



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ANDRESSA DE SOUZA VIEIRA LOPES

**INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE REGULADORES DE TENSÃO E
VELOCIDADE NO DESEMPENHO DINÂMICO DE GERADORES
SÍNCRONOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
UTILIZANDO O SOFTWARE PSP-UFU**

ITUMBIARA-GO

2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Andressa de Souza Vieira Lopes

Matrícula: 20152040070156

Título do Trabalho: Influência dos tipos de reguladores de tensão e velocidade no desempenho dinâmico de geradores síncronos em sistemas de distribuição de energia utilizando o software PSP-UFU.

Autorização - Marque uma das opções

- ☒ (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- ☐ () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
- ☐ () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ () O documento está sujeito a registro de patente.
☐ () O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ () Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

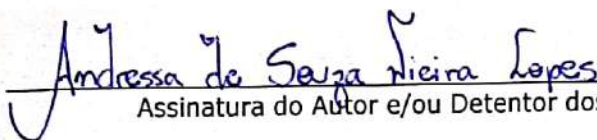
O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 25/07/2022.

Local

Data


Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

ANDRESSA DE SOUZA VIEIRA LOPES

**INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE REGULADORES DE TENSÃO E
VELOCIDADE NO DESEMPENHO DINÂMICO DE GERADORES
SÍNCRONOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
UTILIZANDO O SOFTWARE PSP-UFU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Itumbiara, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: 3.04.04.00-2 – Sistemas elétricos de Potência

Orientador(a): Prof. Olívio Carlos Nascimento Souto.

ITUMBIARA-GO

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L864i Lopes, Andressa de Souza Vieira
 Influência dos tipos de reguladores de tensão e velocidade
 no desempenho dinâmico de geradores síncronos em sistemas de
 distribuição de energia utilizando o software PSP-UFU. /
 Andressa de Souza Vieira Lopes. -- Itumbiara, 2022.
 66 p. : il. color.

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
 Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
 de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2022.

 Orientador: Prof. Dr.º Olívio Carlos Nascimento Souza.

1. Engenharia elétrica 2. Reguladores de voltagem 3. Sistema
de energia elétrica - Estabilidade. I. Título. II. Souza, Olívio
Carlos Nascimento. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás.

CDD 621.31

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

Andressa de Souza Vieira Lopes

INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE REGULADORES DE TENSÃO E VELOCIDADE NO DESEMPENHO DINÂMICO DE GERADORES SÍNCRONOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO O SOFTWARE PSP-UFU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 08 de Julho de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Olívio Carlos Nascimento Souto - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Roberlam Gonçalves de Mendonça - Membro Interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Cláudio Roberto Pacheco - Membro Interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Thales de Lima Oliveira - Membro Externo

Documento assinado eletronicamente por:

- **Claudio Roberto Pacheco**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 01/08/2022 17:32:15.
- **Roberlam Goncalves de Mendonca**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/07/2022 21:41:41.
- **Olivio Carlos Nascimento Souto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/07/2022 19:53:10.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/07/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 302374

Código de Autenticação: e22cf1173d



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

Página de assinaturas



Thales Oliveira
059.084.296-00
Signatário

HISTÓRICO

- | | | |
|-------------------------|---|--|
| 02 ago 2022
09:21:51 |  | Victor Régis Bernardeli criou este documento. (E-mail: victor.bernardeli@ifg.edu.br) |
| 02 ago 2022
10:16:35 |  | Thales Lima Oliveira (E-mail: thaleslima.ufu@gmail.com, CPF: 059.084.296-00) visualizou este documento por meio do IP 200.131.207.133 localizado em Uberlândia - Minas Gerais - Brazil. |
| 02 ago 2022
10:16:49 |  | Thales Lima Oliveira (E-mail: thaleslima.ufu@gmail.com, CPF: 059.084.296-00) assinou este documento por meio do IP 200.131.207.133 localizado em Uberlândia - Minas Gerais - Brazil. |



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Deus** pela sabedoria e saúde que foram indispensáveis na execução desse estudo, sem Ele e suas bênçãos nada seria possível.

Agradeço também aos meus pais, **Gilberto** e **Sandra**, ao meu irmão **Samuel** que sempre estiveram do meu lado me apoiando e acreditando nessa realização junto comigo.

Aos meus amigos que ao longo da minha trajetória acadêmica contribuíram exponencialmente com o meu crescimento, em especial a **Camilla Paiva** que esteve comigo nesse estudo em outros projetos.

Ao meu orientador **Olívio Carlos Nascimento Souto**, pela contribuição e dedicação no desenvolvimento desse trabalho de conclusão de curso.

Ao **Instituto Federal de Goiás**, juntamente com toda a composição administrativa, e **aos meus professores** que de forma direta e indireta participaram em conjunto para que esse trabalho pudesse ser realizado.

Agradeço e dedico esse trabalho em memória ao Professor **Rui Vagner Rodrigues da Silva** que me proporcionou a oportunidade de participar desse estudo e pela contribuição dos seus conhecimentos nesse projeto.

RESUMO

INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE REGULADORES DE TENSÃO E VELOCIDADE NO DESEMPENHO DINÂMICO DE GERADORES SÍNCRONOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO O SOFTWARE PSP-UFU

Este estudo consiste em analisar o desempenho dinâmico de geradores síncronos e seus controles, em um sistema de geração distribuída, utilizando o software PSP-UFU. Para essa análise são implementadas tipos diferentes de reguladores tanto de tensão como de velocidade, para determinar qual apresenta a melhor resposta de controle de frequência, tensão e estabilidade do sistema. Foram utilizados reguladores seguindo os modelos do IEEE adequados a máquina síncrona, tais controles foram implementados no PSP. O sistema teste escolhido para representar o sistema de distribuição é o IEEE 13 barras, as análises consistem no estudo do sistema em relação ao aumento brusco de carga, curtos-circuitos nas barras, duração das faltas, analisando-se assim a resposta dos controles da máquina. Com os resultados obtidos, foi possível avaliar aspectos de qualidade de energia (magnitude de tensão, frequência, etc.), estabilidade das máquinas e a influência que os controles têm sobre as máquinas síncronas. As análises são feitas em dois cenários diferentes, no primeiro o sistema de distribuição é caracterizado por possuir elevada potência de curto-circuito e um valor de inércia alto, que foi denominado como “Sistema forte”. O segundo sistema é caracterizado por possuir uma pequena potência de curto-circuito e baixo valor de inércia, denominado como “Sistema fraco”. A atuação dos reguladores de tensão e de velocidade nessas análises se comprovaram, mostrando a importância do seu uso para melhorar as oscilações nos aspectos de qualidade de energia, diminuir o desequilíbrio de tensão e frequência e retornar esses valores para a estabilidade. Embora os reguladores tenham a mesma função, percebe-se que, para cada modelo utilizado há uma resposta única no seu desempenho, dependendo do tipo de falta ocorrida no sistema. Para o primeiro sistema (rede forte), os reguladores tipo DC1 e tipo hidráulico obteve melhores respostas no controle de estabilidade do sistema, enquanto que para o segundo sistema (rede fraca), todos os controles apresentaram respostas únicas dependendo do tipo de falta, sendo melhor detalhado no capítulo quatro.

Palavras-chave: Regulador de tensão, Regulador de velocidade, Estabilidade, PSP-UFU, Sistema de distribuição.

ABSTRACT

INFLUENCE OF TYPES OF VOLTAGE AND SPEED REGULATORS ON THE DYNAMIC PERFORMANCE OF SYNCHRO GENERATORS IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS USING PSP-UFU SOFTWARE

This study consists of analyzing the dynamic performance of synchronous generators and their controls, in a distributed generation system, using the PSP-UFU software. For this analysis, different types of regulators, both voltage and speed, are implemented to determine which one has the best control response for frequency, voltage and system stability. Regulators were used following the IEEE models suitable for the synchronous machine, such controls were implemented in the PSP. The test system chosen to represent a distribution system was the IEEE 13 buses, the analyzes consist of the study of the system in relation to the sudden increase in load, short circuits in the buses, duration of faults, thus analyzing the response of the controls of the machine. With the results obtained, it was possible to evaluate aspects of power quality (voltage magnitude, frequency, etc.), machine stability and the influence that controls have on synchronous machines. These analyzes are carried out in two different scenarios, in the first, the distribution system is characterized by having high short-circuit power and a high inertia value, which was called “Strong system”. The second system is characterized by having a small short-circuit power and low inertia value, called “Weak system”. The performance of voltage and speed regulators in these analyzes was proven, showing the importance of their use to improve oscillations in the aspects of power quality, reduce voltage and frequency unbalance and return these values to stability. Although the regulators have the same function, it is clear that for each model used there is a unique response in its performance, depending on the type of fault occurred in the system. For the first system (strong network), the DC1 and hydraulic type regulators obtained better responses in the stability control of the system, while for the second system (weak network), all controls presented unique responses depending on the type of fault, being more detailed in chapter four.

Keywords: Voltage regulator, Speed regulator, Stability, PSP-UFU, Distribution system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Máquina síncrona de polos salientes.....	17
Figura 02 - Modelo simples de regulador automático de tensão.....	20
Figura 03 - Modelo simples de regulador de velocidade.....	21
Figura 04 - Sistema teste de 13 barras do IEEE.....	22
Figura 05 - Sistema teste de 13 barras do IEEE implementado no PSP.....	25
Figura 06 - AVR modelo simplificado.....	26
Figura 07 - AVR modelo tipo I.....	27
Figura 08 - AVR modelo tipo II.....	28
Figura 09 - AVR modelo tipo DC1.....	29
Figura 10 - GOV modelo turbina hidráulica.....	30
Figura 11 - GOV modelo turbina Térmica.....	31
Figura 12 - Combinações dos reguladores para a simulação.....	34
Figura 13 - Tensão terminal dos geradores.....	35
Figura 14 - Frequência dos geradores.....	36
Figura 15 - Ângulo delta dos geradores.....	37
Figura 16 - Tensão terminal dos geradores.	38
Figura 17 - Frequência dos geradores.....	38
Figura 18 - Frequência dos geradores.....	39
Figura 19 - Ângulo delta dos geradores.....	39
Figura 20 - Tensão terminal dos geradores.	40
Figura 21 - Frequência dos geradores.....	40
Figura 22 - Ângulo delta dos geradores.....	41
Figura 23 - Frequência dos geradores.....	41
Figura 24 - Ângulo delta dos geradores.....	42
Figura 25 - Tensão terminal dos geradores.	42
Figura 26 - Frequência dos geradores.....	43
Figura 27 - Ângulo delta dos geradores.....	43
Figura 28 - Sistema teste de 13 barras com a carga adicional.....	45
Figura 29 - Tensão terminal dos geradores.....	46

Figura 30 - Frequência dos geradores.....	46
Figura 31 - Ângulo delta dos geradores.....	47
Figura 32 - Tensão na barra 634.....	47
Figura 33 - Tensão na barra 634 sem reguladores.....	48
Figura 34 - Tensão dos geradores sem reguladores.....	48
Figura 35 - Frequência dos geradores sem reguladores.....	49
Figura 36 - Tensão na barra 634 com reguladores.....	49
Figura 37 - Tensão dos geradores com reguladores.....	50
Figura 38 - Frequência dos geradores com reguladores.....	50
Figura 39 - Tensão terminal dos geradores.....	52
Figura 40 - Frequência dos geradores.....	53
Figura 41 - Ângulo delta dos geradores.....	53
Figura 42 - Tensão terminal dos geradores.....	54
Figura 43 - Frequência dos geradores.....	55
Figura 44 - Ângulo delta dos geradores.....	55
Figura 45 - Tensão terminal dos geradores.....	56
Figura 46 - Frequência dos geradores.....	56
Figura 47 - Ângulo delta dos geradores.....	57
Figura 48 - Tensão terminal dos geradores.....	57
Figura 49 - Frequência dos geradores.....	58
Figura 50 - Ângulo delta dos geradores.....	58
Figura 51 - Tensão terminal dos geradores.....	59
Figura 52 - Frequência dos geradores.....	59
Figura 53 - Ângulo delta dos geradores.....	60
Figura 54 - Tensão terminal dos geradores.....	60
Figura 55 - Frequência dos geradores.....	61
Figura 56 - Ângulo delta dos geradores.....	61
Figura 57 - Tensão terminal dos geradores.....	62
Figura 58 - Frequência dos geradores.....	62
Figura 59 - Ângulo delta dos geradores.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Dados do gerador síncrono 1.....	23
Tabela 02 - Dados do gerador síncrono 2 e 3.....	23
Tabela 03 - Dados dos transformadores do sistema.....	24
Tabela 04 - Dados dos parâmetros do regulador tipo simplificado.....	26
Tabela 05 - Dados dos parâmetros do regulador tipo I.....	27
Tabela 06 - Dados dos parâmetros do regulador tipo II.....	28
Tabela 07 - Dados dos parâmetros do regulador tipo DC1.....	29
Tabela 08 - Dados dos parâmetros do regulador para turbinas hidráulicas.....	30
Tabela 09 - Dados dos parâmetros do regulador para turbinas térmicas.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS

f – Frequência.

V_{ref} - Tensão de referência.

K_a - Ganho do regulador de tensão.

T_a - Constante de tempo do regulador de tensão.

K_e - Ganho da excitatriz.

T_e - Constante de tempo da excitatriz.

K_f - Ganho da malha de estabilização do AVR.

T_{f1} - Constante de tempo da malha de estabilização do GOV.

T_{f2} - Constante de tempo da malha de estabilização do GOV.

T_r - Constante de tempo do filtro de entrada.

$V_{mín}$ - Limite de tensão mínimo do regulador.

$V_{máx}$ - Limite de tensão máximo do regulador.

$E_{mín}$ - Limite mínimo da excitatriz.

$E_{máx}$ - Limite máximo da excitatriz.

P – Número de Polos.

P_{ref} - Potência de referência.

T_{fb} - Constante de tempo do sensor de velocidade

G - Ganho do sensor de velocidade.

T_1, T_2 e T_3 - Constante de tempo do regulador velocidade.

T_4 - Constante de tempo da turbina hidráulica/Térmica.

T_5 - Constante de tempo da turbina hidráulica/Térmica.

R - Queda de velocidade do regulador.

$P_{mín}$ - Limite mínimo da Potência.

$P_{máx}$ - Limite máximo da Potência.

R_a - Resistência de armadura.

x_d - Reatância síncrona de eixo direto.

x_q - Reatância síncrona de eixo em quadratura.

x'_d - Reatância transitória de eixo direto.

x'_q - Reatância transitória de eixo em quadratura.

T'_{d0} - Constante de tempo transitório de eixo direto.

LISTA DE SIGLAS

IEEE - Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos.

PSP - Plataforma de sistemas de potência.

UFU - Universidade Federal de Uberlândia.

GOV - Speed Governor

AVR - Automatic Voltage Regulator.

GUI - Graphical User Interface.

CAD - Computer Aided Design.

PSS - Power System Stabilizer.

CC - Corrente contínua.

KVA - Quilo volt-ampère.

MVA - Mega volt-ampère.

KW - Quilowatts.

KVAr - Quilo volt-ampère reativo.

WEG - Empresa equipamentos elétricos fundada por Werner Eggon Geraldo.

S - Potência aparente.

Scc - Potência de curto-circuito.

P - Potência ativa.

Q - Potência reativa.

Hz - Hertz.

s - Segundos.

pu - por unidade.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	14
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Estrutura do Trabalho.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1	Gerador Síncrono.....	17
2.2	Reguladores de Tensão e Velocidade.....	19
2.2.1	Regulador de Tensão.....	19
2.2.2	Regulador de Velocidade.....	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1	Dados dos reguladores de Tensão.....	26
3.2	Dados dos reguladores de Velocidade.....	29
3.3	Considerações finais do capítulo.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1	Simulação do sistema 01 – REDE FORTE.....	34
4.1.1	Considerações finais - REDE FORTE.....	51
4.2	Simulação do sistema 02 – REDE FRACA.....	52
4.2.1	Considerações finais - REDE FRACA.....	64
5	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS.....	66
	ANEXO A.....	67
	ANEXO B.....	68
	ANEXO C.....	69
	ANEXO D.....	70
	ANEXO E.....	71
	ANEXO F.....	72
	ANEXO G.....	73

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que os sistemas de distribuição de energia não foram projetados, originalmente, para suportar a inserção de unidades geradoras, portanto um estudo que analisa mudanças e impactos na operação dos sistemas de distribuição com geração independente de energia é de suma importância. Os geradores síncronos são máquinas de velocidade constante e proporcional à frequência da rede, sendo um dos tipos mais comuns de máquinas elétricas e a principal fornecedora de energia elétrica para os sistemas de potência. A função dos controles de uma máquina síncrona é mantê-la funcionando em um determinado ponto de operação, estes controles atuam de forma a garantir o suprimento contínuo de energia, mantendo a frequência e a tensão da máquina dentro dos limites aceitáveis pré-definidos, além de ser parte fundamental na manutenção da estabilidade da máquina frente a uma perturbação no sistema. Dentre esses controles foram analisados neste trabalho os reguladores de tensão, que tem como função principal controlar a excitação da máquina, mantendo a tensão o mais próximo da referência estabelecida pelas normas e pelos valores de referência do sistema e os reguladores de velocidade, que fazem o controle primário da velocidade dos motores conectados nos geradores, controlando assim a frequência de saída dos geradores através da potência mecânica.

O trabalho apresentará as simulações dinâmicas de geradores síncronos com diversos tipos de reguladores em sistemas de distribuição, sob perturbações no sistema, de maneira a determinar o comportamento das máquinas e verificar quais os reguladores mais apropriados diante das necessidades dos sistemas de distribuição. As informações técnicas e a pesquisa realizada neste trabalho tem como objetivo auxiliar projetistas e engenheiros na escolha do melhor tipo de controle de reguladores de máquinas síncronas em sistemas de distribuição. Através das simulações pode-se verificar todas as possibilidades dos conjuntos de reguladores de tensão com os reguladores de velocidade, auxiliando assim na melhor escolha desse conjunto de reguladores.

Para a realização desse estudo, usou-se o software de código aberto PSP-UFU, que reduz o esforço matemático das equações diferenciais das máquinas síncronas, com os dados de entrada o próprio código escolhe o modelo da máquina, podendo ser de polos lisos ou salientes, essa plataforma possibilita a representação do sistema e seus componentes como por exemplo:

geradores, transformadores, cargas, barras, linhas, etc. Por fim, o software elabora tabelas e gráficos com os dados que resultam das análises.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho de pesquisa é analisar a influência dos controles de um gerador síncrono instalado em um sistema de distribuição em média e baixa tensão composto por 13 (treze) barras, e a resposta desse sistema quando ocorrem perturbações, como, aumento brusco de carga, curto-circuito em algum ponto desse sistema (barra, linha, etc.), com vários tempos de duração de falta. Podendo assim, obter-se as características de cada modelo de regulador de tensão e de velocidade, como também avaliar qual apresenta o melhor desempenho.

1.2 Justificativa

Para garantir uma boa qualidade de energia elétrica, os parâmetros da rede precisam estar dentro dos limites permitidos pelas regulamentações vigentes, sem muitas oscilações e variações do seu módulo. Nos dias atuais, tem-se registrado um aumento de unidades injetoras de energia na rede, que a longo prazo podem causar elevação da tensão no barramento ao qual a carga está conectada e barras próximas, gerando variações de tensão que podem exceder os limites estabelecidos, por isso é necessário estudos e análises que melhorem essas oscilações e mantenham os limites estabelecidos da rede.

Por tanto, entender a influência dos reguladores de tensão e dos reguladores de velocidade em geradores síncronos no sistema de distribuição contribui para o aprimoramento da solução desses problemas de instabilidade da rede.

1.3 Estrutura do trabalho

Para melhor compreensão do assunto abordado e das simulações realizadas assim como da metodologia utilizada, este trabalho é dividido em cinco capítulos, sendo descritos abaixo.

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre o tema desse estudo, destacando o uso dos reguladores de tensão e velocidade para manter a estabilidade do sistema. Apresenta os objetivos e justificativas pertinentes para a realização desse trabalho.

No capítulo 2 é apresentado o referencial teórico utilizado em todo o estudo deste projeto, destacando com mais propriedade as características desses componentes do sistema, no caso dos geradores síncronos é detalhado suas partes construtivas e a função de cada uma delas, para os reguladores de tensão e reguladores de velocidade é mostrado sua composição interna e sua funcionalidade.

O capítulo 3 apresenta a metodologia usada para a realização das simulações deste estudo, é destacado o software PSP-UFU, o sistema teste do IEEE de 13 barras que é utilizado como base, o sistema implementado no software com suas devidas adequações. Neste capítulo contém os dados de cada tipo de controle usado na máquina síncrona e sua composição interna, apresenta também os dados com os parâmetros dos geradores síncronos.

No capítulo 4 consta as simulações feitas para as análises, sendo esse capítulo subdividido em duas partes, a primeira apresenta as simulações feitas para uma rede com maior valor de inércia e potência de curto-circuito alta, apresentando melhores respostas dos controles nesse sistema, a segunda parte apresenta as simulações feitas para uma rede com baixo valor de inércia e baixa potência de curto-circuito, apesar da rede não contribuir na resposta dos controles da máquina é notório a necessidade desses controles para esse sistema. Por fim, no final da simulação de ambas as partes tem-se as considerações finais das análises.

Para finalizar, o capítulo 5 apresenta as conclusões finais deste estudo, as referências bibliográficas citadas no trabalho, e o anexo com dados pertinentes ao estudo desse trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho trata da análise do comportamento dos geradores síncronos em sistemas de distribuição de energia, com o uso de modelos de reguladores de tensão e velocidade fornecidos pelo Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE)[1], frente a perturbações. As análises se concentrarão nas variações que ocorrem nos níveis de tensão, potências, velocidade e ângulo de potência das máquinas. Os sistemas de distribuição de energia não foram projetados, a princípio, para suportar a inserção de unidades geradoras que injetam energia na rede, visto que a característica desse sistema é o de fornecer energia, portanto esse estudo avalia as análises da operação dos sistemas de distribuição com geração distribuída de energia, constatando as mudanças e o efeito dos controles da máquina para manter o sistema estável mesmo com essas mudanças.

O software PSP-UFU foi utilizado como ferramenta de simulação, uma vez que ele é capaz de representar os elementos necessários para a análise das perturbações supracitadas. O PSP é uma plataforma computacional capaz de realizar estudos de fluxo de carga, cálculos de curto-circuito, análise de impacto de harmônicos, assim como análise de estabilidade transitória e dinâmica.

Essa plataforma de estudos em sistemas elétricos de potência é um software gráfico, gratuito, multiplataforma e de código aberto. A GUI (Graphical User Interface) atrelada às ferramentas CAD (Computer Aided Design) são bastante amigáveis e permitem que o usuário realize simulações com apenas alguns cliques. Por meio de ferramentas gráficas o usuário poderá criar qualquer rede elétrica, inserindo e editando elementos de potência[2]. Também é possível importar, criar e editar os controles das máquinas síncronas utilizando diagrama de blocos. Para a visualização de resultados, o programa possui elementos de texto na tela principal, tabelas e gráficos.

Um grupo gerador é composto por uma série de componentes, entre eles estão os reguladores de tensão e os reguladores de velocidade, que são equipamentos necessários para manter o controle da variação de tensão da máquina e do controle de velocidade do motor conectado ao gerador, respectivamente.

A seguir é mostrada com mais detalhes a definição desses componentes.

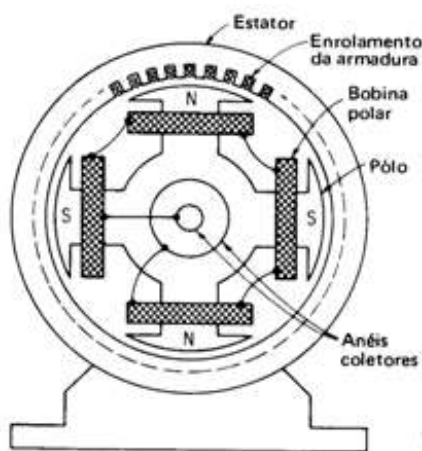
2.1 Gerador Síncrono

Compreender o funcionamento do gerador síncrono e a sua modelagem matemática é a primeira etapa para o estudo do desempenho dinâmico do gerador. Os geradores síncronos são máquinas de velocidade constante e proporcional à frequência da rede, sendo um dos tipos mais comuns de máquinas elétricas e a principal fonte de energia elétrica para os sistemas de potência[3].

A máquina síncrona é constituída pelo rotor, parte interna que é girante (formado pelo enrolamento de campo ou indutor), e pelo estator, parte externa que, conforme o nome sugere, é estática (formada pelo enrolamento induzido ou de armadura). O enrolamento de campo tem seus terminais conectados a dois anéis deslizantes, os quais são conectados através de escovas de carvão a uma fonte de corrente contínua exterior, para fornecer corrente elétrica ao enrolamento de campo. Ressalta-se que existem alternativas para se obter a excitação de campo sem o uso de escovas (sistema Brushless), porém o uso mais comum ainda é com escovas. Nos enrolamentos do estator são induzidas as tensões geradas para o sistema elétrico.

A figura 01 mostra uma representação esquemática de uma máquina síncrona de polos salientes, ressaltando as suas partes construtivas principais.

Figura 01 - Máquina síncrona de polos salientes.



Representação das partes construtivas de uma máquina síncrona de polos salientes.

Fonte: [4]

A) ESTATOR

O estator é a parte estática da máquina síncrona, é construída em volta do rotor, possui conjuntos de enrolamentos que ficam em ranhuras ao longo de toda a circunferência do mesmo. Pelo estator circula toda a energia elétrica gerada, sendo que tanto a tensão quanto a corrente elétrica que circulam são bastante elevadas em relação ao campo (rotor).

B) ROTOR

A função do rotor é produzir um campo magnético constante para "excitar" a máquina de forma que seja possível a indução de tensões nos terminais dos enrolamentos do estator. Do ponto de vista construtivo, o rotor pode ser de dois tipos, dependendo da existência de saliência ou não: rotores de polos lisos e rotores de polos salientes. As máquinas síncronas com rotores de polos lisos são geralmente empregadas em turbo geradores, com número de polos igual a 2 ou 4. Já os geradores síncronos com rotores de polos salientes são normalmente empregados com número de polos igual ou superior a 4, quando se deseja o uso para menores velocidades.

Como o rotor do gerador síncrono possui o seu eixo acoplado mecanicamente à máquina primária (turbina hidráulica/térmica, motor, etc), a qual possui uma velocidade definida, o campo magnético é movimentado pela velocidade do rotor (ω), e desta forma se torna variante no espaço. Segundo a lei de Faraday, uma força eletromotriz será induzida nos enrolamentos da armadura, devido à variação do campo magnético nos mesmos.

Sendo assim, a força eletromotriz induzida no enrolamento de cada fase do estator é dada pela equação abaixo.

$$e = N\Phi\omega\text{Sen}(\omega t)$$

Onde:

N = Número de espiras por fase.

Φ = Fluxo magnético de entreferro por polo (Wb).

ω = Velocidade de rotação (rad/s)

T = tempo (s).

De acordo com [5] e analisando a expressão acima, ressalta-se a grande dificuldade em trabalhar com esta equação da máquina síncrona, uma vez que o fluxo concatenado ($N \Phi$) varia no espaço e no tempo, pois o mesmo depende da posição angular do rotor, a qual está relacionada com uma referência fixa ao estator.

No PSP existem cinco modelos de máquinas síncronas, representadas em diferentes níveis de complexidade. O modelo é selecionado automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo usuário ao programa. Dentre os modelos disponíveis é possível representar tanto máquinas de polos salientes quanto de polos lisos, assim como a presença ou não de enrolamentos amortecedores. Para todos os modelos devem ser resolvidas as equações de oscilação das máquinas

síncronas, portanto é necessário resolver de duas a seis equações diferenciais por máquina síncrona, o que justifica a utilização de uma plataforma de simulação.

2.2 Reguladores de Tensão e Velocidade

A função dos controles de uma máquina síncrona é mantê-la funcionando em um determinado ponto de operação. Estes controles atuam de forma a garantir o suprimento contínuo de energia, mantendo a frequência e a tensão da máquina dentro dos limites aceitáveis pré-definidos[6].

Os principais sistemas de controle que atuam sobre a tensão de saída e a frequência dos geradores são:

Regulador Automático de Tensão (do inglês: Automatic Voltage Regulator – AVR) - Controle da excitação;

Regulador de velocidade (do inglês: Speed Governor – GOV) - Controle primário de velocidade.

2.2.1 Regulador de tensão

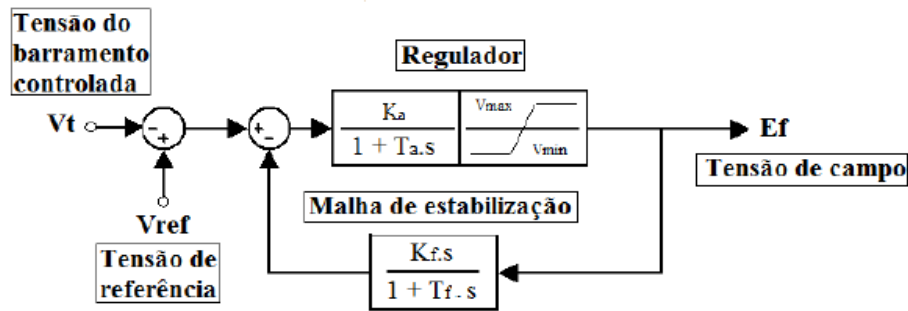
O Regulador Automático de Tensão tem a função de controlar a tensão terminal de uma máquina síncrona, com os seguintes objetivos: manter a tensão constante sob carga, prevenir sobre tensões após a rejeição de carga, melhorar a estabilidade sob carga e favorecer a estabilidade transitória do sistema elétrico [7].

Basicamente, o regulador deve monitorar a tensão terminal da máquina síncrona, durante todo o tempo, e compará-la com um valor de referência definido. O erro resultante dessa comparação é processado e enviado para a excitatriz, que por sua vez, fornecerá a corrente necessária para o ajuste da tensão terminal.

Nesse estudo é implementado os tipos de sistemas que controlam a excitação do gerador para verificar o comportamento da máquina frente a perturbações, com o uso do mesmo.

O modelo da figura 02, abaixo, representa a forma simplificada de regulador automático de tensão.

Figura 02 - Modelo simples do regulador automático de tensão.



Representação esquemática de um regulador automático de tensão.

Fonte: [5]

Observa-se na Figura 02 que o sinal proveniente da diferença da tensão terminal da máquina (V_t) e da tensão de referência (V_{ref}) é adicionada na função de transferência do regulador, essa função possui um ganho K_a e uma constante de tempo T_a , esse sinal passa também pelos limites de tensão máximo ($V_{máx}$) e mínimo ($V_{mín}$) do regulador.

Gera-se um sinal de amortecimento proveniente da tensão de saída da excitatriz E_f , esse sinal é aplicado ao campo da máquina síncrona, ou seja, a tensão da excitatriz é adicionada no enrolamento de campo do gerador (no rotor), esse mesmo sinal contribui na malha de realimentação indo novamente para o somador do regulador. Essa malha de realimentação, também chamada de malha de estabilização apresenta uma função de transferência com ganho K_f e constante de tempo T_f .

2.2.2 Regulador de velocidade

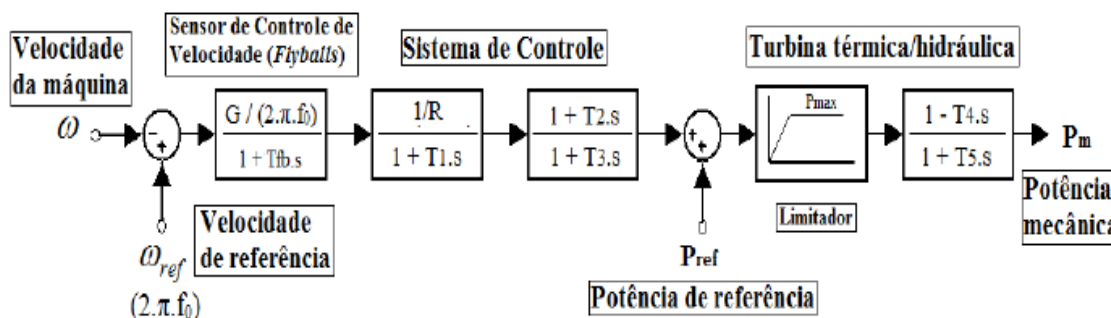
O regulador de velocidade trata-se de uma peça instalada junto ao motor do grupo gerador. Serve facilmente motores a diesel, tanto aqueles com funcionamento contínuo, como também alternados. Neste caso, o regulador de velocidade atende os geradores que são destinados como fonte auxiliar e fixa de energia. Ele pode ser mecânico ou hidráulico.

O regulador de velocidade tem como principal função controlar a velocidade da máquina pelo ajuste do suprimento de potência mecânica no eixo do gerador de acordo com a necessidade da carga e das variações de velocidade existentes.

Neste estudo é implementado tipos de reguladores de velocidade com modelos fornecidos pelo IEEE para analisar o comportamento da máquina frente a perturbações no sistema.

Na figura 03, abaixo, temos o modelo simplificado do regulador de velocidade.

Figura 03 - Modelo simples do regulador de velocidade.



Representação esquemática de um regulador de velocidade.

Fonte: [5]

Observa-se na Figura 03 que o sinal vindo da comparação da velocidade da máquina (ω) com a velocidade de referência (ω_{ref}) passa, a princípio, pela função de transferência do sensor de controle de velocidade, que possui um ganho G e constante de tempo T_{fb} . Depois, este sinal passa pela malha do sistema de controle, com “queda de velocidade” (R) e constantes de tempo do regulador (T_1 , T_2 e T_3). O sinal gerado na saída da malha de controle é somado à potência de referência. O resultado desta soma é aplicado no bloco que representa a função de transferência da turbina térmica/hidráulica, com constantes de tempo T_4 e T_5 e limites máximo e mínimo de potência mecânica. O sinal que sai do regulador de velocidade é usado no eixo do gerador com o objetivo de reduzir, elevar ou manter a velocidade do mesmo dentro dos limites estabelecidos para a estabilidade.

Ressalta-se que na representação do GOV utiliza-se T_4 igual a zero para os geradores conectados a turbina térmica e diferente de zero para as máquinas conectadas a turbina hidráulica, para considerar o efeito inicial, após a abertura das palhetas. Este efeito é uma queda de pressão na turbina hidráulica e uma variação negativa na sua potência, pois a pressão está sendo utilizada para acelerar a coluna de água [8]. Como resultado dessa situação, a variação inicial da turbina é oposta à variação final.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

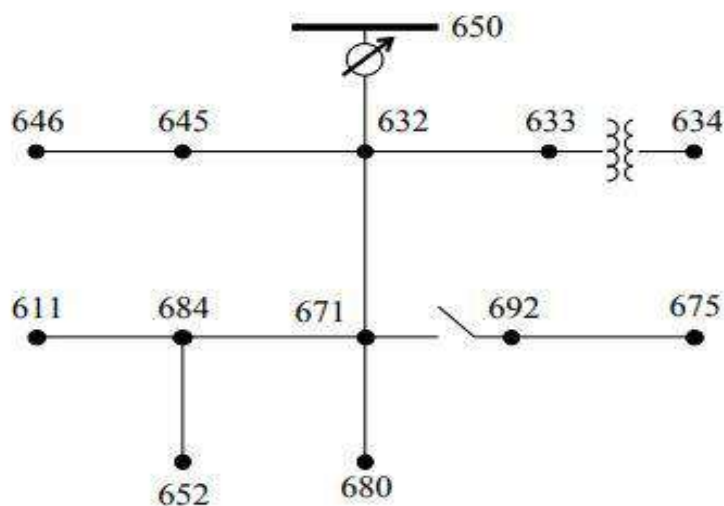
O método utilizado para realizar as análises das respostas do sistema em relação as interferências adicionadas, consiste em simulações realizadas no software PSP-UFU, é necessário que o usuário tenha os parâmetros e dados de entrada dos reguladores, geradores, transformadores, dados de linha e de barra, assim como dados de carga e potência nominal do sistema. Muitos desses parâmetros foram fornecidos por sites de fabricantes e precisaram ser convertidos para valores por unidade (pu) e em segundos (s) para serem inseridos no programa.

O sistema teste estudado é fornecido pelo Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE), que consiste em uma rede que possui 13 barras, originalmente, esse sistema é composto por um transformador, oito cargas uma chave seccionadora e dois capacitores, sendo visto na figura 04.

Para otimizar as análises foram adicionados na figura 04, três geradores com seus respectivos reguladores. Para representar o barramento infinito no PSP é necessário adicionar um “gerador infinito” na barra de referência do sistema, esse barramento é responsável por fornecer os valores de referência desse sistema mantendo-o rigorosamente estável. Para conectar esse barramento infinito ao sistema de distribuição foi necessário adicionar uma barra adicional para interligar o transformador que vai reduzir essa tensão do barramento infinito para valores da rede de distribuição, como representado na figura 05.

O sistema original teste do IEEE está representado na figura 04, abaixo.

Figura 04 – Sistema teste de 13 barras do IEEE.



Representação esquemática de um sistema elétrico com 13 barras.

Fonte: [1].

Após a implementação do sistema teste no PSP, definiu-se a potência dos geradores síncronos, onde determinou-se as potências dos geradores:

- **Gerador 1 - 2500 KVA -- Geradores 2 e 3 - 600KVA.**

Os dados adicionais como marca, modelo e outros dados são fornecidos pelos catálogos dos geradores e estão detalhados nas tabelas 02 e 03, abaixo.

Tabela 01 – Dados do gerador síncrono 1.

Informação	Dado
Modelo - Marca	AG10-400MI90FI - WEG
Potência - Ligação	2500 kVA - Estrela (Y)
Sistema de Excitação	Brushless com bobina auxiliar
Localização	Barra 652
Tensões	Trifásico 575 - 600 V
Inércia	0,5 s
Resistência de armadura (R_a)	0,84 [pu]
Reatância síncrona de eixo direto (x_d)	3,853 [pu]
Reatância síncrona de eixo em quadratura (x_q)	1,155 [pu]
Reatância transitória de eixo direto (x'_d)	0,243 [pu]
Reatância transitória de eixo em quadratura (x'_q)	0,243 [pu]
Constante de tempo transitório de eixo direto ($T'd_0$)	3,853 [s]
Constante de tempo transitório de eixo em quadratura (T'_{q0})	1 [s]
Polos (P)	4
Frequência (f)	60 [hz]

Dados do gerador 1 com sua respectiva localização no sistema.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 02 – Dados dos geradores síncronos 2 e 3.

Informação	Dado
Modelo - Marca	GTA311AIIH - WEG
Potência - Ligação	600 kVA - Estrela (Y)
Sistema de Excitação	Brushless com bobina auxiliar
Localização	Barras 646 e 671
Tensão	Trifásico 380 V
Inércia	0,341 s
Resistência de armadura (R_a)	0,031 [pu]
Reatância síncrona de eixo direto (x_d)	3,8578 [pu]
Reatância síncrona de eixo em quadratura (x_q)	1,5649 [pu]
Reatância transitória de eixo direto (x'_d)	0,2968 [pu]
Reatância transitória de eixo em quadratura (x'_q)	0,2968 [pu]
Constante de tempo transitório de eixo direto ($T'd_0$)	1,31022 [s]
Constante de tempo transitório de eixo em quadratura (T'_{q0})	1 [s]
Polos (P)	4
Frequência (f)	60 [hz]

Dados dos geradores 2 e 3 com sua respectiva localização no sistema.

Fonte: Autoria própria.

Os transformadores presentes nesse sistema tem a função de reduzir e elevar a tensão nas barras, conforme a necessidade da carga e do sistema.

Os dados de tensão, potência, resistência, reatância, conexão e localização dos transformadores, podem ser vistos abaixo.

Tabela 03 – Dados dos transformadores do sistema.

Informação	Trafo 01	Trafo 02	Trafo 03	Trafo 04	Trafo 05
Tensão nominal (KV)	138/13,8	380V/13,8	13,8/380V	13,8/600V	13,8/380V
Potência nominal (MVA)	100	10	10	10	10
Resistência (pu)	0,02	0,22	0,22	0,19	0,22
Reatância (pu)	0,16	0,4	0,4	0,33	0,33
Localização das barras	1 para 650	646 para 645	633 para 634	684 para 652	671 para 680

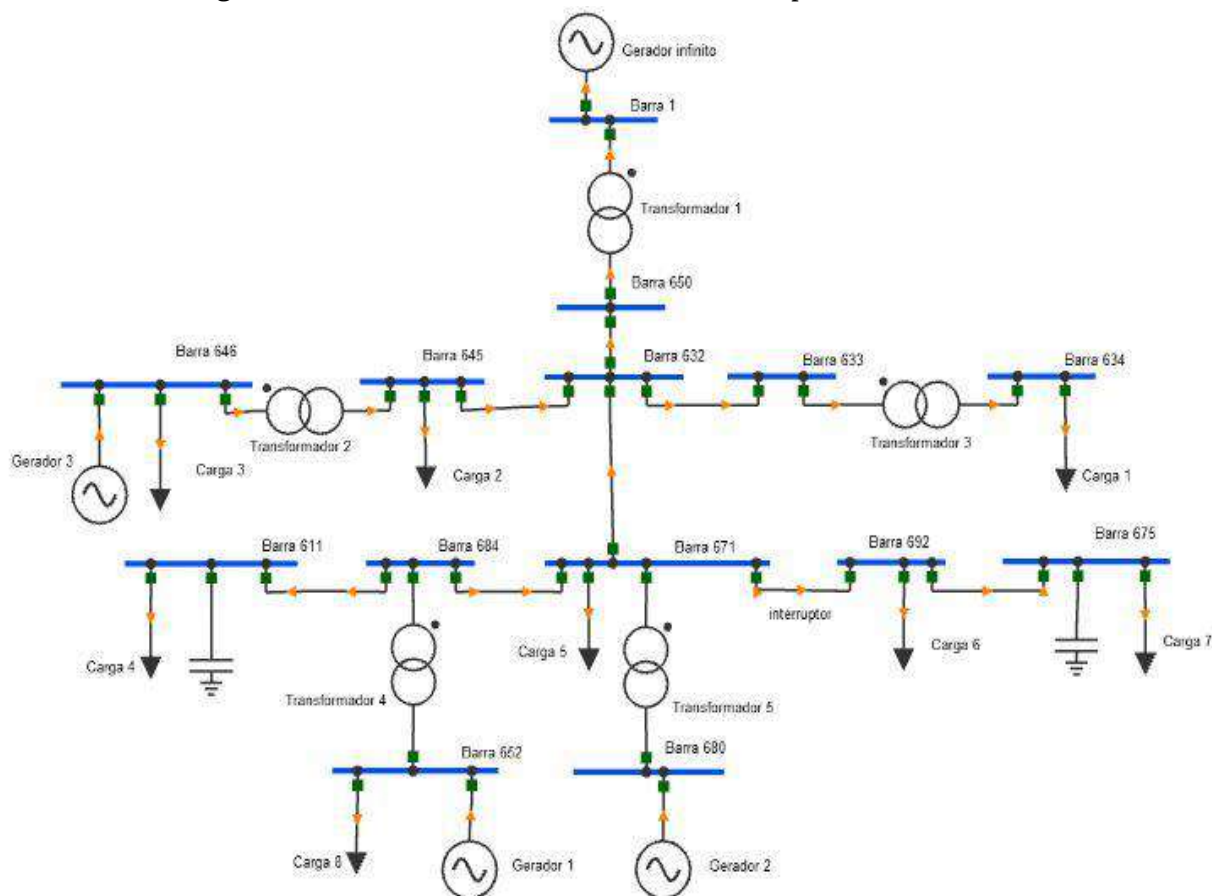
Dados dos transformadores do sistema de 13 barras.

Fonte: Autoria própria.

Adicionando-se os três geradores no sistema, conectados em seus respectivos transformadores, assim como os parâmetros de carga e linha do sistema, disponíveis nos anexos C e D, respectivamente e adicionando-se a barra adicional (barra 1), que interliga o barramento infinito ao sistema de distribuição, através do transformador, temos o sistema pronto para a realização das simulações.

O sistema implementado no PSP, com suas devidas parametrizações é representado na figura 05, abaixo.

Figura 05 – Sistema teste de 13 barras do IEEE implementado no PSP.



Sistema teste com 13 barras e seus componentes implementado no software PSP-UFU.

Fonte: Autoria própria.

No sistema implementado acima nota-se dois capacitores, o primeiro conectado na barra 611 de 100KVAR e o segundo conectado na barra 675 de 200 KVAR. Apesar de não serem o foco desse trabalho sabemos que os capacitores contribuem para melhorar o fator de potência (FP) e reduzir as perdas nas linhas de transmissão e distribuição de energia.

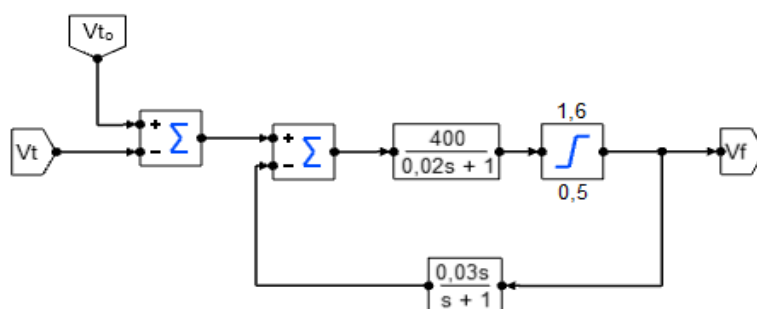
Após a parametrização dos geradores no sistema os mesmos já estão prontos para a implementação dos diferentes tipos de modelos dos reguladores de tensão e velocidade que serão abordados nesse estudo. Dentre esses controles internos da máquina estão os reguladores de tensão do **tipo I**, **tipo II**, **tipo DC1** e modelo **simplificado** e também os reguladores de velocidade para **turbinas hidráulicas** e **turbinas térmicas**.

A seguir são apresentados as características de cada modelo dos controles supracitados.

3.1 Dados dos Reguladores de Tensão (AVR - Automatic Voltage Regulator)

Foram usados quatro tipos de Reguladores de Tensão nas simulações. O primeiro é o Tipo Simplificado, onde se considera a impossibilidade de obter todos os dados da excitatriz e de saturação, podendo assim ser reduzido a um modelo mais simples. A implementação e os dados estão indicados na Figura 06.

Figura 06 – AVR modelo simplificado



Representação esquemática do AVR simplificado já implementado no PSP.

Fonte: Autoria própria.

Para melhor compreensão da composição do regulador de tensão simplificado, na tabela 04, abaixo, temos os dados do AVR de forma mais detalhada.

Tabela 04– Dados dos parâmetros do regulador tipo simplificado.

Informação	Dado
Frequência (f)	60 [Hz]
Tensão de referência (Vref)	1 [pu]
Ganho do regulador (Ka)	400 [pu]
Constante de tempo do regulador (Ta)	0,02 [s]
Ganho da malha de estabilização (Kf)	0,03 [pu]
Constante de tempo da malha de estabilização (Tf)	1,0 [s]
Limite de tensão mínimo do regulador (V _{mín})	0,5 [pu]
Limite de tensão máximo do regulador (V _{máx})	1,6 [pu]

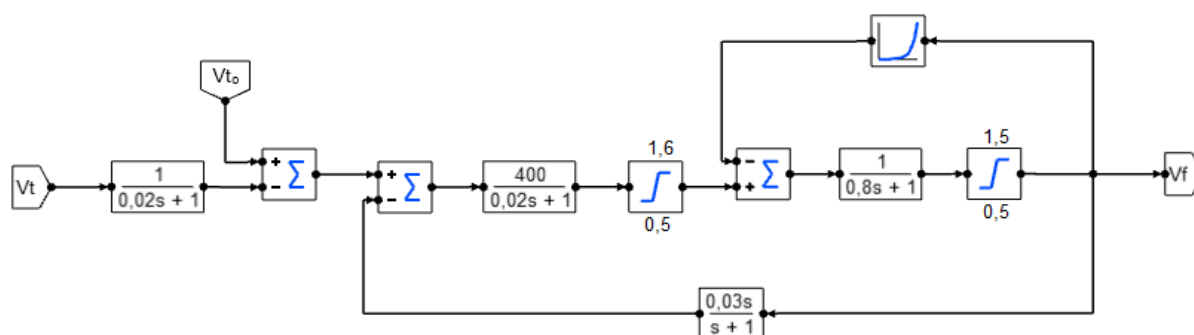
Dados dos parâmetros usados nos blocos do AVR tipo simplificado.

Fonte: Autoria própria.

O segundo é o IEEE Tipo 1, que é associado aos sistemas de excitação CC. O sinal de entrada é uma composição da tensão de referência Vto e da tensão terminal Vt somada com a tensão proveniente da malha de estabilização (realimentação), que modula a tensão de campo Vf para

prover o necessário amortecimento das oscilações. Os ganhos e as constantes de tempo estão associados ao bloco amplificador, enrolamento de campo do gerador CC, e ao circuito de realimentação estabilizante. O sinal de entrada da malha de realimentação sai da excitatriz. A implementação e os dados usados estão indicados na Figura 07.

Figura 07 – AVR modelo tipo I



Representação esquemática do AVR tipo I já implementado no PSP.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 05 – Dados dos parâmetros do regulador tipo I.

Informação	Dado
Frequência (f)	60 [Hz]
Tensão de referência (Vref)	1 [pu]
Ganho do regulador (Ka)	400 [pu]
Constante de tempo do regulador (Ta)	0,02 [s]
Ganho da excitatriz (Ke)	1,0 [pu]
Constante de tempo da excitatriz (Te)	0,8 [s]
Ganho da malha de estabilização (Kf)	0,03 [pu]
Constante de tempo da malha de estabilização (Tf)	1,0 [s]
Constante de tempo do filtro de entrada (Tr)	0,02 [s]
Limite de tensão mínimo do regulador (Vmín)	0,5 [pu]

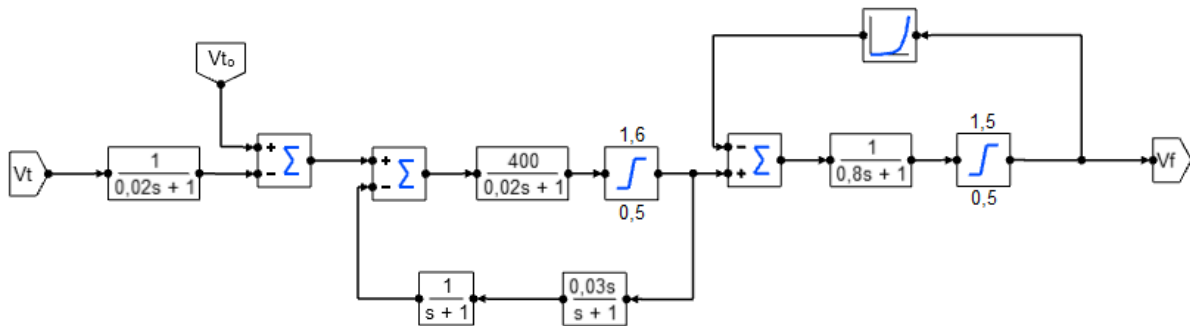
Limite de tensão máximo do regulador ($V_{m\acute{a}x}$)	1,6 [pu]
Limite mínimo da excitatriz ($E_{m\acute{i}n}$)	0,5 [pu]
Limite máximo da excitatriz ($E_{m\acute{a}x}$)	1,5 [pu]

Dados dos parâmetros usados nos blocos do AVR tipo I.

Fonte: Autoria própria.

O terceiro AVR é o IEEE Tipo 2, que é associado aos sistemas de excitação modernos com alto ganho e baixa constante de tempo. Ele aumenta os torques de sincronização e melhora a estabilidade transitória dos geradores. Entretanto, ganhos altos fazem que o amortecimento intrínseco dos geradores seja reduzido, conduzindo o sistema a problemas de estabilidade a pequenos sinais, devido ao baixo amortecimento das oscilações[6]. Diferentemente do modelo tipo 1, o sinal de entrada da malha de realimentação nesse caso está inserida na saída do gerador. A implementação e os dados usados estão indicados na Figura 08.

Figura 08 – AVR modelo tipo II



Representação esquemática do AVR tipo II já implementado no PSP.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 06 – Dados dos parâmetros do regulador tipo II.

Informação	Dado
Frequência (f)	60 [Hz]
Tensão de referência (V_{ref})	1 [pu]
Ganho do regulador (K_a)	400 [pu]
Constante de tempo do regulador (T_a)	0,02 [s]
Ganho da excitatriz (K_e)	1,0 [pu]
Constante de tempo da excitatriz (T_e)	0,8 [s]
Ganho da malha de estabilização (K_f)	0,03 [pu]
Constante de tempo da malha de estabilização (T_{f1})	1,0 [s]
Constante de tempo da malha de estabilização (T_{f2})	1,0 [s]

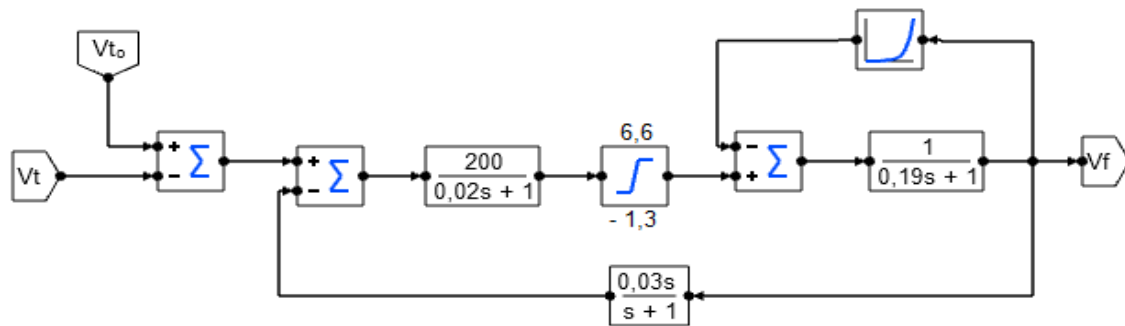
Constante de tempo do filtro de entrada (T_r)	0,02 [s]
Limite de tensão mínimo do regulador ($V_{\min}$)	0,5 [pu]
Limite de tensão máximo do regulador ($V_{\max}$)	1,6 [pu]
Limite mínimo da excitatriz ($E_{\min}$)	0,5 [pu]
Limite máximo da excitatriz ($E_{\max}$)	1,5 [pu]

Dados dos parâmetros usados nos blocos do AVR tipo II.

Fonte: Autoria própria.

O quarto é o IEEE Tipo DC1, cujo modelo utiliza geradores de excitatriz girante com comutador de corrente contínua (auto excitado ou com excitação independente) como fonte de alimentação do campo da máquina síncrona, o mais usado é o Gerador CC shunt auto excitado, embora poucas máquinas síncronas ainda utilizem esse tipo de excitatriz. A implementação e os dados usados estão indicados na Figura 09.

Figura 09 – AVR modelo tipo DC1



Representação esquemática do AVR tipo DC1 já implementado no PSP.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 07 – Dados dos parâmetros do regulador tipo DC1.

Informação	Dado
Frequência (f)	60 [Hz]
Tensão de referência (V_{ref})	1 [pu]
Ganho do regulador (K_a)	200 [pu]
Constante de tempo do regulador (T_a)	0,02 [s]
Ganho da excitatriz (K_e)	1,0 [pu]

Constante de tempo da excitatriz (T_e)	0,19 [s]
Ganho da malha de estabilização (K_f)	0,03 [pu]
Constante de tempo da malha de estabilização (T_f)	1,0 [s]
Limite de tensão mínimo do regulador ($V_{\min}$)	-1,3 [pu]
Limite de tensão máximo do regulador ($V_{\max}$)	6,6 [pu]

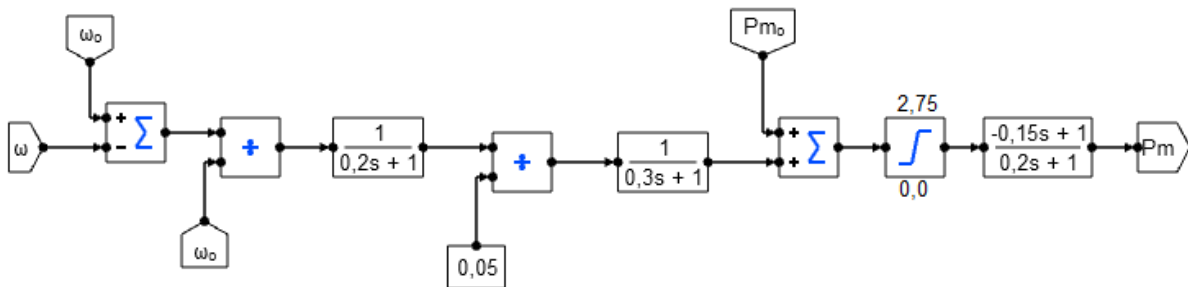
Dados dos parâmetros usados nos blocos do AVR tipo DC1.

Fonte: Autoria própria.

3.2 Dados dos Reguladores de Velocidade (GOV - Speed Governor)

Foram usados dois tipos de Reguladores de Velocidade, que definem a regulação primária da frequência do sistema. O primeiro é o modelo de GOV de turbinas hidráulicas, ele consiste em um sensor de velocidade (que produz um deslocamento mecânico proporcional à velocidade do rotor do conjunto turbina-gerador), amplificador de movimento (sua função é amplificar o deslocamento produzido pelo sensor, enquanto que a força do sensor é amplificada através de servomotores), controlador de carga-frequência (usado para modificar a referência de velocidade na operação em vazio), o amortecedor (para melhorar o desempenho transitório), sistemas de alavancas, etc. A implementação e os dados usados estão indicados na Figura 10.

Figura 10 – GOV modelo turbina hidráulica.



Representação esquemática do GOV para turbinas hidráulicas já implementado no PSP.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 08 – Dados dos parâmetros do regulador para turbinas hidráulicas.

Informação	Dado
Frequência (f)	60 [Hz]
Potência de referência (P_{ref})	1 [pu]
Constante de tempo do sensor de velocidade (T_{fb})	0,2 [s]

Ganho do sensor de velocidade (G)	1,0 [pu]
Constante de tempo do regulador (T1)	0 [s]
Constante de tempo do regulador (T2)	0 [s]
Constante de tempo do regulador (T3)	0,3 [s]
Constante de tempo da turbina hidráulica (T4)	-0,15 [s]
Constante de tempo da turbina hidráulica (T5)	0,2 [pu]
Queda de velocidade do regulador (R)	0,05 [pu]
Limite mínimo da Potência (Pmín)	0 [pu]
Limite máximo da Potência (Pmáx)	2,75 [pu]

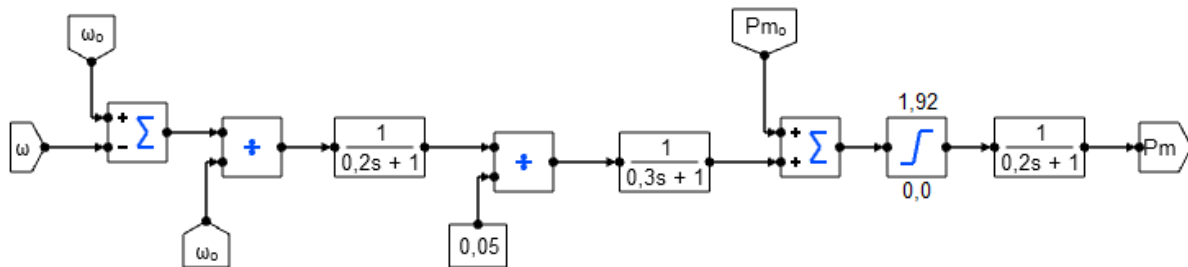
Dados dos parâmetros usados nos blocos do GOV hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

O segundo é o modelo de GOV das turbinas térmicas, o qual atua, assim como qualquer regulador de velocidade, no sentido de elevar ou reduzir a potência mecânica do grupo de geração, quando sua velocidade se afasta daquela de referência, além de realizar a correta distribuição de potência entre as máquinas de um sistema multi-máquinas. Contribui também na melhoria da resposta do sistema quando há aumento ou rejeição de carga, para que o sistema permaneça estável.

A implementação e os dados usados estão indicados na Figura 11.

Figura 11 – GOV modelo turbina Térmica.



Representação esquemática do GOV para turbinas térmicas já implementado no PSP.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 09 – Dados dos parâmetros do regulador para turbinas térmicas.

Informação	Dado
Frequência (f)	60 [Hz]
Potência de referência (Pref)	1 [pu]
Constante de tempo do sensor de velocidade (Tfb)	0,2 [s]
Ganho do sensor de velocidade (G)	1,0 [pu]
Constante de tempo do regulador (T1)	0 [s]
Constante de tempo do regulador (T2)	0 [s]
Constante de tempo do regulador (T3)	0,3 [s]

Constante de tempo da turbina hidráulica (T4)	Não se aplica
Constante de tempo da turbina hidráulica (T5)	0,2 [pu]
Queda de velocidade do regulador (R)	0,05 [pu]
Limite mínimo da Potência (P _{mín})	0 [pu]
Limite máximo da Potência (P _{máx})	1,92 [pu]

Dados dos parâmetros usados nos blocos do GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

3.3 Considerações Finais do Capítulo

Esse capítulo teve como objetivo apresentar o sistema teste usado como base para as simulações, e suas adequações para que o sistema se mostrasse mais eficaz para esse estudo. Foi adicionado a esse sistema teste três geradores síncronos e quatro transformadores.

Os parâmetros originais de linha e carga foram mantidos e seus valores estão disponíveis no apêndice deste trabalho.

Foi apresentado nesse capítulo os diferentes modelos de reguladores de tensão e dos reguladores de velocidade, assim como seus aspectos construtivos, mostrando-se os dados internos desses controles em tabelas e representando-os por blocos.

É necessário para a realização das simulações no software PSP-UFU, que o usuário esteja com os valores do sistema parametrizados, os dados fornecidos do sistema de 13 barras do IEEE, não estão estabelecidos nas unidades brasileiras, precisando ser convertidos para as unidades usadas no nosso sistema. Os dados de entrada usados nas simulações estão em pu (por unidade) e em segundos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a implementação de todos os parâmetros necessários para a realização das simulações o software está pronto para analisar como o sistema responde as perturbações com o uso dos reguladores de tensão e de velocidade nos geradores síncronos.

Para que pudesse comparar como o sistema se comporta de acordo com o barramento infinito e seus controles, decidiu-se que fosse simulado uma rede fraca e outra mais robusta, pois a rede robusta contribui para manter os geradores estáveis trabalhando em conjunto com os reguladores, sendo assim, menos perceptível a atuação desses controles internos da máquina, por si só. Já na rede fraca não há essa contribuição do barramento infinito, sendo mais notório a participação dos reguladores.

Os resultados das simulações serão discutidos com base na divisão abaixo:

REDE FORTE

- I. Curto-circuito trifásico com duração de 2 segundos na Barra 646.
- II. Curto-circuito trifásico com duração de 4 segundos na Barra 646.
- III. Curto-circuito trifásico com duração de 4 segundos na Barra 675.
- IV. Aumento brusco de carga na barra 675.

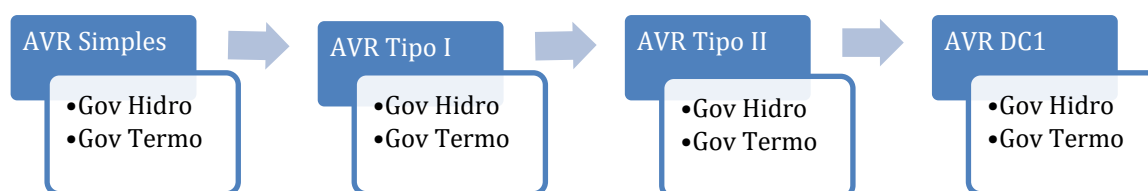
REDE FRACA

- I. Curto-circuito trifásico com duração de 2 segundos na Barra 646.

- II. Curto-circuito trifásico com duração de 0,3 segundos na Barra 646.
- III. Aumento brusco de carga na barra 675.
- IV. Perda do gerador 3 na barra 646.

Para cada tópico acima tanto da rede forte e da rede fraca foram feitos oito combinações de AVR e GOV, para serem usados as simulações, conforme figura abaixo:

Figura 12 – Combinações dos reguladores para a simulação.



Combinações de AVR e GOV que serão usadas em cada simulação.

Fonte: Autoria própria.

4.1 Simulação do Sistema 01 – REDE FORTE

A definição de um barramento infinito consiste em um sistema que mantém tensão e frequência rigorosamente constantes, ou seja, não permite que esses parâmetros do sistema tenham variações bruscas em seus valores, é o que estabelece valores de referência para o sistema.

Um sistema para ser denominado forte precisa ter a capacidade de manter sua tensão quando ocorrem curtos-circuitos em outras barras do sistema elétrico. Como esse sistema é proporcional a potência de curto-circuito (S_{cc}), quanto maior for esse valor mais forte a rede será.

Na simulação do sistema forte usado nesse estudo, definiu-se que o gerador infinito fosse configurado com potência de 100 MVA e inércia de 9999 segundos. A resposta dos controles para esse sistema estão descritos a seguir.

I. Curto-circuito trifásico com duração de 2 segundos na Barra 646.

Nessa primeira simulação a barra escolhida para a análise é a barra 646, nessa barra está conectada o gerador 3 que possui potência de 600KVA, responsável por 16% do fornecimento de energia somando os três geradores. É importante ressaltar que dois segundos para duração de um curto-circuito em um sistema real, causaria grandes danos para rede, ressaltando que a proteção do sistema atua na ordem de milissegundos, portanto essa duração foi escolhida nesse estudo para determinar a influência dos reguladores de forma mais significativa, visto que a rede forte contribui para a melhoria dessa resposta, principalmente para esse tempo menor de duração curto.

Aplicada a falta com duração de 2 segundos a tensão na barra vai a zero e consequentemente a tensão do gerador 3 também é zerada. A tensão dos geradores 1 e 2 sofrem queda de cerca de 70% do seu valor inicial durante o período do curto-circuito, apesar disso pode-se perceber que logo após o início da falta os controles já atuam estabilizando a tensão e a frequência desses geradores. Logo que o curto-circuito termina os reguladores conseguem fazer com que os parâmetros iniciais de estabilidade retornassem, sendo assim a tensão e a frequência reestabelecidas após alguns segundos, como mostram as figuras 13 e 14.

Todas as combinações de reguladores foram utilizadas nessa simulação de falta e todos demonstraram um bom desempenho para reestabelecer os parâmetros iniciais do sistema. Mesmo para o regulador de tensão cujo o modelo é o mais simples (modelo simplificado), obteve uma boa resposta, é importante também reconhecer que os geradores possui ajuda do barramento infinito que é muito forte, conseguindo contribuir junto aos controles na melhoria da tensão, como é mostrado na Figura 13.

Portanto os reguladores conseguem atuar de forma que a tensão, frequência e ângulo delta nos três geradores voltem ao seu valor de estabilidade no sistema.

Figura 13 – Tensão terminal dos geradores.

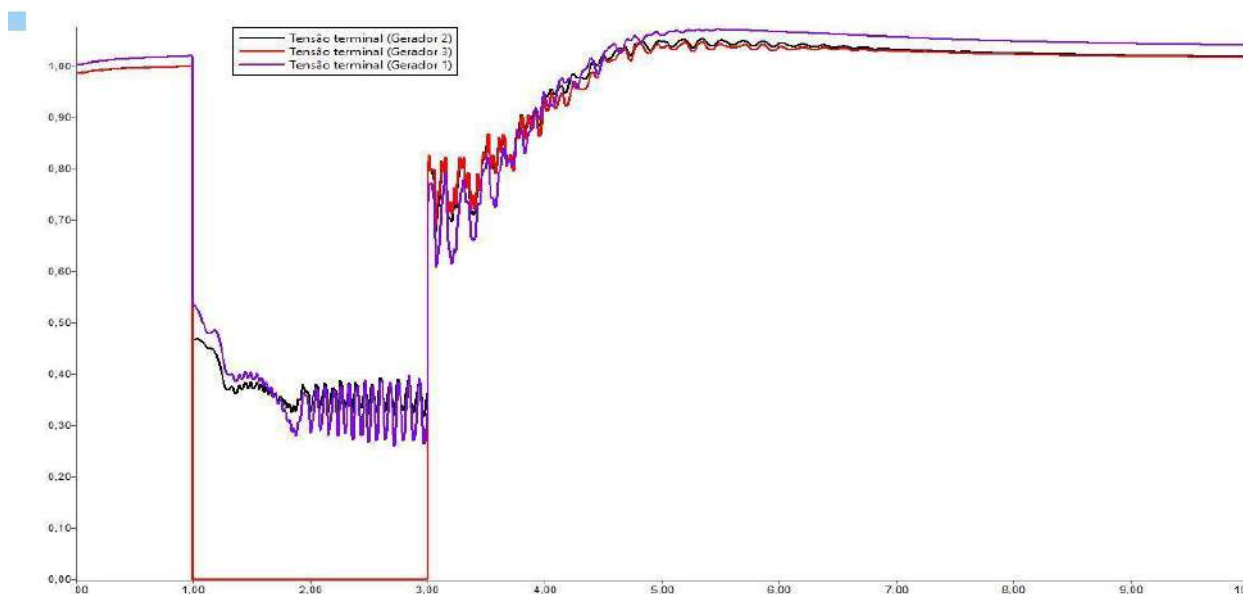


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

A figura 13 acima, representa o comportamento da tensão com o uso do regulador de tensão do tipo simplificado e com o regulador de velocidade hidráulico. Para essa mesma situação, temos na figura 14, abaixo, o comportamento da frequência, podemos notar que, mesmo com grandes oscilações (da ordem de 55% a mais da frequência nominal), durante a falta, os reguladores atuam conseguindo reestabelecer a frequência ao valor de referência em aproximadamente 4 segundos após o final da falta, como pode ser observado a seguir.

Figura 14 – Frequência dos geradores

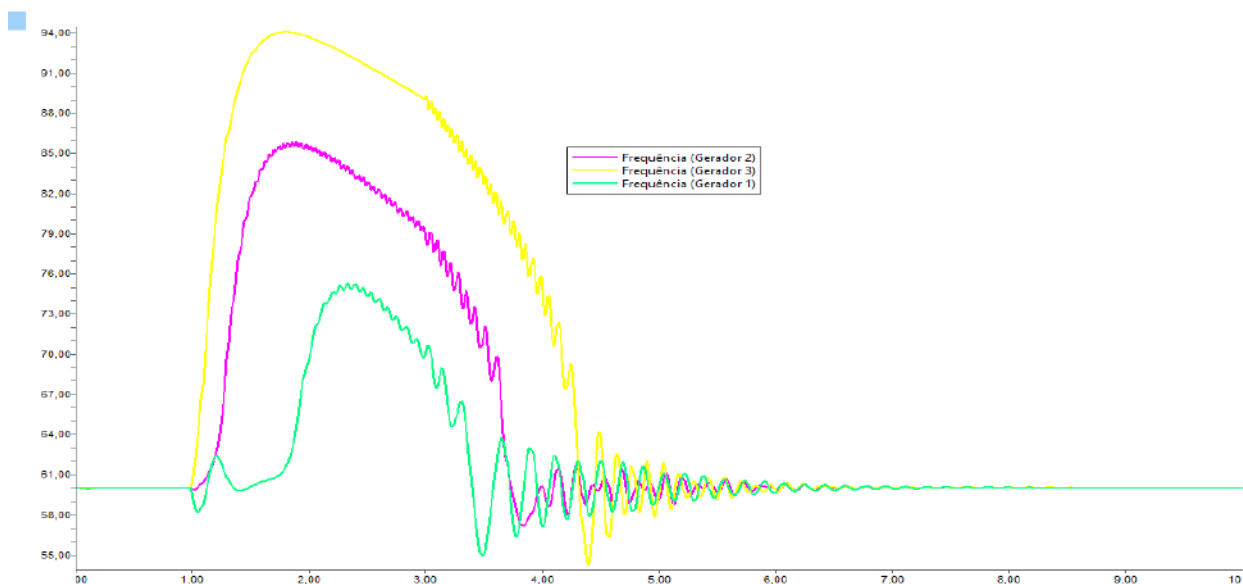


Gráfico da Frequência dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

O valor do ângulo delta (α) é relevante nesse estudo por que ele corresponde ao ângulo do campo indutor e o campo resultante do entreferro, a variação desse ângulo corresponde ao comportamento da máquina em relação a f.e.m (excitação) e ao valor de tensão de referência (tensão da rede). Caso $\alpha > 0$ a tensão de excitação está adiantada em relação a tensão do barramento, o que define a máquina operando como um gerador, se o $\alpha < 0$ a tensão de excitação está atrasada em relação a tensão da rede e portanto a máquina está operando como um motor. Por ser um ângulo proporcional a excitação e ao torque do gerador, sua análise permite determinar também se há o fornecimento ou recebimento de potência ativa e reativa entre máquina e rede.

É possível notar na figura 15 abaixo que o valor do ângulo delta muda após a falta, não voltando para seu valor inicial, isso acontece porque esse ângulo está em relação ao ângulo de referência de uma máquina hipotética com velocidade constante igual a síncrona. Por esse motivo, o valor de delta varia para quaisquer condições de frequência da máquina diferente da síncrona, como no evento de curto-circuito. Essa variação somente irá cessar quando a máquina retornar para sua frequência nominal (60Hz) e o valor de delta pode assumir montantes elevados de acordo com a amplitude imposta pela perturbação.

Figura 15 – Ângulo delta dos geradores

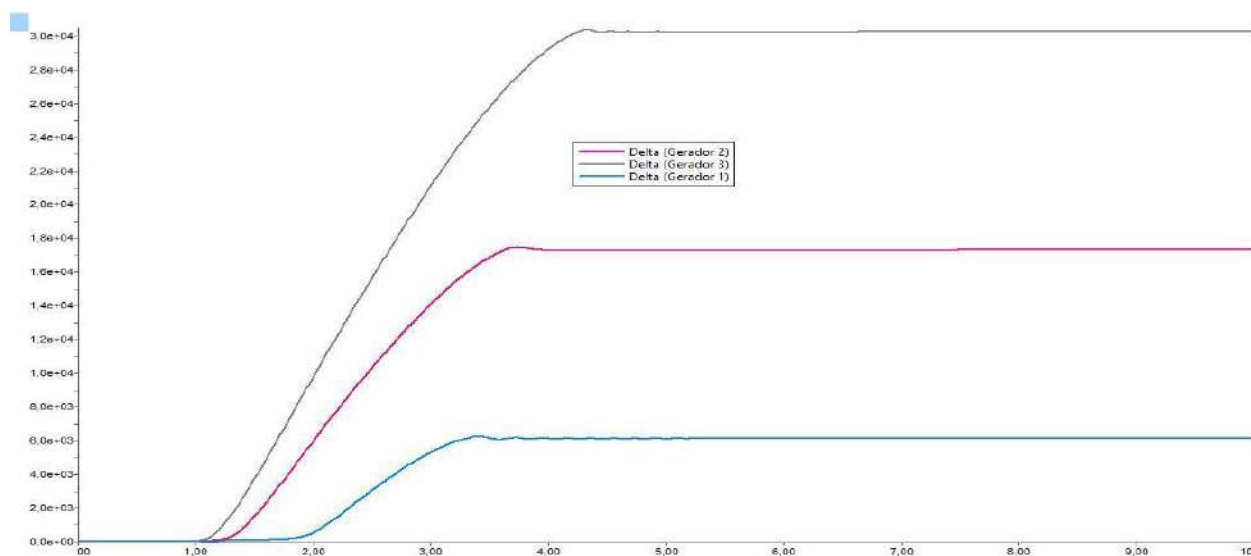


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Após feito a simulação para o tipo de AVR simplificado e GOV Hidro discutido anteriormente, foram feitas as outras combinações dos reguladores e o comportamento da tensão (Figura 13), frequência (Figura 14) e delta (Figura 15) foram semelhantes para o tipo I e II, resalta-

se que para o regulador de tensão tipo DC1 houve uma diminuição na queda de tensão com oscilações menores de frequência, se comparado aos outros modelos citados acima, isso pode ser justificado por que a constante de tempo da malha da excitatriz quando menor que a constante de tempo da malha de regulação apresenta melhor eficiência de controle em relação à manutenção da estabilidade de tensão do que no controle da velocidade[9], o tipo DC1 apresenta a menor constante de tempo em relação aos demais reguladores, e essa influência pode ser vista nas figuras 16 e 17, abaixo.

Figura 16 – Tensão terminal dos geradores.

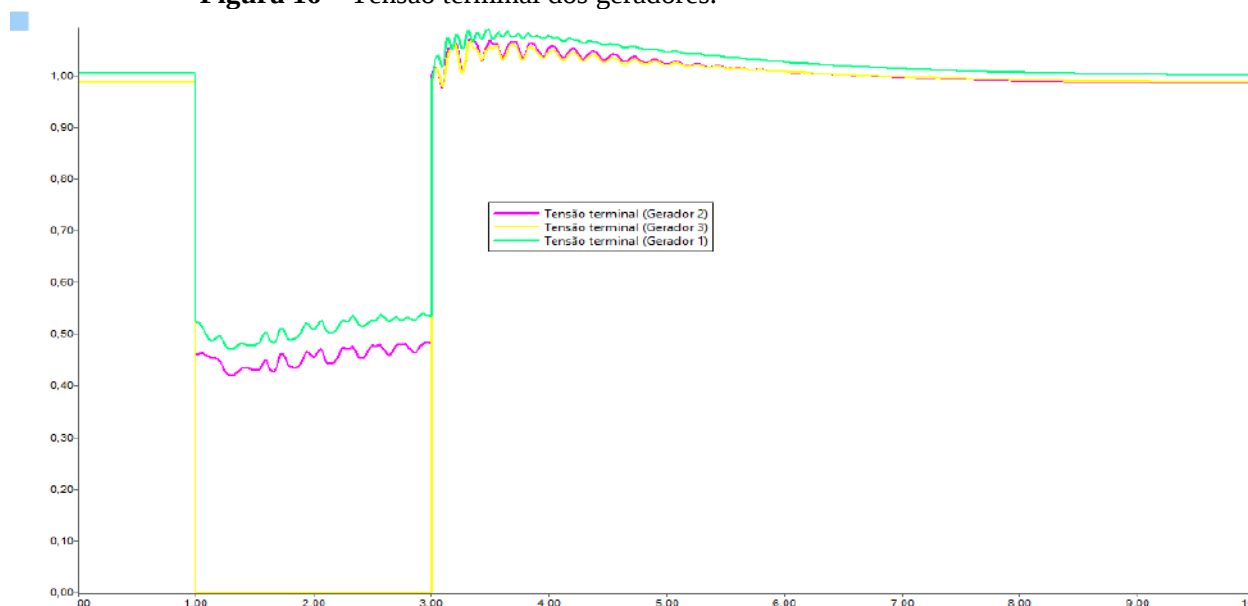


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR tipo DC1 e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 17 – Frequência dos geradores.

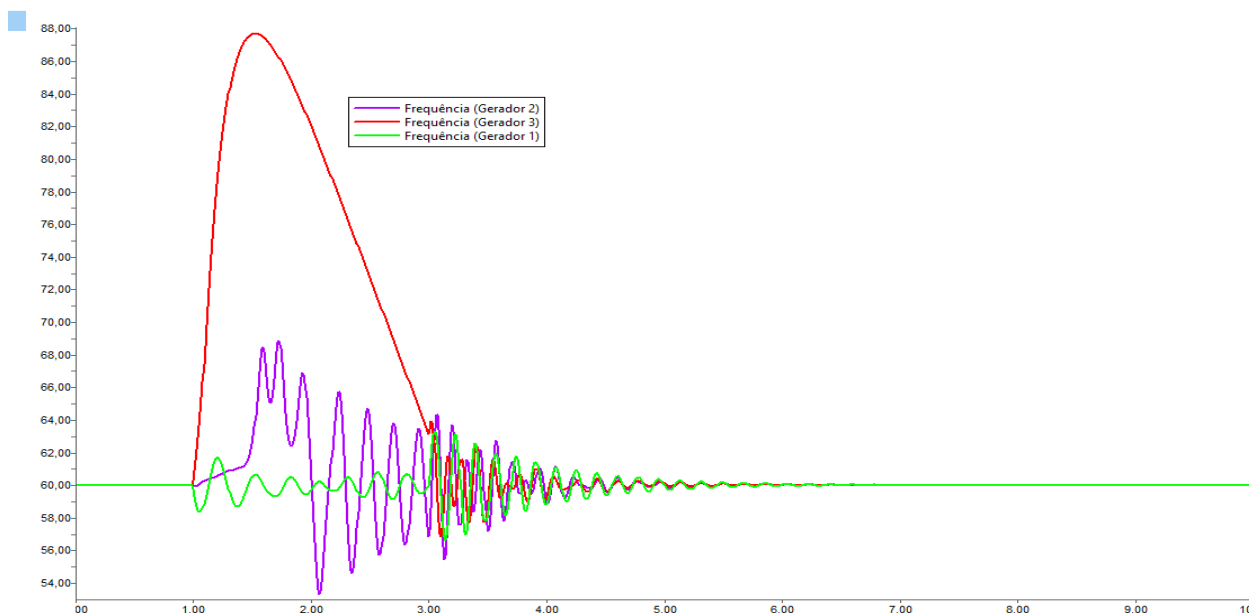


Gráfico da Frequência dos geradores para o AVR tipo DC1 e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Para os reguladores de tensão tipo simplificado, tipo I e tipo II em conjunto com o regulador de velocidade **termoelétrico** a tensão apresentou comportamento semelhante ao regulador de velocidade hidráulico. Porém quando em conjunto com o regulador de tensão tipo DC1, o mesmo não consegue fazer com que o gerador 3 volte para seu valor de estabilidade, isso por que no caso de reguladores para turbinas térmicas não há a contribuição da constante de tempo T_4 , além do tipo DC1 diminuir essa contribuição para a melhoria da estabilidade da velocidade, isso pode ser observado nas figuras 18 e 19.

Figura 18 – Frequência dos geradores.

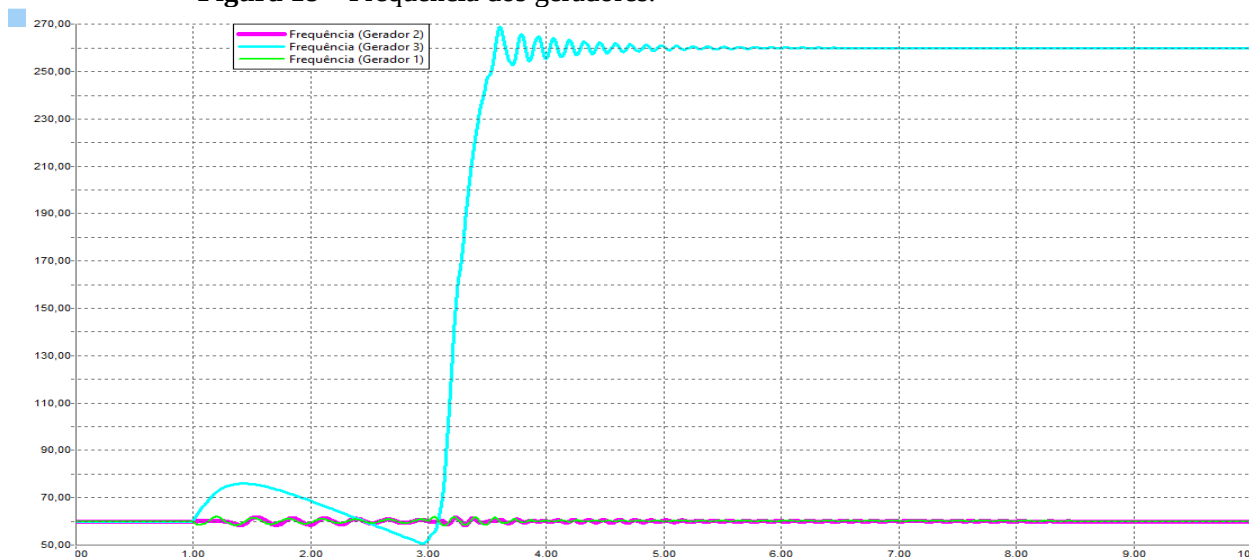


Gráfico da Frequência dos geradores para o AVR tipo DC1 e GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Ângulo delta dos geradores

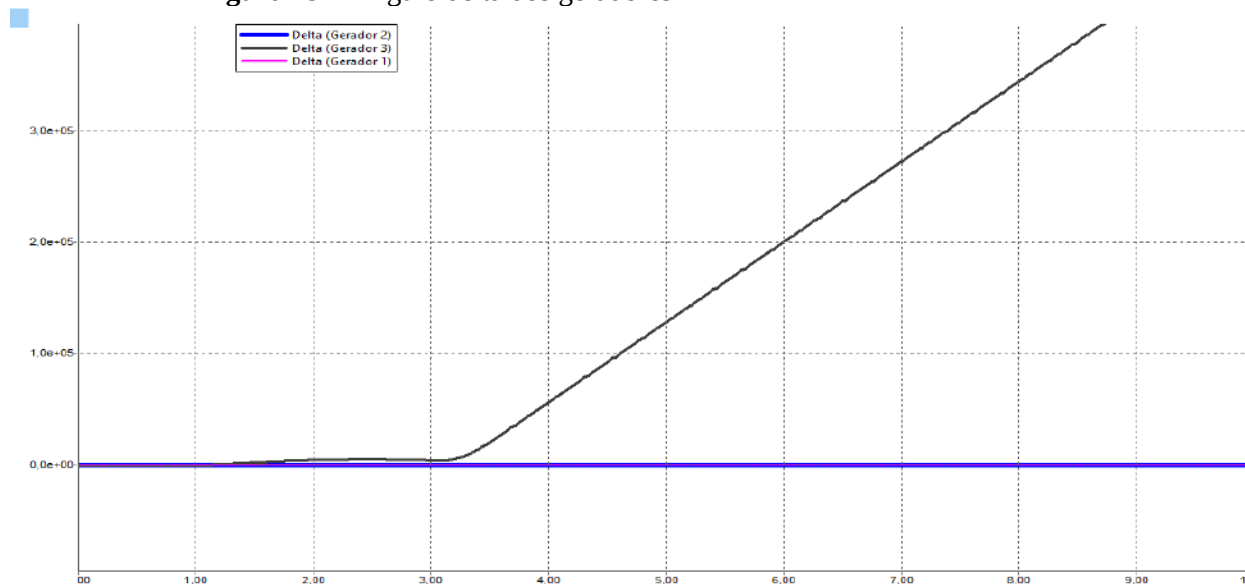


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR tipo DC1 e GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

II. Curto-circuito trifásico com duração de 4 segundos na Barra 646.

Os resultados foram semelhantes ao curto-circuito de 2s, mesmo dobrando o tempo de duração da falta os reguladores conseguem atuar de forma a reestabelecer a estabilidade pós falta.

As figuras 20, 21 e 22 mostram respectivamente o comportamento da tensão, frequência e ângulo delta do caso II.

Figura 20 – Tensão terminal dos geradores.

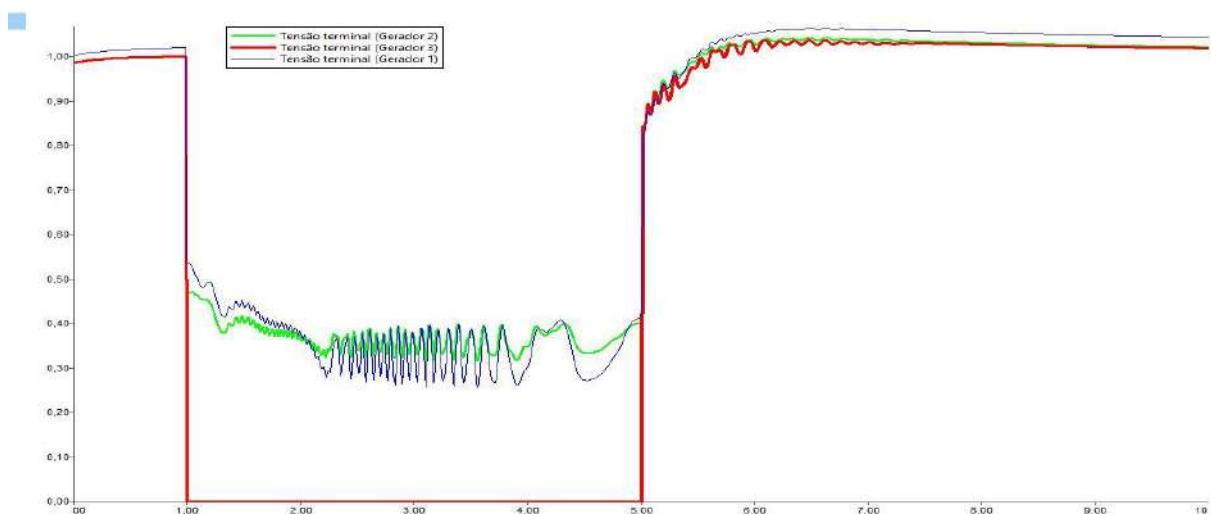


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Frequência dos geradores.

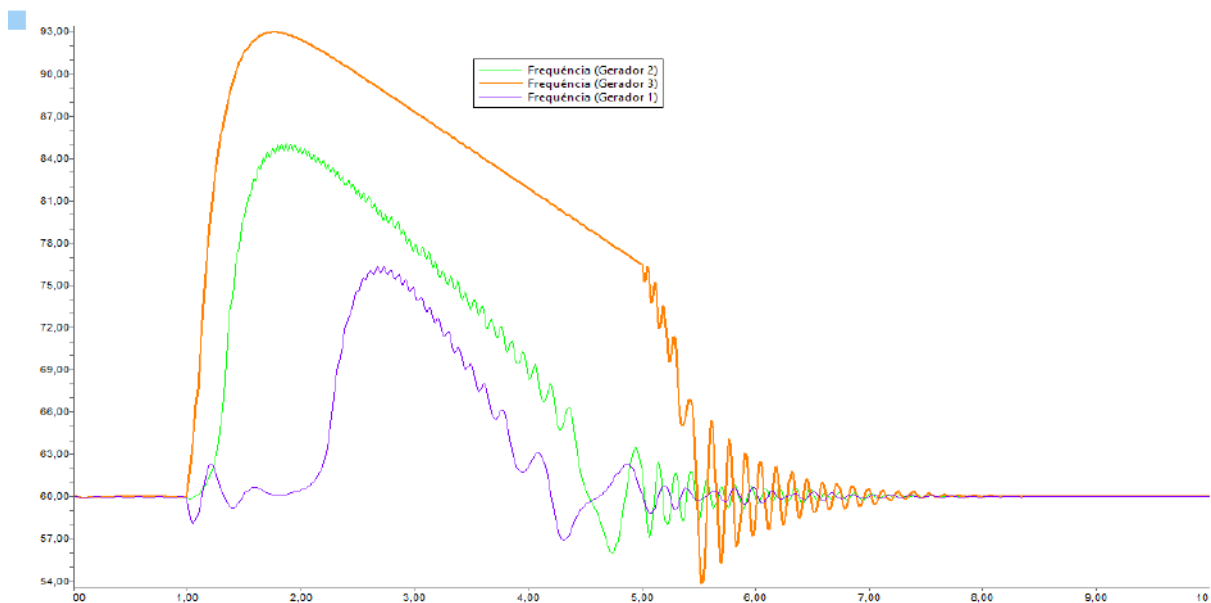


Gráfico da Frequência dos geradores para o AVR tipo Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 22 – Ângulo delta dos geradores.

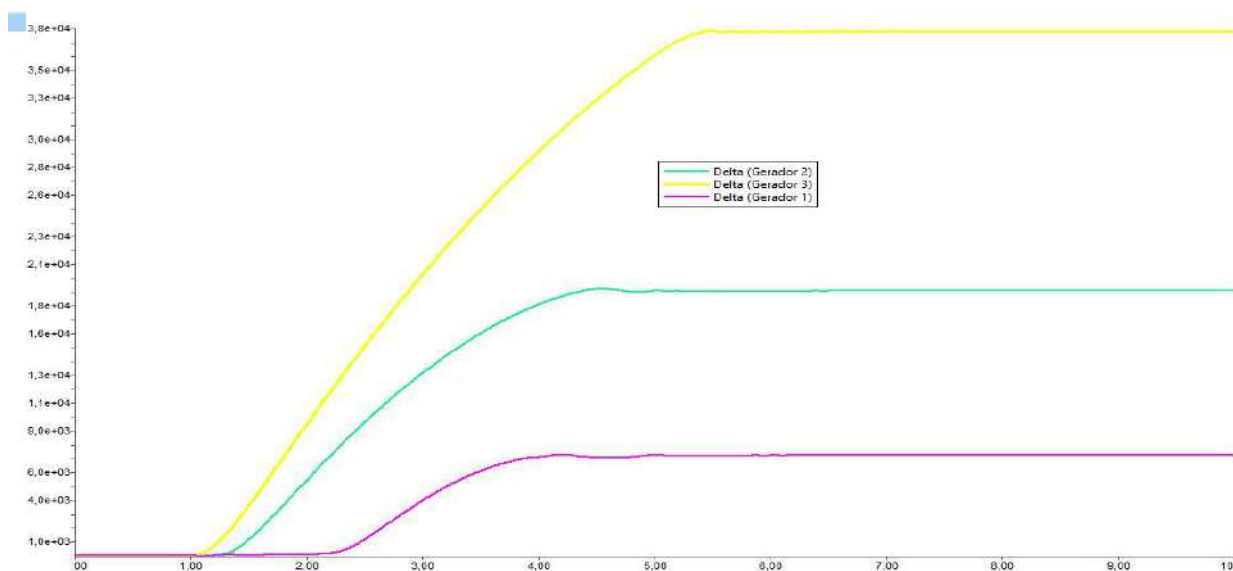


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

O Gerador 3, assim como no caso I com o DC1 em conjunto com o regulador tipo termoeletrico saiu de sincronismo, como visto nas figuras 23 e 24.

Figura 23 – Frequência dos geradores.

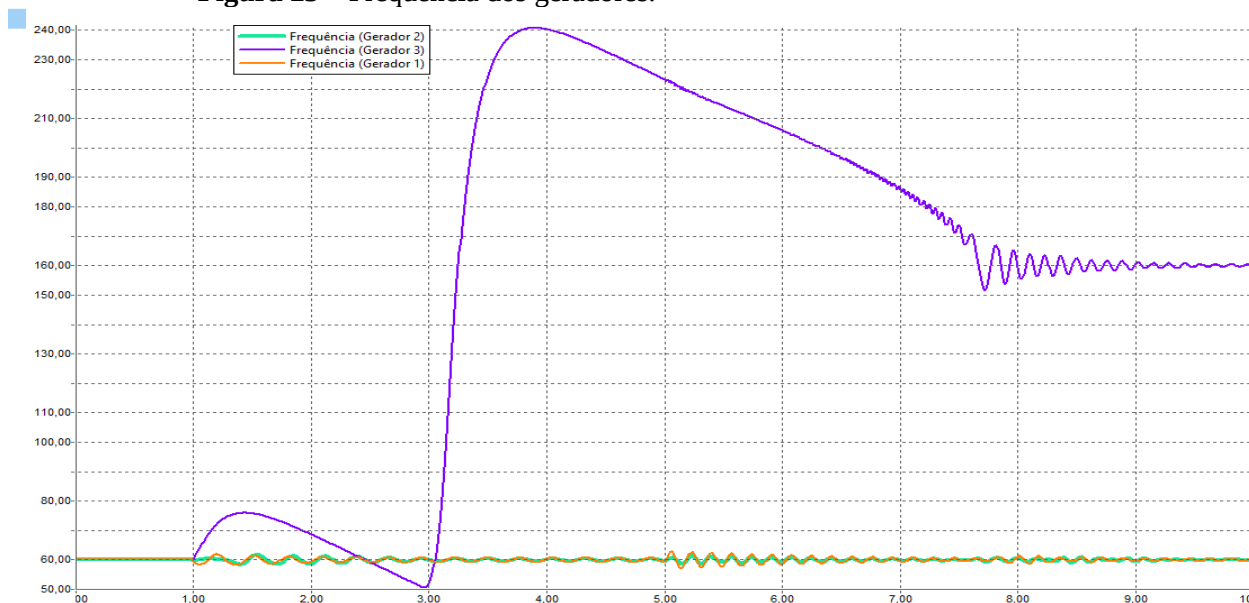


Gráfico da Frequência dos geradores para o AVR tipo DC1 e GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Ângulo delta dos geradores

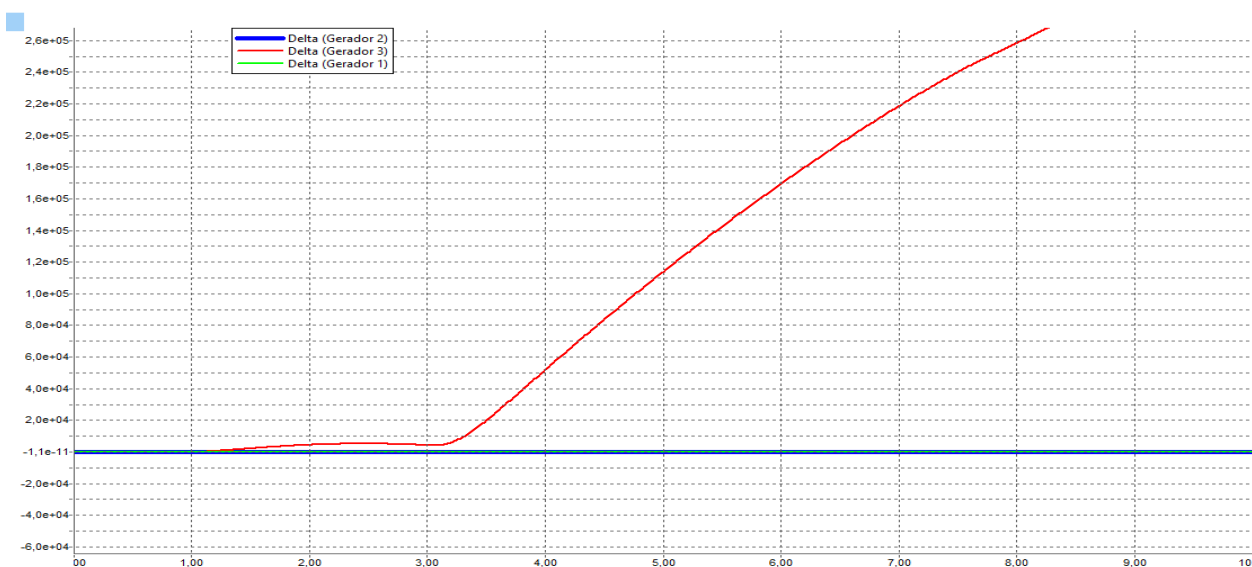


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR tipo DC1 e GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

III. Curto-circuito trifásico com duração de 4 segundos na Barra 675.

As simulações anteriores visavam incluir perturbações na barra onde estava inserido o gerador 3, para esse caso escolhesse-se a barra 675 por não possuir nenhum gerador, é uma barra que tem conectada a ela uma carga cuja potência ativa é igual a 68KW e potência reativa igual a 60 KVA_r, espera-se para esse caso, observar como os reguladores se comportam quando há essa perda de demanda no sistema. As figuras 25, 26 e 27 abaixo, mostram a resposta do sistema em relação a tensão, frequência e ângulo delta.

Figura 25 – Tensão terminal dos geradores.

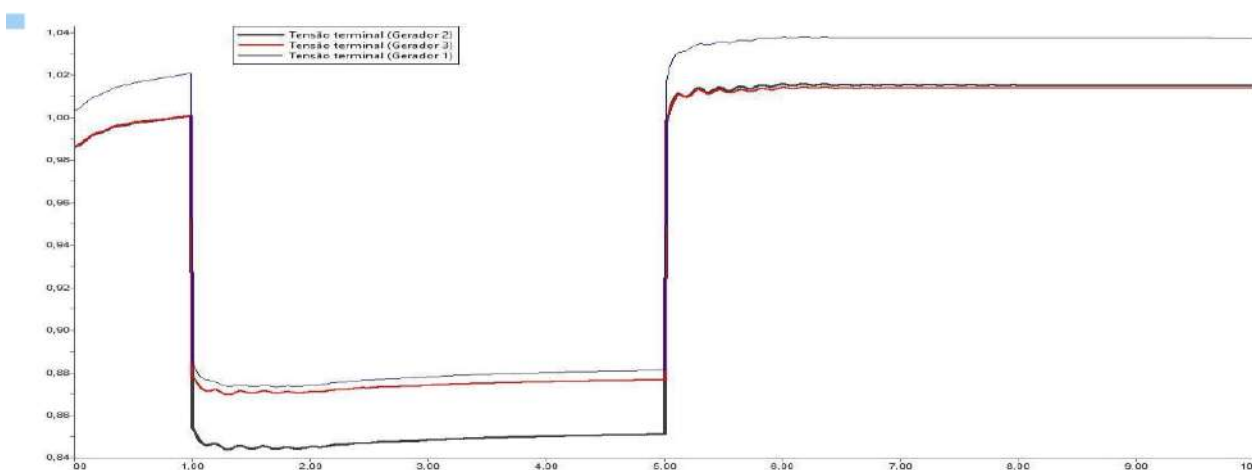


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Frequência dos geradores.

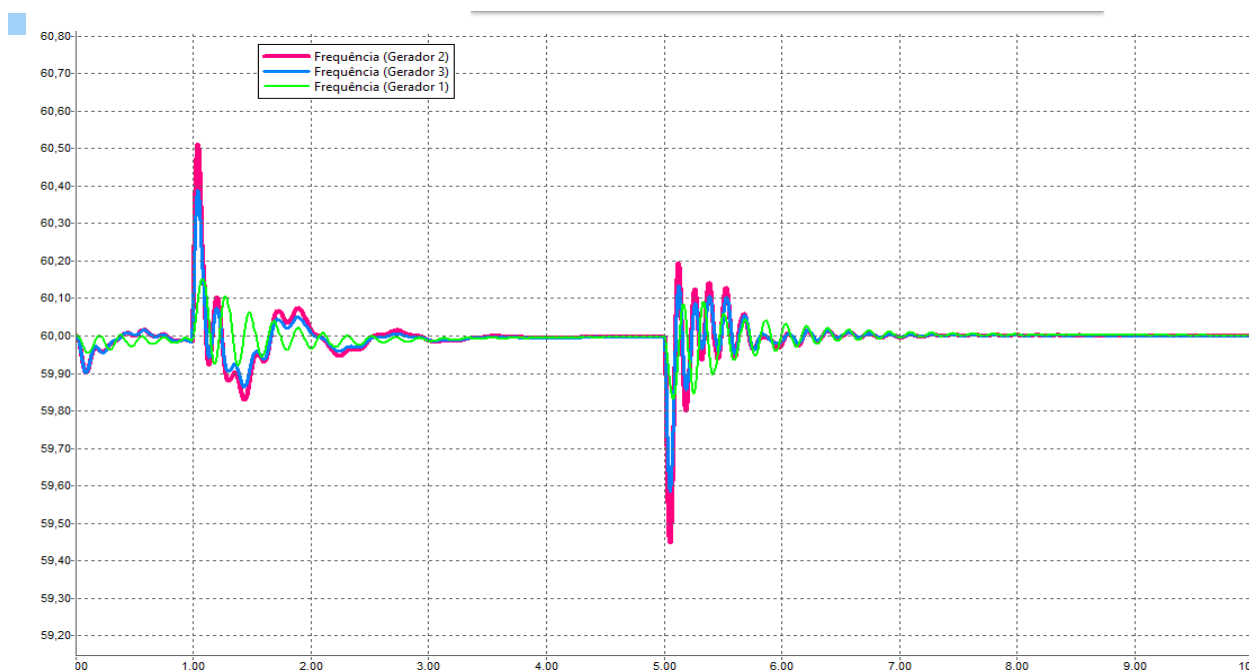


Gráfico da Frequência dos geradores para o AVR tipo Simplificado e GOV Hidráulico.
Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Ângulo delta dos geradores

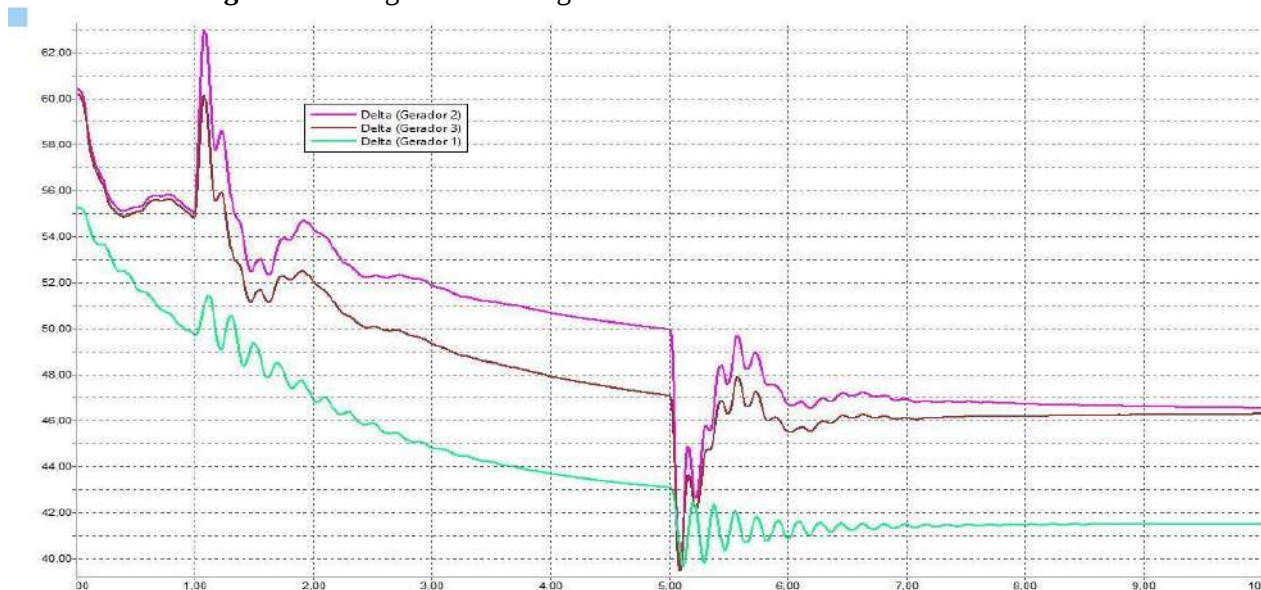


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.
Fonte: Autoria própria.

O comportamento do ângulo delta mostra que a tensão de excitação da máquina a princípio, antes da falta, está próxima da tensão de referência, assim que se inicia a falta nota-se o aumento

desse ângulo, isso demonstra que a tensão de excitação aumentou em relação a tensão de referência, visto que a carga se desconectou do sistema abruptamente, durante a falta os reguladores controlam essa excitação, estabilizando o ângulo, logo que a falta termina a carga se conecta novamente no sistema, fazendo com que esse ângulo diminua, demonstrando que a tensão de excitação está menor que a tensão de referência, nesse caso novamente os reguladores atuam para estabilizar essa variação.

Pelos gráficos mostrados acima, nota-se que a queda de tensão dos geradores reduziu consideravelmente comparando-se ao caso I e II, visto que nenhum gerador foi desconectado do sistema. As oscilações de tensão, frequência e ângulo delta foram suavizadas e pelo tempo muito grande de duração da falta, percebe-se que a frequência e o delta conseguiram manter valores bem próximos da estabilidade depois de 2 segundos do início da falta.

Nenhum gerador saiu de sincronismo para esse caso, mesmo o tipo DC1 combinado com o GOV Térmico, como nos casos anteriores. Para esse caso o regulador tipo DC1 apresentou as melhores respostas de eficiência em relação as oscilações do gerador.

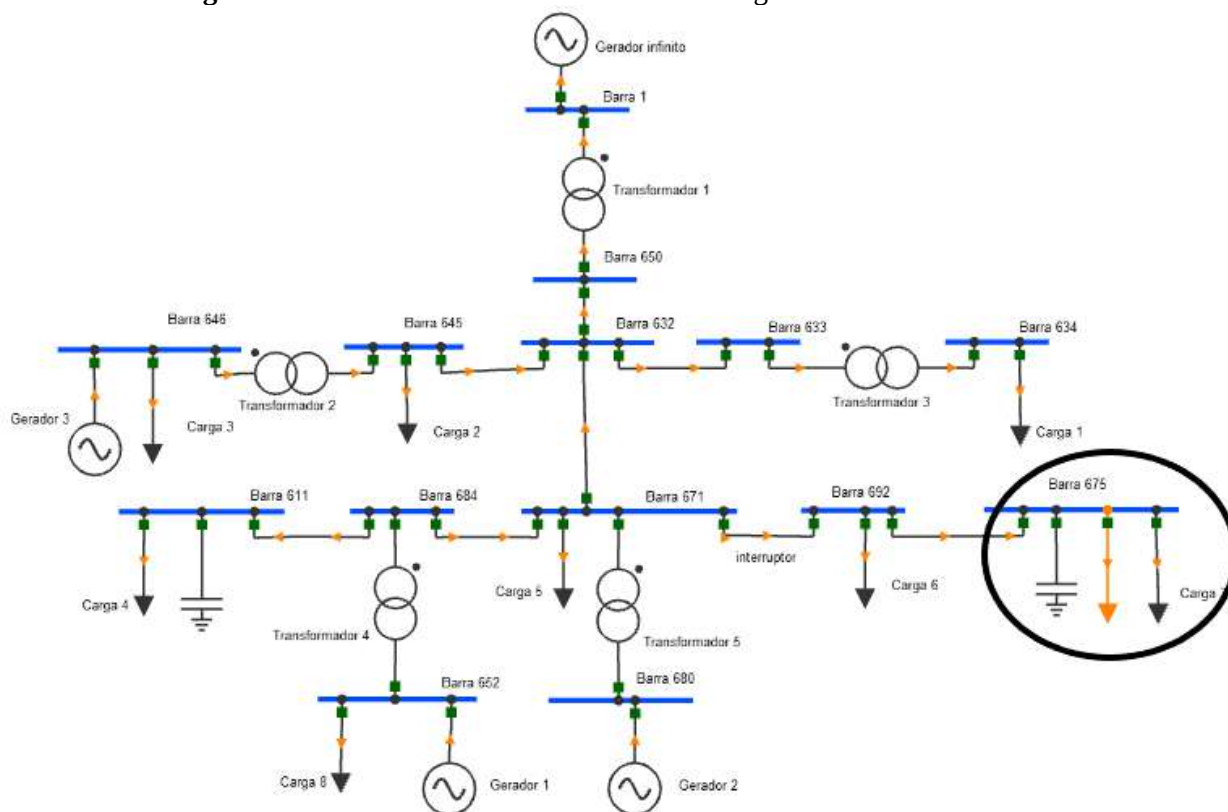
IV. Aumento brusco de carga após 3 segundos de simulação na Barra 675.

Agora iremos analisar a resposta dos controles da máquina síncrona quando se é adicionada uma carga inesperada no sistema. A potência ativa da carga foi determinada em 500KW e 300KVA_r de potência reativa.

Para simular a entrada dessa carga adicional no PSP é necessário inserir uma carga hipotética no sistema configurando o chaveamento da mesma para um tempo escolhido pelo usuário que essa carga entre no sistema, nesse caso foi escolhido que essa carga fosse inserida no sistema após 3 segundos do início da simulação.

Essa carga hipotética adicional pode ser vista na figura abaixo.

Figura 28 – Sistema teste de 13 barras com a carga adicional.



Sistema teste com 13 barras com carga adicional na cor laranja com $P=500\text{KW}$ e $Q=300\text{KVAR}$.

Fonte: Autoria própria.

Nas figuras abaixo, nota-se que ao se inserir a carga adicional no sistema os geradores reagem a presença da mesma, há uma queda de tensão nos geradores de aproximadamente 15% do valor inicial, apesar da atuação do regulador de tensão nesse caso, percebe-se que os valores de tensão não voltam mais ao seu valor de referência inicial, isso se explica pelo fato que essa carga adicional não cessa com o tempo, ela foi adicionada no sistema e permanece, com isso mesmo que não exista oscilações nos níveis de tensão a ação dos reguladores não conseguem retornar essa tensão ao seu valor inicial.

A frequência e o ângulo delta sofrem oscilações no momento da inserção da carga, mas alguns segundos depois já é possível notar a atuação dos reguladores estabilizando novamente esses valores.

Figura 29 – Tensão dos geradores.

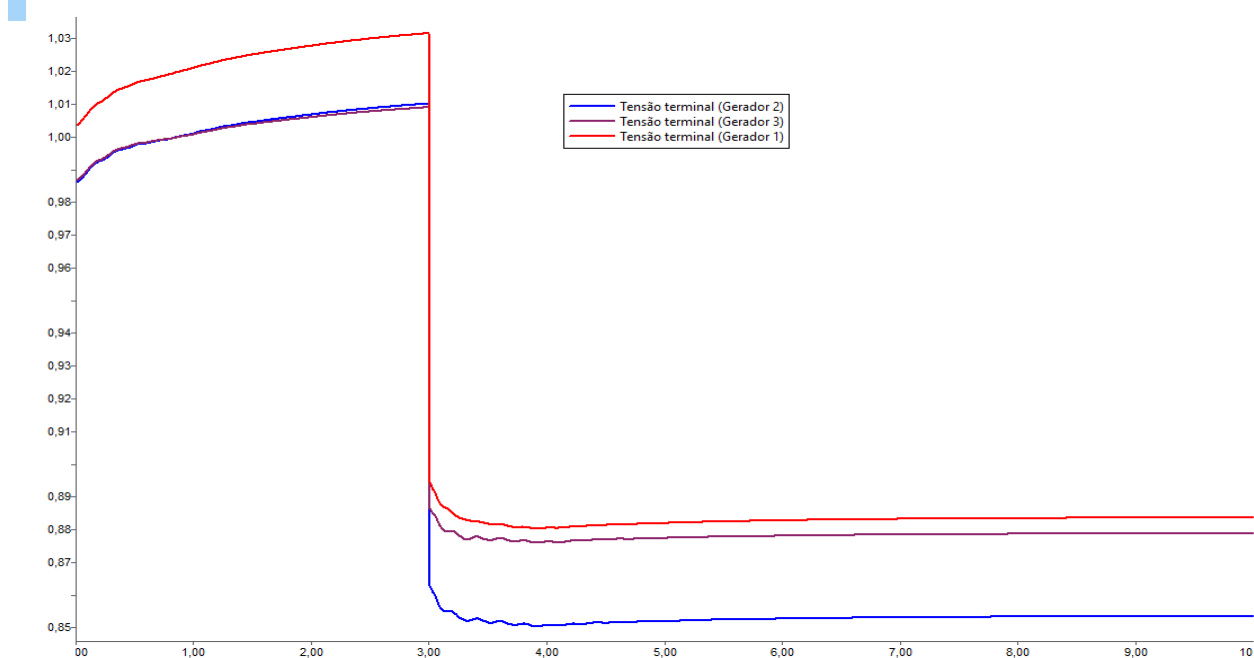


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 30 – Frequência dos geradores.

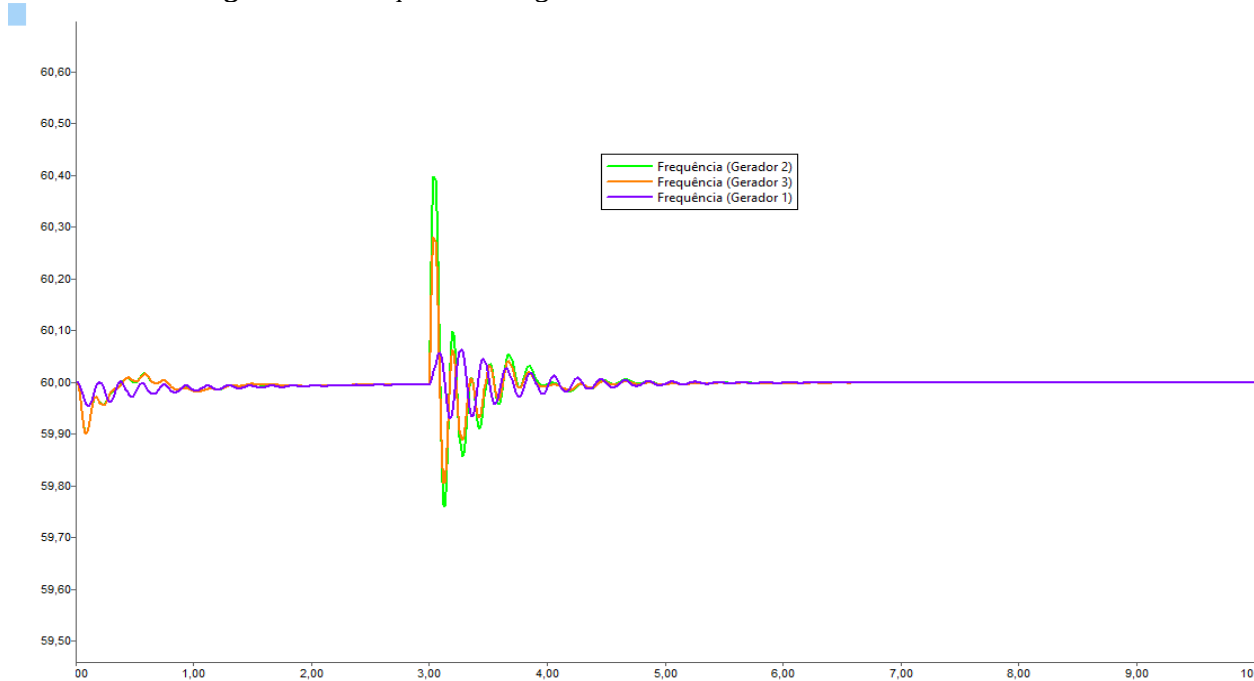


Gráfico da Frequência dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Ângulo delta dos geradores.

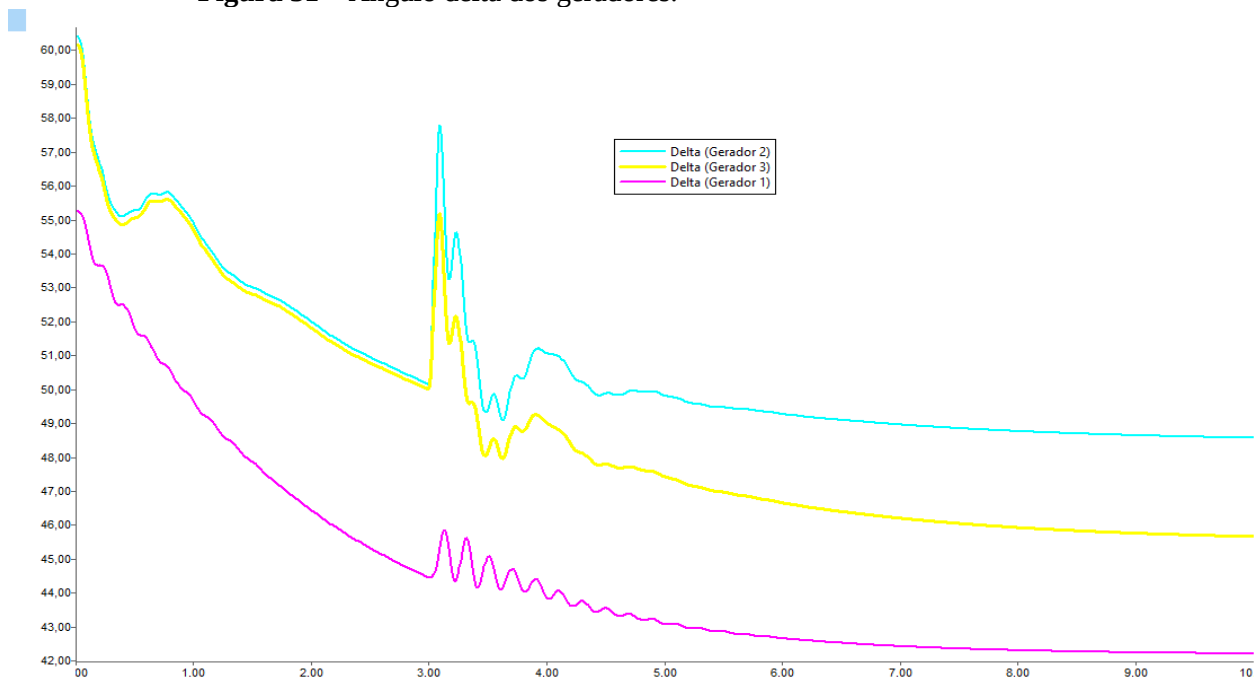


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Essa carga adicional foi inserida na barra 675, para analisar se uma mudança no sistema influencia a resposta da configuração inicial, escolheu-se analisar o efeito da carga em barras mais distantes dos geradores, como no caso da barra 634, que está localizada logo após o transformador 3 (13,8KV/380V). Primeiramente temos na figura abaixo a tensão na barra 634 antes da inserção da carga.

Figura 32 – Tensão na barra 634.

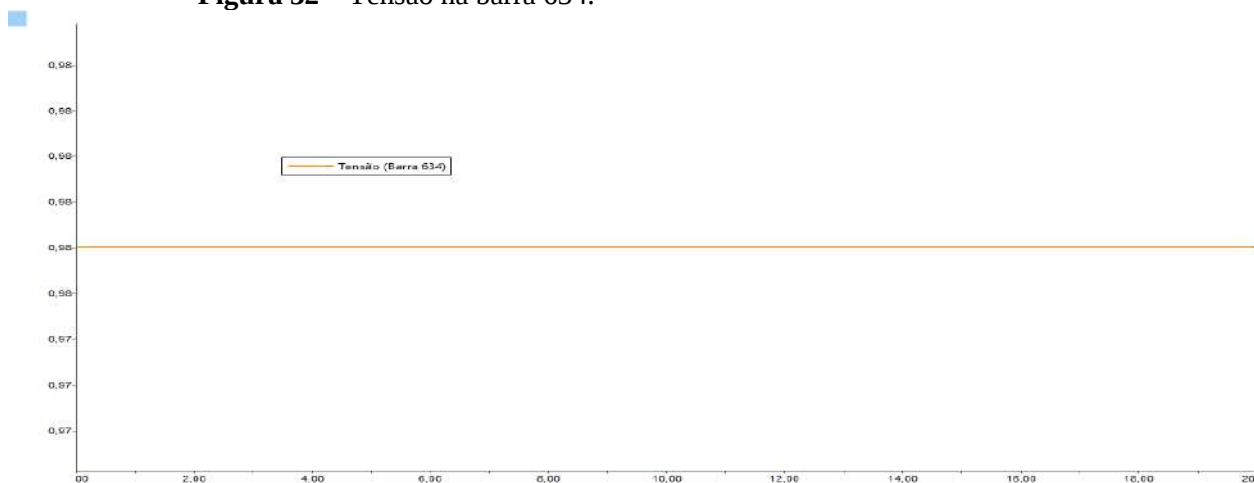


Gráfico da Tensão na Barra 634 antes de inserido a carga.

Fonte: Autoria própria.

Quando inserido a carga no sistema, sem o uso dos reguladores de tensão e velocidade nos geradores, a resposta de tensão da barra 634 e dos geradores, estão mostradas na figura 33 e 34, abaixo:

Figura 33 – Tensão na barra 634.

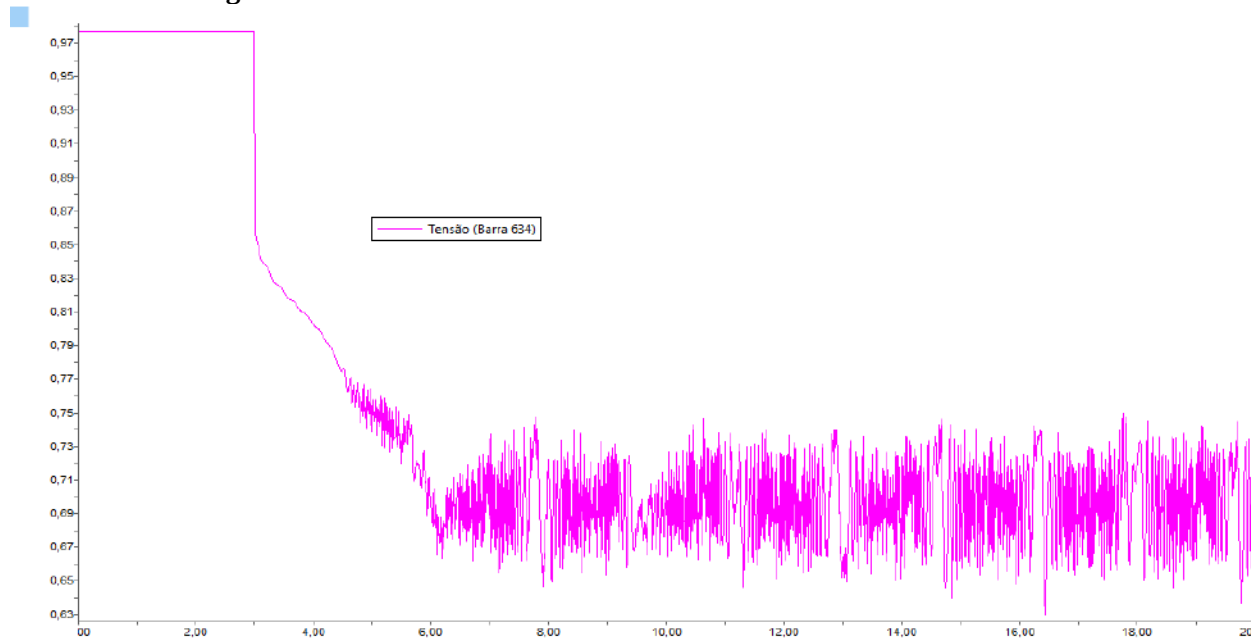


Gráfico da Tensão na Barra 634 sem o uso dos reguladores.

Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Tensão nos geradores.

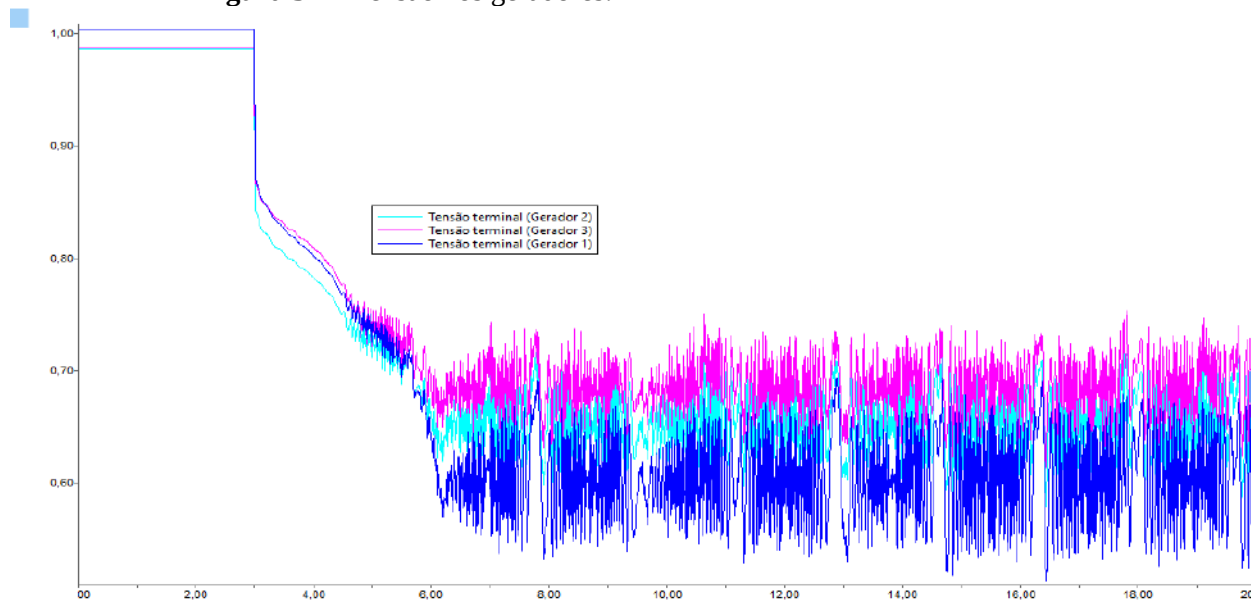


Gráfico da Tensão nos geradores sem o uso dos reguladores.

Fonte: Autoria própria.

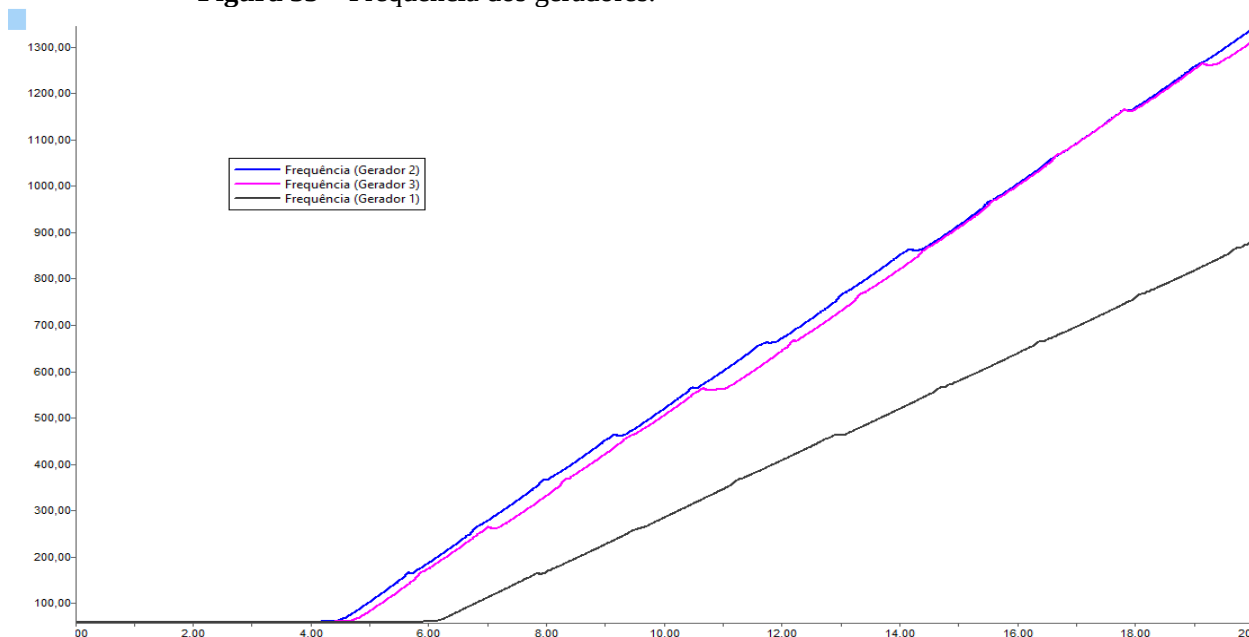
Figura 35 – Frequência dos geradores.

Gráfico da Frequência dos geradores sem o uso dos reguladores.

Fonte: Autoria própria.

Quando adicionado os controles da máquina síncrona, é notório a atuação dos mesmos, mesmo em barras distantes dos geradores, a influência dos reguladores se fazem presentes, no caso dos geradores, além de diminuir as grandes oscilações observadas anteriormente, esses controles conseguem manter os geradores estáveis, podemos ver isso nas figuras 37 e 38, abaixo.

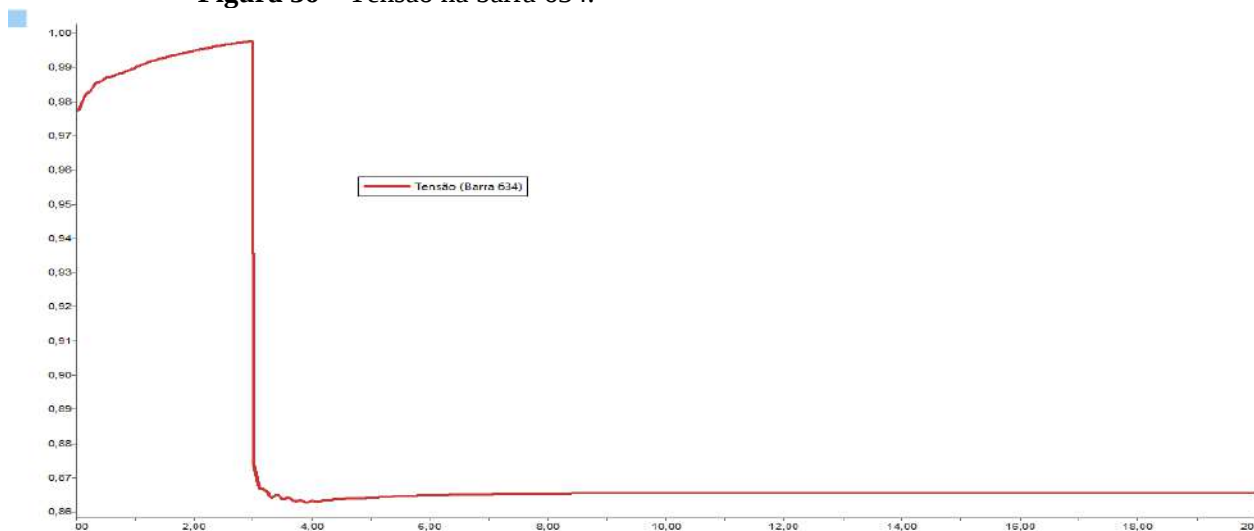
Figura 36 – Tensão na barra 634.

Gráfico da Tensão na Barra 634 com o uso dos reguladores.

Fonte: Autoria própria.

Figura 37 – Tensão nos geradores.

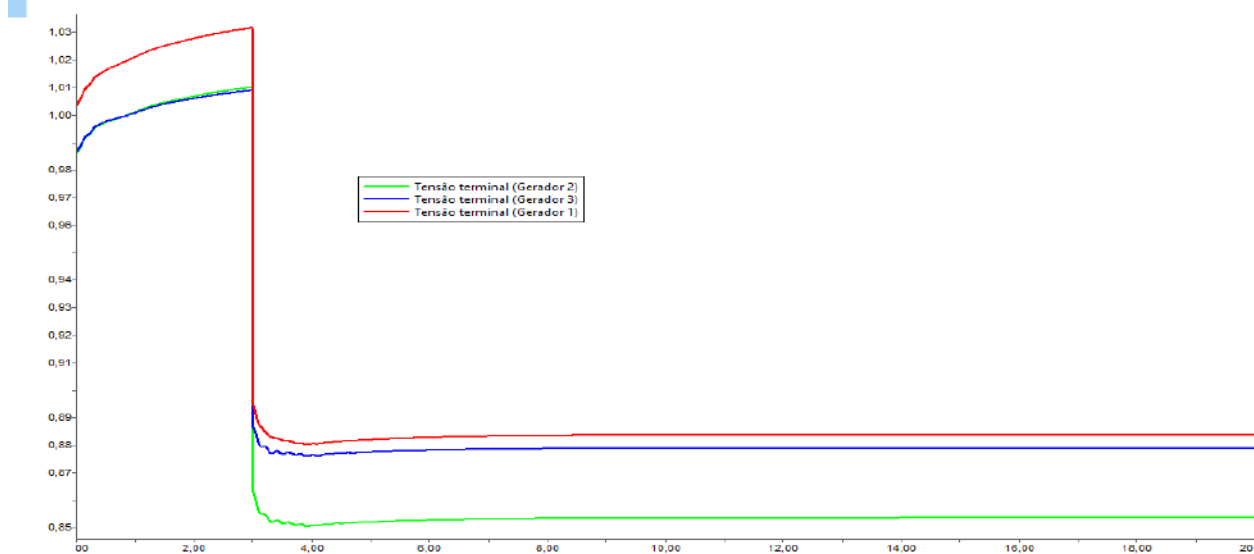


Gráfico da Tensão dos geradores com o uso dos reguladores.

Fonte: Autoria própria.

Figura 38 – Frequência dos geradores.



Gráfico da Frequência dos geradores com o uso dos reguladores.

Fonte: Autoria própria.

4.1.1 Considerações finais – REDE FORTE

Através das simulações realizadas acima foi possível comprovar o funcionamento dos controles primários dos geradores. A ação do AVR não somente fornece um perfil de tensão constante durante a operação em regime permanente, como também auxilia a minimizar as oscilações de tensão durante períodos transitórios, melhorando desta forma a estabilidade global do sistema. Os GOV's forneceram frequência constante durante o regime permanente e diminuíram as oscilações na presença de perturbações.

Verificou-se através das simulações, que o tipo de regulador de tensão DC1 apresentou uma melhor eficiência em relação as oscilações de tensão e em conjunto com o regulador de velocidade tipo hidráulico se tornaram o melhor par de combinação para a estabilidade do sistema. Os tipos de AVR tipo I e II conseguiram retornar os valores de tensão conforme o valor de referência após as perturbações, não sendo tão satisfatórios no controle das oscilações.

Como o sistema está caracterizado como uma rede forte, o mesmo diminui a possibilidade de que algum gerador saia de sincronismo, isso porque esse barramento infinito interfere diretamente ajudando os geradores a se manterem estáveis mesmo quando há uma grande perturbação no ambiente.

Percebe-se que existe um pequeno desequilíbrio de carga no início das simulações, apresentando um transitório, onde deveria estar em regime permanente, porém esse desequilíbrio se estabiliza antes da aplicação das perturbações no sistema, não tendo impacto nos resultados finais.

4.2 Simulação do Sistema 02 – REDE FRACA

A rede fraca, é caracterizada por possuir uma pequena potência de curto-circuito (abaixo de 10 vezes da potência das máquinas conectadas no barramento infinito) e uma constante de inércia também baixa. Por isso, na simulação da rede fraca, o gerador infinito foi configurado com potência de 20 MVA e inércia de 20 segundos. Verificou-se que nesse sistema é mais fácil as máquinas saírem de sincronismo para uma falta. Como mostra as simulações feitas a seguir.

I. Um curto-circuito trifásico com duração de 2 segundos na Barra 646.

A mesma simulação realizada para a rede forte foi realizada nesse caso, o objetivo é comparar o comportamento dos controles nesse novo sistema. Com a falta ocorrida na Barra 646, os reguladores de tensão, combinados com regulador de velocidade para turbinas hidráulicas, apresentaram melhores respostas, conseguindo atuar e regular a tensão. Apesar da regulação nota-se um tempo muito maior para que isso ocorra, deixando notório que a rede nesse caso não contribui de forma significativa como é o caso da rede forte. Isso pode ser visto na figura abaixo.

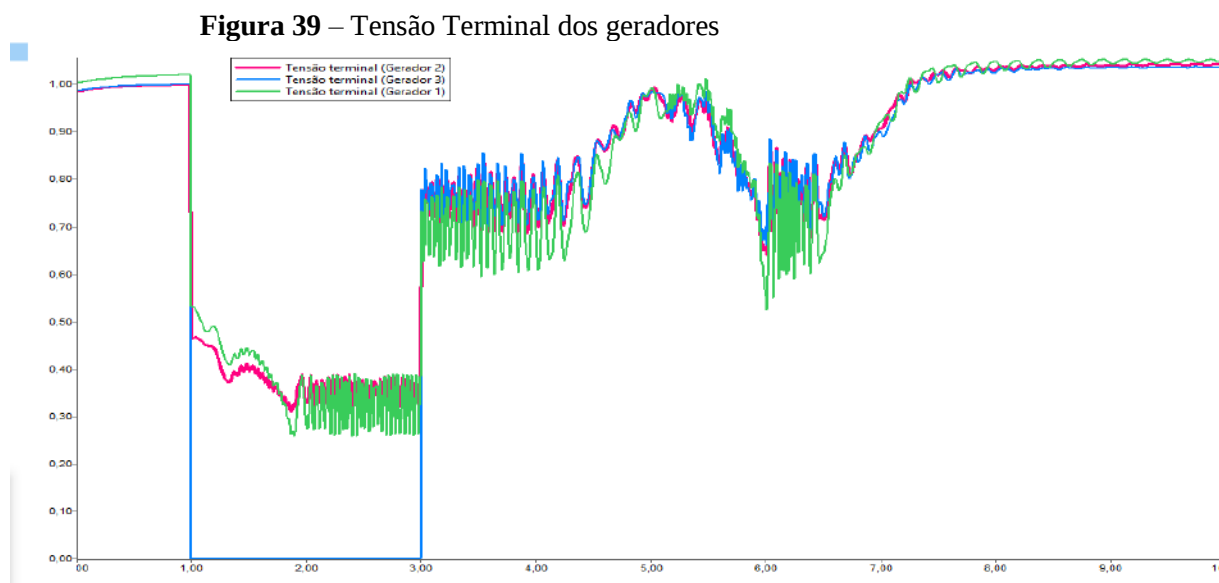


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Apesar de ser ajustada a tensão, pelo gráfico 40 percebemos que a frequência desestabiliza totalmente, chegando a valores muito altos, a condição para que os geradores estejam em sincronismo com a rede depende da tensão, frequência, sequência de fases e ângulo de fase das tensões, se algum desses fatores não estiverem estáveis o gerador já não pode mais ser considerado síncrono com a rede. E é essa condição que o gerador se encontra, como visto abaixo.

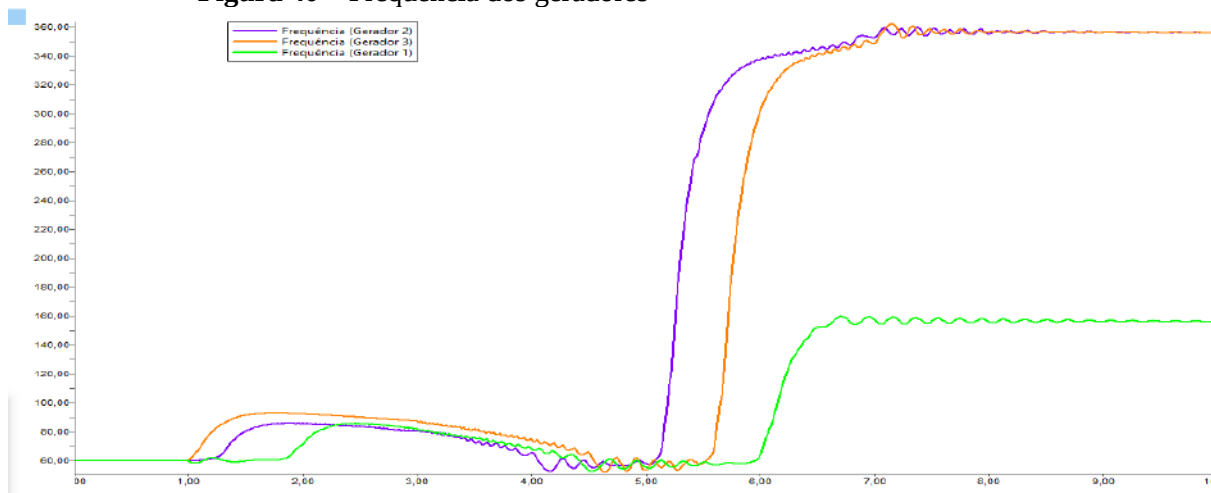
Figura 40 – Frequência dos geradores

Gráfico da frequência dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Pelo gráfico do ângulo delta consegue-se confirmar mais uma vez que os três geradores existentes no sistema perderam totalmente o sincronismo com a rede, isso porque o delta vai para o infinito, não estabilizando seu valor mesmo após o fim da falta de 2 segundos, acontecendo isso para todos os tipos de combinações possíveis de reguladores de tensão e de velocidade utilizados neste trabalho.

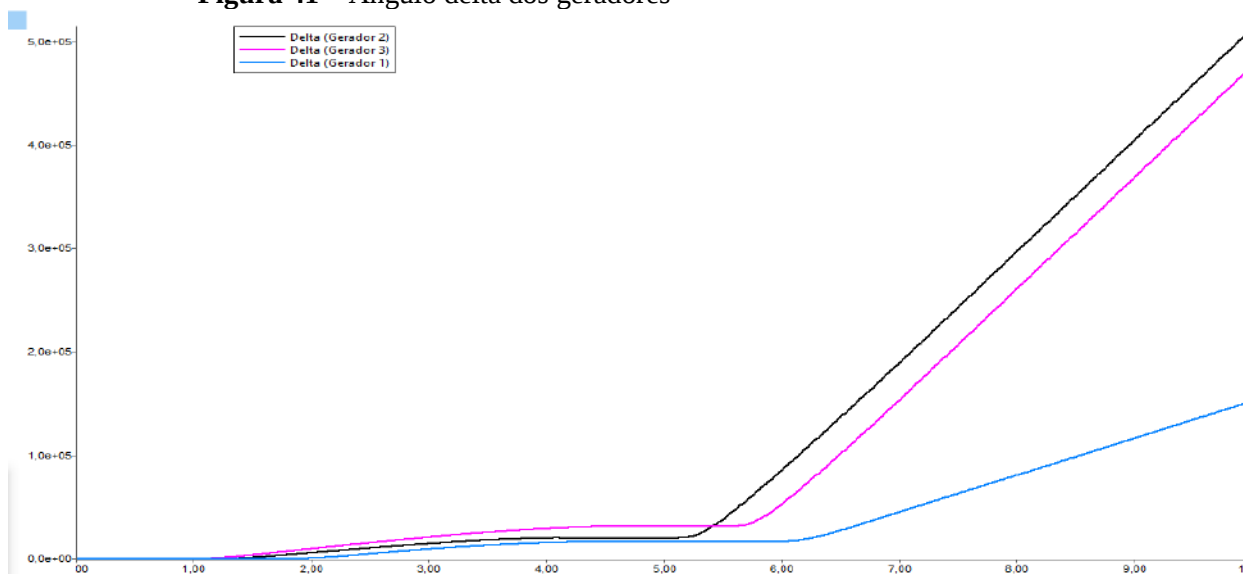
Figura 41 – Ângulo delta dos geradores

Gráfico do Ângulo delta dos geradores para o AVR tipo Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

II. Um curto-circuito trifásico com duração de 0,3 segundos na Barra 646.

Foi inserida a mesma falta do caso anterior, diminuindo-se o tempo de duração da mesma.

Concluiu-se então que com o uso dos reguladores de velocidade para máquinas hidráulicas, as três máquinas perderam o sincronismo, com muitas oscilações de frequência, isso acontece para todas as combinações com os reguladores de tensão.

Para o uso dos reguladores de velocidade para máquinas térmicas, as três máquinas não perderam sincronismo, não importando a combinação com os reguladores de tensão, diminuindo as oscilações de frequência e melhorando o tempo de resposta para a regulação dos parâmetros do gerador.

A combinação dos reguladores que apresentou o melhor resultado para esse caso foi o tipo simples e o GOV em termo, mostrado abaixo.

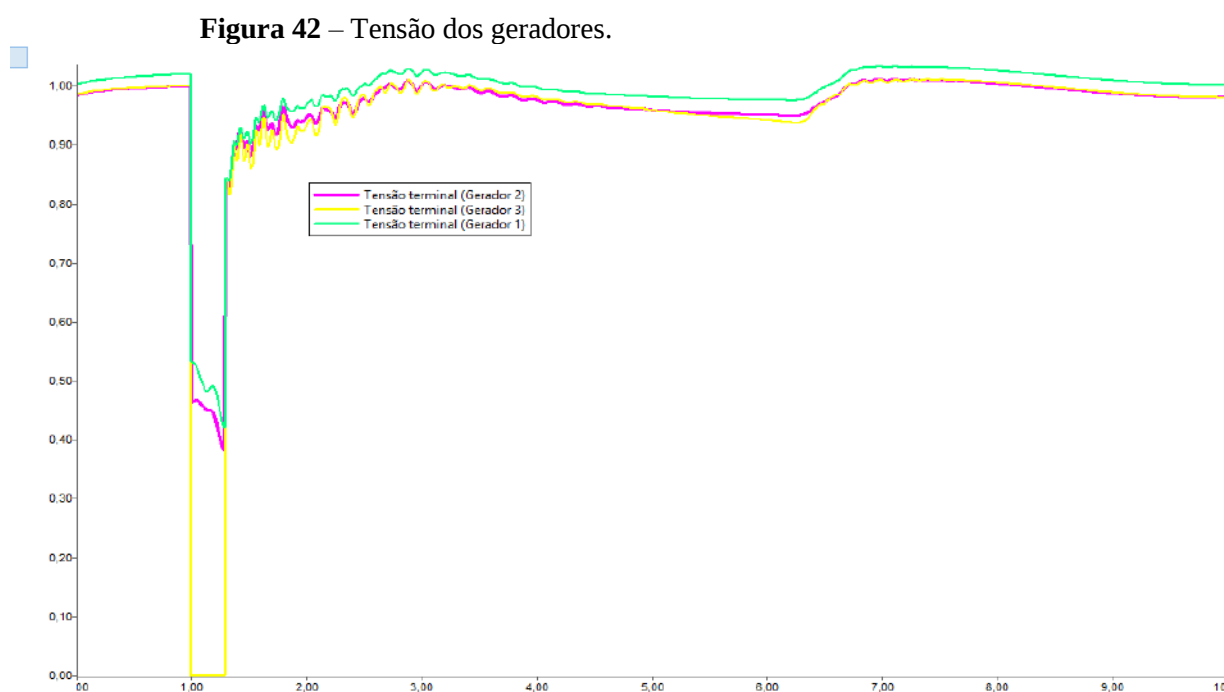


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 43 – Frequência dos geradores

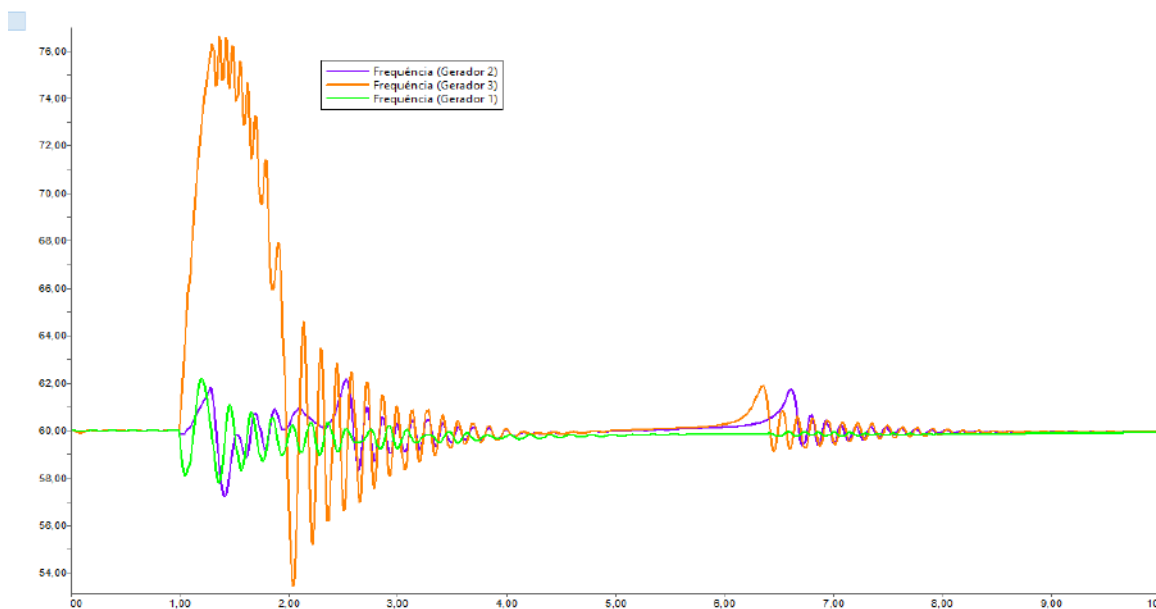


Gráfico da frequência dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 44 – Ângulo delta dos geradores

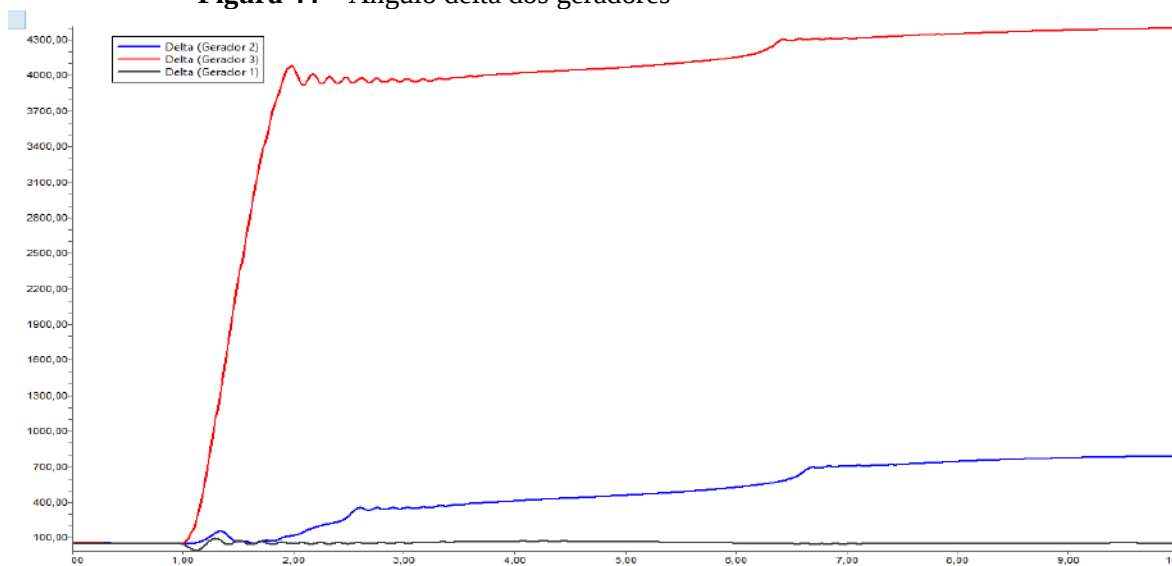


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

Comparando-se o resultados anteriores acima, com o AVR simples e o GOV hidro, vemos que os geradores saíram de sincronismo, sendo mais evidente no gráfico 46, da frequência.

Figura 45 – Tensão dos geradores.

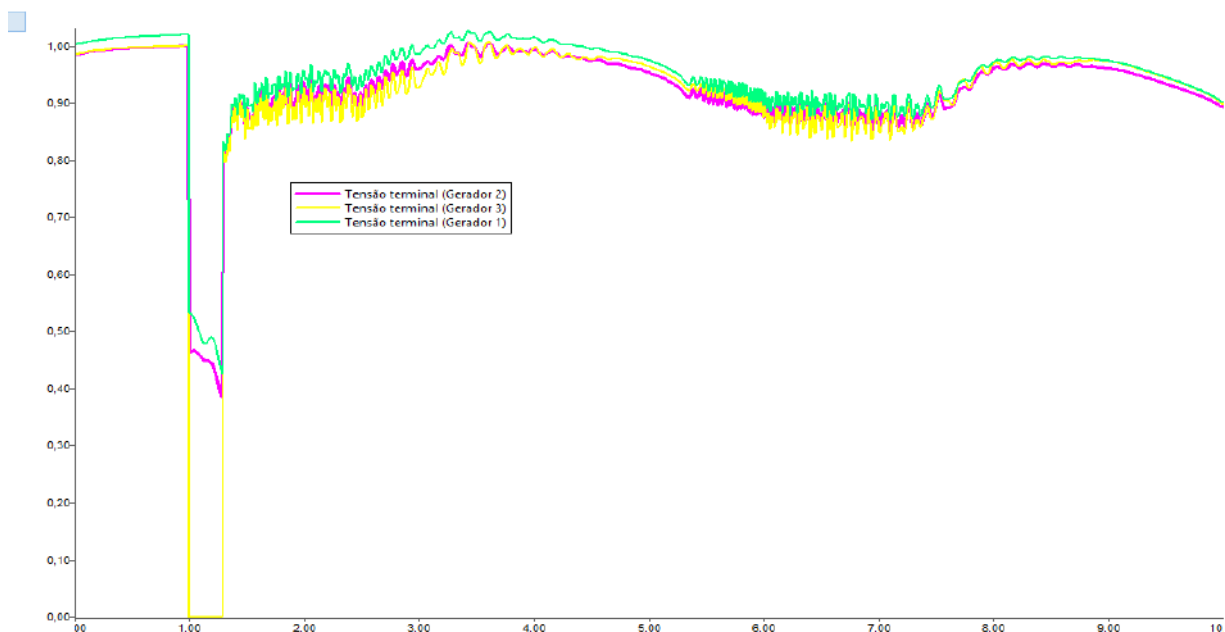


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 46 – Frequência dos geradores

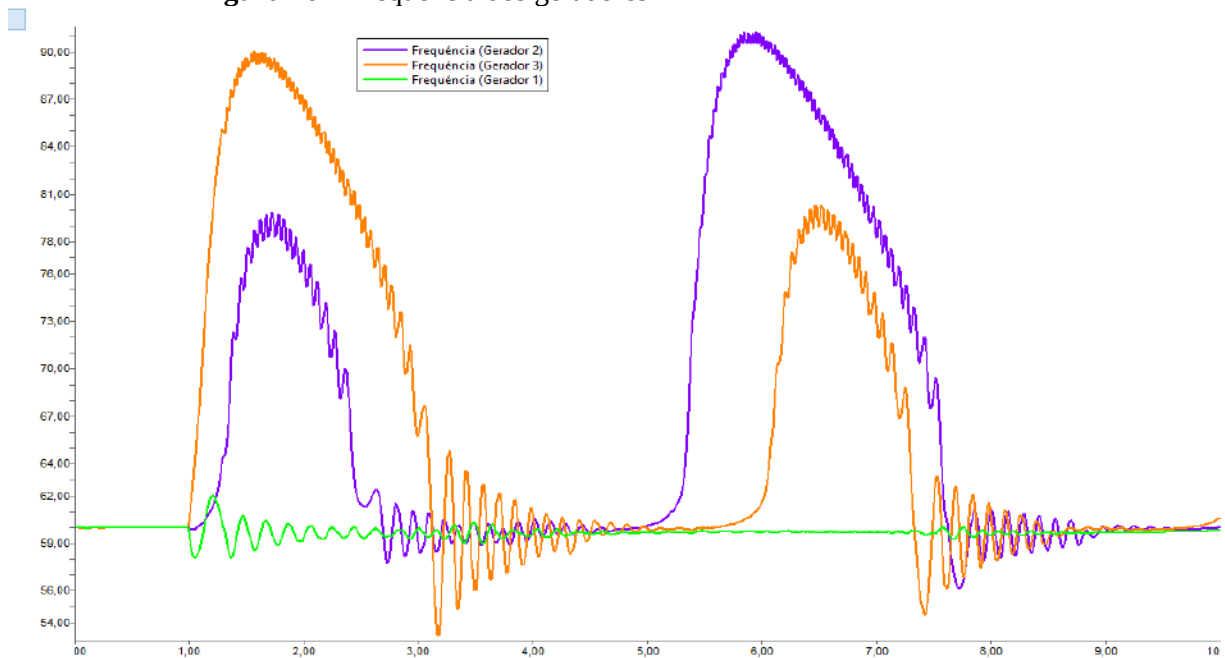


Gráfico da frequência dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 47 – Ângulo delta dos geradores.

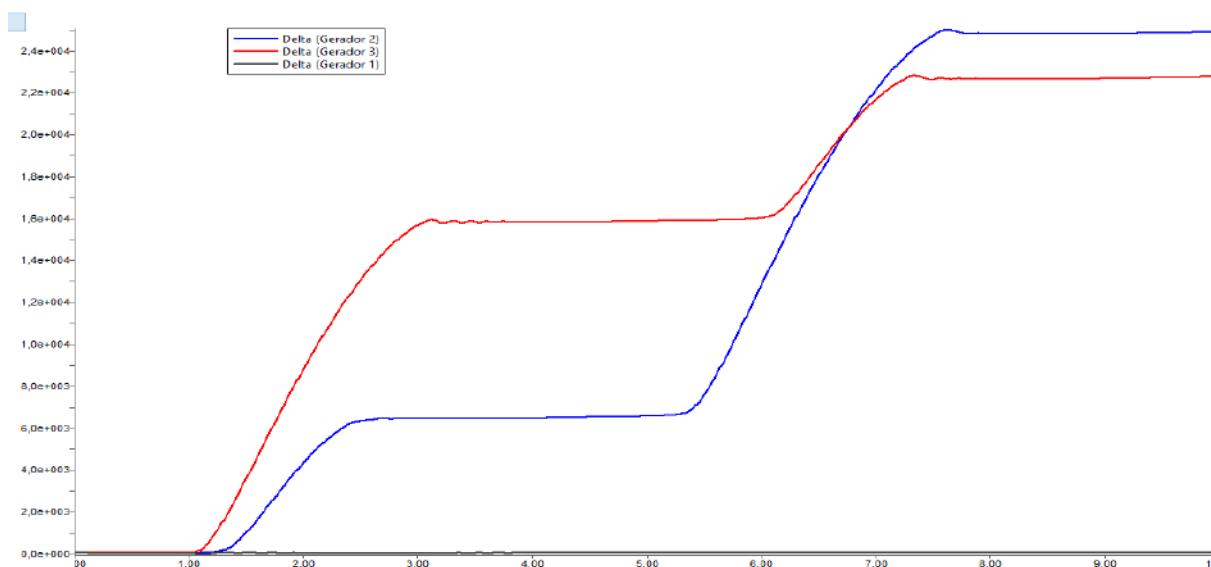


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

III. Aumento brusco de carga na Barra 675

Inseriu-se uma carga adicional de 500 kW, consumindo 300 kVAr após 2 segundos de simulação. Notou-se que todos os conjuntos de reguladores obtiveram resultados muito parecidos, a resposta em tensão e em frequência praticamente se comportaram iguais para os GOV Hidráulico e Térmico e nenhuma máquina saiu de sincronismo. O AVR IEEE tipo DC1 obteve oscilações de tensão e frequência menores após a inserção da carga.

Abaixo temos a resposta dos reguladores para o tipo DC1 e Hidro e também para o tipo Simplificado e Hidro.

Figura 48 – Tensão dos geradores.

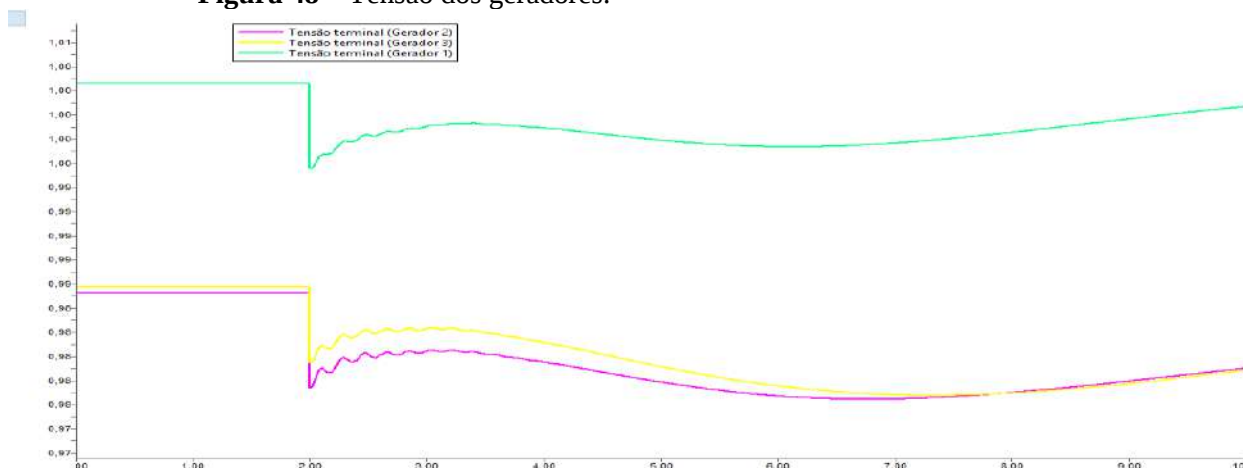


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR DC1 e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 49 – Frequência dos geradores.

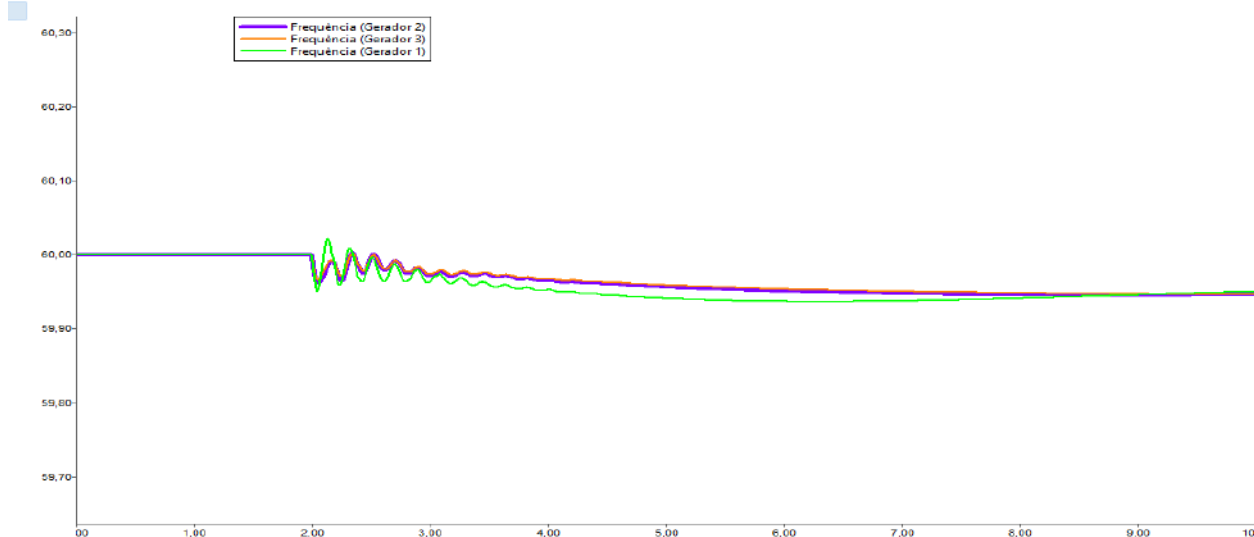


Gráfico da frequência dos geradores para o AVR DC1 e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – Ângulo delta dos geradores

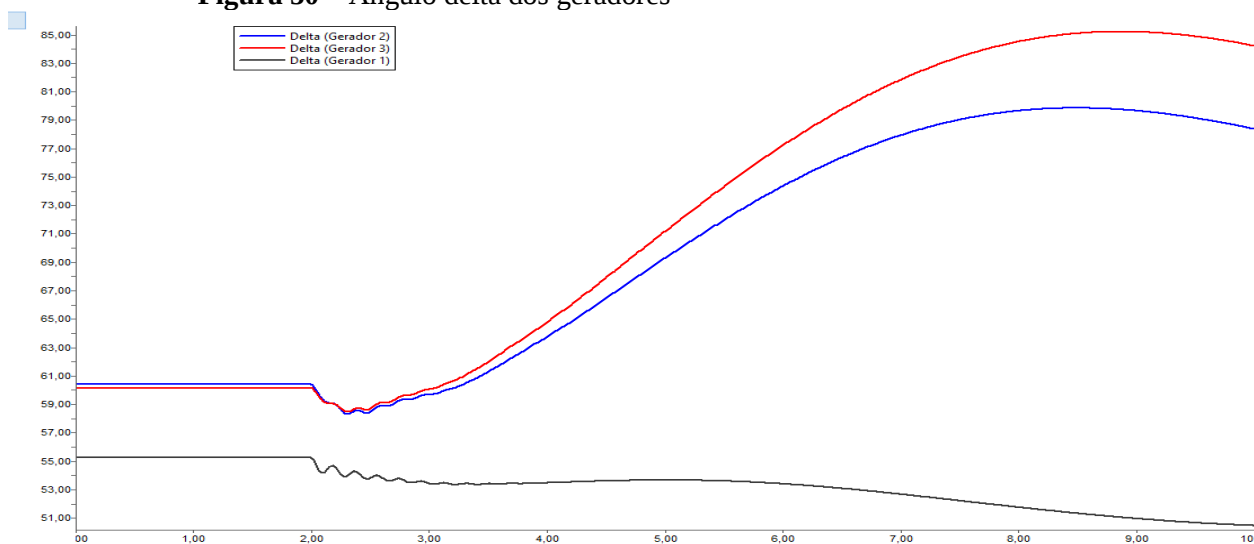


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR DC1 e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Comparando-se o AVR Tipo simplificado e GOV hidráulico, com os resultados obtidos nos gráficos anteriores, temos:

Figura 51 – Tensão dos geradores.

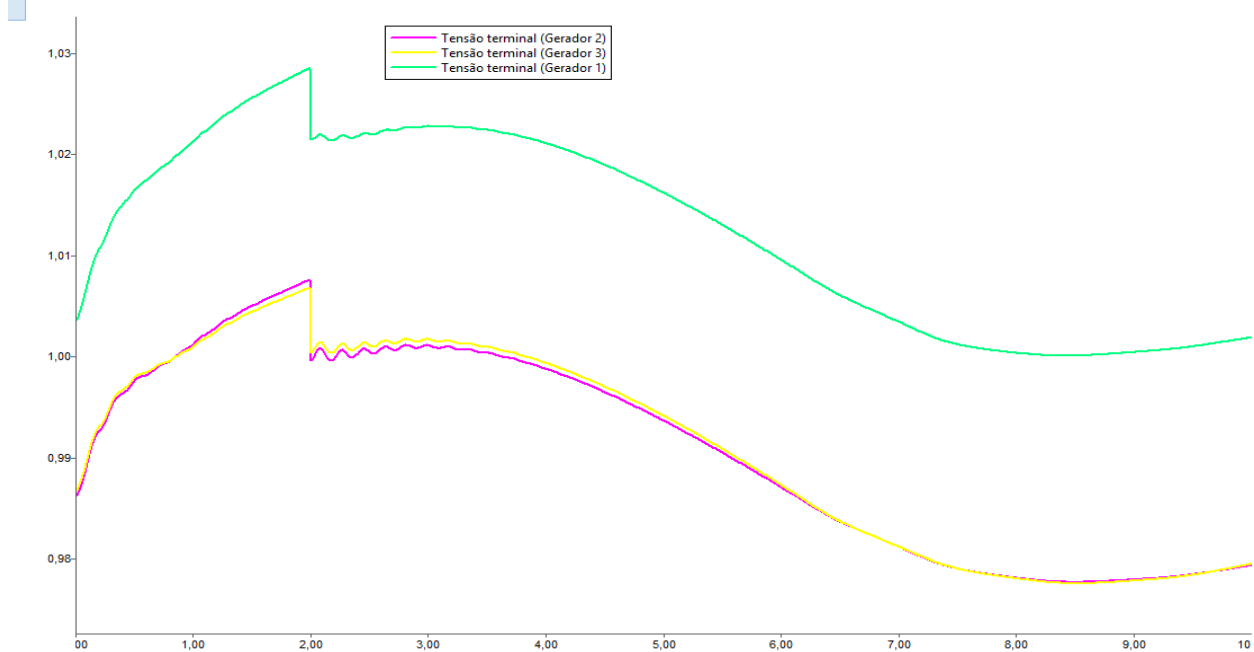


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 52 – Frequência dos geradores.

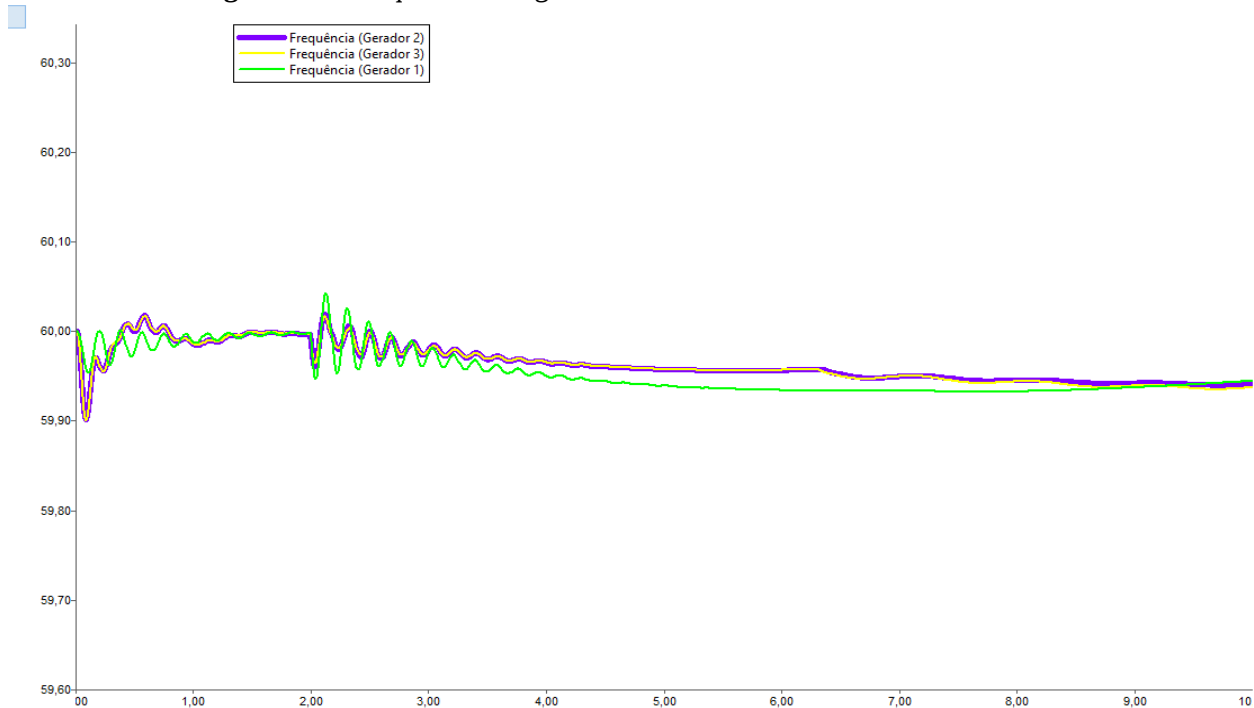


Gráfico da frequência dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 53 – Ângulo delta dos geradores

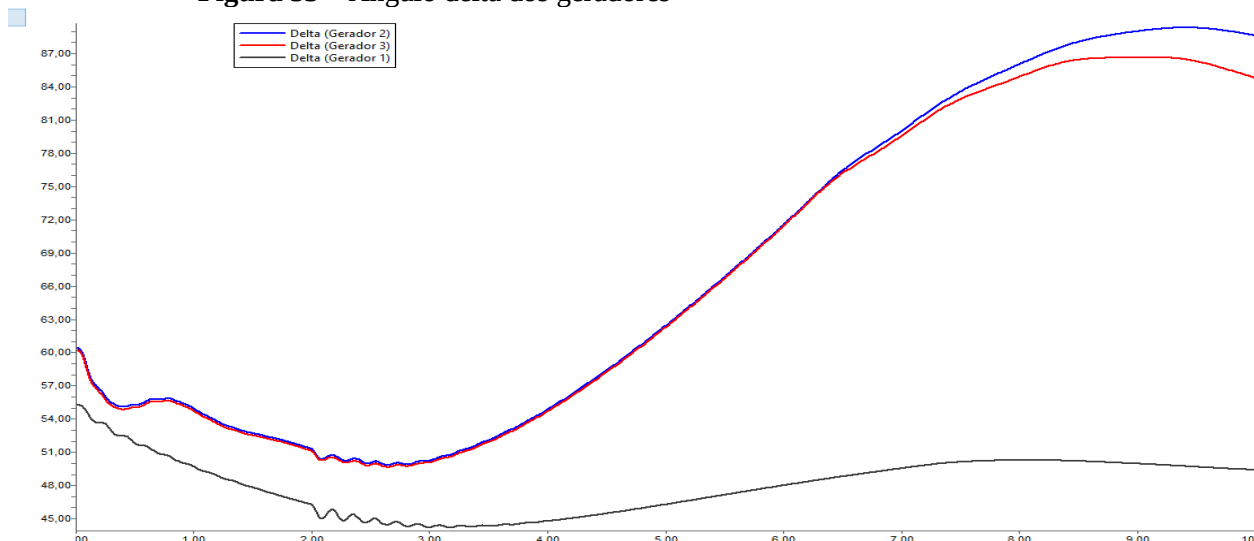


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

IV. Perda do gerador 3 na Barra 646

Para esse caso retira-se o gerador 3 após 2 segundos de início da simulação com o sistema sem faltas. Para todas as combinações de reguladores de tensão e de velocidade os geradores 1 e 2 não conseguem manter o sincronismo, pois a frequência não consegue retornar o seu valor de referência, somente o AVR tipo 1 combinado com o GOV termo conseguiram manter o sincronismo dos geradores 1 e 2.

Figura 54 – Tensão dos geradores.

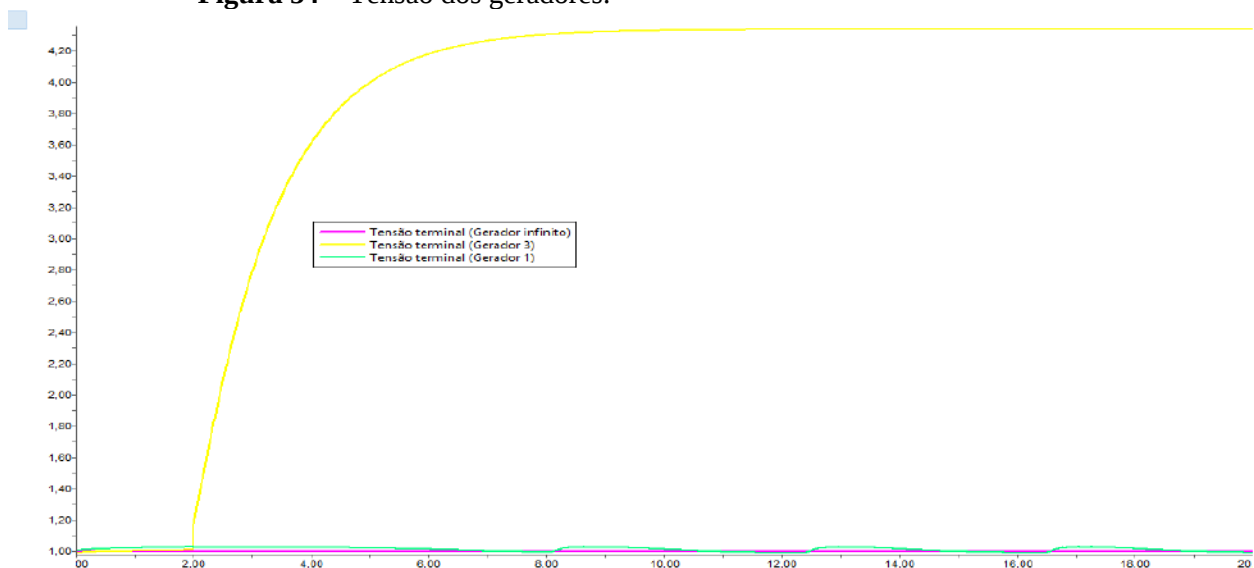


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR Tipo 1 e GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

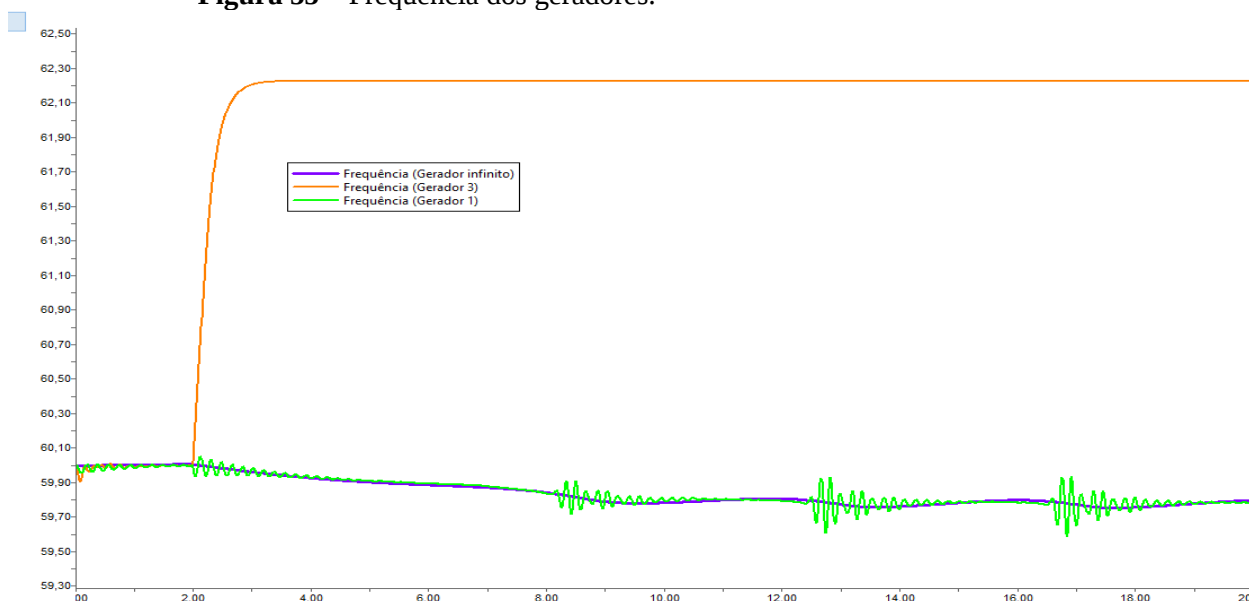
Figura 55 – Frequência dos geradores.

Gráfico da Frequência dos geradores para o AVR tipo 1 e GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

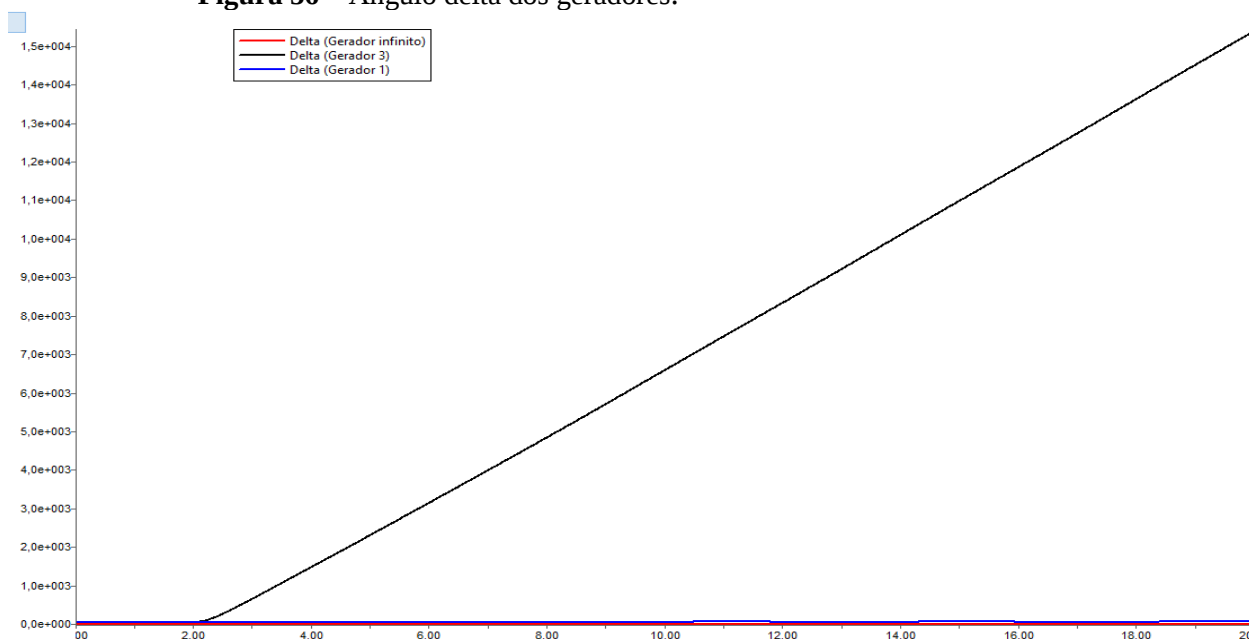
Figura 56 – Ângulo delta dos geradores.

Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR tipo 1 e GOV Térmico.

Fonte: Autoria própria.

Para as outras combinações de reguladores, os geradores saíram de sincronismo, nota-se que o gerador 2 mantém uma frequência oscilatória e o valor do ângulo delta se afasta do valor do ângulo delta do gerador 1, apresentando o comportamento a seguir.

Figura 57 – Tensão dos geradores.

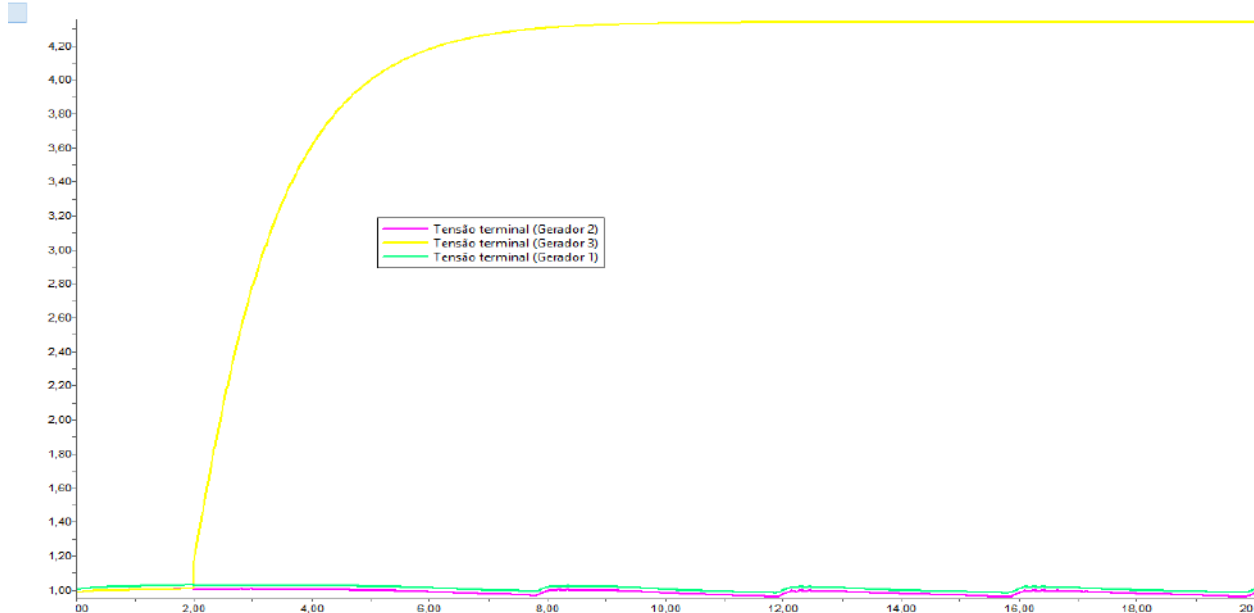


Gráfico da Tensão Terminal dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 58 – Frequência dos geradores.

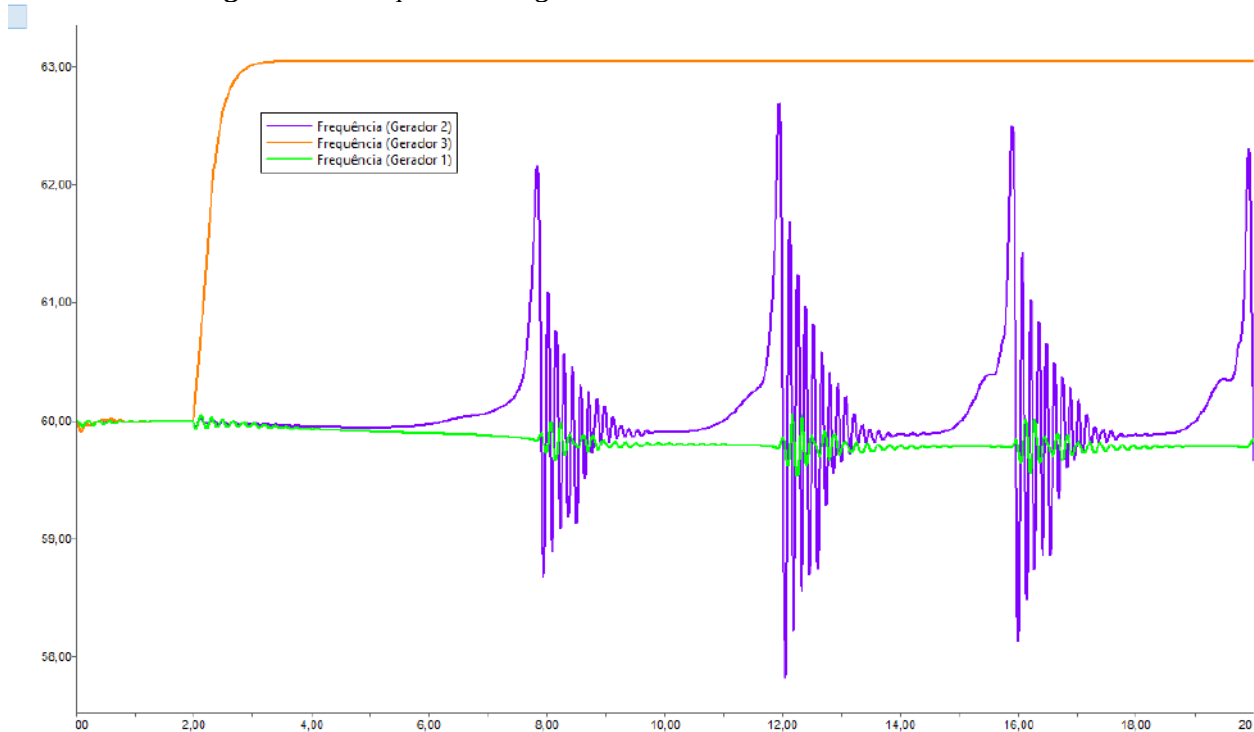


Gráfico da Frequência dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

Figura 59 – Ângulo delta dos geradores.

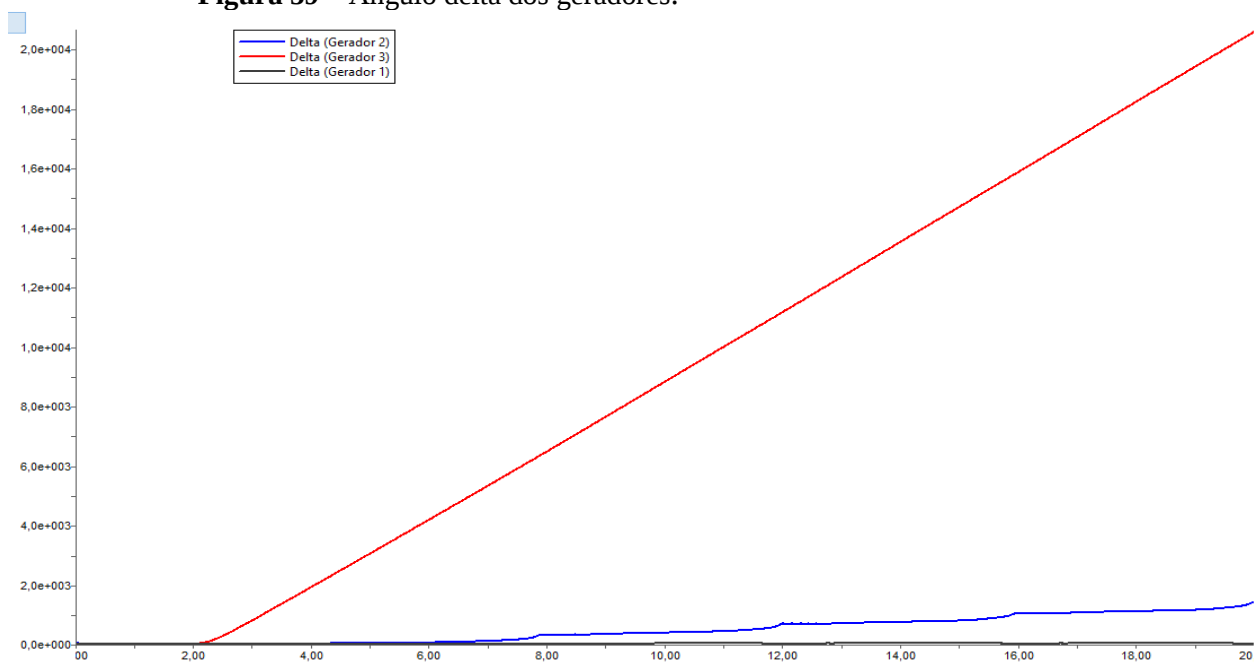


Gráfico do ângulo delta dos geradores para o AVR Simplificado e GOV Hidráulico.

Fonte: Autoria própria.

4.2.1 Considerações finais – REDE FRACA

Foi notório a diferença do comportamento de resposta dos controles da máquina para esse sistema, para cada caso de perturbação inserido no sistema um modelo de AVR e GOV se destacou, deixando em evidência que todos os tipos de reguladores são importantes e cada um tem o seu uso para uma finalidade específica.

Para o primeiro caso todos os geradores saíram de sincronismo visto que o tempo de falta para esse sistema era muito grande, somente os controles da máquina não foram suficientes para retornar os geradores a valores estáveis.

No segundo caso, com a diminuição do tempo de falta, os reguladores conseguiram atuar, destacando-se que o modelo de regulador de velocidade do tipo térmico apresentou um desempenho superior que o regulador de velocidade tipo hidráulico para manter o sincronismo dos geradores diminuindo com mais eficiência as oscilações.

No terceiro caso, quanto ao aumento brusco da carga no sistema, nenhum gerador perdeu o sincronismo com a rede, o AVR DC1 combinado com o GOV hidráulico, obtiveram melhores respostas de eficiência na diminuição das oscilações do sistema.

Por fim, para a perda do gerador 3, responsável por 16% do fornecimento de energia, somando-se os três geradores, apenas o conjunto do regulador de tensão tipo 1 em conjunto com o regulador de velocidade tipo Térmico conseguiram manter os geradores 1 e 2 em sincronismo.

5 CONCLUSÃO

É possível concluir, através das simulações, a influência que os reguladores de tensão e velocidade tem sobre um sistema de energia e o quão notório é a importância do seu uso no desempenho dos geradores. Os reguladores escolhidos para esse estudo possuem características diferentes de funcionamento, cada um apresentando melhor resposta frente a diferentes perturbações, o princípio de funcionamento foi obedecido por todos os modelos de reguladores, reestabelecendo os parâmetros do sistema para valores de referência e dentro dos limites de estabilidade.

Pode-se concluir que para a rede robusta o regulador de tensão do tipo DC1 apresentou melhor desempenho, diminuindo as oscilações de tensão dos geradores no sistema. O regulador de velocidade do tipo Hidráulico também apresentou melhor desempenho nessa rede, com respostas mais rápidas de estabilização da frequência dos geradores. Independentemente do tempo de duração das faltas serem maiores para as simulações, a rede forte mantém influência direta na resposta dos geradores atuando no sistema, melhorando a resposta dos controles primários da máquina.

Para a rede fraca, houve muitas oscilações, já que a influência do barramento infinito era menor se comparado com a rede forte, deixando mais evidente o comportamento dos controles da máquina. Nesse sistema cada combinação de AVR e GOV demonstrou características únicas de resposta para as faltas adicionadas. Analisando as simulações como um todo os reguladores de velocidade para turbinas térmicas apresentaram uma melhor eficiência se comparado com o regulador para turbinas hidráulicas. Outra característica dessa rede está no fato do tempo de curto-circuito, para valores acima de 0,3 segundos os reguladores não conseguem atuar na estabilidade dos geradores.

Ressalta-se que os reguladores de tensão e velocidade agem no controle primário dos geradores, e que é necessário ajustar os parâmetros internos dos mesmos conforme necessidade para uma melhor eficiência do funcionamento. Quando os geradores saem de sincronismo só os controles primários não conseguem resolver esse problema sendo necessário o uso de controles secundários, terciários e etc.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Committee Report - "Computer Representation of Excitation Systems" –IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems – Vol. PAS-87, pp.1460-1464, Jun/1968.
- [2] OLIVEIRA, Thales Lima. PSP-UFU (Plataforma de Sistemas Elétricos de Potência - Universidade Federal de Uberlândia). Versão Beta 2019w29a. Disponível para download em: <<https://thales1330.github.io/PSP/>>. Acesso em setembro de 2021.
- [3] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D.; - "Maquinas Eletricas". 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [4] JORDAO, R. G.; - "Maquinas Síncronas", Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1980.
- [5] KUNDUR, P.; - "Power Systems Stability and Control", McGraw-Hill, EPRI, Power Systems Engineering Series, New York, 1994.
- [6] PERES, L. M.; - "Estudos do desempenho dinâmico de geradores síncronos de produtores independentes em sistemas de geração distribuída via ATPDraw", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- [7] ANDERSON , P. M.; FOUAD, A.A., - "Power System Control and Stability", Second Edition. Iowa, IEEE Press, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2003.
- [8] GUIMARÃES, G. C.; - "Computer methods for transient stability analysis of isolated power generation systems with special reference to prime mover and induction motor modeling", PhD Thesis, University of Aberdeen, Scotland, GB 1990.
- [9] MATA, C. G.; - "Uma Contribuição na Análise da Estabilidade Transitória dos Sistemas Elétricos de Distribuição na presença de Geração Distribuída", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.
- [10] CALDEIRA, N.S.; - "Aplicação de Estabilizadores de Sistemas de Potência em Reguladores de velocidade e turbinas", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Itajubá, 2009.
- [11] GOMES, P., Schilling, M. T., J. W. M. et al. - "Geração distribuída: vantagens, problemas e perspectivas". XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1999.
- [12] MEDEIROS, C.; - "Curtos Circuitos trifásicos no sistema elétrico" – Escola de Engenharia Elétrica - PUC GOIÁS, atualização 2017.

ANEXO A – Catálogo com os dados do gerador 1 de 2500 KVA

FOLHA DE DADOS

Alternadores Síncronos

Número:

1

Data:

18-DEZ-2018

Dados gerais

Tensões (V)

Potências (kVA)

Dados Elétricos (FP=0.8 - Δt=125°C - Ta=40°C)

Rendimento (%)

Cliente:	ruí																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		</
----------	-----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

ANEXO B – Catálogo com os dados dos geradores 2 e 3 de 600 KVA

<

ANEXO C – TABELA COM OS DADOS DE CARGA DO SISTEMA

Carga	KW	KVAr
1	160	110
2	170	125
3	230	132
4	170	80
5	385	220
6	170	151
7	68	60
8	128	86

ANEXO D – TABELA COM OS DADOS DE LINHA DO SISTEMA

LINHA	LOCAL	R(pu)	Xi(pu)	B(pu)	L(km)
1	633 / 632	0,02456	0,03854	0,0001168	0,1524
2	632 / 650	0,01131	0,03321	0,0001291	0,6096
3	632 / 645	0,04337	0,04395	0,00009653	0,1524
4	611 / 684	0,04337	0,04396	0,0000926	0,09144
5	684 / 671	0,04323	0,04427	0,0000956	0,09144
6	692 / 675	0,026043	0,01456	0,001986	0,1524

LEGENDA:

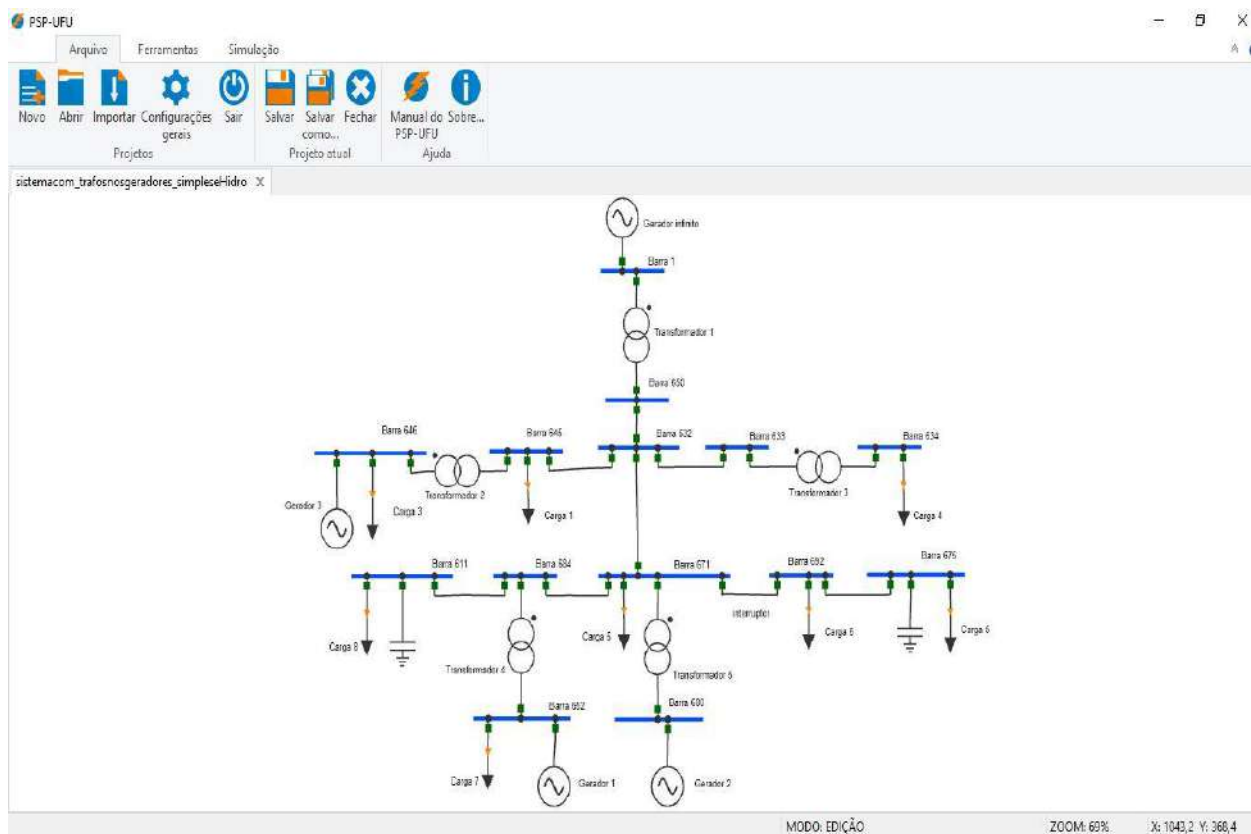
R – Resistência;

Xi – Reatância Indutiva;

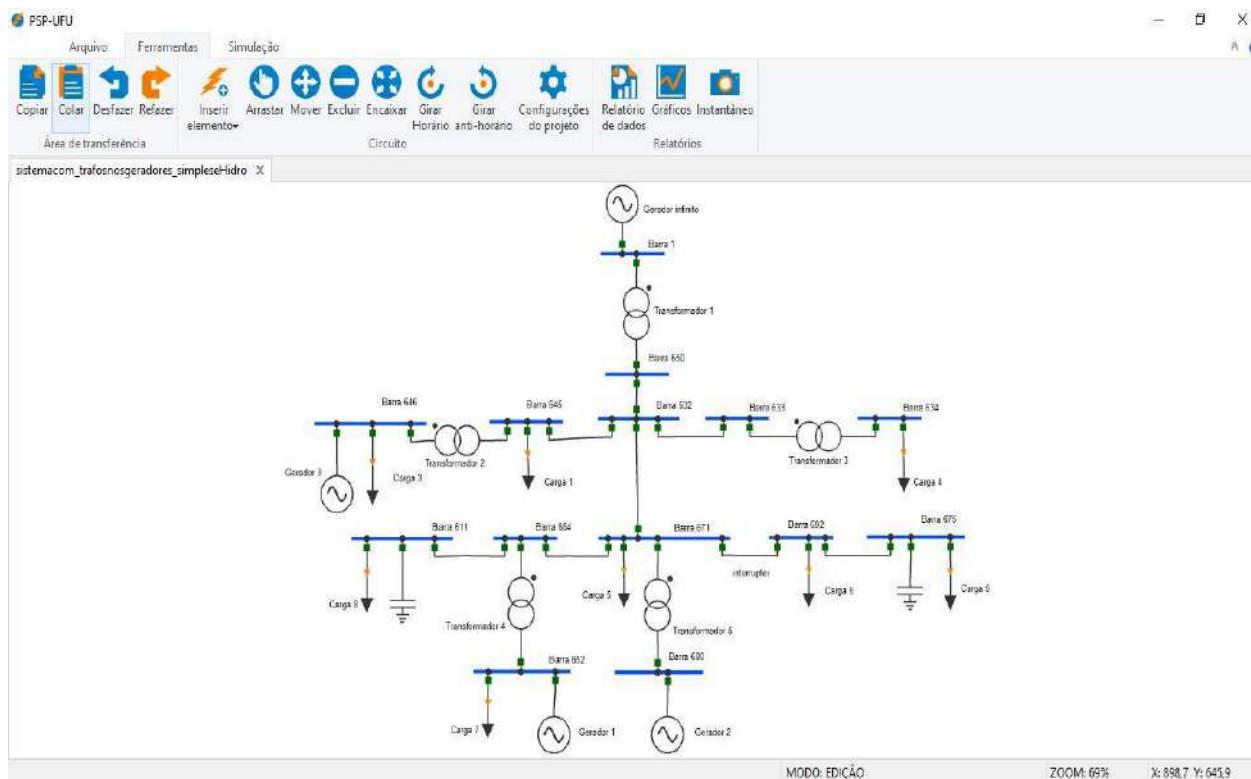
B – Susceptância Capacitiva;

L – comprimento da linha.

ANEXO E – INTERFACE DO SOFTWARE PSP-UFU – ARQUIVO



ANEXO F – INTERFACE DO SOFTWARE PSP-UFU – FERRAMENTAS



ANEXO G – INTERFACE DO SOFTWARE PSP-UFU – SIMULAÇÃO

