



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

João Antonio Vicini

**Estudo de caso: Análise da influência do PSS na tensão e frequência da rede elétrica**

Florianópolis  
2024

João Antonio Vicini

**Estudo de caso: Análise da influência do PSS na tensão e frequência da rede elétrica**

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Daniel Coutinho, Dr.

Supervisor: Lucas Borré Lobo, Eng.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Vicini, João Antonio

Estudo de caso: Análise da influência do PSS na tensão e frequência da rede elétrica / João Antonio Vicini ; orientador, Daniel Ferreira Coutinho, 2024.

56 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. PSS. 3. Tensão Terminal. 4. Frequência. 5. Simulação. I. Coutinho, Daniel Ferreira. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

João Antonio Vicini

**Estudo de caso: Análise da influência do PSS na tensão e frequência da rede elétrica**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 26 de fevereiro de 2024.

Prof. Marcelo de Lellis Costa de Oliveira, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente

**Daniel Ferreira Coutinho**

Data: 01/03/2024 11:32:35-0300

CPF: \*\*\*.169.980-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Daniel Coutinho, Dr.

Orientador

UFSC/CTC/DAS

Documento assinado digitalmente



**LUCAS BORRE LOBO**

Data: 29/02/2024 16:31:11-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Lucas Borré Lobo, Eng.

Supervisor

ONS



Documento assinado digitalmente

**ISAIAS VALENTE DE BESSA**

Data: 29/02/2024 19:11:56-0300

CPF: \*\*\*.309.602-\*\*

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Isaias Valente de Bessa, Me.

Avaliador

UFSC/CTC/DAS

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.

Presidente da Banca

UFSC/CTC/DAS

Este trabalho é dedicado aos meus pais e a mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais. Pela oportunidade dada de estudar fora da minha cidade-natal, pela infindável paciência ao longo dos anos que foi necessária para que eu chegasse até aqui e por todo o suporte nas horas necessárias.

Gostaria de agradecer aos meus colegas e amigos que a faculdade me apresentou, que proporcionaram inúmeros e incontáveis momentos de risada, descontração e felicidade.

Gostaria de agradecer a Reivax Automação e Controle, por me proporcionar a experiência do primeiro estágio e, depois, do primeiro emprego. Aos colegas de trabalho que sempre me ensinaram muito, Rafael Paiva, Kleiton Schmitt, Lucas Souza, Lucas Lobo, Bruno Maciel e Luiz Pflieger e também a toda a equipe do Service que nunca negou conhecimento, nem nos horários mais inusitados.

Por fim, a UFSC, por proporcionar um ambiente que sempre ofereceu muita troca de conhecimento, não apenas acadêmico, mas também da vida.

*Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.*  
*(Leonardo Da Vinci)*

## DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 26 de fevereiro de 2024.

Na condição de representante da Reivax Controle e Automação na qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização *online* no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que João Antonio Vicini, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa n° 126/2019/CUn.

Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.



Documento assinado digitalmente

KLEITON SCHMITT

Data: 16/02/2024 09:23:10-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

---

Kleiton Schmitt  
Reivax Controle e Automação



## RESUMO

Neste projeto, estudou-se um caso na rede elétrica em Matala, Angola. Na ocasião, eram observadas oscilações de frequência na rede, amortecidas mediante a ativação do PSS (Power System Stabilizer), porém, com efeito colateral de variações substanciais na tensão terminal. Foram comparados os ensaios em campo com simulações feitas no software ANATEM para determinar a causa da situação e qual devem ser as diretrizes ao se deparar com um caso como este.

**Palavras-chave:** PSS. Tensão Terminal. Frequência. Simulação.

## **ABSTRACT**

This project studied a problem that occurred when commissioning a power grid in Matala, Angola. At the time, there were frequency oscillations in the grid, attenuated by activating the PSS (Power System Stabilizer), but with the side effect of substantial variations in the terminal voltage. The field tests will be compared with simulations made in the ANATEM software to determine the cause of the situation and what the guidelines should be when faced with a case like this.

**Keywords:** PSS. Terminal Voltage. Frequency. Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética brasileira em 2022 . . . . .	16
Figura 2 – Componentes do SEP . . . . .	17
Figura 3 – Turbina Kaplan . . . . .	18
Figura 4 – Turbina Pelton . . . . .	19
Figura 5 – Turbina Francis . . . . .	20
Figura 6 – Diagrama de Queda x Vazão . . . . .	20
Figura 7 – Método para identificação dos parâmetros da MS . . . . .	24
Figura 8 – Diagrama do Regulador de Velocidade . . . . .	25
Figura 9 – Controle do Regulador de Velocidade . . . . .	25
Figura 10 – Diagrama de blocos equivalente à planta da turbina . . . . .	27
Figura 11 – Diagrama do Regulador de Tensão . . . . .	28
Figura 12 – Curva de Capabilidade . . . . .	29
Figura 13 – Estrutura do PSS2C . . . . .	37
Figura 14 – Diferença na potência ativa mediante ação do PSS . . . . .	38
Figura 15 – Oscilação na frequência. . . . .	39
Figura 16 – Oscilação na tensão. . . . .	40
Figura 17 – Potência Ativa. . . . .	40
Figura 18 – Potência Reativa. . . . .	41
Figura 19 – Sinal de controle gerado pelo PSS. . . . .	41
Figura 20 – Malha de regulação de tensão feita em ANATEM . . . . .	43
Figura 21 – Sistema de 3 barras referentes ao caso estudado . . . . .	44
Figura 22 – Degrau de tensão a vazio: comparação campo e simulação . . . . .	45
Figura 23 – Degrau de tensão em carga: comparação campo e simulação . . . . .	46
Figura 24 – Limitador V/Hz: comparação campo e simulação . . . . .	47
Figura 25 – GEP de 0.1Hz - 3Hz . . . . .	49
Figura 26 – GEP de 0.2Hz - 3Hz . . . . .	50
Figura 27 – GEP de 0.5Hz - 3Hz . . . . .	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do modelo da máquina síncrona . . . . .	22
Tabela 2 – Variáveis algébricas e de estado do modelo da MS . . . . .	23
Tabela 3 – Variáveis da planta da turbina . . . . .	27
Tabela 4 – Variáveis do regulador de tensão . . . . .	28

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

PSS: Power System Stabilizer

SEP: Sistema Elétrico de Potência

MS: Máquina Síncrona

RT: Regulador de Tensão

RV: Regulador de Velocidade

OEL: Over-excitation Limiter

LCC: Limitador de Corrente de Campo

UEL: Under Excitation Limiter

LSE: Limitador de Sub-Excitação

SCL: Stator Current Limiter

LCE: Limitador de Corrente Estatística

SE: Sistema de Excitação

ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
2.2	UNIDADE GERADORA	17
<b>2.2.1</b>	<b>Turbina</b>	<b>18</b>
2.2.1.1	Turbina Kaplan	18
2.2.1.2	Turbina Pelton	19
2.2.1.3	Turbina Francis	19
2.2.1.4	Faixa de operação das turbinas	20
<b>2.2.2</b>	<b>Gerador</b>	<b>21</b>
2.2.2.1	Método de Rejeição de Carga Tradicional	24
2.3	CONTROLE DE VELOCIDADE E POTÊNCIA	24
<b>2.3.1</b>	<b>Modelo Dinâmico da Turbina</b>	<b>26</b>
2.4	CONTROLE DE TENSÃO	27
<b>2.4.1</b>	<b>Curva de Capabilidade</b>	<b>27</b>
2.4.1.1	Comissionamento dos limitadores	30
<b>2.4.2</b>	<b>PSS (<i>Power System Stabilizer</i>)</b>	<b>35</b>
2.4.2.1	PSS2	36
2.4.2.2	Ajuste do PSS	36
2.5	COMENTÁRIO FINAIS	38
<b>3</b>	<b>ANÁLISE</b>	<b>39</b>
3.1	ESTUDO DO CASO	39
3.2	SIMULAÇÃO DO CASO	41
3.3	ANÁLISE DO CASO	48
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>54</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Este documento realiza o estudo de caso em uma unidade de geração de energia que consistiu no comissionamento de uma hidrelétrica em Matala, Angola. Em particular, neste trabalho foram verificadas 2 situações: a oscilação da tensão terminal do gerador e a oscilação da frequência da rede. O que diferencia uma situação de outra é o funcionamento do PSS (*Power System Stabilizer*). Quando o PSS está desativado, observam-se oscilações de frequência na rede e, mediante a ativação do PSS, é possível adicionar amortecimento em detrimento de oscilações na tensão terminal. Esse foi um caso atípico para reguladores de velocidade e tensão, e motivou a Reivax estudá-lo para saber como lidar nessa situação caso isso ocorra novamente. A Reivax é uma empresa de tecnologia que atua no mercado de energia há mais de 35 anos, provendo as melhores soluções para o controle da geração de energia. A sede onde foi fundada se localiza em Florianópolis, porém possui além dessa, outras duas unidades, uma localizada em Montreal no Canadá e outra em Baden na Suíça. Sua missão, visão e proposição de valor são citados em seu website (REIVAX, s.d.), e serão mostrados a seguir:

- **Missão:** Contribuir, por meio de soluções sustentáveis de controle e automação, para que a sociedade usufrua os benefícios propiciados pela energia elétrica.
- **Visão:** Ser referência mundial em soluções sustentáveis de controle e automação de energia elétrica.
- **Proposição de valor:** Contribuímos para que empresas e investidores do setor elétrico maximizem o retorno sobre o investimento, por meio de soluções inovadoras e sustentáveis de controle e automação.

## 1.1 OBJETIVOS

Este projeto de fim de curso visou estudar o fenômeno visto em campo durante o comissionamento de uma unidade geradora considerando simulações similares aos registros realizados, que possam revelar a causa da oscilação entre a frequência e a tensão terminal mediante a ativação do PSS (*Power System Stabilizer*) e quais devem ser as diretrizes ao se deparar com um caso como esse. O objetivo pode ser dividido nas seguintes metas:

- Explicar o funcionamento de uma unidade geradora e o sistema de potência que envolve a mesma, além do controle de tensão e velocidade de um sistema turbina - gerador.
- Realizar simulações condizentes com o comportamento visto através dos registros realizados em campo e definir o que ocasionou a ocorrência.

- Criar uma conduta para futuras ocorrências do mesmo caso.

## 1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este relatório é dividido em 4 capítulos, onde o capítulo atual foca em apresentar uma introdução ao trabalho realizado. Um sumário do objetivo dos próximos capítulos é mostrado a seguir:

- **Capítulo 2** - Conceitos Fundamentais: Apresenta os principais conceitos acerca de sistemas de potência, geradores, turbinas, controle de velocidade e tensão.
- **Capítulo 3** - Análise: Apresenta uma detalhada explicação do fenômeno ocorrido e expõe as simulações feitas para replicar os ensaios feitos em campo.
- **Capítulo 4** - Conclusão: Conclui o trabalho realizado, lembrando o que foi feito, e avaliando se o estudo feito a partir do caso foi satisfatório ou não, orientando sobre possíveis passos futuros.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta de forma resumida alguns conceitos básicos para o correto entendimento do trabalho desenvolvido no caso estudado.

### 2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Hoje, a energia elétrica se tornou um bem indispensável na vida da maioria dos brasileiros. Não há dúvida de que no último século esta se tornou um dos elementos fundamentais para o bom funcionamento da sociedade moderna. Dessa forma, sua presença pode ser percebida nas atividades mais básicas dos cidadãos, como alimentação, higiene e, cada vez mais, transporte. Além disso, além de proporcionar diretamente o bem-estar aos indivíduos, a energia elétrica é claramente um dos alicerces do desenvolvimento econômico nacional, “alimentando” as indústrias e serviços de forma ideal, ininterrupta e de alta qualidade. Desse modo, torna-se evidente a importância do produto como chave para a qualidade de vida dos cidadãos (BRASCAN, s.d.).

Ao focar nesses pontos, percebe-se a relevância de manter a qualidade da geração de energia. Desse jeito, ao reconhecer que a composição da matriz energética de geração de energia é composta principalmente por usinas hidrelétricas e termelétricas (EPE, s.d.), percebe-se o destaque dos geradores síncronos, já que a maioria desses tipos de usinas utiliza tais máquinas para gerar energia elétrica (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2012). Para ilustrar tal argumento, na Figura 1, apresenta-se a composição da matriz energética Brasileira no ano de 2022.

Figura 1 – Matriz energética brasileira em 2022



Fonte: (EPE, s.d.)

Portanto, considerando a importância dos geradores síncronos, nota-se que a qualidade e a estabilidade da energia transmitida e distribuída pela rede de transmissão e distribuição se traduz em assegurar a estabilidade em cada gerador síncrono. Neste contexto, para manter um bom e estável funcionamento da máquina síncrona, surgiram os reguladores automáticos de tensão.

Para explicar o regulador de tensão, a geração de energia e sua distribuição, inicialmente é necessário apresentar os elementos do SEP (Sistema Elétrico de Potência). Tais elementos são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Componentes do SEP



Fonte: (ABRADEE, s.d.)

Numa visão geral, pode-se dizer que a geração é a responsável por transformar a energia primária em energia elétrica, onde, nesse caso da foto, a conversão é feita através de uma turbina e um gerador. Feito isso, a transmissão leva a energia gerada para as subestações, que recebem as cargas de diversas usinas (não necessariamente com a mesma forma de geração), que por sua vez distribuem para o consumidor. Primeiramente, serão explicados os elementos necessários para a geração de energia hidrelétrica e, posteriormente, serão definidos alguns conceitos acerca da transmissão de energia que serão fundamentais para a compreensão do caso estudado neste trabalho.

## 2.2 UNIDADE GERADORA

A unidade geradora possui como cerne a turbina e o gerador síncrono, comumente chamado de máquina síncrona (MS). A seguir, será explicado cada um separadamente afim de mostrar as particularidades de cada um.

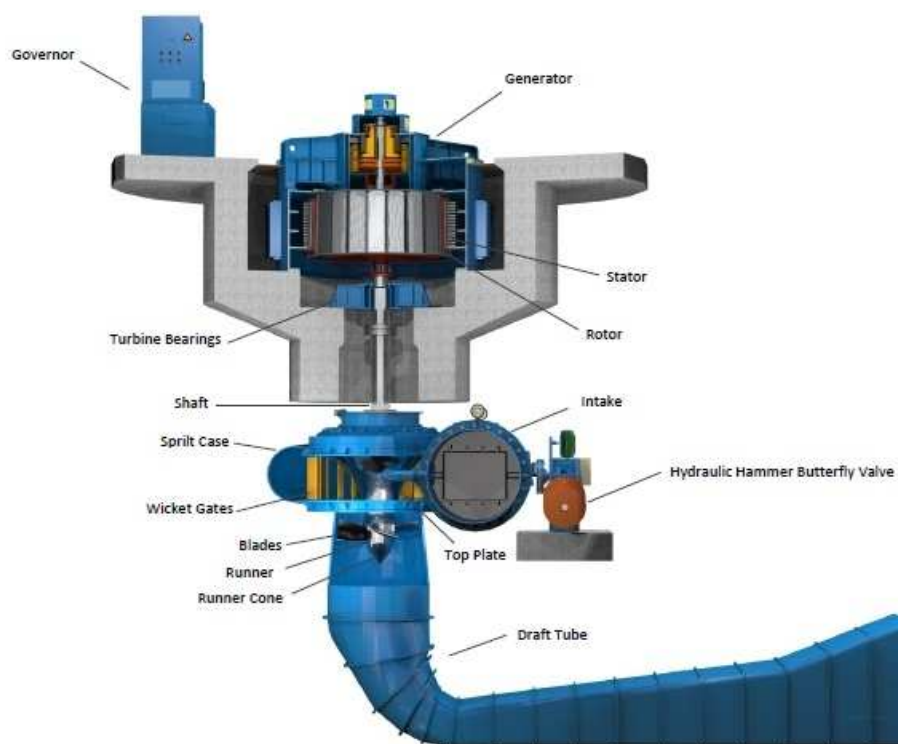
## 2.2.1 Turbina

A turbina é a responsável por receber a água vinda do conduto forçado, que traz a mesma do reservatório. Dependendo do nível da queda e da vazão especificada pelo projeto, pode-se escolher a turbina mais adequada para a usina. Dessa maneira, cada turbina tem um atuador, que regula a quantidade de água passada através de uma válvula *bypass* e, conseqüentemente, ajustando o número de rotações por minuto (*rpm*). Essa é a função do regulador de velocidade, que será explicado posteriormente. Os três principais tipos de turbina serão mostrados a seguir para explicar em que caso cada uma é usada e qual a diferença entre elas.

### 2.2.1.1 Turbina Kaplan

A turbina Kaplan possui dois atuadores para regular a velocidade e a potência: o distribuidor e as pás. Esta turbina fica posicionada na horizontal, e é essencialmente utilizada para usinas com grandes vazões de água porém com níveis de queda baixos. De acordo com a Figura 3 é possível notar o que o fluxo de água liberado pelo distribuidor faz com que as hélices girem em direção axial em relação ao eixo de rotação do impulsor. As pás por sua vez, podem ajustar seu ângulo de abertura, para atingir uma melhor eficiência e controlar a velocidade.

Figura 3 – Turbina Kaplan

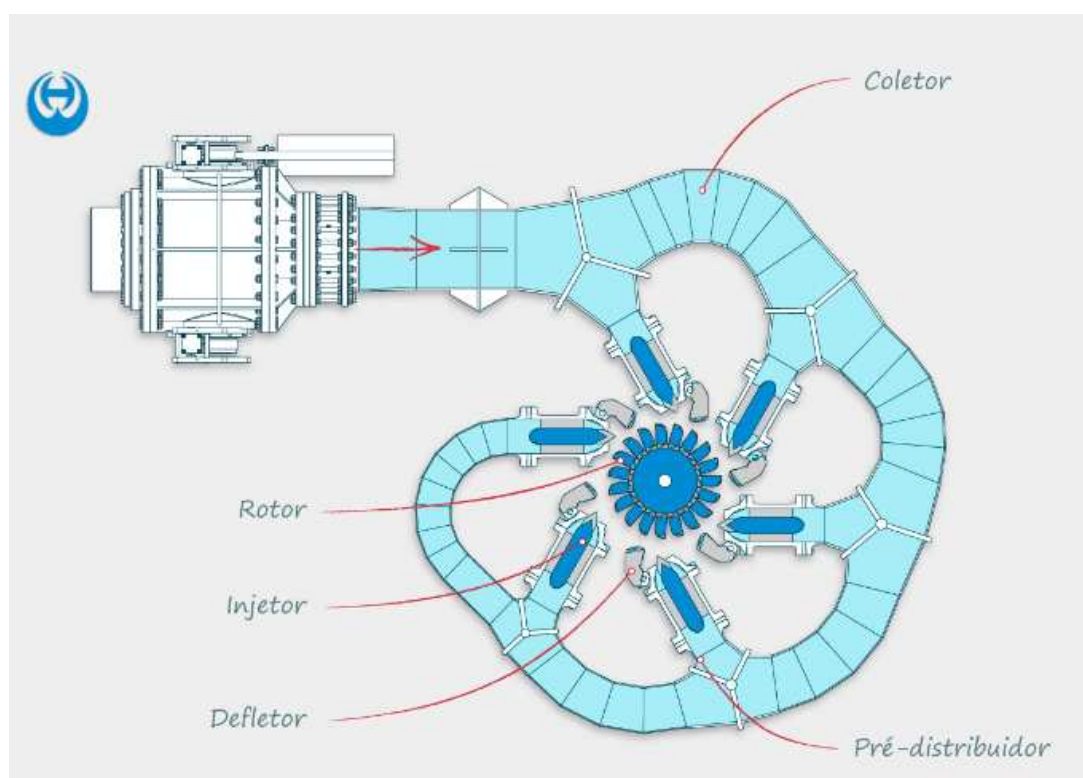


Fonte: (JIANHUA, s.d.)

### 2.2.1.2 Turbina Pelton

A turbina Pelton possui dois atuadores: a agulha e o defletor. É utilizada em casos opostos ao da Kaplan, ou seja, usinas com alto nível de queda porém com vazões mais baixas. Como a alta queda resulta em uma coluna de água elevada as taxas de posicionamento das agulhas são lentas para evitar sobrepressão no conduto, dessa forma, o defletor é um atuador com a função de desviar o jato de água rapidamente quando necessário, como por exemplo, em casos de sobrevelocidade da turbina. Ao analisar a Figura 4 é visível que é possível ter mais de uma agulha. Esse fator pode variar devido a inércia da turbina e da rotação requerida pela mesma.

Figura 4 – Turbina Pelton

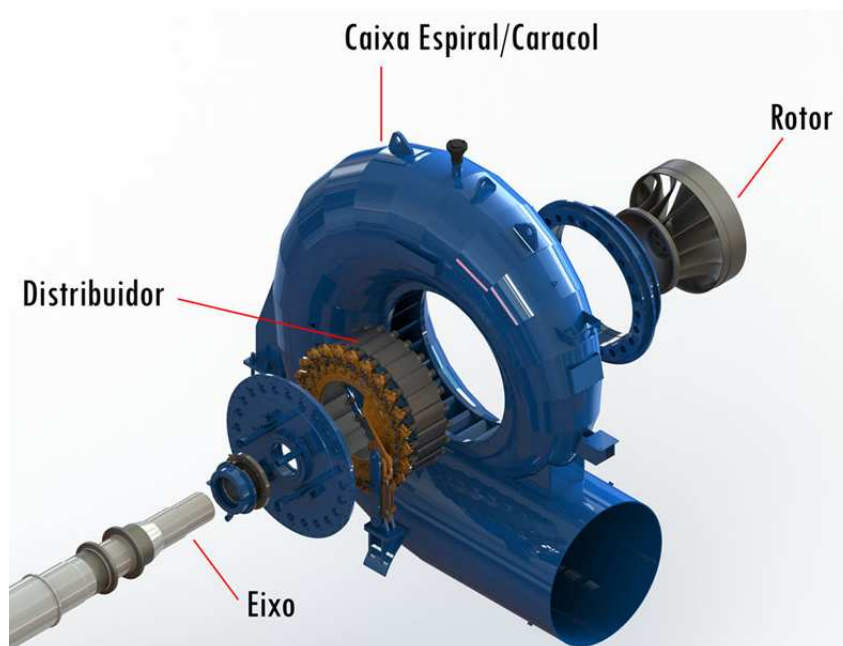


Fonte: (HYDROWHEEL, s.d.)

### 2.2.1.3 Turbina Francis

A turbina Francis possui apenas o distribuidor como elemento de atuação. Este tipo de turbina é o mais utilizado atualmente, sendo 60% da capacidade hidroelétrica global gerada através desse tipo de turbina (UNICAMP, s.d.). Isso se dá devido ao fato dela ser eficiente em diversas faixas de operação, ou seja, pode ser utilizada para quedas e vazões abrangentes. Ao analisar a Figura 5 nota-se apenas um atuador que regula o fluxo de água advindo do conduto.

Figura 5 – Turbina Francis

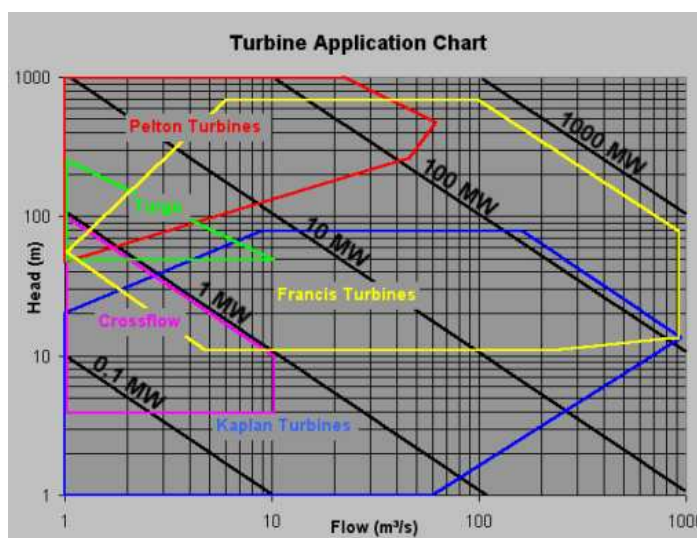


Fonte: (BOCK, s.d.)

#### 2.2.1.4 Faixa de operação das turbinas

Dessa maneira, temos 3 tipos de turbina com diferentes aplicações. O gráfico apresentado a seguir mostra a faixa de operação em que cada uma opera, portanto, essa é uma escolha feita de acordo com o projeto, de acordo com a queda e vazão fornecidas.

Figura 6 – Diagrama de Queda x Vazão



Fonte: (UNICAMP, s.d.)

### 2.2.2 Gerador

A máquina síncrona é basicamente uma máquina de corrente alternada onde a frequência da tensão induzida e a velocidade possuem uma relação constante. Dessa maneira, ela recebe a tensão de excitação da excitatriz e converte na tensão terminal, que é o que se deseja controlar, além da corrente terminal, potência ativa e reativa. Dessa maneira, são necessários definir os parâmetros da máquina, que são as constantes de tempo e reatâncias síncronas, transitórias e subtransitórias.

O modelo matemático da MS utilizado para a identificação dos seus respectivos parâmetros é o de 6ª Ordem de Sauer Pai (SAUER; PAI, 2008). Esse modelo é representado pelo conjunto de equações a seguir.

Equações magnéticas do estator:

$$E'_q = \frac{1}{T'_{do}} [V_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d) * [I_d - \gamma_{d2} * \psi''_d - (1 - \gamma_{d1}) * I_d + \gamma_{d2} * E'_q] - Sat_d] \quad (1)$$

$$E'_d = \frac{1}{T'_{qo}} [-E'_d - (x_q - x'_q) * [I_q - \gamma_{q2} * \psi''_q - (1 - \gamma_{q1}) * I_q + \gamma_{q2} * E'_d] - Sat_q] \quad (2)$$

$$\psi''_d = \frac{1}{T''_{do}} [E'_q - \psi''_d - (x'_d - x_l) * I_d] \quad (3)$$

$$\psi''_q = \frac{1}{T''_{qo}} [E'_d - \psi''_q - (x'_q - x_l) * I_q] \quad (4)$$

$$\psi_d = -x''_d * I_d + \gamma_{d1} * E'_q + (1 - \gamma_{d1}) * \psi''_d \quad (5)$$

$$\psi_q = -x''_q * I_q - \gamma_{q1} * E'_d + (1 - \gamma_{q1}) * \psi''_q \quad (6)$$

Onde:

$$\gamma_{d1} = \frac{x''_d - x_l}{x'_d - x_l} \quad (7)$$

$$\gamma_{q1} = \frac{x''_q - x_l}{x'_q - x_l} \quad (8)$$

$$\gamma_{d2} = \frac{1 - \gamma_{d1}}{x'_d - x_l} \quad (9)$$

$$\gamma_{q2} = \frac{1 - \gamma_{q1}}{x'_q - x_l} \quad (10)$$

Equações do estator:

$$V_d = -\omega * \psi_q - r_s * I_d \quad (11)$$

$$V_q = \omega * \psi_d - r_s * I_q \quad (12)$$

Equações do rotor:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} [P_m - P_e - D * (\omega - \omega_s)] \quad (13)$$

$$\delta = \Omega_s * (\omega - \omega_s) \quad (14)$$

Os parâmetros estão dispostos na Tabela 1, enquanto as variáveis algébricas e de estado estão na Tabela 2:

Tabela 1 – Parâmetros do modelo da máquina síncrona

Variável	Descrição	Unidade
$X_d$	Reatância de eixo direto	pu
$X_q$	Reatância de eixo em quadratura	pu
$X'_d$	Reatância transitória de eixo direto	pu
$X''_d$	Reatância sub-transitória de eixo direto	pu
$X''_q$	Reatância sub-transitória de eixo em quadratura	pu
$X_l$	Reatância de dispersão	pu
$r_s$	Resistência de armadura	pu
$T'_{do}$	Constante de tempo transitória de eixo direto	s
$T''_{do}$	Constante de tempo subtransitória de eixo direto	s
$T'_{qo}$	Constante de tempo transitória de eixo em quadratura	s
$T''_{qo}$	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura	s
$D$	Coeficiente de amortecimento	pu/pu
$2H(M)$	Constante de inércia	s

Para a representação da MS de pólos salientes, a equação diferencial da variável  $E'_d$  é nula devido a equivalência de  $X_q = X'_q$  dada pela saliência polar. Com isso, o modelo equivalente é um de 5ª Ordem. Outro detalhe importante é a representação da saturação. Para o modelo da MS de pólos salientes, a saturação é concentrada em  $E'_q$ , enquanto que na de pólos lisos utiliza-se o  $\psi''$ . Sendo assim, tem-se que:

Tabela 2 – Variáveis algébricas e de estado do modelo da MS

Variável	Descrição	Unidade
$\psi_d$	Fluxo de eixo direto	pu
$\psi_q$	Fluxo de eixo em quadratura	pu
$\delta$	Ângulo do rotor	pu
$\omega$	Frequência angular do rotor	pu
$E'_d$	Tensão transitória de eixo direto	pu
$E'_q$	Tensão transitória de eixo em quadratura	pu
$\psi''_d$	Fluxo subtransitório de eixo direto	pu
$\psi''_q$	Fluxo subtransitório de eixo em quadratura	pu
$I_d$	Corrente de eixo direto	pu
$I_q$	Corrente de eixo em quadratura	pu
$V_{fd}$	Tensão de excitação na MS	pu
$V_d$	Tensão de eixo direto	pu
$V_q$	Tensão de eixo em quadratura	pu

$$Sat_d = Tabela(E'_q)$$

$$E'_d = 0$$

A saturação utilizada no modelo é representada pela tabela de pontos obtida da curva de saturação levantada em campo.

Os procedimentos para a identificação dos parâmetros estão descritos na norma (IEEE. . . , 2010), sendo que o método de rejeição de carga, preconizado por deMello nas décadas e 70 e 80, é o mais simples e prático. É um método bastante eficaz, pois a rejeição de carga permite obter os parâmetros de eixo direto e em quadratura, e é de fácil execução.

A Reivax tem empregado esse método desde a década de 80, e aprimorando esse método através de novas técnicas computacionais que permitem o cruzamento dos dados obtidos na rejeição de carga com ensaios não convencionais como, por exemplo, ensaio de excitação e ensaios dinâmicos em carga e em vazio. Ressalta-se que para a correta aplicação desse método é necessária uma instrumentação com amostragem mínima de 1kHz para a correta identificação do período subtransitório e transitório da máquina síncrona.

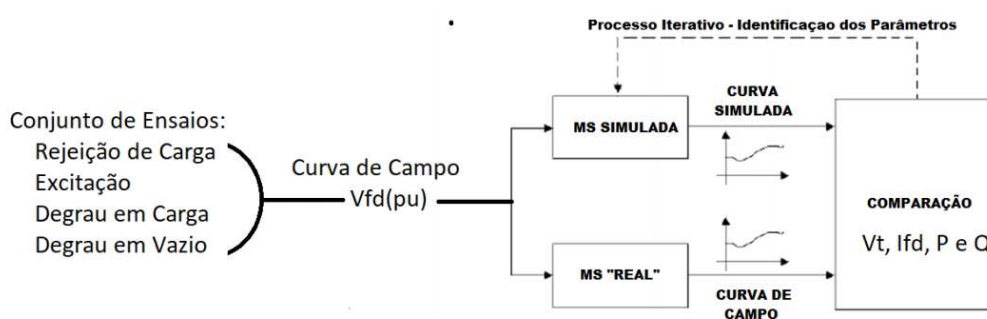


A seguir será dado um exemplo de aplicação do método que pode ser padronizado. O método iterativo de rejeição de carga.

### 2.2.2.1 Método de Rejeição de Carga Tradicional

Através de simulações, na qual a tensão de excitação é um dado de entrada do modelo, pode-se aplicar métodos numéricos (até empíricos) que permitem a obtenção dos parâmetros da MS. Além disso, utilizam-se outros ensaios para validação dos parâmetros, por exemplo, o processo de excitação. A Figura 7 ilustra o processo usado pela Reivax na identificação dos parâmetros da máquina síncrona.

Figura 7 – Método para identificação dos parâmetros da MS



Fonte: (material\_rt\_reivax)

Ou seja, basta inserir a variável medida referente a tensão de excitação adquirida em campo no modelo de simulação para a comparação dos resultados. Por fim, são apresentados um conjunto de ensaios dinâmicos que foram utilizados na identificação dos parâmetros da MS.

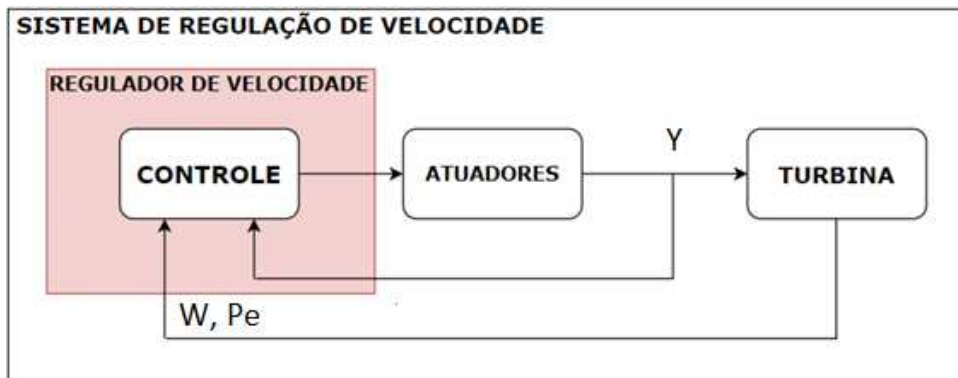
## 2.3 CONTROLE DE VELOCIDADE E POTÊNCIA

O regulador de velocidade e potência, também chamado de RV, é o responsável por realizar a regulação primária do sistema elétrico, ou seja, responder automaticamente às variações ocorridas na frequência de maneira a tornar nulo o erro de seguimento da frequência (garantindo desta forma a estabilidade da rotação da máquina). A Figura 8 exemplifica na forma de diagrama de blocos a realimentação proveniente dos sensores na turbina para o sistema controle-atuadores, sendo as variáveis nesta figura representando:

- **W**: frequência;
- **Pe**: potência ativa elétrica; e

- **Y**: abertura do atuador mecânico.

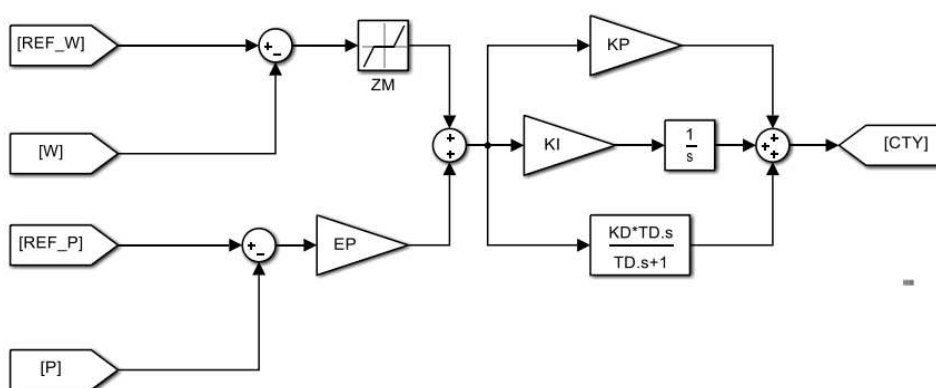
Figura 8 – Diagrama do Regulador de Velocidade



Fonte: (JUNIOR, s.d.)

Além disso, o controlador de velocidade e potência tem como função (quando a máquina está em carga, i.e.,  $Pe \neq 0$ ) atingir o patamar de carga desejado através da abertura e fechamento dos atuadores da turbina. Para controlar a potência, o RV recebe os valores tanto da potência quanto da frequência comparando-os com as referências de velocidade e potência, para depois passar por um controlador do tipo PID de modo a zerar o erro da referência, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Controle do Regulador de Velocidade



Fonte: (JUNIOR, s.d.)

Nota-se, no diagrama da Figura 9, que existe um parâmetro chamado *ZM* representando uma zona morta no ajuste de frequência. A zona morta serve para evitar que os atuadores se movam para pequenos intervalos no erro da frequência causando um desgaste menor dos atuadores. Também, nesta figura, o parâmetro *EP* representa

o chamado estatismo permanente do gerador. O estatismo garante que exista um incremento ou decremento na potência através da variação da frequência da máquina.

O estatismo permanente torna-se necessário para equilibrar a potência gerada em um sistema elétrico real composto por várias unidades geradoras (UG) interconectadas garantindo, desta forma, a operação satisfatória e estável das UGs (PUCRIO, 2021). As equações referentes ao sistema são mostradas a seguir:

$$\text{Erro conjugado} = \Delta P * EP + \Delta w \quad (15)$$

sendo:

$$\Delta P = \text{Ref}_P - P \quad (16)$$

$$\Delta W = \text{Ref}_w - w \quad (17)$$

O integrador presente no PID garante para mudanças do tipo degrau na carga que o erro seja nulo em regime permanente, portanto:

$$0 = \Delta P * EP + \Delta W \Rightarrow$$

Adicionando a presença da zona morta na equação da malha de controle anterior, pode-se isolar a variação de potência:

$$\Delta P = \frac{\Delta W - ZM}{EP} \quad (18)$$

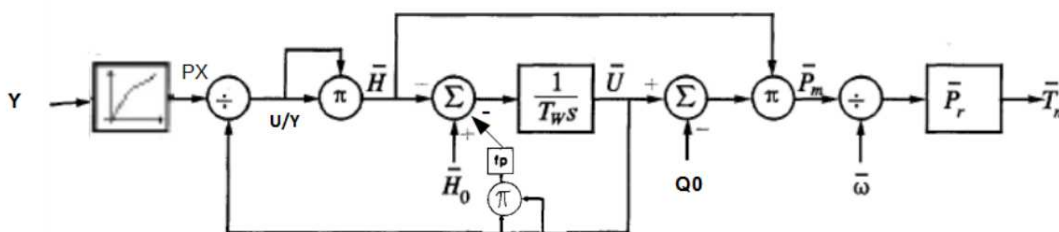
Dessa maneira, a relação entre a variação de potência no sistema elétrico interligado e a variação de frequência do gerador é ajustada pelo estatismo.

### 2.3.1 Modelo Dinâmico da Turbina

A seguir, apresenta-se o modelo dinâmico considerado para a turbina e conduto forçado. O modelo recebe como entrada a posição dos atuadores e tem como saída a potência mecânica. Para realizar a conversão entre a entrada e a saída, é necessário fazer um ensaio em campo que relaciona a abertura do distribuidor, com a quantidade de potência gerada na saída. Uma vez feita essa conversão, torna-se necessário modelar matematicamente a dinâmica do conduto e da turbina, que é mostrado através do diagrama de blocos da Figura 10.

Os parâmetros presentes na Figura 10 são detalhados na Tabela 3 apresentada a seguir.

Figura 10 – Diagrama de blocos equivalente à planta da turbina



Fonte: (KUNDUR; BALU, 1994)

Tabela 3 – Variáveis da planta da turbina

Variável	Descrição	Unidade
Tm	Torque/Potência Mecânica	N.m
Q0	Perdas relacionadas ao fluxo nominal	m <sup>3</sup> /s
H0	queda nominal	m
fp	Fator de perda devido a fricção no conduto	-
Tw	Tempo de atraso da água	-
PX	Curva de abertura e potência	-
U	Vazão	m <sup>3</sup> /s
H	Pressão	Pa
Pr	Correção de base (Potência nominal x Potência da turbina)	-

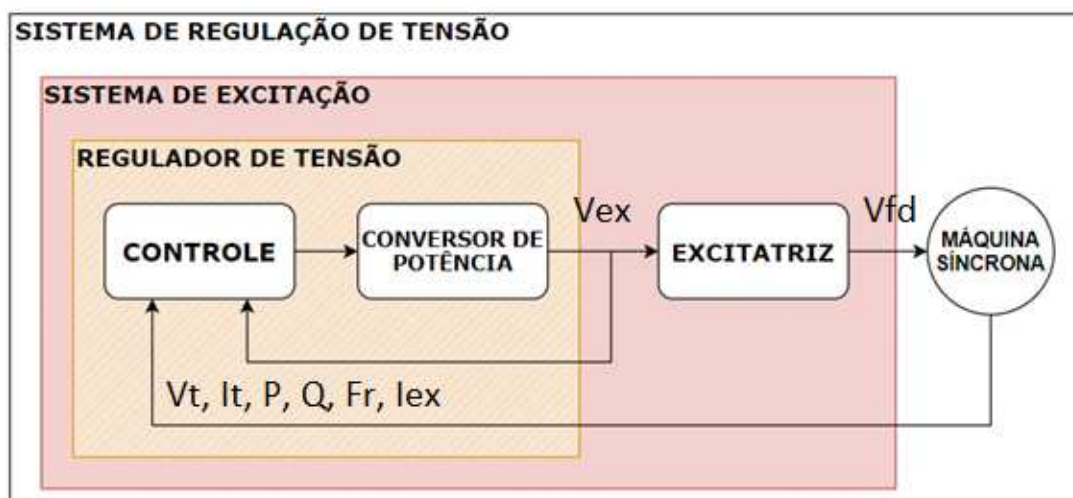
## 2.4 CONTROLE DE TENSÃO

O regulador de tensão (RT) é o responsável por realizar o controle da tensão terminal do gerador, fornecendo a tensão de campo, vinda do transformador de excitação, para o campo do gerador, de modo a permitir que a máquina síncrona possa gerar a tensão em seus terminais. O controle da tensão permite manter de forma estável a tensão terminal do gerador. A seguir, apresenta-se o diagrama de blocos na Figura 11 que representa de forma simplificada o funcionamento do RT. As variáveis presentes neste diagrama são detalhadas na Tabela 4.

### 2.4.1 Curva de Capabilidade

A curva de capacidade é uma ferramenta que mostra sob quais condições de carga de potência ativa e reativa uma máquina pode operar com segurança e eficiência. Portanto, definir limites de operação para que o gerador não ultrapasse

Figura 11 – Diagrama do Regulador de Tensão



Fonte: (JUNIOR, s.d.)

Tabela 4 – Variáveis do regulador de tensão

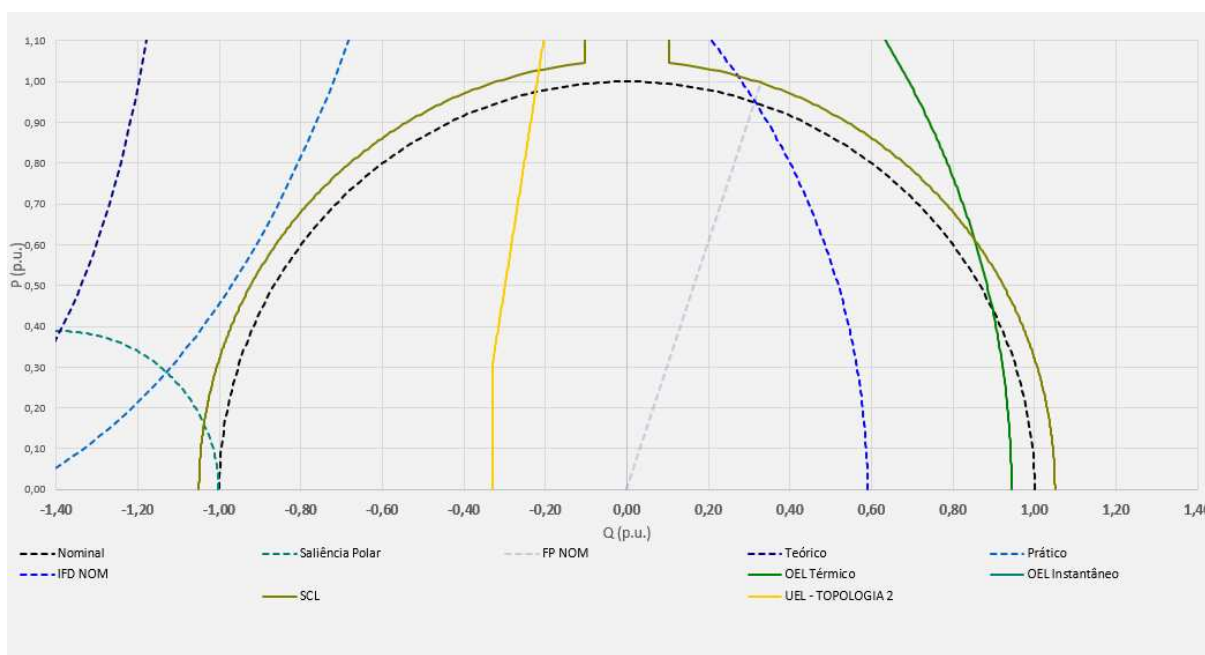
Variável	Descrição	Unidade
$V_t$	Tensão terminal	kV
$I_t$	Corrente terminal	A
$P$	Potência Ativa	W
$Q$	Potência Reativa	VA
$F_r$	Frequência	Hz
$I_{ex}$	Corrente de excitação	A
$V_{ex}$	Tensão de excitação	V
$V_{fd}$	Tensão de campo	V

seus limites térmicos devido aos efeitos da corrente de campo (HUNT, 1967) ajuda a proteger o RT, a excitatriz e a máquina síncrona. Dentre esses limites temos: tanto a corrente de armadura quanto a corrente de campo podem causar superaquecimento dos respectivos enrolamentos, portanto devem ser limitados a determinados valores, além disso, o ângulo de potência não deve ultrapassar um determinado limite máximo para manter o gerador numa região estável (BOLDEA, 2016). Ambos os limites estão relacionados ao valor da corrente de excitação e ao valor da tensão terminal do gerador. Há também limitadores referentes à troca de potência reativa e ativa entre o gerador e o sistema. Tais limitadores atuam para que o gerador continue seu funcionamento em cenários de subexcitação e de sobreexcitação, garantindo assim a sua efetiva e segura operação. Na Figura 12 é mostrada uma curva típica de capacidade com a curva de

cada limitador, além de uma breve explicação sobre os principais.

- **Limitador da relação Volts/Hertz (V/Hz):** Esse limitador evita que se atinja determinados níveis de excitação com a máquina operando em níveis menores de frequência com o intuito de proteger os geradores contra sobrefluxo magnético.
- **Limitador de corrente de campo (OEL/LCC):** Define o valor máximo da corrente de campo da MS. É calculado através da corrente de campo nominal da máquina e possui dois valores: pico e térmico. Caso a corrente passe pelo limite de pico, seu valor é corrigido instantaneamente, enquanto o limite térmico é ativado após um certo tempo afim de proteger o enrolamento de campo.
- **Limitador de subexcitação (UEL/LSE):** Tem a função de limitar a quantidade de potência reativa absorvida pela máquina. Dessa maneira, protege contra a operação com excitação insuficiente, impedindo a perda de estabilidade do gerador.
- **Limitador de corrente estatórica (SCL/LCE):** Verifica o valor da corrente terminal e compara com o valor máximo permitido pelo enrolamento estatórico. Limita a excitação de forma a assegurar que não ocorrerá sobre-corrente no estator.

Figura 12 – Curva de Capabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 2.4.1.1 Comissionamento dos limitadores

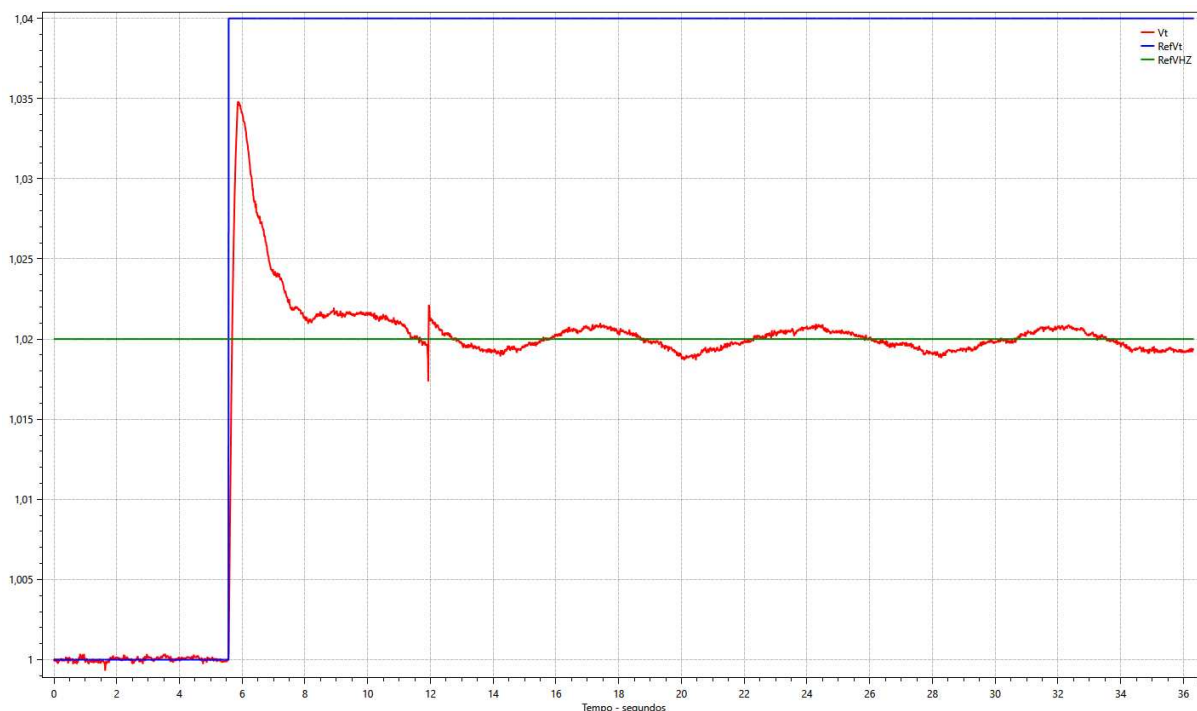
Para uma melhor visualização do funcionamento dos limitadores, será mostrado um ensaio acerca dos principais limitadores, que foram explicados acima, apenas com as variáveis relevantes para cada limitador. A lista de variáveis está disposta abaixo:

- $V_t$ : Tensão terminal;
- $RefV_t$ : Referência de tensão terminal;
- $I_f$ : Corrente de campo;
- $I_t$ : Corrente estatórica;
- $Q$ : Potência reativa;
- $RefV_{HZ}$ : Referência do limitador V/Hz;
- $RefOEL$ : Referência do limitador OEL;
- $RefSCL$ : Referência do limitador SCL;
- $RefUEL$ : Referência do limitador UEL;

Nos gráficos, é possível ver a legenda no canto superior direito.

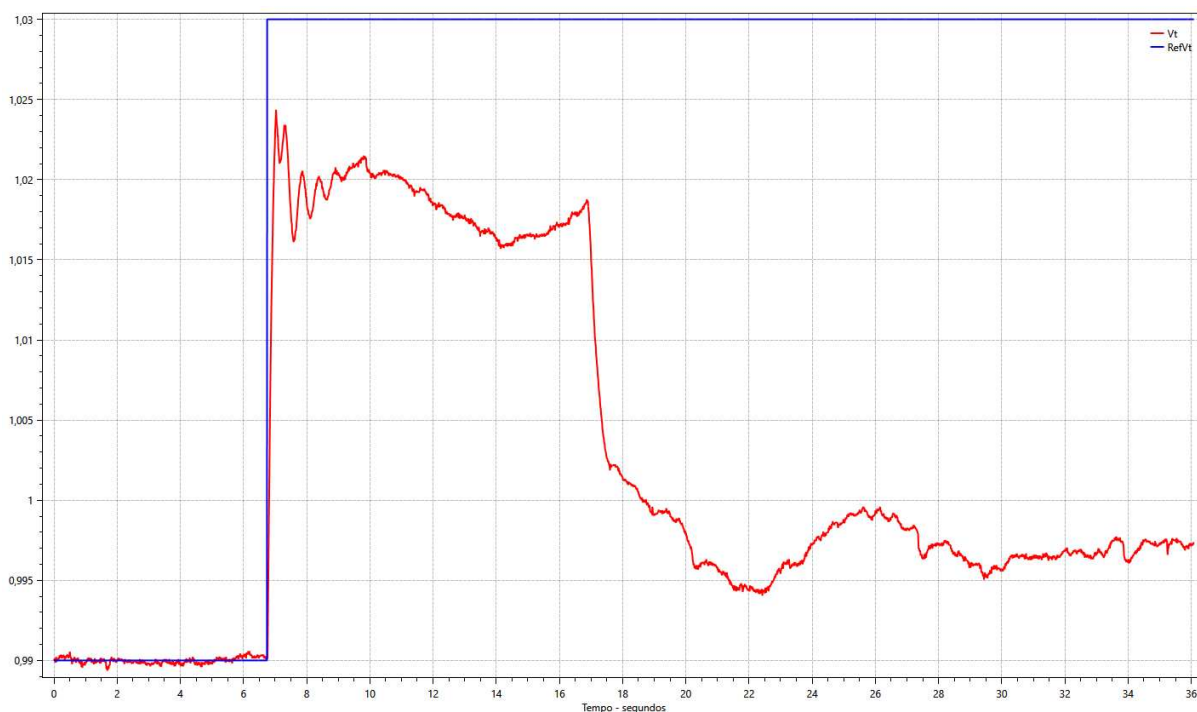
- **Limitador V/Hz:**

Percebe-se que é dado um degrau de tensão de 4%, porém o limitador tem seu *setpoint* em  $1.02pu$ , não permitindo que a tensão terminal ultrapasse até o valor do degrau.



Fonte: Elaborado pelo autor

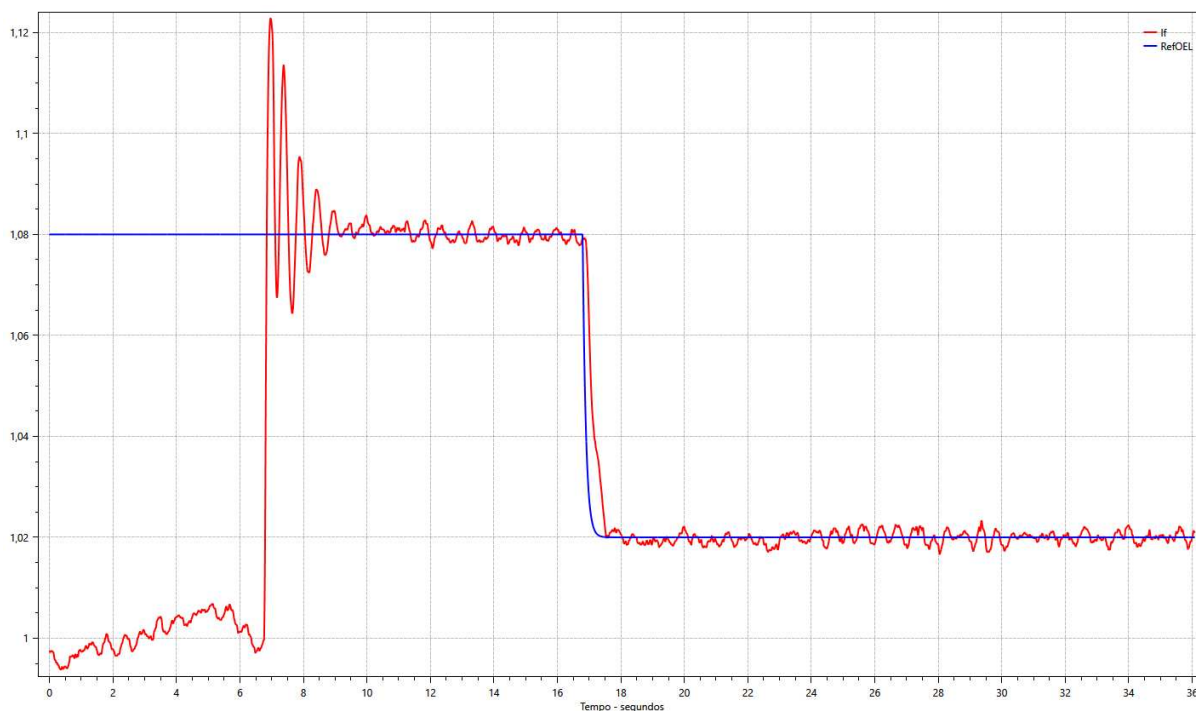
• **Limitador OEL:**



Fonte: Elaborado pelo autor

No caso do limitador OEL, foi dado um degrau de 3%, porém a tensão não atinge esse limite pois a corrente de campo já atingiu seu limite instantâneo ( $1.08\mu$ ).



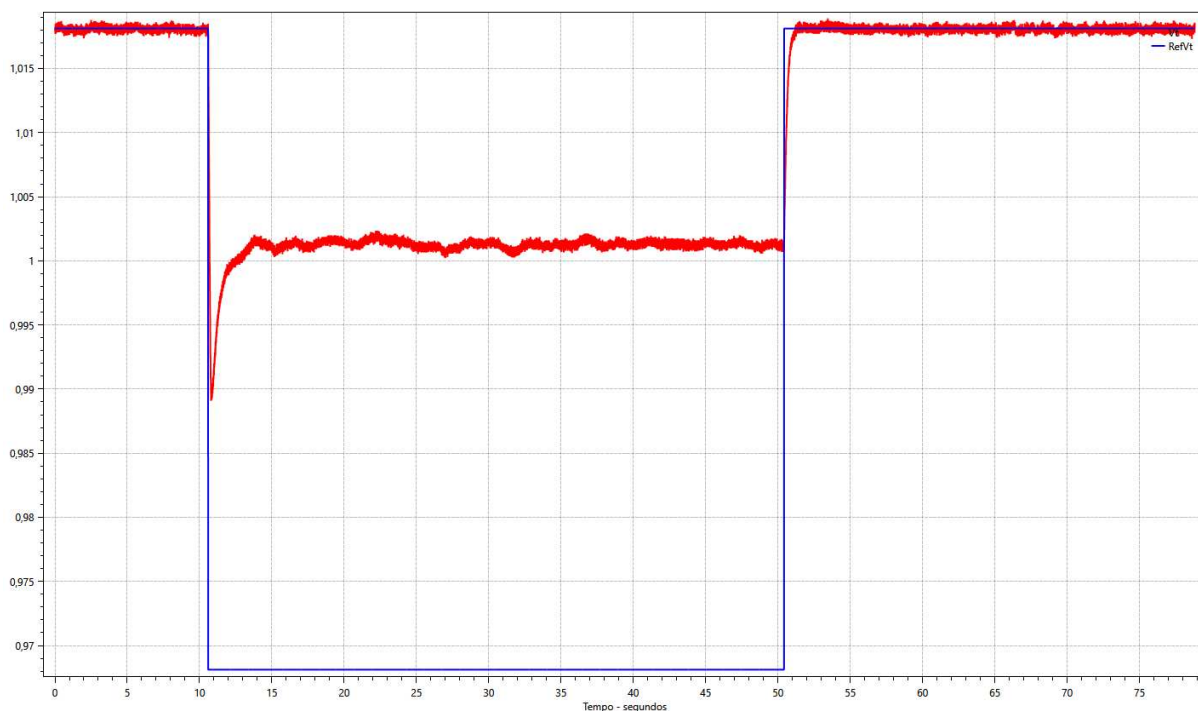


Fonte: Elaborado pelo autor

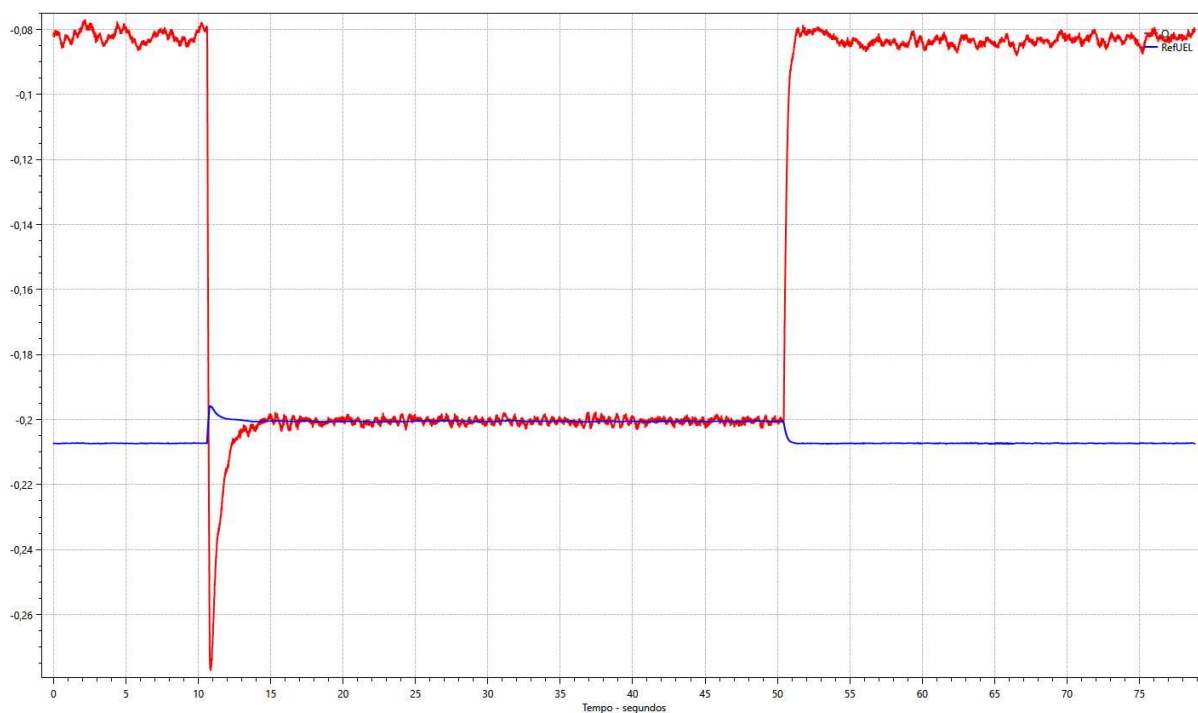
Logo em seguida, após a temporização do limite térmico, a corrente de campo diminui até  $1.02pu$  e, por consequência, a tensão terminal sofre uma diminuição também.

- **Limitador UEL:**

No caso do UEL, vemos um degrau de tensão negativo que também não é alcançado devido ao limite da potência reativa frear o degrau.



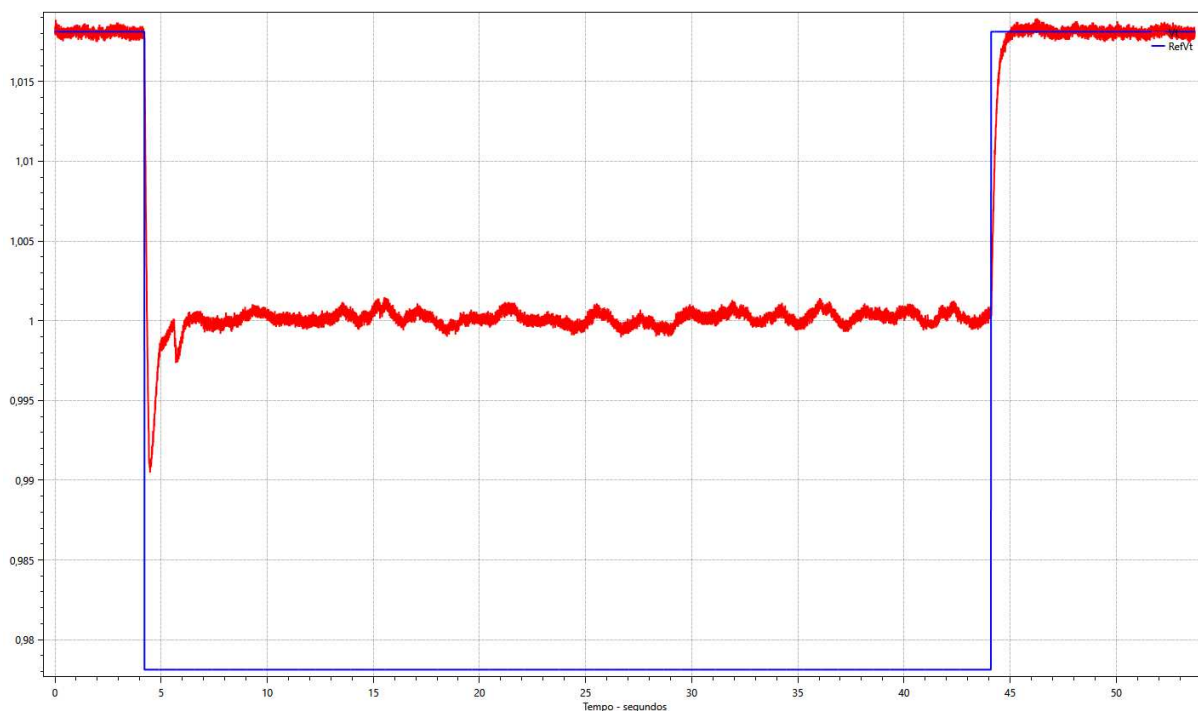
Fonte: Elaborado pelo autor



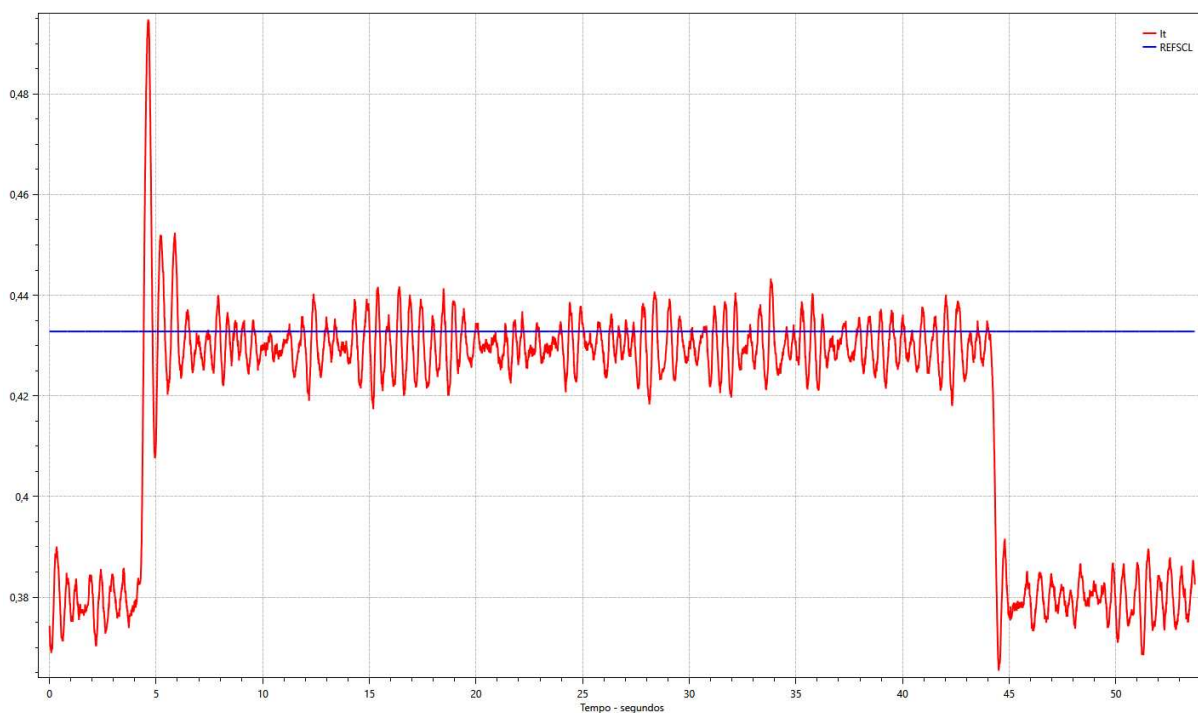
Fonte: Elaborado pelo autor

- **Limitador SCL:**

No último limitador, o SCL, é possível perceber que a corrente estática está limitada na faixa de  $0.43pu$ , não permitindo que a tensão terminal diminua 3%.



Fonte: Elaborado pelo autor



Fonte: Elaborado pelo autor

Como é possível observar, em todos os ensaios, o valor de referência da tensão terminal não é atingido, devido ao limitador em questão não permitir que a variável limitada ultrapasse o patamar estabelecido.

### 2.4.2 PSS (*Power System Stabilizer*)

Os sistemas de energia elétrica estão se tornando cada vez mais complexos devido ao aumento: das interconexões e da capacidade de geração a partir da inclusão de novas fontes de geração devido a crescente demanda (CASTRO *et al.*, 2012). Desse modo, as condições adversas aumentam no SEP, principalmente devido a transitórios gerados por alterações de carga, manipulações ou falhas. Por conseguinte, ocorrem oscilações eletromecânicas na MS, que muitas vezes não conseguem ser suprimidas apenas pelo RT, independentemente do ajuste realizados em seus parâmetros. Nota-se a gravidade destas oscilações, dado que em casos extremos, podem vir a tirar o gerador de sincronismo (TANG, 2011). Nesse contexto, entra em cena o PSS, um instrumento capaz de gerar um sinal que, somado ao  $\Delta V$ , pode reduzir as oscilações eletromecânicas no gerador.

As principais oscilações eletromecânicas as quais a MS está submetida são divididas por meio de faixas de frequência e são as que seguem (ROGERS, 2000):

- **Modos locais:** esta classe compõe as oscilações na faixa de 0,8 e 2,0 Hz (ROGERS, 2000). Este modo surge devido à interação de uma ou mais máquinas oscilando contra um largo sistema de potência. Estas oscilações se tornam perigosas quando as UG's estão sob alto carregamento e conectadas ao sistema de alta reatância (IEEE. . . , 2014);
- **Modos inter-área:** a faixa de frequência a qual este modo compõe é entre 0,1 e 0,8 Hz (ROGERS, 2000). Este tipo de oscilação surge devido a grupos de máquinas síncronas oscilando em conjunto em diferentes partes do SEP (IEEE. . . , 2014).
- **Modos intra-planta:** as oscilações são classificadas assim na faixa entre 1,5 e 3,0 Hz (ROGERS, 2000). Ocorre entre geradores próximos entre si, seja dentro de uma mesma usina ou em usinas próximas;
- **Modos torsionais:** esta classe compõe oscilações de mais de 4,0 Hz. Estes surgem devido a interações e movimentos relativos entre partes de uma mesma UG, como o rotor, os eixos e as turbinas.

Desta forma, o PSS é um elemento que se propõe a ser uma malha de controle adicional ao RT capaz de gerar torque amortecedor, visando diminuir as oscilações supracitadas e, assim, estender os limites de transferência de potência (IEEE, 2009).

Uma vez que o PSS visa atingir o desvio de velocidade da máquina por meio de alterações na corrente de campo do gerador, este dispositivo é capaz de receber como entrada as seguintes grandezas: a variação da velocidade do rotor  $\Delta\omega$ , a variação do ângulo de potência do gerador  $\Delta\delta$ , a variação de potência ativa  $\Delta P_e$ , a variação de

potência acelerante  $\Delta P_{acc}$  (KUNDUR; BALU, 1994) e a variação da frequência terminal do gerador (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2012). Portanto, uma combinação destas grandezas pode ser utilizada para compor o conjunto de entradas de uma certa topologia de estabilizador.

O guia (IEEE. . . , 2016) traz diferentes topologias do PSS e cada uma delas traz desempenhos diferentes no cumprimento desta tarefa de amortecimento para os diferentes modos, porém para o caso estudado, será apenas mostrado o a topologia do PSS2, pois é a utilizada no software do RT da Reivax.

#### 2.4.2.1 PSS2

Uma das topologias de PSS mais comuns é a de potência acelerante, isto é, os da família PSS2. Nesta estrutura, apresentada na Figura 13, o PSS, de forma a minimizar as oscilações eletromecânicas no gerador, utiliza como base a Equação de Swing da máquina síncrona, disposta a seguir:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e - P_d = P_{acc} \quad (19)$$

De forma a relacionar a potência acelerante (composta a partir da subtração das potências mecânica e elétrica, oriundas da energia mecânica entregue à turbina e da interação com a carga, respectivamente) com a velocidade no rotor. Nota-se que, outros valores podem ser usados como entradas nesta topologia, ao invés da potência acelerante e do desvio de velocidade. A estrutura comum de um PSS2 é composta por filtros de wash-out logo na entrada da topologia, posicionados como filtros passa-alta para passar apenas as frequências de interesse

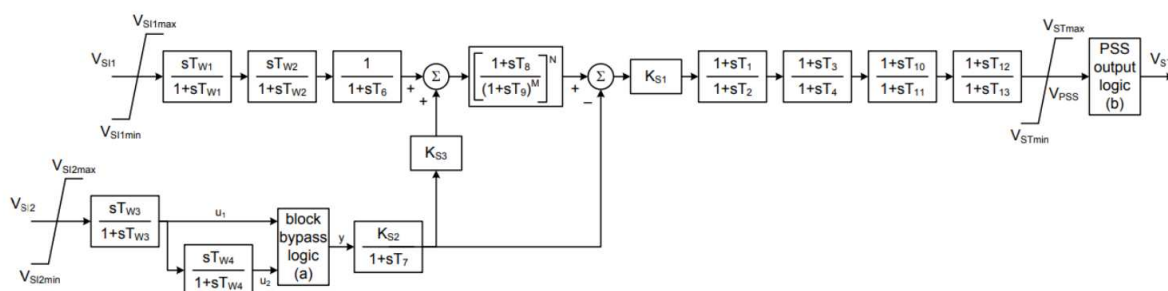
Desta maneira, este bloco é ajustado de forma a amortecer mais algum dos modos supracitados (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2012). Usa-se também nesta topologia filtros rastreadores de rampa, os quais são utilizados para filtrar o sinal sintetizado de potência, tirando altas frequências indesejadas (MURDOCH *et al.*, 1999). Em seguida, tem-se o estágio de avanço-atraso de fase. Aqui, o intuito é compensar a defasagem gerada no SE (sistema de excitação), permitindo a geração de torque de amortecimento em fase com as oscilações de velocidade do rotor.

Nota-se, aliás, que o Operador Nacional do Sistema (ONS) demanda que o sinal estabilizante deva ser gerado por uma estrutura dotada de um “filtro rastreador de rampa, capaz de propiciar um bom amortecimento na faixa de 0,2 a 2,0 Hz” (ONS, 2009).

#### 2.4.2.2 Ajuste do PSS

Conforme mencionado anteriormente, o PSS pode receber diferentes sinais para gerar sinais de amortecimento, como desvio de velocidade, frequência e potência.

Figura 13 – Estrutura do PSS2C



Fonte: (IEEE... , 2016)

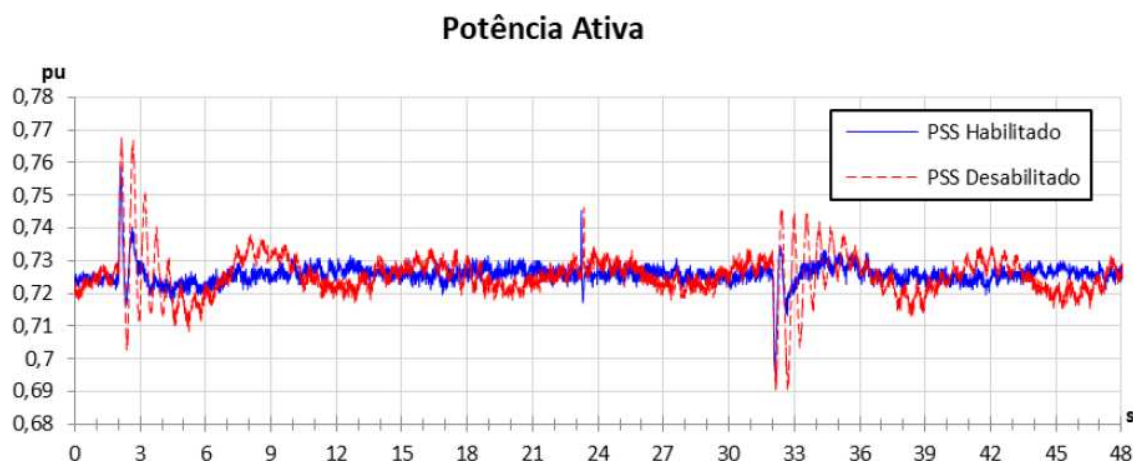
Portanto, alguns requisitos para fazer esta escolha são: o sinal deve ser de fácil medição, além de não ter muito ruído, para que a adição de mais filtros não seja necessária e, finalmente, a topologia do PSS deve ser adequada para que o sinal seja atenuado. Como o PSS nada mais é do que um compensador de fase do sinal de controle RT, é necessário realizar uma boa parametrização dos ajustes, pois caso seja mal ajustado, ao invés de gerar torques inversos as oscilações de velocidade no rotor, pode justamente aumentar tais oscilações eletromecânicas.

A partir disso, surge uma ferramenta para realizar o ajuste do PSS, o ensaio de resposta em frequência. O ensaio de resposta em frequência, consiste em injetar uma senoide de frequência variável na entrada da referência do RT, com o intuito de tirar o diagrama de Bode da função de transferência de tal sistema, sendo a saída a tensão terminal. Ao final de tal ensaio, obtém-se uma aproximação do GEP, obtido através da oscilação da frequência na entrada da referência.

Contudo, nota-se que o sinal de saída do PSS deve ser o inverso ao GEP obtido para atenuar as frequências de oscilação. Desta maneira, deseja-se ajustar a compensação de fase do PSS de forma a sobrepor o inverso da fase do GEP. Aliás, uma vez que se tem apenas a aproximação da resposta em frequência do sistema GEP, é comum aceitar uma compensação que se encontre na faixa de  $\pm 30^\circ$  da resposta de fase. Além disso, no caso do PSS2C (baseado na integral de potência acelerante), a fase independe do ganho. Desta forma, durante o ajuste dos parâmetros do PSS, pode-se focar apenas na resposta de fase do sistema, uma vez que o gráfico da magnitude do diagrama de bode pode ser facilmente ajustada ao alterar o ganho do PSS posteriormente. Assim sendo, com o ajuste do PSS feito e este habilitado no regulador de tensão, pode-se notar seu efeito principalmente através da potência ativa, como pode ser visto na Figura 14.

Nota-se portanto, que, ao utilizar o PSS, necessita-se da aplicação e leitura de diversos sinais. É preciso realizar a leitura da frequência e da potência de forma pouco

Figura 14 – Diferença na potência ativa mediante ação do PSS



Fonte: Elaborado pelo autor

ruidosa, além de realizar a aplicação de um sinal senoidal na entrada da referência do RT para realizar o ensaio de resposta em frequência. Sua parametrização deve ser feita de forma adequada, para atenuar de forma eficiente as oscilações afim de garantir estabilidade na MS.

## 2.5 COMENTÁRIO FINAIS

O capítulo 2 procurou contextualizar a importância do controle dos reguladores de velocidade e tensão para o bom funcionamento da rede elétrica brasileira. Além disso, apresentou os conceitos fundamentais acerca de tais reguladores, assim como o funcionamento do PSS e sua função dentro do regulador de tensão. No próximo capítulo, será discorrido sobre o caso ocorrido numa usina comissionada pela Reivax Automação e Controle, e por fim analisado através de simulações a origem do problema e qual a melhor estratégia ao se deparar com uma situação semelhante.

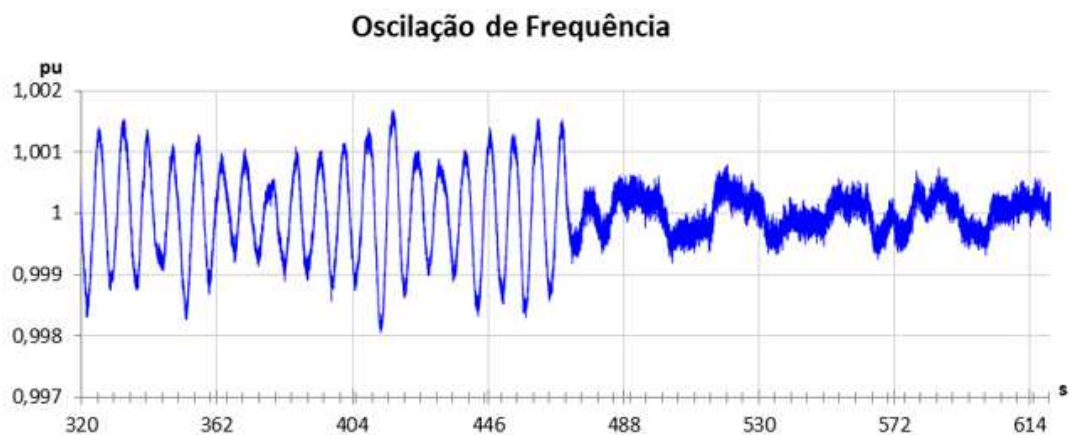
### 3 ANÁLISE

Esta seção irá analisar o caso ocorrido, discorrerá sobre as estratégias propostas durante o comissionamento da UG, simulará o mesmo comportamento visto em campo para poder afirmar qual a estratégia que deve ser adotada em casos semelhantes.

#### 3.1 ESTUDO DO CASO

Ao realizar um comissionamento em Matala - Angola, um comissionador da Reivax se deparou com a seguinte situação: com o PSS desabilitado, ocorria uma oscilação indesejada na frequência, na faixa de valores do modo inter-área, já com o PSS habilitado, a frequência era amortecida, porém iniciava uma oscilação na tensão terminal. Os gráficos a seguir irão mostrar o fenômeno.

Figura 15 – Oscilação na frequência.



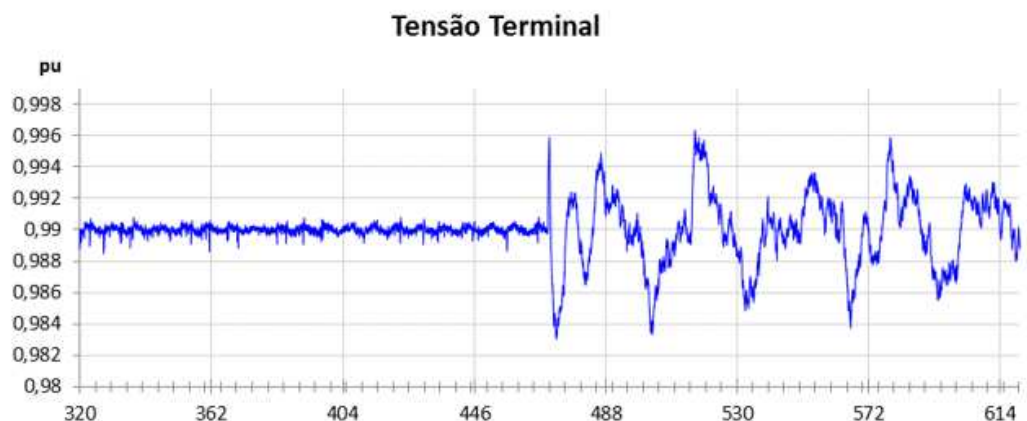
Fonte: Elaborado pelo autor

Como é possível notar através das Figuras 15-18, a ativação do PSS (apresentada na Fig. 19) faz com que a frequência pare de oscilar porém, a tensão terminal passa a ter um comportamento similar ao que a frequência possuía. Um dos motivos plausíveis para isso acontecer se deve ao fato que a rede elétrica na Angola consiste de pequenas redes isoladas, ao contrário do Brasil em que temos uma malha interligada.

O SEP no Brasil funciona da seguinte maneira: após a geração da usina chegar as subestações, a distribuição brasileira está interconectada, ou seja, todas as usinas, sejam hidrelétricas, termelétricas, solares ou eólicas, podem estar fornecendo energia para qualquer região do país. Isso cria a chamada "barra infinita", que é o conceito de que há tantas unidades geradoras contribuindo para o sistema de geração de energia, que caso uma única UG desconecte do sistema, isso não acarretará no desbalanço

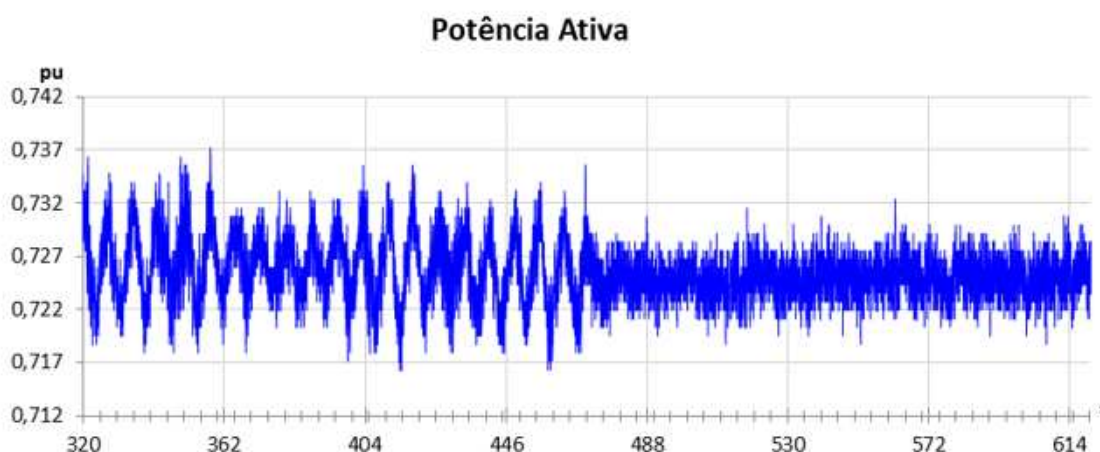


Figura 16 – Oscilação na tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 – Potência Ativa.

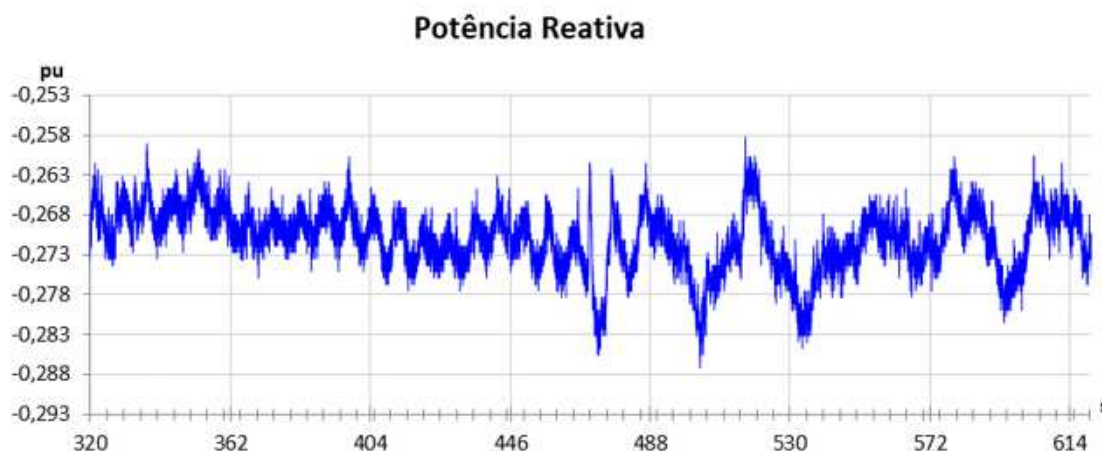


Fonte: Elaborado pelo autor

do mesmo, pois existem inúmeras outras UG's que podem suprir o valor de potência que estava sendo fornecido por aquela unidade específica. Isso traz estabilidade para o SEP, uma vez que o torna menos suscetível a grandes quedas.

Por outro lado, existe o sistema de uma rede isolada, que é o caso visto em Matala na Angola. Na situação em questão, apenas 3 usinas estavam contribuindo para a geração de energia: uma usina termelétrica com 40MW, uma usina solar com 20MW, e a unidade geradora que estava sendo comissionada, com potencial de 17MW porém que no momento estava com apenas 12.5MW (73% da carga máxima). Nesse cenário, a unidade geradora contribuía com 17% da carga da rede, um valor considerado alto se comparado com o sistema barra infinita visto aqui no Brasil. Isso torna a rede mais suscetível a quedas pois caso uma unidade venha a perder sincronismo, as outras duas tentarão suprir essa demanda, que por sua vez pode ser alta demais para a

Figura 18 – Potência Reativa.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Sinal de controle gerado pelo PSS.



Fonte: Elaborado pelo autor

capacidade nominal da MS, gerando uma série de perda de sincronismos como num efeito dominó. Outro revés é que a influência da oscilação da frequência de uma máquina em outra se torna maior, tanto que devido a isso é aconselhável não ativar o PSS num sistema isolado de uma máquina só.

Uma vez esclarecido o caso ocorrido, a próxima seção irá explicar o método de simulação utilizado para representar os ensaios em campo de maneira coerente.

### 3.2 SIMULAÇÃO DO CASO

Os softwares usados para a simulação do modelo proposto foram o ANATEM e o ANAREDE. Uma breve explicação sobre cada um é apresentada a seguir:

- **ANATEM:** O programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - Anatem, é

uma aplicação computacional para a realização de estudos de estabilidade à frequência fundamental tanto na operação como no planejamento de sistemas elétricos de potência. O Anatem possui a capacidade de representação dos principais componentes dinâmicos do sistema elétrico, tais como geradores síncronos, dispositivos FACTS, elos de corrente contínua, motores de indução, cargas estáticas ou dinâmicas, usinas eólicas e sistemas de controle de forma geral. Os sistemas de controle podem ser representados por modelos predefinidos ou, em especial, por controladores definidos pelo usuário (CDU) que conferem ao Anatem uma flexibilidade de modelagem e precisão de resultados únicas, devido à grande variedade de blocos elementares disponíveis para a montagem dos controladores e a solução robusta e eficiente destes blocos mesmo quando combinados de forma complexa e em grande quantidade. Ressalta-se ainda que o programa está dimensionado e projetado para a eficiente e robusta simulação de sistemas de grande porte, como é o caso do SIN (CEPEL, s.d.[a]).

- **ANAREDE:** O programa computacional ANAREDE é um abrangente conjunto de funções de análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente que inclui fluxo de potência, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão e fluxo, entre outras. O ANAREDE é uma opção natural para a realização de estudos de acesso, planejamento da operação e da expansão do SIN por vários fatores, como: integração com outros programas de análise de redes, como ANAFAS e ANATEM, disponibilização por ONS e EPE de bases de dados compatíveis com esses programas, integração com programas auxiliares para pós-processamento de resultados e ações de educação em engenharia voltadas ao treinamento de usuários. O ANAREDE é utilizado por empresas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, públicas e privadas, além de entidades setoriais, como ONS e EPE, consultoras e universidades. O programa é voltado a estudos de acesso de empreendimentos de geração e transmissão, além de estudos de planejamento da operação e da expansão do SIN. O desenvolvimento do programa conta com a colaboração de agentes de geração e transmissão, em particular das empresas Eletrobras e do ONS. Universidades também participaram, em diversos momentos, dos esforços de desenvolvimento, divulgados regularmente através de artigos e participações em congressos, seminários e webinars (CEPEL, s.d.[b]).

Sintetizando, o ANATEM será usado para realizar o controle da máquina síncrona, e nele estará presente a malha de regulação da tensão terminal, os limitadores e o PSS. O ANAREDE por sua vez simulará a rede na qual a MS está conectada, que, neste caso, será um sistema multibarras com 3 unidades geradoras. Para uma melhor visualização dos dois softwares, será mostrada malha de regulação da tensão terminal,

feita em ANATEM, na Figura 20:

Figura 20 – Malha de regulação de tensão feita em ANATEM

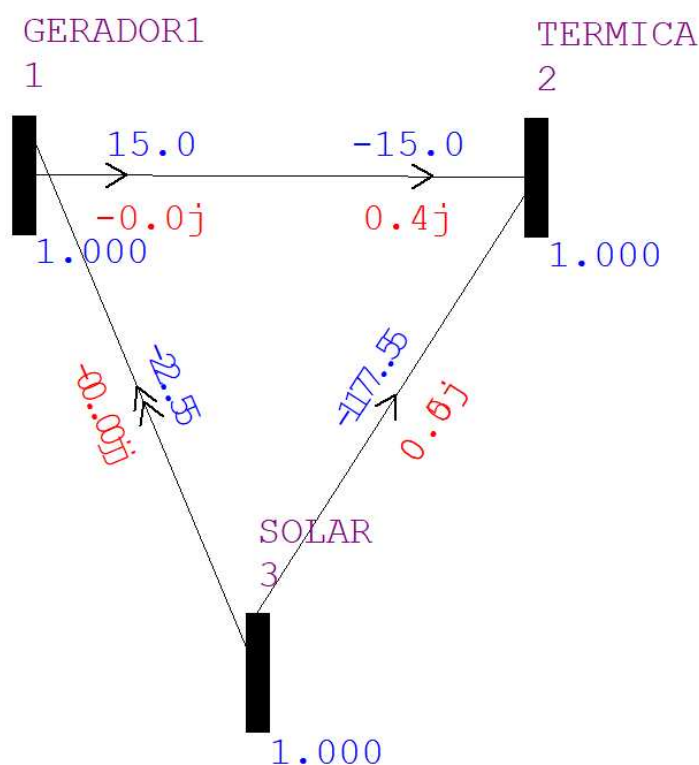
```

64 (=====
65 ( REGULADOR DE TENSÃO
66 (-----
67 (nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
68 (-----
69 0100 GANHO      Ixm   x100  #XC
70 0101 LIMITA    x100  RCC
71 0102 SOMA      RCC   VC1      CN.05  C.05
72              Vtm   VC1
73 0103 FUNCAO ABS VC1   VC
74 0104 SOMA      RefVt RefVt1
75              Vtm   RefVt1
76              -VC  RefVt1
77 0105 LIMITA    RefVt1 RefVt2    VtMin  VtMax
78 0106 SOMA      RefVt2 ErrVt
79              -Vtm  ErrVt
80 0107 MAX       ErrVt  xMAX
81              vUEL  xMAX
82              vSCLu xMAX
83              vMEL  xMAX
84 0108 MIN       xMAX  xMIN
85              vSCLo xMIN
86              vVHZ  xMIN
87              vOEL  xMIN
88 0109 SOMA      xMIN  xPSS
89              vPSS  xPSS
90 0110 GANHO     xPSS  xKP      #Kp
91 0111 SELET2    xKP   x101
92              C0    x101
93              CTRSAT x101
94 0112 PROINT    x101  xTI     1    0    #Ti    VRMin1 VRMax1
95 0113 SOMA      xKP   CTRL
96              xTI   CTRL
97 0114 LIMITA    CTRL  VR      VRMin1 VRMax1
98 ( RESET DO INTEGRADOR
99 0150 COMPAR    .GE.  CTRL  x150
00              VRMax1 x150
01 0151 COMPAR    .LE.  CTRL  x151
02              VRMin1 x151
03 0152 LOGIC     .OR.  x150  CTRSAT
04              x151  CTRSAT
05 ( LIMITES
06 0160 GANHO     VRMax  VRMax1 #Teto
07 0161 GANHO     VRMin  VRMin1 #Teto
08 ( CHAVE DO PSS
09 0170 SELET2    C0    vPSS
10              PSS  vPSS
11              EnPSS vPSS
    
```

Fonte: Elaborado pelo autor

Da mesma maneira, o sistema gerado no ANAREDE referente as 3 barras interligadas, que simulará a troca de potência entre as mesmas, está representado na Figura 21:

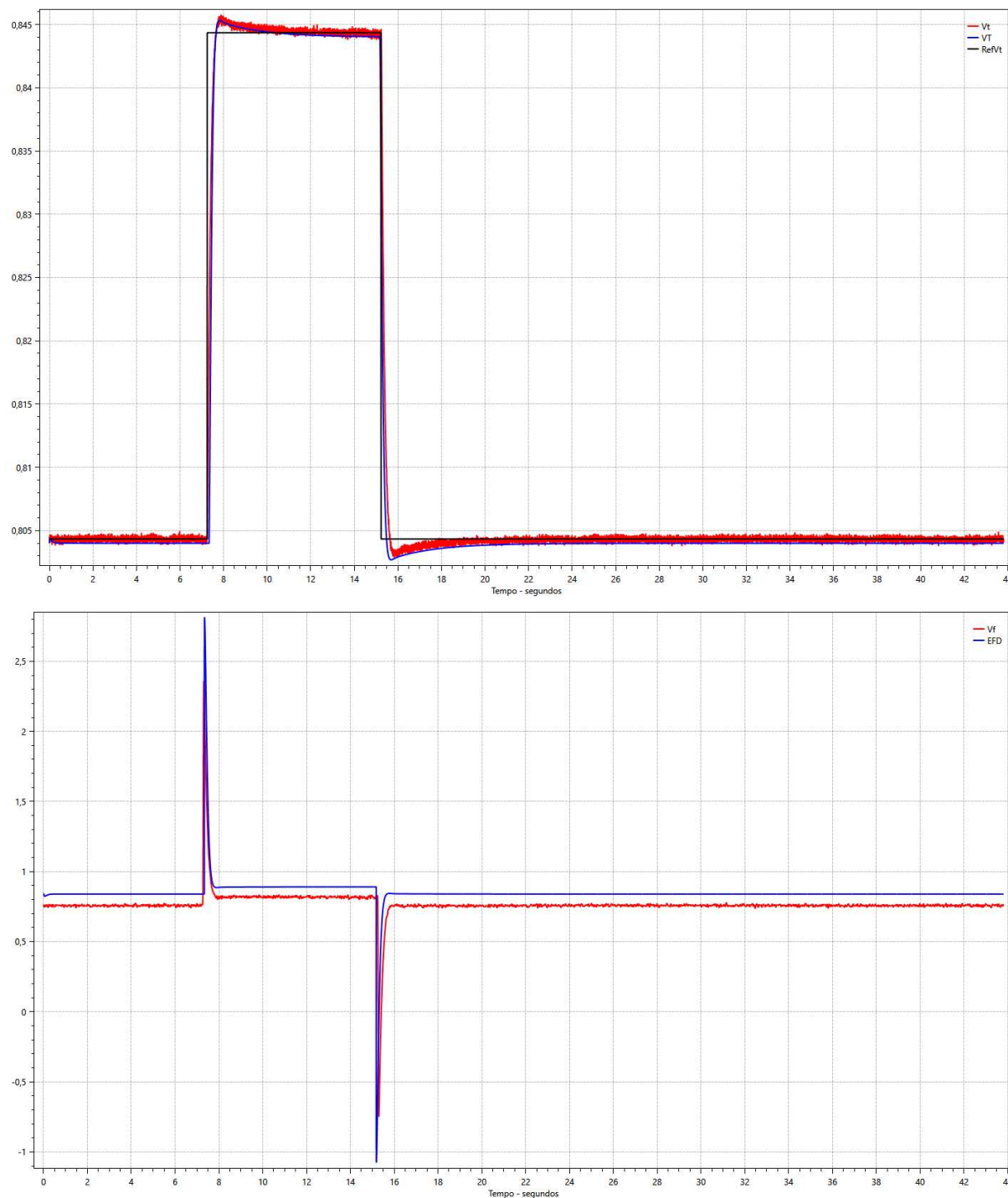
Figura 21 – Sistema de 3 barras referentes ao caso estudado



Fonte: Elaborado pelo autor

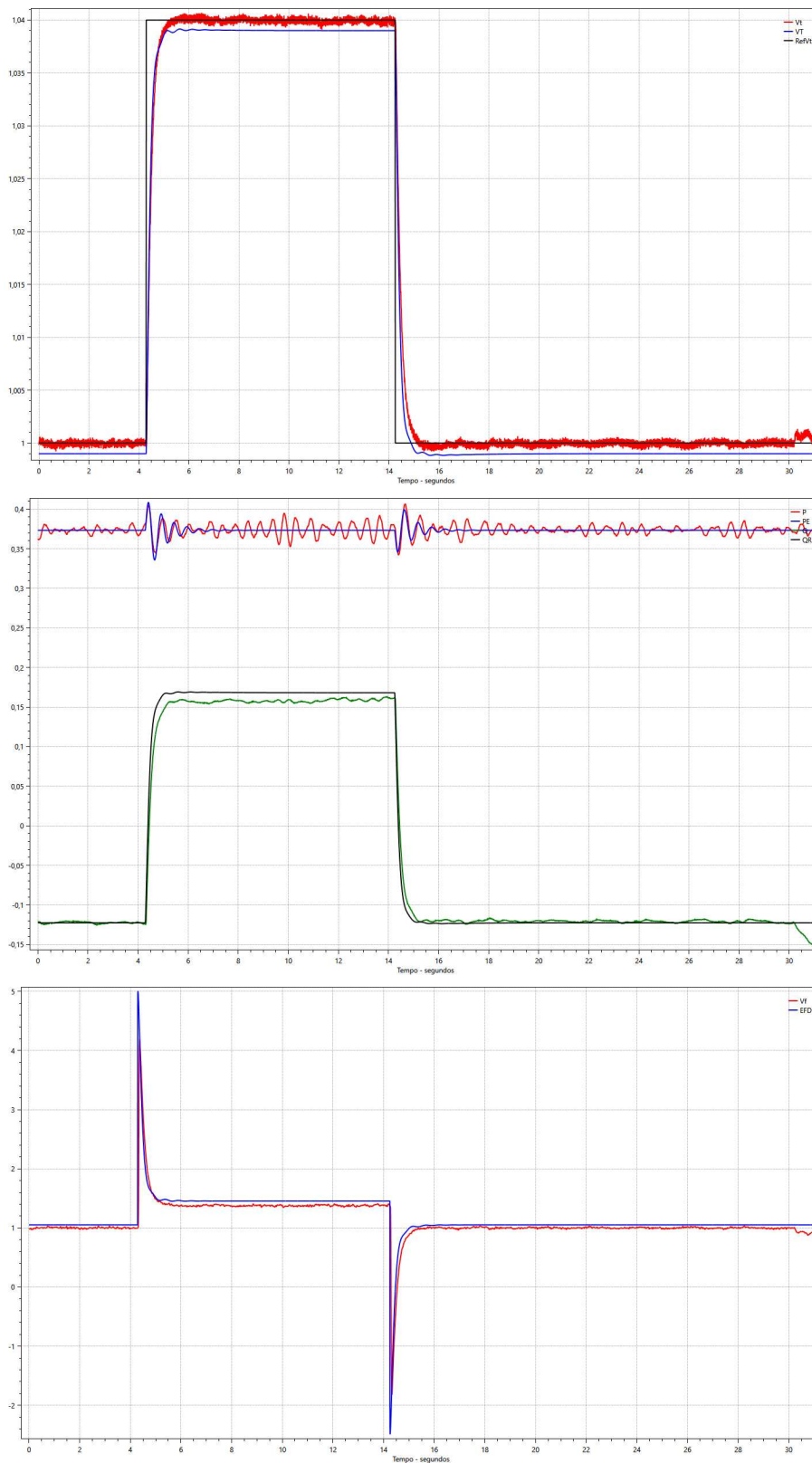
Feita a correta parametrização nos softwares dos ganhos das malhas, dos parâmetros do PSS, ambos de acordo com o comissionamento em campo, é necessário averiguar se a simulação está coerente com os testes em campo. As figuras a seguir tem a simulação na cor azul e o ensaio feito em campo em vermelho, enquanto a legenda está no canto superior direito.

Figura 22 – Degrau de tensão a vazio: comparação campo e simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

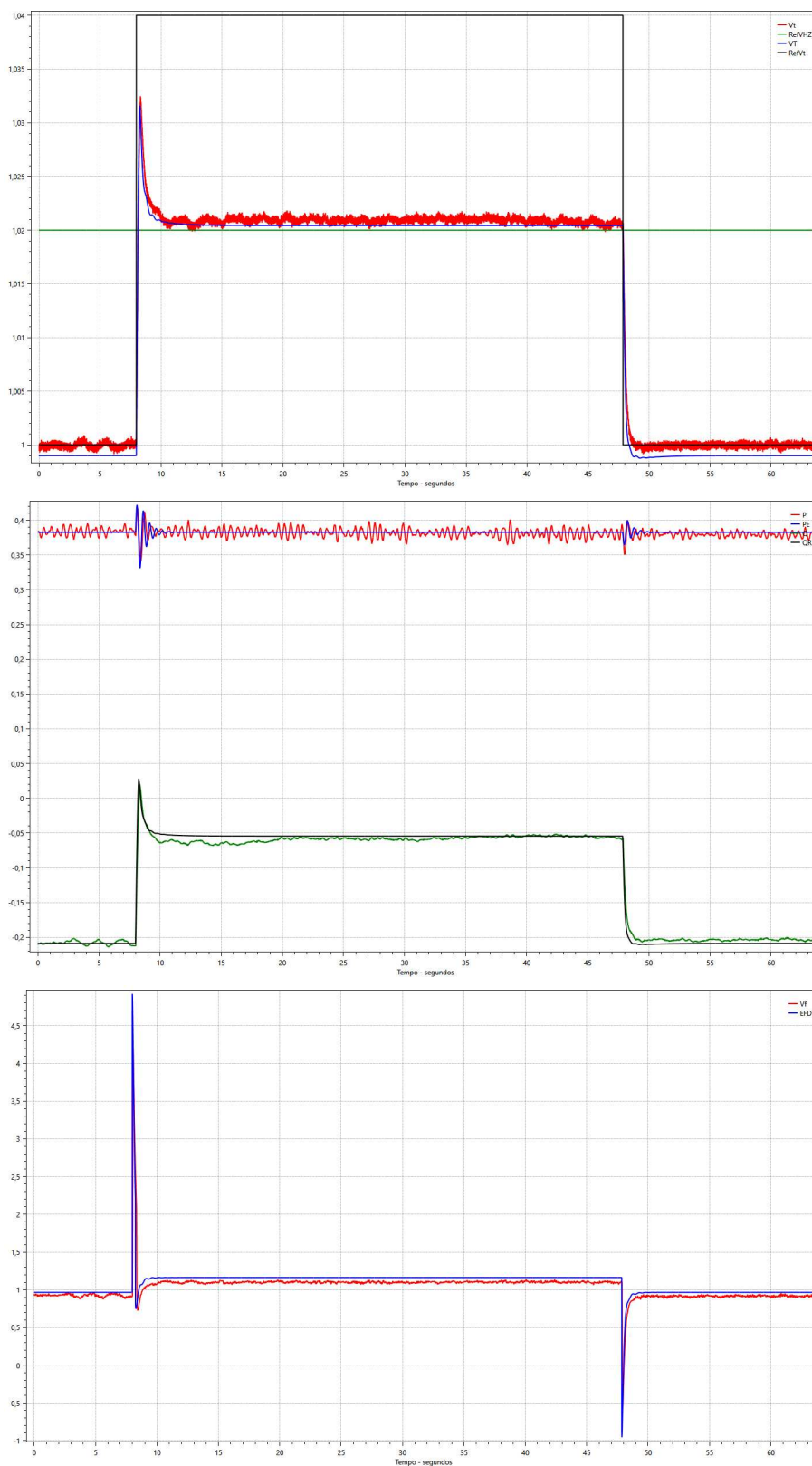
Figura 23 – Degrau de tensão em carga: comparação campo e simulação



Fonte: Elaborado pelo autor



Figura 24 – Limitador V/Hz: comparação campo e simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

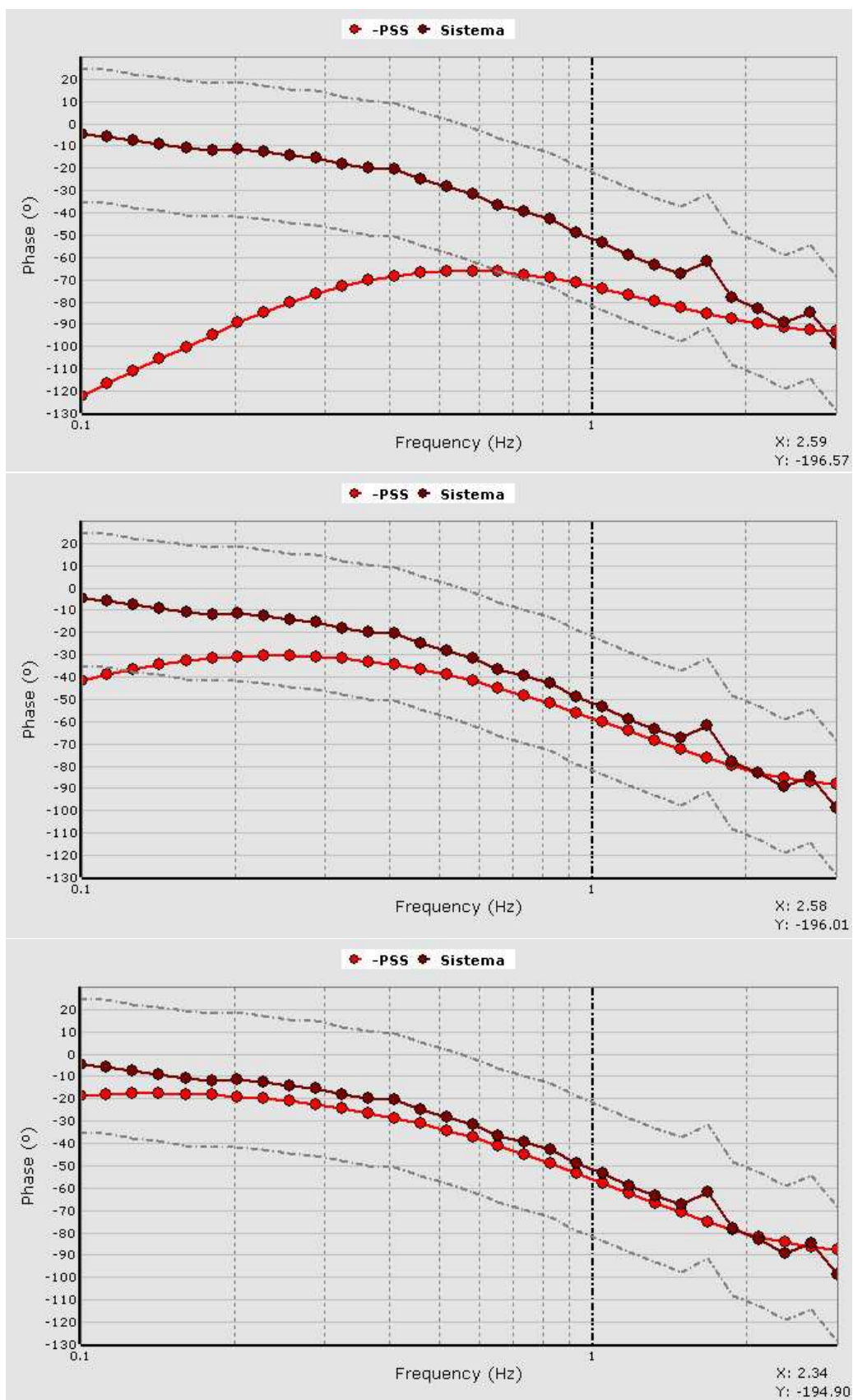


A partir das comparações feitas acima, pode-se afirmar que o modelo matemático criado no software representa com precisão o comportamento visto em campo. Dito isso, a próxima seção buscará avaliar através dos ensaios em campo e das simulações a razão da oscilação na frequência e na tensão terminal mediante a ativação do PSS.

### 3.3 ANÁLISE DO CASO

Nesta seção, serão exploradas as hipóteses que causaram a oscilação da frequência e da tensão terminal. Ao ser feito o ensaio de resposta em frequência durante o comissionamento, foi verificado que para baixas frequências, o parâmetro responsável por atenuar as oscilações eletromecânicas estava muito baixo. Tal parâmetro, chamado de  $T_w$ , normalmente tem seu valor na faixa de 3 a 5, e ele atua nas frequências mais baixas, de  $0.1\text{Hz}$  até  $0.8\text{Hz}$ , ou seja, na faixa inter-área vista no capítulo 2. Tal faixa de frequência recebe oscilações quando máquinas síncronas operam em conjunto no SEP (IEEE. . . , 2014). A Figura 25 a seguir mostra 3 diagramas de Bode com diferentes valores de  $T_w = 1$ ,  $T_w = 5$  e  $T_w = 15$ , respectivamente, na faixa de  $0.1\text{Hz}$  até  $3\text{Hz}$ .

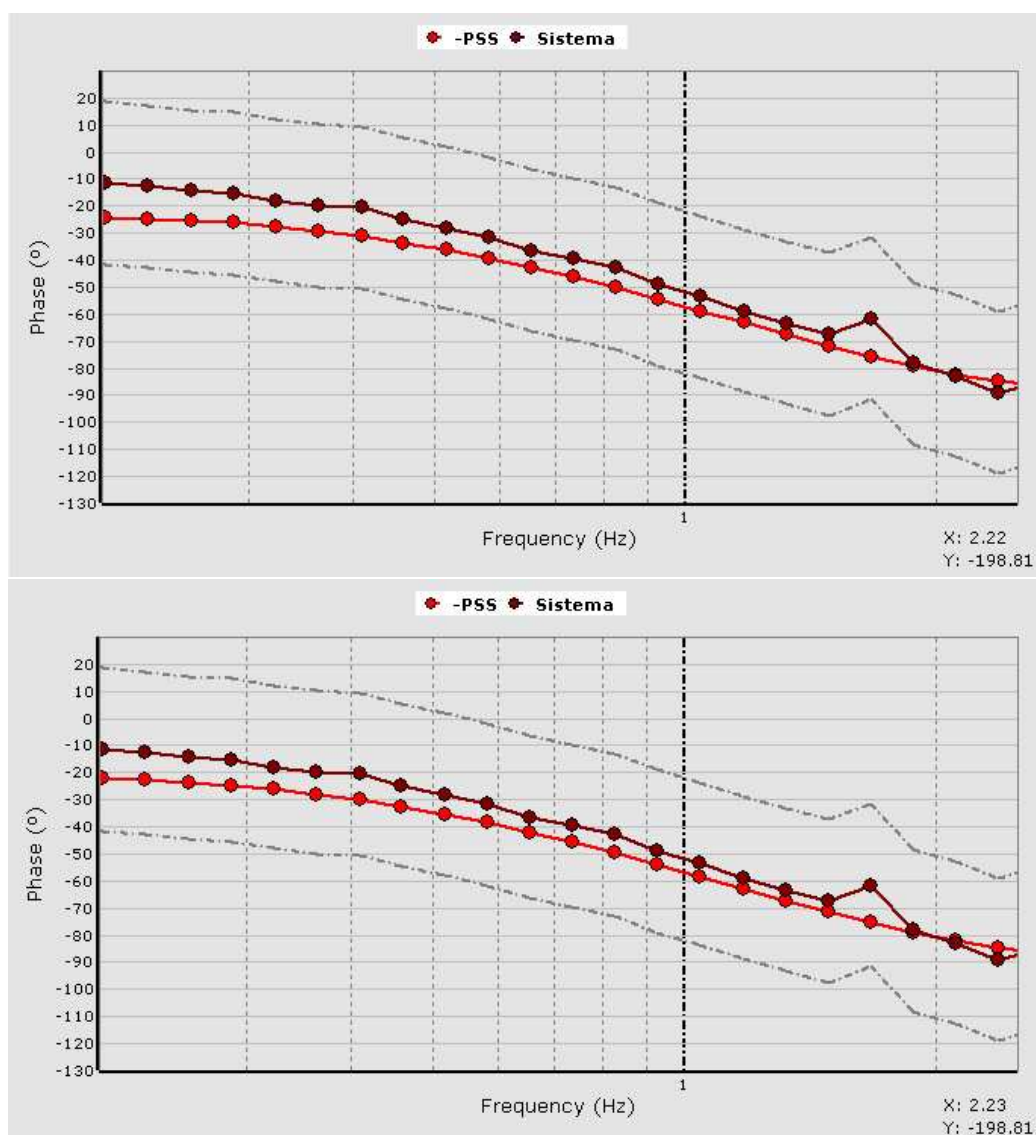
Figura 25 – GEP de 0.1Hz - 3Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

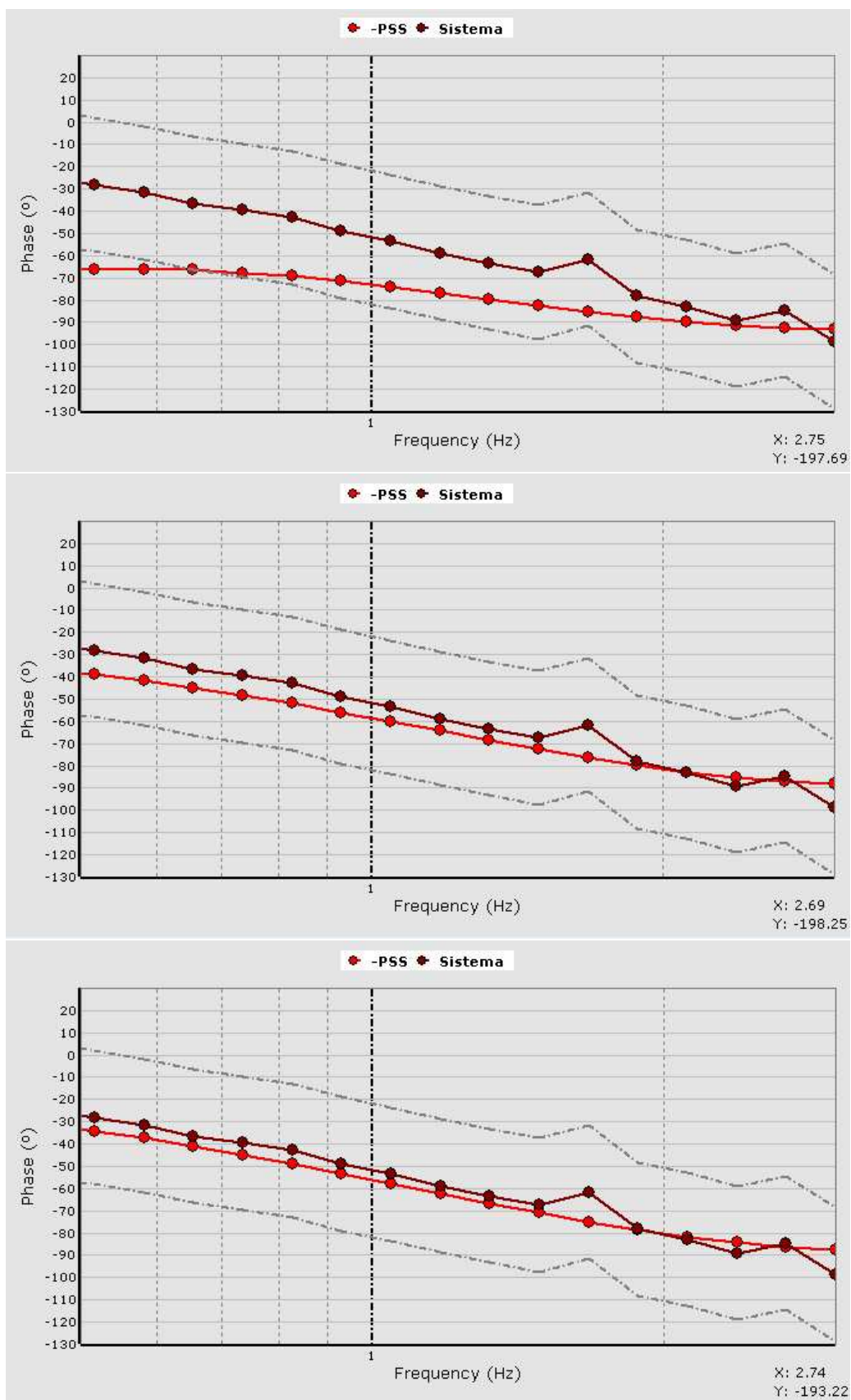
É perceptível a evolução do sistema do PSS ao aumentar o valor de  $T_w$ , apesar do valor colocado não ser convencional. A seguir na Figura 26 são mostrados 2 diagramas de Bode, na faixa de 0.2Hz até 3Hz, e após na Figura 27 3 diagramas de Bode na faixa de 0.5Hz até 3Hz, afim de averiguar se o ajuste dos outros parâmetros do PSS não poderia beneficiar a resposta em frequência.

Figura 26 – GEP de 0.2Hz - 3Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27 – GEP de 0.5Hz - 3Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a análise assídua do PSS, foi averiguado que apenas com o  $T_w = 15$  seria possível amortecer de forma significativa a frequência, porém com o ônus da tensão terminal ficar oscilando. Quanto a escolha entre deixar o PSS ativado (tensão oscilatória) ou PSS desativado (frequência oscilatória), ficou a cargo do operador da usina decidir no momento.

Ambas as situações devem ser analisadas de forma mais detalhada:

- **PSS Habilitado - Tensão terminal oscilatória:** Com a frequência atenuada, pode-se garantir que a turbina e o atuador da UG não sofrerão tanto estresse mecânico, reduzindo o desgaste. Por outro lado, a oscilação da tensão terminal não é benéfica e no caso de eventos sistêmicos a saída do PSS pode saturar e causar perda de sincronismo da máquina;
- **PSS Desabilitado - Frequência oscilatória:** Como citado anteriormente, a oscilação da frequência pode gerar um desgaste mecânico maior, resultando numa maior frequência de manutenção e custo. Com o PSS desabilitado, as oscilações mecânicas advindas da rede não serão atenuadas, porém no caso de um evento sistêmico garante-se uma maior segurança que a MS reagirá de maneira mais robusta pois estará apenas regulando a tensão sem nenhuma interferência advinda da saída do PSS.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa seção procurou mostrar o problema visto em campo, apresentar o software usado para simular o sistema da máquina síncrona e garantir que o modelo matemático nele presente é fidedigno ao comportamento dos ensaios mostrados, e então discutir quais foram e podem ser as estratégias para tratar o problema visto.

## 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho de conclusão do curso estudou-se um comportamento não usual da atuação do PSS durante o comissionamento de uma unidade de geração elétrica em Matala, Angola. Ao longo deste trabalho, verificou-se a importância de um bom comissionamento e parametrização das máquinas síncronas presentes na geração de energia conectado ao sistema elétrico Angolano. Nota-se cada vez mais que uma correta sintonia dos sistemas de controle de frequência e tensão na unidade de geração tem grande importância no bom funcionamento geral da rede elétrica entregue as indústrias e residências.

Este trabalho, iniciou-se apresentando alguns conceitos fundamentais de sistemas elétricos de potência como funcionamento do conjunto gerador-turbina, os tipos de turbina e o princípio de funcionamento da máquina síncrona, assim como a regulação de tensão e velocidade do sistema, possibilitando desta forma uma análise qualitativa do problema de flutuação de frequência e tensão abordado durante a execução deste projeto. Na sequência, discutiu-se como é feito o ajuste do PSS além da importância da sua função para atenuar as oscilações eletromecânicas.

Por fim, avaliou-se o caso ocorrido em Matala - Angola onde demonstrou-se que o modelo matemático desenvolvido para reproduzir o comportamento da unidade geradora em questão foi feito corretamente. Após a análise do comportamento do sistema por simulação, concluiu-se que a principal causa é devida à operação isolada do sistema, característica presente na rede elétrica angolana, que causa uma maior dependência entre as máquinas presentes e, conseqüentemente, influência traduzida através de oscilações entre uma e outra. Foram apresentadas estratégias para reduzir a oscilação de frequência, através de um ajuste não convencional do parâmetro  $T_w$ . Por fim, discutiu-se uma diretriz a ser seguida em casos semelhantes, e observou-se que para garantir maior segurança da máquina, deve-se escolher manter o PSS desabilitado, porém, para priorizar um menor desgaste mecânico, deve-se escolher atenuar a oscilação na frequência com o PSS habilitado.

Para trabalhos futuros, sugere-se que seja vista a viabilidade da implementação do PSS4 para esta unidade geradora, visto que a topologia do PSS4 é baseada em regiões de frequência e, portanto, pode-se fazer uma parametrização mais detalhada apenas para a área de baixa frequência.

## REFERÊNCIAS

ABRADEE. **Visão Geral do Setor**. [S.l.: s.n.]. Disponível em:

<https://abradee.org.br/visao-geral-do-setor/>.

BOCK, Maiquel. **Tipos de Turbinas Hidráulicas: Conheça os principais modelos**.

[S.l.: s.n.]. Disponível em:

<https://www.hidroenergia.com.br/blog/tipos-turbinas-hidraulicas/>.

BOLDEA, Ion. **Synchronous generators**. [S.l.]: Taylor Francis Group, 2016.

BRASCAN. **Áreas de atuação de turbinas**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: [https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/EIA/2003/PCH%20Timbu%C3%AD%20Seco/D-I-\\_-Introdu%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/EIA/2003/PCH%20Timbu%C3%AD%20Seco/D-I-_-Introdu%C3%A7%C3%A3o.pdf).

[https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/EIA/2003/PCH%20Timbu%C3%AD%20Seco/D-I-\\_-Introdu%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/EIA/2003/PCH%20Timbu%C3%AD%20Seco/D-I-_-Introdu%C3%A7%C3%A3o.pdf).

CASTRO, Nivalde José de; NETO, Pedro Bara; BRANDÃO, Roberto;

DANTAS, Guilherme de A. **Expansão do Sistema Elétrico Brasileiro e o Potencial Hidroelétrico da Região Amazônica**. [S.l.]: Louisiana State University, 2012.

CEPEL, Eletrobrás. **Tipos de Turbinas Hidráulicas: Conheça os principais modelos**. [S.l.: s.n.]. Disponível em:

<https://dre.cepel.br/manual/anatem/apresentacao/historico.html>.

CEPEL, Eletrobrás. **Tipos de Turbinas Hidráulicas: Conheça os principais modelos**.

[S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/anared-2/>.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. [S.l.: s.n.]. Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>.

HUNT, J. P. Capability Curves and Excitation Requirements of Saturated Cylindrical Rotor Synchronous Machines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-86, n. 7, p. 855–859, 1967. DOI: 10.1109/TPAS.1967.291752.

HYDROWHEEL. **Turbina hidráulica de ação de eixo vertical do tipo Pelton de fluxo radial**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://hydrowheel.com.br/produtos/turbinas-hidraulicas/pelton/pelton-vertical/>.

<https://hydrowheel.com.br/produtos/turbinas-hidraulicas/pelton/pelton-vertical/>.

IEEE. **IEEE Tutorial Course Power System Stabilizing via Excitation Control**. [S.l.]: Energy Development e Power Generation Committee, 2009.

IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems. **IEEE Std 421.2-2014 (Revision of IEEE Std 421.2-1990)**, p. 1–63, 2014. DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6845300.

IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines Part I—Acceptance and Performance Testing Part II—Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis. **IEEE Std 115-2009 (Revision of IEEE Std 115-1995)**, p. 1–219, 2010. DOI: 10.1109/IEEESTD.2010.5464495.

IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. **IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)**, p. 1–207, 2016. DOI: 10.1109/IEEESTD.2016.7553421.

JIANHUA, Wu. **Unidade de turbinas Kaplan/turbina de Fluxo Axial**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: [https://pt.made-in-china.com/co\\_fuchunind/product\\_Kaplan-Turbine-Unit-Axial-Flow-Turbine\\_hrhiresyy.html](https://pt.made-in-china.com/co_fuchunind/product_Kaplan-Turbine-Unit-Axial-Flow-Turbine_hrhiresyy.html).

JUNIOR, Nelson Zeni. **Controle de Tensão**. [S.l.: s.n.].

KUNDUR, Prabha; BALU, Neal J. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994. P. 1–1176.

MACHOWSKI, Jan; BIALEK, J.W.; BUMBY, J.R. Power System Dynamics. Stability and Control, jan. 2012.

MURDOCH, A.; VENKATARMAN, S.; SANCHEZ-GASCA, J.J.; LAWSON, R.A. Practical application considerations for power system stabilizer (PSS) controls. *In*: 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364). [S.l.: s.n.], 1999. 83–87 vol.1. DOI: 10.1109/PESS.1999.784328.

ONS. **Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica**. [S.l.]: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2009.

PUCRIO. **Agregação Dinâmica de Modelos de Turbinas e Reguladores de Velocidade: Teoria**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5584/5584\\_3.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5584/5584_3.PDF).

REIVAX. **Reivax S/A**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.reivax.com/pt/>.



ROGERS, Graham. **Power System Oscillations**. [S.l.: s.n.], jan. 2000. ISBN 9780792377122. DOI: 10.1007/978-1-4615-4561-3.

SAUER, P.W.; PAI, Anantha. Power system dynamics and stability / Peter W. Sauer and M. A. Pai. **SERBIULA (sistema Librum 2.0)**, jan. 2008.

TANG, Bixiang. **Parameter Tuning and Experimental Results of Power System Stabilizer**. [S.l.]: Louisiana State University, 2011. Disponível em: [https://repository.lsu.edu/gradschool\\_theses/2315](https://repository.lsu.edu/gradschool_theses/2315).

UNICAMP. **Áreas de atuação de turbinas**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.dsee.fee.unicamp.br/~dotta/it003/Aula5.pdf>.