



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Dissertação de Mestrado

Estudos do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos de Produtores Independentes em Sistemas de Geração Distribuída via ATPDraw

Larissa Marques Peres
Mestranda

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, Ph.D.
Orientador

Prof. Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr.Sc.
Coorientador

Uberlândia, julho/2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

**Estudos do Desempenho Dinâmico de Geradores
Síncronos de Produtores Independentes em Sistemas de
Geração Distribuída via ATPDraw**

Dissertação de mestrado submetida à Universidade Federal de Uberlândia por Larissa Marques Peres como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

Geraldo Caixeta Guimarães, Ph.D. (Orientador) – UFU

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Dr.Sc. (Coorientador) – UFU

Kleiber David Rodrigues, Dr.Sc. – UFU

Rui Vagner Rodrigues da Silva, Dr.Sc. – IFET/GO

Geraldo Caixeta Guimarães

Orientador

Marcelo Lynce Ribeiro Chaves

Coorientador

Edgard Afonso Lamounier Júnior

Coordenador do Curso de Pós-graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Osmar e Elenita, às minhas irmãs Franciele e Taciana, ao meu noivo Diogo e a toda a minha família e amigos que sempre estiveram ao meu lado me incentivando e apoiando para a realização desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **Deus** pela minha vida, pela inteligência e sabedoria, dons indispensáveis para o desenvolvimento desta dissertação, e por tantas graças que **Ele** tem concedido a mim.

Aos meus pais **Osmar** e **Elenita**, às minhas irmãs **Franciele** e **Taciana**, e **demais familiares**, por sempre torcerem por mim e acreditarem no meu potencial, e que durante todos os momentos, deram total apoio para a realização desta, além da compreensão nas horas de minha ausência.

Ao meu noivo **Diogo** pelo seu companheirismo, carinho, dedicação, e que mesmo a distância, sempre está me apoiando e torcendo por mim.

Ao professor **Marcelo Lynce Ribeiro Chaves** pela confiança, paciência, compreensão, orientação e conhecimentos transmitidos durante todas as etapas deste trabalho.

Ao professor **Geraldo Caixeta Guimarães** por todo apoio, incentivo e tempo a mim dispensado em seus ensinamentos sobre o assunto aqui estudado.

Ao professor **Fabrício Augusto Matheus Moura** pela sua ajuda e contribuição para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos **amigos** por todo apoio, compreensão e carinho durante esses dois anos de mestrado, especialmente àqueles que me incentivaram a seguir em frente, nos momentos de fragilidade e indecisão.

À **Cinara Fagundes P. Mattos**, secretária da pós-graduação, pelas informações e auxílios prestados.

À **CAPES** (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

RESUMO

Estudos do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos de Produtores Independentes em Sistemas de Geração Distribuída via ATPDraw

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho dinâmico de um gerador síncrono e seus controles, num sistema de geração distribuída, assim como avaliar os impactos causados por este quando da sua operação conectado às redes de distribuição, utilizando a interface *ATPDraw* do *software ATP*.

Neste contexto, é primeiramente necessário obter modelos adequados para representar os sistemas de controle da máquina síncrona (regulador de tensão e regulador de velocidade e estabilizador do sistema) no *ATPDraw*.

Além disso, para análise de estabilidade é desenvolvido uma técnica matemática para o cálculo do ângulo de potência da máquina a qual é representada no *ATPDraw* por um dispositivo (ícone).

Para ajustar os parâmetros dos sistemas de controle de tensão e de velocidade são apresentados alguns procedimentos adotados, sendo estes verificados por meio de dois sistemas elétricos: o primeiro com um gerador síncrono conectado a uma rede de distribuição; e o segundo composto por três geradores distintos formando um sistema multimáquinas. Nesses sistemas são aplicados distúrbios do tipo rejeição de carga e curto-circuito para realização dos estudos.

Finalmente, com os resultados obtidos anteriormente, são realizados estudos do desempenho dinâmico de um gerador síncrono de um produtor independente, conectado a rede de distribuição, para avaliar aspectos de qualidade de energia (magnitude de tensão), de estabilidade e verificar as influências dos controles da máquina durante a resposta do sistema para uma dada rejeição de carga.

Palavras chave:

Geração distribuída, máquina síncrona, regulador de tensão, regulador de velocidade, ângulo de potência, *ATPDraw*, sistema multimáquinas.

ABSTRACT

Dynamic Performance Studies of Synchronous Generators of Independent Producers in Distributed Generation Systems via ATPDraw

This work aims to analyze the dynamic performance of a synchronous generator and its controls in a distributed generation system, as well as evaluate the impacts of its operation when connected to the distribution grid, using for this task the ATPDraw interface/tool of software ATP.

Within this context, it is firstly necessary to obtain suitable models to represent the synchronous machine control systems (voltage regulator, speed governor and stabilizer system) in ATPDraw.

Furthermore, for stability analysis, it is developed a mathematical technique to calculate the machine power angle which is represented in ATPDraw by a device (icon).

The adjustments of voltage and speed control system parameters are performed by some adopted procedures which are verified using two electric systems: the first one with a synchronous generator connected to the distribution grid; and the second with three distinct generators forming a multimachine system. In these systems some disturbances are applied such as load shedding and short-circuit to accomplish the studies.

Finally, with the previous results, it is carried out some dynamic performance studies of a synchronous generator of an independent producer connected to a distribution grid so as to assess aspects of power quality (voltage magnitude), stability and to evaluate the influence of machine controls during the system response for a given load shedding.

Keywords:

Distributed generation, synchronous machine, voltage regulator, speed governor, power angle, *ATPDraw*, multimachine system.

SUMÁRIO

Capítulo I - INTRODUÇÃO	1
1.1 – Considerações Iniciais.....	1
1.2 – Objetivos e Metas.....	2
1.3 – Contextualização do Tema e Estabelecimento de Diretrizes.....	3
1.4 – Contribuições oferecidas por esta Dissertação	9
1.5 – Estrutura da Dissertação.....	10
Capítulo II - MODELOS DA MÁQUINA SÍNCRONA E DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO PARA DETERMINAR O ÂNGULO DE POTÊNCIA.....	12
2.1 – Considerações Iniciais.....	12
2.2 – Descrição Física da Máquina Síncrona	13
2.2.1 – Partes Construtivas Principais de uma Máquina Síncrona	14
A) Estator	14
B) Rotor	15
C) Conjunto de Escovas e Anéis e Sistema <i>Brushless</i>	17
2.3 – Descrição Matemática da Máquina Síncrona	17
2.4 – Diagramas Fasoriais e Circuitos Elétricos Equivalentes do Gerador Síncrono.....	21
A) Reação de armadura em uma máquina síncrona	22
B) Efeito da Resistência e Reatância dos Enrolamentos da Armadura	23
C) Não Uniformidade do Circuito Magnético em Máquinas de Polos Salientes	23
2.4.1 – Diagrama Fasorial para o Gerador Síncrono de Polos lisos	24
2.4.2 – Diagrama Fasorial para o Gerador Síncrono de Polos Salientes	26
2.5 – Potências Ativas e Reativas dos Geradores Síncronos	28
2.6 – Equações Mecânicas da Máquina Síncrona	31
2.7 – Modelos da Máquina Síncrona Disponíveis no <i>ATPDraw</i>	33
2.8 – Desenvolvimento e Modelagem do Dispositivo para Determinar o Ângulo de Potência	37
2.8.1 – Inclusão do Efeito da Resistência de Armadura	41
2.8.2 – Verificação do Desempenho do Dispositivo para Determinar o Ângulo de Potência.....	45
2.9 – Considerações Finais.....	51
Capítulo III - MODELAGEM DOS REGULADORES DE TENSÃO E DE VELOCIDADE E DO ESTABILIZADOR DO SISTEMA.....	53
3.1 – Considerações Iniciais.....	53
3.2 – Justificativas para a Utilização do Regulador Automático de Tensão	54
3.2.1 – Esquema Simplificado do Sistema de Controle da Excitação	55
3.2.2 – Tipos de Sistemas de Excitação	56
3.3 – Modelagem Computacional do Regulador de Tensão.....	57
3.4 – Modelagem Computacional do Regulador de Tensão no <i>ATPDraw</i>	60
3.5 – A Máquina Primária e o Regulador de Velocidade.....	63

SUMÁRIO

3.6 – Tipos de Reguladores de Velocidade	64
3.7 – Modelagem Computacional do Regulador de Velocidade no <i>ATPDraw</i>	68
3.8 – Verificação da Característica Operacional dos Reguladores de Velocidade	70
3.8.1 – Estudos de Casos	75
3.9 – Função e Mecanismo de Atuação de um Estabilizador do Sistema ou Sinal Adicional Estabilizante	80
3.10 – Modelagem Computacional do Estabilizador no <i>ATPDraw</i>	85
3.11 – Considerações Finais	86
 Capítulo IV - ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE TENSÃO E DE VELOCIDADE	89
4.1 – Considerações Iniciais	89
4.2 – Especificações de Desempenho para um Sistema de Controle	90
4.2.1 – Especificações no Domínio do Tempo	91
4.3 – Ponderações sobre os Estudos que serão Feitos	93
4.4 – Sistema de Controle da Excitação: Influência dos Ganhos K_a e K_f na Resposta do Sistema	103
4.4.1 – Análise Computacional do Sistema de Controle da Excitação para o Gerador Síncrono de um Produtor Independente conectado ao Sistema Elétrico de Distribuição	104
A) Caso 1: Resultado da Variação da Tensão para K_f constante e K_a variando	105
B) Caso 2: Resultado da Variação da Tensão para K_a constante e K_f variando	108
4.4.2 – Análise Computacional do Sistema de Controle da Excitação para os Geradores Síncronos do Sistema Elétrico de Potência composto por 9 Barras	111
A) Caso 1: Resultado da Variação da Tensão para K_f constante e K_a variando	112
I. Análise Computacional para o Gerador 1 (G_1)	112
II. Análise Computacional para o Gerador 2 (G_2)	113
III. Análise Computacional para o Gerador 3 (G_3)	114
B) Caso 2: Resultado da Variação da Tensão para K_a constante e K_f variando	117
I. Análise Computacional para G_1	117
II. Análise Computacional para G_2	118
III. Análise Computacional para G_3	119
4.5 – Sistema de Controle da Velocidade: Influência da constante de Tempo (T_4) na Resposta do Sistema	121
4.5.1 – Análise Computacional do Sistema de Controle da Velocidade para o Gerador Conectado a Barra 1 do Sistema Elétrico de Potência composto por 9 Barras	123
4.6 – Considerações Finais	128
 Capítulo V - ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DE UM GERADOR SÍNCRONO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO, COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	131
5.1 – Considerações Iniciais	131
5.2 – Análise do Desempenho Dinâmico do Gerador Síncrono do PI conectado ao Sistema Elétrico de Distribuição	132
5.2.1 – Estudo de Caso: Rejeição de Carga	133
5.3 – Análise do Desempenho Dinâmico do Gerador Síncrono do PI, com Estabilizador, Conectado ao Sistema Elétrico de Distribuição	144
5.3.1 – Simulação do Estabilizador Aplicado no Gerador do Produtor Independente de Energia	146
5.4 – Considerações Finais	150
 Capítulo VI - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	152

SUMÁRIO

Referências Bibliográficas	157
Anexo.....	160
I – Algoritmo Implementado para Representar o Novo Ícone da Máquina Síncrona no ATPDraw	160
II – Algoritmo Implementado para o Dispositivo Desenvolvido para Determinar o Ângulo de Potência	161
III – Algoritmo Implementado para Representar o Regulador de Tensão no ATPDraw	165
IV – Algoritmo Implementado para Representar o Regulador de Velocidade no ATPDraw	166
V – Algoritmo Implementado para Representar o Regulador de Tensão junto com o PSS no ATPDraw.....	167

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Representação esquemática da máquina síncrona com polos salientes	14
Figura 2.2: Rotores das máquinas síncronas com polos lisos e com polos salientes.....	15
Figura 2.3: Polo saliente apresentando as barras do enrolamento amortecedor	17
Figura 2.4: Fluxos nos condutores da armadura e nos polos.....	22
Figura 2.5: Definição do eixo direto e do eixo em quadratura no rotor de polos salientes	24
Figura 2.6: Circuito elétrico equivalente do gerador síncrono de polos lisos	25
Figura 2.7: Diagrama fasorial para o gerador síncrono de polos lisos	25
Figura 2.8: Circuito elétrico equivalente do gerador síncrono de polos salientes	26
Figura 2.9: Diagrama fasorial para a máquina síncrona de polos salientes.....	27
Figura 2.10: Curva característica do ângulo de potência do gerador (P e δ).....	31
Figura 2.11: Ícone da máquina síncrona sem controle do ATPDraw.....	34
Figura 2.12: Ícone da máquina síncrona controlada do ATPDraw	34
Figura 2.13: Novo ícone criado para a representação da máquina síncrona no ATPDraw	36
Figura 2.14: Circuito equivalente do gerador síncrono incluindo o efeito da resistência de armadura (r_a).....	42
Figura 2.15: Diagrama fasorial para o gerador síncrono de polos salientes, com a inclusão da resistência de armadura	43
Figura 2.16: Ícone do dispositivo modelado no ATPDraw	44
Figura 2.17: Circuito equivalente, modelado no ATPDraw, para verificação do desempenho do dispositivo modelado.....	46
Figura 2.18: Ângulo de potência da máquina síncrona, com e sem o efeito da resistência de armadura (r_a), para o caso 1	47
Figura 2.19: Potências aparente, ativa e reativa trifásicas geradas, para o caso 1	47
Figura 2.20: Grandezas disponibilizadas pelo dispositivo desenvolvido, para o caso 1	48
Figura 2.21: Ângulo de potência da máquina síncrona, com e sem o efeito da resistência de armadura (r_a), para o caso 2	48
Figura 2.22: Potências aparente, ativa e reativa trifásicas geradas, para o caso 2	49
Figura 2.23: Grandezas disponibilizadas pelo dispositivo desenvolvido, para o caso 2	49
Figura 2.24: Ângulo de potência da máquina síncrona, com e sem o efeito da resistência de armadura (r_a), para o caso 3	50
Figura 2.25: Potências aparente, ativa e reativa trifásicas geradas, para o caso 3	50
Figura 2.26: Grandezas disponibilizadas pelo dispositivo desenvolvido, para o caso 3	51
Figura 3.1: Diagrama esquemático de um sistema de controle da excitação (AVR)	55
Figura 3.2: Modelo geral do regulador automático de tensão (AVR)	57
Figura 3.3: Modelo simples de regulador automático de tensão	57
Figura 3.4: Modelo mais avançado de regulador automático de tensão.....	58
Figura 3.5: Modelo de regulador de tensão: Tipo I do IEEE	59
Figura 3.6: Modelo de regulador de tensão: Tipo II do IEEE	60
Figura 3.7: Ícone representando o regulador de tensão no ATPDraw.....	62
Figura 3.8: Característica de “queda de velocidade” de uma máquina operando em um sistema elétrico	65
Figura 3.9: Diagrama esquemático para duas máquinas operando em paralelo com características de “queda de velocidade” diferentes suprindo uma mesma carga	65

LISTA DE FIGURA

Figura 3.10: Característica isócrona de um gerador operando em um sistema elétrico	66
Figura 3.11: Representação esquemática de duas máquinas operando em paralelo, uma com característica de “queda de velocidade” e a outra isócrona	67
Figura 3.12: Diagrama de blocos representando um modelo simples de um regulador de velocidade	68
Figura 3.13: Ícone representando o regulador de velocidade no ATPDraw.....	69
Figura 3.14: Sistema elétrico, modelado no ATPDraw, para verificação da característica operacional dos reguladores.....	70
Figura 3.15: Potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador síncrono 1, em regime permanente	72
Figura 3.16: Potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador síncrono 2, em regime permanente	73
Figura 3.17: Velocidades dos geradores 1 e 2, em regime permanente	73
Figura 3.18: Tensões (V _t) nos terminais dos geradores 1 e 2 , em regime permanente	73
Figura 3.19: Variáveis elétricas para o cálculo do valor do ângulo de potência	74
Figura 3.20: Potências ativas fornecidas pelos geradores 1 e 2, após a inserção de carga, com “queda de velocidade” de 5%	76
Figura 3.21: Velocidades dos geradores 1 e 2, após a inserção de carga, com “queda de velocidade” de 5%	76
Figura 3.22: Tensões (V _t) nos terminais dos geradores 1 e 2, após a inserção de carga, com “queda de velocidade” de 5%	77
Figura 3.23: Potências ativas fornecidas pelos geradores 1 e 2, após a inserção de carga, com “queda de velocidade” de 5%(G ₁) e 20% (G ₂).....	78
Figura 3.24: Velocidades dos geradores 1 e 2, após a inserção de carga, com “queda de velocidade” de 5% (G ₁) e 20% (G ₂)	80
Figura 3.25: Decomposição do torque elétrico em componente de sincronização e de amortecimento	81
Figura 3.26: Estrutura básica de um estabilizador, retirado da referência [11].....	82
Figura 3.27: Diagrama de blocos representando o modelo do estabilizador (Kundur)	83
Figura 3.28: Ícone representando o estabilizador (junto com o AVR) no ATPDraw	85
Figura 4.1: Resposta de uma variável do sistema (por exemplo: tensão terminal) a um degrau unitário	91
Figura 4.2: Sistema de distribuição conectado ao gerador do Produtor Independente de energia (PI) simulado no ATPDraw	94
Figura 4.3: Sistema Elétrico de Potência de 9 barras simulado no ATPDraw	96
Figura 4.4: Modelo de regulador de tensão: Tipo I do IEEE	99
Figura 4.5: Diagrama de blocos representando um modelo simples de um regulador de velocidade	99
Figura 4.6: Esquema geral do Sistema de Controle da Excitação, modelado no Matlab/Simulink.....	100
Figura 4.7: Esquema do Sistema de Controle da Velocidade, modelado no Matlab/Simulink	102
Figura 4.8: Respostas no tempo da tensão terminal (V _t) para a variação de K _a , usando o Matlab.....	105
Figura 4.9: Comportamento da tensão terminal (V _t), para a variação de K _a , após rejeição da carga 4 ligada a barra 3, usando o ATPDraw.....	107
Figura 4.10: Comportamento da tensão terminal (V _t),para a variação de K _a ,após inserção de uma nova carga no sistema, usando o ATPDraw	108
Figura 4.11: Respostas no tempo da tensão terminal (V _t) para a variação de K _f , usando o Matlab	109
Figura 4.12: Comportamento da tensão terminal (V _t),para a variação de K _f , após rejeição da carga 4 ligada a barra 3, usando o ATPDraw.....	110
Figura 4.13: Respostas no tempo da tensão terminal (V _t), para G ₁ , usando o Matlab.....	112
Figura 4.14: Respostas no tempo da tensão terminal (V _t), para G ₂ , usando o Matlab.....	113
Figura 4.15: Respostas no tempo da tensão terminal (V _t), para G ₃ , usando o Matlab.....	114
Figura 4.16: Comportamento da tensão terminal (V _t), para cada gerador, após um curto-circuito trifásico na barra 4, usando o ATPDraw	116

LISTA DE FIGURA

Figura 4.17: Comportamento da tensão terminal (V_t), para o G_3 , após um curto-círcuito trifásico na barra 4 ...	116
Figura 4.18: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t), para G_1 , usando o Matlab.....	118
Figura 4.19: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t), para G_2 , usando o Matlab.....	119
Figura 4.20: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t), para G_3 , usando o Matlab.....	120
Figura 4.21: Comportamento da tensão terminal (V_t), para o G_2 , após a perda de carga, usando o ATPDraw ..	121
Figura 4.22: Respostas no tempo da velocidade da máquina para a variação de T_4 , usando o Matlab	124
Figura 4.23: Respostas no tempo da velocidade da máquina para a variação de T_4 , com zoom da Figura 4.22.	124
Figura 4.24: Comportamento da velocidade do gerador 1, após um curto-círcuito trifásico na barra 4, variando o valor de T_4 e T_5 , usando o ATPDraw	126
Figura 4.25: Comportamento da velocidade do gerador 2,após um curto-círcuito trifásico na barra 4, variando o valor de T_5 , usando o ATPDraw.....	127
Figura 4.26: Comportamento da velocidade do gerador 3 ,após um curto-círcuito trifásico na barra 4, variando o valor de T_5 , usando o ATPDraw	127
Figura 5.1: Sistema de distribuição conectado ao gerador do Produtor Independente de energia (PI) simulado no ATPDraw	133
Figura 5.2: Tensões na barra 3: reguladores desativados (cor vermelha)e reguladores ativados (cor verde).....	135
Figura 5.3: Tensões na barra 4: reguladores desativados (cor vermelha)e reguladores ativados (cor verde).....	137
Figura 5.4: Resposta do regulador de tensão (tensão de excitação - E_f).....	137
Figura 5.5: Potência ativa fornecida pela Concessionária: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde).....	139
Figura 5.6: Potência ativa fornecida pelo gerador do PI: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde).....	139
Figura 5.7: Velocidade do gerador do PI: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde)	140
Figura 5.8: Potência mecânica do gerador do PI: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde).....	141
Figura 5.9: Ângulo de potência do gerador do PI: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde).....	142
Figura 5.10: Estrutura de um estabilizador (Kundur).....	145
Figura 5.11: Sistema de distribuição conectado ao Produtor Independente de energia simulado no ATPDraw, com PSS	145
Figura 5.12: Comportamento da velocidade da máquina síncrona, para a variação de K_{STAB} , após a perturbação no sistema.....	147
Figura 5.13: Resposta da velocidade do gerador do PI com a presença do estabilizador (curva preta) e quando este não está operando (curva vermelha)	148
Figura 5.14: Resposta da potência mecânica do gerador do PI com a presença do estabilizador (curva preta) e quando este não está operando (curva vermelha).....	148
Figura 5.15: Resposta da tensão terminal do gerador do PI com a presença do estabilizador (curva preta) e quando este não está operando (curva vermelha).....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Dados e parâmetros de entrada das máquinas síncronas	71
Tabela 3.2: Potências ativa e reativa de cada carga.....	71
Tabela 3.3: Dados e Parâmetros de entrada do AVR IEEE Tipo I.....	71
Tabela 3.4: Dados e Parâmetros de entrada do GOV.....	72
Tabela 4.1: Potências ativas e reativas geradas pelo sistema	95
Tabela 4.2: Dados e parâmetros de entrada da máquina síncrona do PI	95
Tabela 4.3: Dados e parâmetros de entrada das máquinas síncronas	96
Tabela 4.4: Dados dos transformadores e linhas de transmissão	97
Tabela 4.5: Dados de barra (potências e tensões)	98
Tabela 4.6: Parâmetros utilizados para as constantes do diagrama de blocos da Figura 4.6.....	103
Tabela 4.7: Resultados obtidos da Figura 4.8	106
Tabela 4.8: Resultados obtidos da Figura 4.11	109
Tabela 4.9: Resultados obtidos da Figura 4.13 – G ₁	113
Tabela 4.10: Resultados obtidos da Figura 4.14 – G ₂	114
Tabela 4.11: Resultados obtidos da Figura 4.15 – G ₃	115
Tabela 4.12: Resultados obtidos da Figura 4.18 – G1.....	118
Tabela 4.13: Resultados obtidos da Figura 4.19 – G ₂	119
Tabela 4.14: Resultados obtidos da Figura 4.20 – G ₃	120
Tabela 4.15: Parâmetros utilizados para as constantes do diagrama de blocos da Figura 4.7.....	122
Tabela 4.16: Resultados obtidos da Figura 4.22	125
Tabela 5.1: Faixas de Classificação de Tensões: Tensões de Regime Permanente – Pontos de Conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV	137
Tabela 5.2: Resultados obtidos da simulação, após a retirada do banco de capacitores.....	143
Tabela 5.3: Valores dos parâmetros do PSS (Kundur) simulados no ATPDraw	145

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O momento de crescimento econômico vivido pelo Brasil, aliado ao crescimento populacional, faz surgir uma crescente demanda de energia elétrica em todo o território nacional. Em épocas passadas, os empreendimentos para suprir o aumento dessa demanda eram feitos sem as barreiras promovidas pelas questões sociais e ambientais que existem hoje. Diante das restrições atuais, ganhou destaque uma solução alternativa – a geração distribuída – a qual trata de pequenas unidades geradoras, conectadas em sistemas de distribuição ou subtransmissão e, em alguns casos, ao lado das cargas a serem atendidas. Por se tratar de construções de menor porte, estas podem enfrentar mais favoravelmente as questões sociais e ambientais, possuindo ainda como vantagem adicional a capacidade de diminuir as perdas na transmissão e distribuição da energia.

Em um cenário que apresenta muitos geradores de pequena potência interligados pela rede de distribuição, os desempenhos destes geradores podem ocasionar oscilações no sistema de distribuição os quais, por sua vez, podem causar problemas ainda não enfrentados nas empresas do setor elétrico ou apresentados na literatura técnica. Nesse sentido, é importante analisar as

mudanças e impactos na operação dos sistemas de distribuição com geração independente de energia, seja do ponto de vista de dinâmica dos sistemas elétricos, ou mesmo, do ponto de vista de qualidade de energia elétrica, considerando que os sistemas de distribuição não foram projetados, originalmente, para suportar a inserção de unidades geradoras.

1.2 – OBJETIVOS E METAS

Diante da problemática apresentada, este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho dinâmico de um gerador síncrono, e seus controles, com geração distribuída, assim como os impactos causados por este na operação dos sistemas de distribuição, utilizando para isto, a interface *ATPDraw* do *software ATP*. Sendo assim, algumas metas devem ser cumpridas para atingir este objetivo, a saber:

- Escolher o modelo mais adequado da máquina síncrona, disponível no *software ATPDraw*, para ser utilizado nos estudos realizados nesta dissertação;
- Desenvolver um dispositivo para determinar o ângulo de potência do gerador síncrono;
- Modelar adequadamente, no *ATPDraw*, os sistemas de controle da máquina síncrona (reguladores de tensão e de velocidade e o estabilizador do sistema) para operarem em conjunto com a mesma;
- Apresentar procedimentos e técnicas para a análise dos sistemas de controle de tensão e de velocidade, que permitam discutir os parâmetros empregados para ajustá-los, conforme suas representações na forma de diagrama de blocos, analisando seus efeitos sobre o desempenho de um gerador síncrono.

1.3 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E ESTABELECIMENTO DE DIRETRIZES

Não há um consenso na definição de geração distribuída, divergindo normalmente no que se refere ao ponto de conexão do gerador na rede, nos níveis máximos de potência instalada e na classificação dos empreendimentos [1].

De acordo com [2], a geração distribuída pode ser definida como uma fonte de geração conectada diretamente na rede de distribuição ou ao consumidor. O autor da referência citada, divide a geração distribuída em função da potência em Micro (até 5 [kW]), Pequena (de 5 [kW] a 5 [MW]), Média (de 5 [MW] a 50 [MW]) e Grande (de 50 [MW] a 300 [MW]), valores estes que consideram a realidade americana. No Brasil, a geração distribuída é normalmente limitada superiormente por uma potência instalada de 30 [MW] ou de 50 [MW] [1].

Existem basicamente três tipos de geração distribuída, considerando apenas as características elétricas: os geradores síncronos (como os turbogeradores movidos por turbinas térmicas ou a gás), geradores assíncronos (por exemplo, os eólicos e acionados por motores de combustão interna a diesel) e os inversores utilizados como interface entre a rede de distribuição e componentes que geram energia elétrica na forma de corrente contínua, como no caso das células combustíveis, painéis fotovoltaicos e microturbinas, sendo que nestes casos devido a avanços da microeletrônica e de mudanças das legislações, tem sido ampliado [3].

Os sistemas de geração distribuída são caracterizados pela flexibilidade em relação ao uso do combustível para geração de energia elétrica, a saber: biomassa (cogeração), carvão, rejeitos sólidos de agroindústrias e da indústria madeireira; e também pela diversidade tecnológica utilizada, como por exemplo, motores e células combustíveis e microturbinas [4].

A cogeração é o processo de geração simultânea de energia elétrica e térmica, por meio da queima de um combustível. Esta pode ser considerada uma forma de geração distribuída, pois se localiza próximo a carga. A cogeração é muito utilizada na indústria, tendo como combustível um subproduto do processo industrial.

No Brasil, um dos maiores empreendimentos de geração distribuída é a cogeração a partir da biomassa da cana-de-açúcar. Na indústria açucareira o bagaço da cana é um subproduto do processo industrial. Sendo assim, este bagaço pode ser queimado gerando energia térmica e elétrica. A cogeração pode ser implantada utilizando-se diferentes arranjos de equipamentos, como por exemplo, os arranjos de turbogeradores acoplados a turbinas a vapor e caldeiras convencionais [5].

Dependendo da legislação local a Geração Distribuída é vista de forma distinta. No Brasil este tipo de geração é geralmente implementado pelos Produtores Independentes de energia (PI) ou pelos Autoprodutores. De acordo com [6], Produtores Independentes de energia são empresas reunidas em consórcio ou pessoa jurídica (acessante) que recebem autorização ou concessão para produzir energia elétrica destinada à comercialização de toda ou parte da energia gerada, por sua conta e risco. Autoprodutores são empresas reunidas em consórcio ou pessoa jurídica ou física que recebem autorização ou concessão para gerar energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo. Quando esta mesma pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio geram energia elétrica para o seu consumo e vendem o excesso de geração para a concessionária ou a terceiros, são denominados de Autoprodutores com venda de excedentes.

Desta forma, nos estudos realizados nesta dissertação será analisado o desempenho dinâmico do gerador de um Produtor Independente de energia (PI) e os impactos causados por este na operação dos sistemas de distribuição. Neste caso, a energia elétrica, proveniente da geração distribuída, é fornecida por um

gerador síncrono e a máquina primária é uma turbina térmica cujo vapor é oriundo da queima do bagaço da cana-de-açúcar (cogeração).

A compreensão do funcionamento de um gerador síncrono e a sua correta modelagem são etapas importantes para o estudo de dinâmica e estabilidade de sistemas elétricos, podendo ser o principal diferenciador de resultados. Os sistemas de controle da máquina também são alvos de estudos, uma vez que estes atuam de forma a garantir o suprimento contínuo de energia, mantendo a frequência e a tensão dentro dos limites aceitáveis pré-definidos.

Uma máquina síncrona consiste essencialmente de dois elementos: enrolamento de campo (inserido no rotor da máquina) e enrolamento de armadura (distribuído ao longo da periferia do estator). Além desses essenciais enrolamentos, a máquina síncrona pode ser dotada de enrolamentos amortecedores. Nas referências [7] e [8] são apresentadas as principais partes construtivas da máquina síncrona, com uma descrição detalhada do rotor e do estator, bem como o seu princípio de funcionamento.

Em estudos sobre o comportamento dos geradores síncronos e as características das grandezas elétricas do sistema (tensão, frequência, potência elétrica, ângulo de potência, entre outras) perante contingências, é conveniente utilizar a transformação de Park, ou seja, abc – dq0. Desta forma, com a velocidade síncrona na referência do sistema dq0, as grandezas elétricas são constantes no tempo para a operação em regime permanente. As referências [9] e [10] mostram algebricamente esta transformação de coordenadas.

Em [10] é apresentado o modelo da máquina síncrona, bem como os diagramas fasoriais e os circuitos elétricos equivalentes do gerador com rotores de polos lisos e com rotores de polos salientes, descritos por equações diferenciais referenciadas aos eixos d e q da máquina.

Os estudos de dinâmica e estabilidade dos sistemas elétricos verificam o desempenho dos sistemas após distúrbios de grande impacto e se um novo ponto

de operação, em regime permanente, será buscado pelo sistema após o impacto e quais os procedimentos utilizados para que isso aconteça.

Normalmente, problemas de estabilidade transitória consideram-se faltas e distúrbios que causam variações significativas do ângulo de potência dos geradores síncronos durante o período transitório, isto é, nos primeiros instantes ao da eliminação da falta [11].

Já os estudos de estabilidade dinâmica analisam a estabilidade do sistema como um todo, incluindo as ações dos Sistemas de Controle da máquina síncrona: reguladores de tensão e de velocidade.

De acordo com a referência [12] o aumento da inserção da geração distribuída pode afetar significativamente os tipos de estabilidade (de frequência, de tensão e do ângulo do rotor), do sistema elétrico de distribuição e da geração independente (gerador síncrono) conectado a esta rede.

Nos atuais Sistemas Elétricos, de acordo com [13], o problema da estabilidade do ângulo do rotor da máquina é mais frequente sob a forma de amortecimento insuficiente das oscilações da máquina ou do sistema elétrico.

Quando o desempenho de gerador síncrono é analisado em sistemas elétricos [11], é útil expressar o ângulo do rotor em termos de um ângulo elétrico que pode ser relacionado com a posição do rotor, denominado de ângulo de torque ou ângulo de potência (δ). Nesse sentido, foi necessário modelar um dispositivo para possibilitar a análise do comportamento do ângulo de potência para estudos de estabilidade do sistema elétrico.

As oscilações pouco amortecidas dos geradores síncronos podem ser analisadas como um problema de estabilidade dinâmica [11], considerando que mesmo garantindo o sincronismo dos geradores (através de uma margem de estabilidade transitória), espera-se que, mesmo após a eliminação da perturbação, as oscilações das variáveis da rede (tensão, frequência, potência e ângulo de potência) sejam amortecidas brevemente, prevenindo assim problemas relacionados à qualidade da energia fornecida aos consumidores.

Essas oscilações são normalmente amortecidas pelos Estabilizadores do Sistema de Potência (do inglês: *Power System Stabilizer – PSS*). Estes controladores fornecem amortecimento suplementar através de um sinal estabilizante adicionado ao regulador de tensão [10].

Nesse sentido, é importante ressaltar que um bom projeto de reguladores de tensão e de velocidade e do Estabilizador, são fatores imprescindíveis para atingir a estabilidade.

Nas referências [9], [10] e [14] são mostrados os tipos de reguladores de tensão, bem com suas definições, características e modelos práticos para o sistema de excitação dos geradores.

Um modelo do controlador de velocidade e as análises do comportamento deste sistema para máquinas síncronas são descritos nas referências [9], [11] e [15]. São citados os principais tipos de máquinas primárias (turbina térmica / hidráulica) utilizadas para acionar os geradores de energia elétrica.

Em [10] são apresentados modelos de estabilizadores de sistemas de potência, que descrevem os parâmetros do estabilizador para aplicação em estudos de pequenos sinais e estabilidade transitória. E, além disso, comenta sobre os tipos de sinais de entrada, normalmente utilizados para este controlador.

Também é mostrado em [16] um modelo de estabilizador do sistema, que detalha suas definições e características. Já em [17] são discutidos conceitos básicos para se compreender o funcionamento e os métodos de ajustes dos estabilizadores.

Em [18] são apresentados diferentes métodos para o projeto do estabilizador, dentre eles ressaltam-se: métodos de comparação de grandezas no domínio do tempo; e métodos de compensação de fase.

Na referência [3], é desenvolvida uma metodologia a qual se propõe investigar o uso de IDLNs (Inclusão Diferencial Linear Limitada por Normas)

para o projeto de controladores de amortecimento com aplicação em sistemas de distribuição equipados com geradores síncronos.

A referência [9] especifica os valores típicos de projetos para os parâmetros das máquinas síncronas e de seus sistemas de controle (reguladores de velocidade e de tensão; e estabilizador do sistema). Vários estudos são realizados baseados nestes parâmetros fornecidos por [9]. No entanto, é importante enfatizar que um bom projeto de reguladores de tensão e de velocidade, associado aos ajustes adequados de seus controles, são fatores imprescindíveis para atingir a estabilidade.

Desta forma, serão feitas análises para encontrar os melhores valores para alguns parâmetros dos reguladores de velocidade e de tensão, baseando-se nas quantidades pertinentes para especificar o desempenho de um sistema de controle no domínio do tempo, sendo eles: *overshoot* (ultrapassagem), *settling time* (tempo de assentamento) e *rise time* (tempo de crescimento) [19].

Na referência [20] é feita uma análise de desempenho de um gerador síncrono, com seus respectivos reguladores de tensão e velocidade, em paralelo com um sistema de distribuição, através de um disjuntor de interconexão e um transformador de isolamento [21], para estudos de geração distribuída. Ressalta-se que o gerador síncrono e seus reguladores, bem como todo o sistema de distribuição, nessa tese de doutorado, foram modelados no *Alternative Transients Program – ATP*, utilizando a linguagem de programação deste *software*, que segue algumas normas pré-definidas originárias do antigo *Fortran* em forma de cartões (linhas de códigos).

Dessa forma, devido a complexidade inerente deste algoritmo, essa dissertação apresenta os modelos computacionais dos reguladores de velocidade e de tensão desenvolvidos no ambiente *ATPDraw* através de ícones específicos, bem como a implementação e modelagem de um estabilizador ou controlador de amortecimento. Essas modelagens permitem que o usuário possa alterar com

facilidade os parâmetros dos componentes do sistema que deseja simular, além de ser uma interface didática e de fácil compreensão.

Esses controladores atuam de forma a garantir o suprimento contínuo de energia, e ao mesmo tempo, respeitando certos padrões de qualidade, os quais consistem na manutenção da frequência e tensão dentro de certos limites.

Vale ressaltar que será utilizada a função *Data Base Modularization – DBM* [22] e a rotina denominada *Transient Analysis of Control Systems – TACS* [23] do *software ATP* para a implementação e a criação de modelos para a representação dos controles da máquina síncrona no *ATPDraw*. Será ainda utilizada a linguagem de programação do *ATP* denominada *MODELS*, para a modelagem e desenvolvimento de um dispositivo para determinar o ângulo de potência (δ) [24].

Existem várias normas e recomendações para a regulamentação dos limites da variação da tensão e da frequência em regime permanente. No âmbito Nacional, o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia – PRODIST [25] indica os padrões e valores típicos aceitáveis para as variações de tensão em regime permanente, para todo o sistema.

As referências [21] e [26] serão adotadas como guias para as análises a serem realizadas, com relação às variações de frequência do sistema elétrico de distribuição e a operação eficaz dos equipamentos computadorizados.

1.4 – CONTRIBUIÇÕES OFERECIDAS POR ESTA DISSERTAÇÃO

Dentro do contexto apresentado, esta dissertação irá contribuir nos seguintes aspectos:

- Implementação computacional de modelos dos reguladores de velocidade e de tensão e do estabilizador de um gerador síncrono no *software ATP* em sua interface *ATPDraw*;

- Desenvolvimento de um dispositivo para determinar o ângulo de potência e disponibilizar em sua saída as variáveis elétricas da rede (tensão; frequência; potências ativa, reativa e aparente; fator de potência e ângulo do fator de potência) e do gerador síncrono (tensão interna do gerador);
- Apresentação de alguns procedimentos utilizados para encontrar os valores mais adequados, dentro de uma faixa típica, para os parâmetros dos controles da máquina síncrona de um sistema de distribuição com um produtor independente e um sistema multimáquinas;
- Análise do desempenho do gerador síncrono do Produtor Independente de energia, e de seus reguladores, conectado ao sistema de distribuição perante uma perturbação;
- Análise comparativa do desempenho da máquina síncrona da geração independente, com e sem a inserção do estabilizador no sistema de excitação, conectada a rede de distribuição.

1.5 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A fim de alcançar os objetivos aqui propostos, além do presente capítulo, esta dissertação será estruturada conforme apresentado na sequência:

Capítulo II - Modelos da Máquina Síncrona e Desenvolvimento do Dispositivo para Determinar o Ângulo de potência

Este capítulo destina-se a sintetizar as características e definições da máquina síncrona, e sua modelagem computacional no programa *ATPDraw*. Além disso, será desenvolvido e modelado um dispositivo para determinar o ângulo de potência e a tensão interna da máquina síncrona.

Capítulo III - Modelagem dos Reguladores de Tensão e de Velocidade e do Estabilizador do Sistema

Esta unidade tem por foco principal abordar as funções dos Sistemas de Controle da Tensão e da Velocidade e do Estabilizador do Sistema ou Sinal Adicional Estabilizante, apresentando os mecanismos e efeitos da atuação desses controles, bem como suas modelagens no *ATPDraw*.

Capítulo IV - Análise das Influências dos Sistemas de Controle de Tensão e de Velocidade

Apresentação dos procedimentos e técnicas utilizados para análise dos sistemas de controle da excitação e da velocidade, com o intuito de realizar o ajuste adequado de alguns parâmetros desses reguladores, encontrando os valores que fornecerão a melhor resposta para o sistema. As modelagens e simulações serão realizadas no *Matlab/Simulink* e no software *ATP*.

Capítulo V - Análise do Desempenho Dinâmico de um Gerador Síncrono em Sistemas de Distribuição, com Geração Distribuída

Este capítulo contempla a análise do desempenho dinâmico do gerador síncrono de um Produtor Independente de energia conectado ao sistema elétrico de distribuição, após uma perturbação no sistema. São avaliados aspectos da qualidade da energia elétrica (magnitude de tensão), estabilidade do ângulo de potência e o comportamento dos controles da máquina síncrona. E também será estudado, o mecanismo e o efeito de atuação de um estabilizador aplicado ao regulador de tensão da máquina síncrona da geração independente.

Capítulo VI - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta as principais contribuições do trabalho e suas conclusões finais, bem como aponta sugestões de novas pesquisas relacionadas com esta dissertação.

CAPÍTULO II

MODELOS DA MÁQUINA SÍNCRONA E DESENVOLVIMENTO DO DISPOSITIVO PARA DETERMINAR O ÂNGULO DE POTÊNCIA

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A compreensão do funcionamento de um gerador síncrono e a sua correta modelagem são etapas importantes para o estudo do desempenho dinâmico do gerador de um Produtor Independente de energia e os impactos causados por este na operação dos sistemas de distribuição.

Nesse sentido, este Capítulo tem como objetivo realizar uma breve descrição do funcionamento de um gerador síncrono. Além disso, serão abordadas as principais partes construtivas da máquina e, de forma sucinta, será apresentada a simplificação das equações elétricas da resposta dinâmica do gerador síncrono, por meio da Transformação de Park. Na sequência serão mostradas as equações elétricas e mecânicas utilizadas para a modelagem da máquina.

Diagramas fasoriais e os circuitos elétricos equivalentes do gerador síncrono com rotores de polos lisos e com rotores de polos salientes serão

apresentados, bem como as expressões da tensão interna gerada, do ângulo de potência e das potências ativa e reativa fornecidas pela máquina.

O *software ATP* disponibiliza em sua biblioteca dois modelos da máquina síncrona: SM 59 sem controle e SM 59 controlada. Desta forma, serão abordadas as características e peculiaridades de cada modelo disponível do gerador, bem como a escolha do mais adequado para representar a geração independente, em sistemas com geração distribuída.

Portanto, além do modelo da máquina síncrona no *ATPDraw*, será desenvolvido e modelado um dispositivo, o qual calcula o ângulo de potência no domínio do tempo. Esse dispositivo também disponibiliza em sua saída a tensão interna da máquina síncrona (E_g) e algumas variáveis elétricas da rede (por exemplo: tensão, corrente, potências ativa e reativa).

2.2 – DESCRIÇÃO FÍSICA DA MÁQUINA SÍNCRONA

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.

A máquina síncrona é constituída pelo rotor, parte mais interna que é girante (formado pelo enrolamento de campo ou indutor), e pelo estator, parte mais 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. Uma fonte de corrente contínua exterior é ligada a esses anéis por meio de escovas de carvão, 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, porém, essa é a mais comum. Nos enrolamentos do estator são induzidas as tensões geradas para o sistema elétrico. A Figura 2.1

mostra uma representação esquemática da máquina síncrona com polos salientes, ressaltando as suas partes principais.

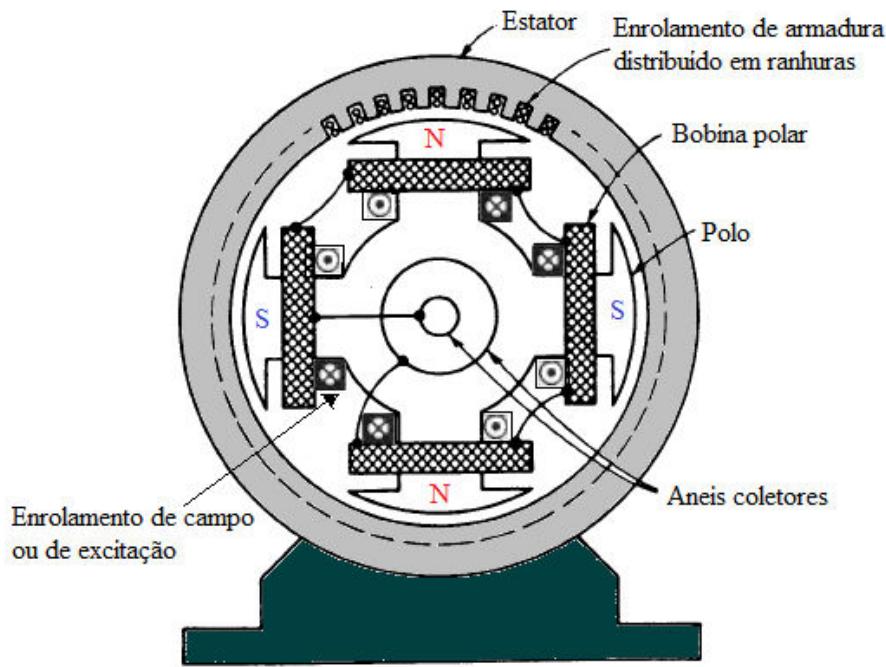


Figura 2.1: Representação esquemática da máquina síncrona com polos salientes

2.2.1 – PARTES CONSTRUTIVAS PRINCIPAIS DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

As partes construtivas principais de uma máquina síncrona são apresentadas e discutidas brevemente nesta seção.

A) ESTATOR

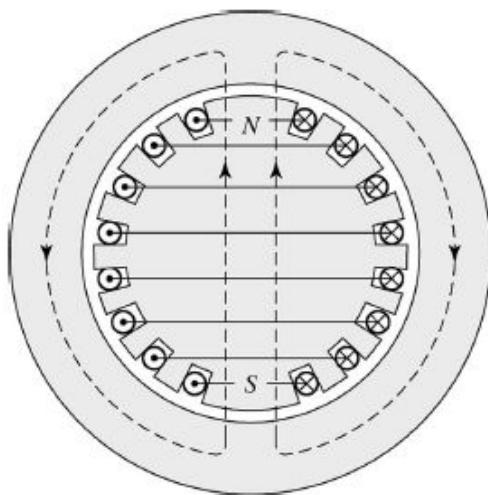
O estator da máquina síncrona é formado de chapas laminadas dotadas de ranhuras axiais onde se encontra alojado o enrolamento do estator. As chapas apresentam características magnéticas de alta permeabilidade, o que permite criar um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, diminuindo o fluxo disperso e concentrando o campo no entreferro [7].

O enrolamento do estator denominado de enrolamento de armadura ou induzido pode ser monofásico ou trifásico. Geralmente, as máquinas síncronas são trifásicas, uma vez que os geradores monofásicos são mais utilizados para

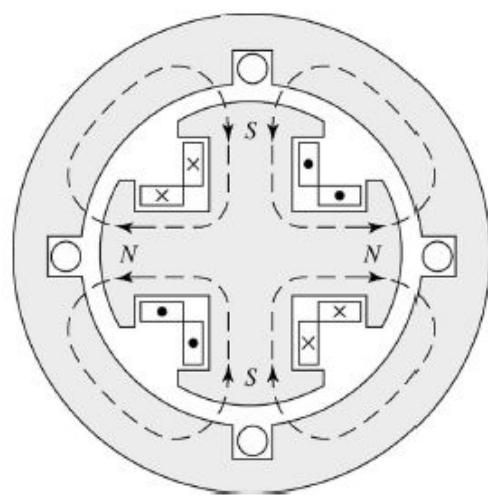
fornecer energia elétrica às cargas de pequenas potências, ou quando não existe uma rede trifásica disponível, como por exemplo, em áreas rurais.

B) ROTOR

O rotor da máquina síncrona também é formado de chapas laminadas que normalmente são do mesmo material que o estator. O rotor, do ponto de vista construtivo, pode ser de dois tipos, dependendo da existência de saliência ou não: rotores de polos lisos e rotores de polos salientes, conforme ilustrado na Figura 2.2. Esta diferenciação conduz a construção de modelos equivalentes diferentes, porém não modifica o princípio de funcionamento, que permanece o mesmo para os dois tipos de rotores (com polos lisos e com polos salientes).



Rotor de polos lisos



Rotor de polos salientes

Figura 2.2: Rotores das máquinas síncronas com polos lisos e com polos salientes

As máquinas síncronas com rotores de polos lisos são geralmente empregadas em turbogeradores, com número de polos igual a 2 ou 4. Desta forma, constroem-se máquinas que rodam a velocidades elevadas uma vez que não se ultrapassa com este tipo de enrolamento o total de 4 pólos. São compostas de peças com grande resistência mecânica, geralmente com rotores

maciços em aço [8]. Em sistemas com geração distribuída, normalmente, são utilizados geradores síncronos com rotor de polos lisos.

Já os geradores síncronos com rotores de polos salientes são normalmente empregados com número de polos igual ou superior a 4. Este tipo de máquina é usado, por exemplo, em centrais hidroelétricas, acoplado a turbinas hidráulicas que operam com baixa rotação, sendo por isso necessário, geradores com alto número de polos. A escolha da quantidade de polos é ditada pela rotação mais adequada para a máquina primária, observando a frequência da tensão gerada. Em turbinas hidráulicas a velocidade de rotação varia em função da pressão hidráulica existente, em função da altura da queda de água e também varia de acordo com o tipo da turbina (Kaplan, Francis, Pelton, entre outras) [8].

Em se tratando do enrolamento do rotor, denominado de enrolamento de campo ou de excitação, este, no caso de polos salientes, é alojado no espaço interpolar. Já no caso de polos lisos o enrolamento de excitação é distribuído em ranhuras cobrindo apenas uma parte da superfície do rotor.

Na maioria das máquinas síncronas, além dos enrolamentos de campo e de armadura, existe outro denominado de enrolamento amortecedor, mostrado na Figura 2.3, que é alojado em ranhuras semi-abertas e de formato redondo sobre a superfície do rotor. Este enrolamento destina-se a amortecer oscilações que acontecem em condições transitórias, como por exemplo, uma rejeição brusca de carga, um curto-circuito; possibilitando uma maior estabilidade à máquina [7] e [8].

De acordo com [9] em condições normais de operação e em regime permanente não há tensão e corrente induzidas no enrolamento amortecedor. Isto só acontece quando ocorrem fenômenos transitórios na máquina síncrona. Desta forma, as dimensões do enrolamento amortecedor são mais reduzidas em relação às do estator e do rotor.

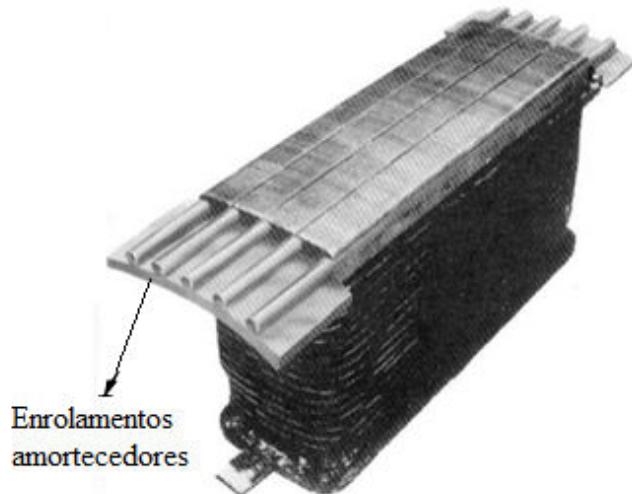


Figura 2.3: Polo saliente apresentando as barras do enrolamento amortecedor

C) CONJUNTO DE ESCOVAS E ANÉIS E SISTEMA *BRUSHLESS*

As escovas e anéis têm a função de conectar a fonte de corrente contínua com os polos do rotor. Considerando que ao longo do tempo estes componentes (escovas e anéis) se desgastam e podem produzir faíscas e interferência eletromagnética, os geradores, geralmente, estão sendo empregados com excitação sem escovas. Neste caso, a excitação é fornecida através de excitatrices auxiliares montadas no eixo da máquina e de dispositivos a base de semicondutores. Com este dispositivo, geralmente denominado por “Sistema *Brushless*”, consegue-se impor uma corrente de excitação no rotor controlável sem a utilização de anéis e escovas. Detalhes desta forma de excitação podem ser encontrados nas referências [7] e [8].

2.3 – DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DA MÁQUINA SÍNCRONA

O enrolamento de campo (alojado nos polos) do rotor da máquina síncrona é alimentado por uma fonte de corrente contínua por meio de anéis deslizantes, como foi mostrada na Figura 2.1. Com a circulação de corrente neste enrolamento, estabelece-se um campo magnético, que se fecha entre os polos através do estator, onde se encontra os condutores de armadura. Como o

rotor do gerador síncrono possui o seu eixo acoplado mecanicamente à máquina primária (turbina hidráulica/térmica), 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 2.1.

$$e = N\Phi\omega \operatorname{sen}(\omega t) \quad (2.1)$$

Onde:

N = Número de espiras por fase

Φ = Fluxo magnético de entreferro por polo (Wb)

ω = velocidade de rotação (rad/s)

t = tempo (s)

Pela equação 2.1 é possível obter o valor máximo da tensão induzida e o seu valor eficaz, como apresentadas pelas expressões 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$E_m = N\Phi\omega = N\Phi 2\pi f \quad (2.2)$$

$$E_F = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \right) N\Phi f = 4,44 N\Phi f \quad (2.3)$$

A frequência da tensão gerada é dada pela expressão 2.4.

$$f = \frac{nP}{120} \quad (2.4)$$

Onde:

f = frequência do rotor (Hz)

n = velocidade do rotor (rpm)

P = Número de polos do gerador

De acordo com [10] e analisando a expressão 2.1, 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.

Nesse contexto, é de grande valia obter equações simplificadas da resposta dinâmica da máquina síncrona. Para isso, utiliza-se uma ferramenta matemática denominada de *Transformação de Park*. Esta transformação altera o referencial do sistema, da referência estática para uma referência rotacional que acompanha o sentido do movimento do rotor. Deste modo, as variáveis da máquina síncrona não serão mais dependentes do tempo, sendo expressas agora em relação aos dois eixos girantes d e q e um terceiro eixo estático associado à componente de sequência zero [9] e [10].

A mudança de coordenadas obtida faz com que o enrolamento trifásico de armadura passe a ser representado por um conjunto de três enrolamentos equivalentes fictícios situados sob os eixos d , q e 0 de sequência zero.

A matriz de transformação de Park é representada pela matriz \mathbf{P} , sendo expressa pela equação 2.4, onde θ é o ângulo referente à posição do rotor, em radianos elétricos. As correntes i_0 , i_d , i_q se relacionam com as correntes i_a , i_b , i_c através da matriz de transformação de Park, conforme mostra a equação 2.5.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 \\ \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Similarmente, as tensões e fluxos nos enrolamentos reais podem ser obtidos dos valores fictícios, como mostra as equações 2.6 e 2.7, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_q \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

As equações de tensão e de corrente sob a forma d, q e 0 (obtidas pela Transformação de Park) para os enrolamentos do estator e do rotor do gerador síncrono, envolvem parâmetros da máquina que são difíceis de serem obtidos na prática. De acordo com [10] uma representação mais simples do modelo do gerador pode ser obtida, eliminando algumas variáveis e pelo reajuste das expressões resultantes. Esta simplificação é conseguida definindo-se bases convenientes para as grandezas físicas (tensão e corrente) dos enrolamentos do estator e do rotor e utilizando-se o sistema por unidade (pu) ou em porcentagem (%) da base.

Depois da simplificação das equações pelo uso do sistema por unidade, ainda é possível eliminar algumas variáveis, resultando em equações que estão em função das correntes e tensões de armadura e de campo. Essas novas

expressões incorporam parâmetros da máquina normalmente disponibilizados pelos fabricantes (reatâncias e constantes de tempo, entre outras). Portanto, a próxima seção irá apresentar o circuito equivalente e as equações elétricas e mecânicas utilizadas para a representação da máquina síncrona.

2.4 – DIAGRAMAS FASORIAIS E CIRCUITOS ELÉTRICOS EQUIVALENTES DO GERADOR SÍNCRONO

A tensão induzida no enrolamento do estator em uma fase do gerador síncrono será denominada de E_g . De acordo com o que foi mostrado na seção 2.3, essa tensão é diretamente proporcional à frequência e ao fluxo. Como o gerador opera com frequência constante (característica imposta pelo sistema elétrico), e o fluxo depende da corrente no circuito de campo, a tensão E_g está diretamente vinculada somente com a corrente de campo. Porém, essa tensão interna do gerador não é normalmente a tensão que aparece nos terminais da máquina. Ela só será a mesma da tensão terminal de saída (V_t) quando não existir corrente percorrendo os enrolamentos de armadura, ou seja, com a máquina operando em vazio.

Existem alguns fatores que contribuem para a diferença entre E_g e V_t , sendo eles:

- O efeito magnético das correntes da armadura ou estator no fluxo de entreferro da máquina, denominado de reação de armadura.
- A reatância de dispersão das bobinas da armadura.
- A resistência dos enrolamentos de armadura.
- Não uniformidade do circuito magnético presente em máquinas de polos salientes.

A) REAÇÃO DE ARMADURA EM UMA MÁQUINA SÍNCRONA

Quando uma corrente circula nos enrolamentos de armadura de uma máquina síncrona, em torno dos condutores é produzido um campo magnético (circular) que se combina vetorialmente com o campo magnético indutor (fluxo principal, gerado pelos polos).

O campo magnético produzido pelas correntes de armadura é transversal e tende a distorcer o fluxo principal. Assim o fluxo total efetivo em um gerador síncrono decresce. Esta ação do fluxo da armadura sobre o fluxo principal é denominado reação de armadura [8].

De acordo com [7] a reação de armadura depende da intensidade da corrente nos enrolamentos de armadura e também da defasagem desta em relação à força eletromotriz induzida, em que os polos do rotor se deslocam em relação à armadura.

Na Figura 2.4, a corrente está em atraso em relação à f.e.m gerada, desta forma, o campo magnético devido à reação da armadura tende a reduzir o fluxo útil no entreferro. Nesse caso, a reação da armadura é dita desmagnetizante e diminui o fluxo no entreferro.

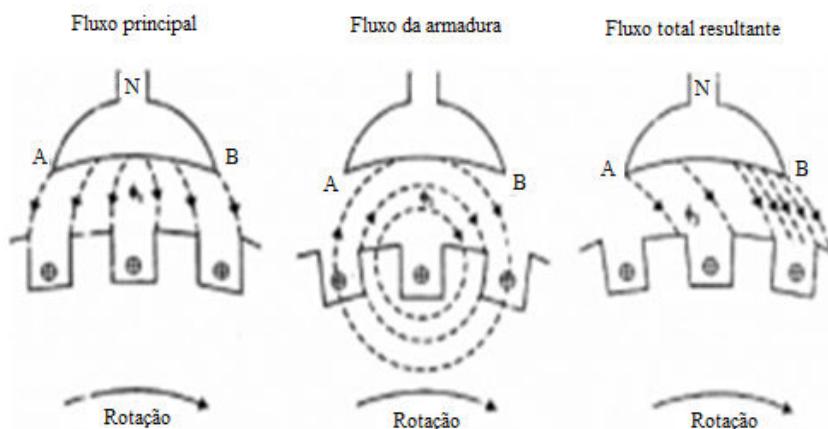


Figura 2.4: Fluxos nos condutores da armadura e nos polos

A reação de armadura é uma das causas no decréscimo da força eletromotriz em geradores síncronos. Este efeito é muito importante ao se

considerar às perdas de armadura e outras perdas existentes na máquina, pois estas contribuem de alguma forma para a queda da força eletromotriz gerada [8].

B) EFEITO DA RESISTÊNCIA E REATÂNCIA DOS ENROLAMENTOS DA ARMADURA

Além do efeito da reação de armadura, tem-se o efeito da queda de tensão na resistência (r_a) e na reatância de dispersão (x_a) dos enrolamentos de armadura.

Os efeitos magnéticos podem ser combinados em uma única reatância, denominada de reatância síncrona do gerador (x_s). Este termo é amplamente empregado, e grande parte da literatura o utiliza.

C) NÃO UNIFORMIDADE DO CIRCUITO MAGNÉTICO EM MÁQUINAS DE POLOS SALIENTES

O fluxo de reação produzido pelo enrolamento de armadura de uma máquina síncrona depende do valor do comprimento do entreferro – espaço físico existente entre rotor e estator [7]. Nos rotores de polos lisos o entreferro é uniforme ao longo da periferia do rotor, o que garante uma relutância constante para o fluxo que atravessa o entreferro e, por conseguinte, o valor da reatância síncrona não varia. Sendo assim, a reatância para este gerador é representada pela reatância síncrona da máquina (x_s).

Nos rotores de polos salientes, o comprimento do entreferro varia ao longo da periferia do rotor. Desta forma, a relutância do circuito magnético não é constante, ou seja, esta mudará com a posição do rotor em virtude das variações no entreferro. Nesse sentido, o valor da reatância também varia com a posição angular do rotor [7]. Sendo assim, obtêm-se as reatâncias da máquina com rotores de polos salientes empregando o método baseado na teoria das duas reatâncias de Blondel.

Essa teoria consiste na definição de dois eixos de simetria no rotor: o eixo direto ou eixo polar que apresenta menor relutância em sua direção e o eixo em quadratura ou eixo interpolar, que se encontra a 90° elétricos defasados do eixo d e possui maior relutância em sua direção.

Uma vez que os eixos direto e em quadratura estão associados ao rotor, ambos giram na velocidade síncrona ω . Desta forma, surge a reatância de eixo direto (x_d) e a reatância de eixo em quadratura (x_q). A figura 2.5 mostra a definição dos eixos d e q .

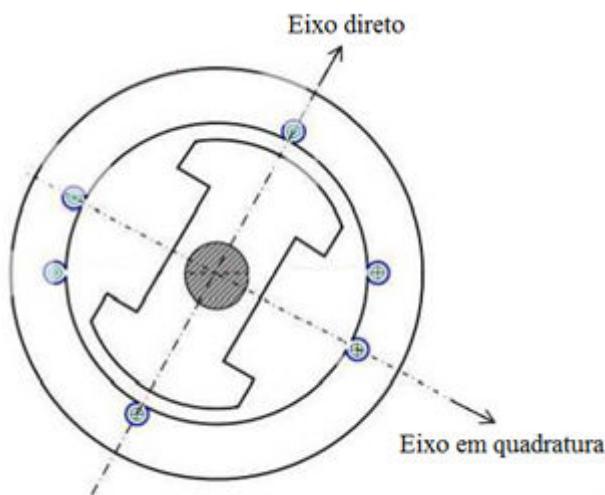


Figura 2.5: Definição do eixo direto e do eixo em quadratura no rotor de polos salientes

2.4.1 – DIAGRAMA FASORIAL PARA O GERADOR SÍNCRONO DE POLOS LISOS

Nos geradores de polos lisos a relutância do circuito magnético ao fluxo de reação da armadura independe da posição do rotor, como já citado anteriormente. Desta forma, o efeito da reação da armadura e os fluxos de dispersão são também independentes da posição do rotor, podendo ser representados por uma única reatância, a reatância síncrona (x_s).

Para a construção do diagrama fasorial, normalmente, faz-se a análise do circuito equivalente, como apresentado na Figura 2.6. Este circuito consiste de um gerador síncrono de polos lisos com suas respectivas resistência de armadura (r_a) e reatância síncrona (x_s). O gerador síncrono pode ser representado por

apenas uma de suas fases, em que uma fonte de tensão é representada atrás de sua impedância. Desta forma, no circuito também são mostradas a tensão interna (E_g) e a tensão terminal da máquina (V_t).

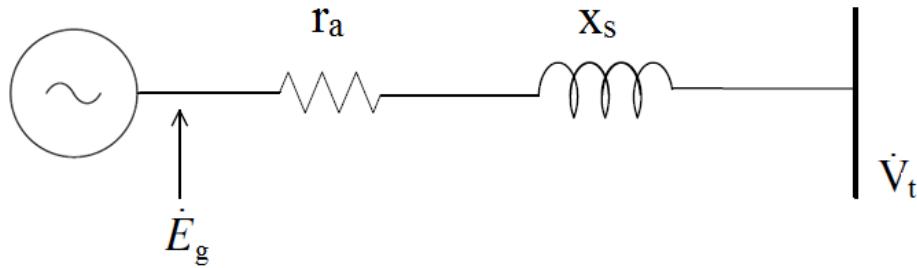


Figura 2.6: Circuito elétrico equivalente do gerador síncrono de polos lisos

Desta forma, o diagrama fasorial para o circuito do gerador de polos lisos, é apresentado na Figura 2.7. Este diagrama considera que a corrente de armadura ($\dot{I}_a = \dot{I}$) está atrasada da tensão terminal (\dot{V}_t) de um ângulo φ , sendo este denominado de ângulo do fator de potência.

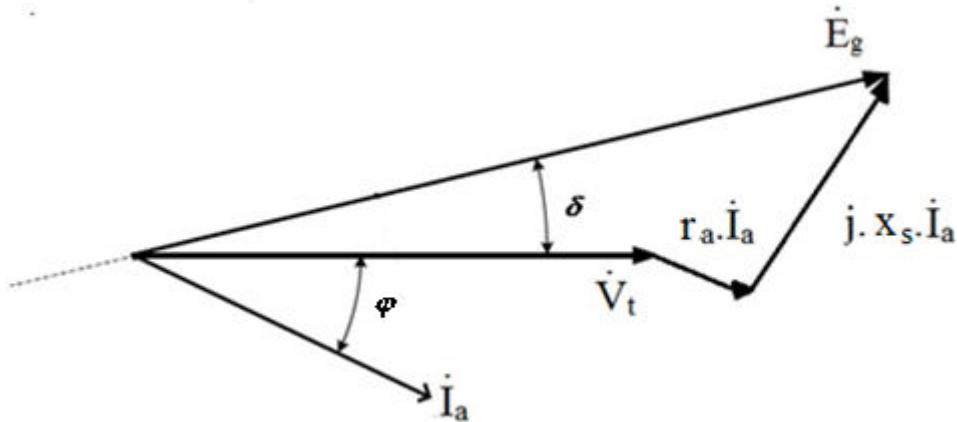


Figura 2.7: Diagrama fasorial para o gerador síncrono de polos lisos

O diagrama apresentado na Figura 2.7 mostra que a tensão interna da máquina (E_g) é a soma fasorial da tensão em seus terminais (V_t) e das quedas de tensão na resistência de armadura ($r_a I_a$) e na reatância síncrona (X_s), conforme mostra a expressão 2.8. O ângulo entre a tensão interna (E_g) e a tensão terminal

(V_t) é denominado de ângulo de potência (δ), sendo também conhecido como ângulo de carga ou de torque.

$$\dot{E}_g = \dot{V}_t + j r_a \dot{I}_a + j x_s \dot{I}_a \quad (2.8)$$

2.4.2 – DIAGRAMA FASORIAL PARA O GERADOR SÍNCRONO DE POLOS

SALIENTES

Nos geradores de polos salientes a relutância do circuito magnético e o fluxo de reação da armadura dependem da posição angular dos polos do rotor, como já citado anteriormente. Desta forma, o efeito da reação da armadura e os fluxos de dispersão são também dependentes da posição do rotor, não podendo assim ser representados por uma única reatância, a reatância síncrona (x_s).

Para a construção do diagrama fasorial, de acordo com [10], os efeitos dos polos salientes são considerados. Desta forma, houve a decomposição da corrente de armadura ($\dot{I}_a = \dot{I}$) em duas componentes, uma na direção do eixo direto (I_d), e outra no sentido do eixo em quadratura (I_q).

O circuito equivalente do gerador de polos salientes é mostrado na Figura 2.8. Este circuito apresenta a tensão interna (E_g) e a tensão terminal da máquina (\dot{V}_t), com as respectivas resistência de armadura (r_a), reatância de eixo direto (x_d) e reatância de eixo em quadratura (x_q) do gerador.

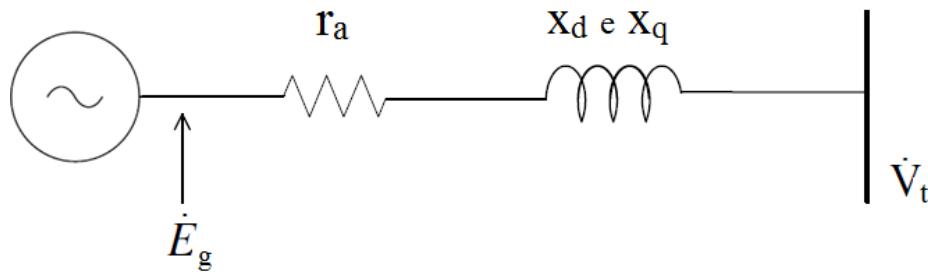


Figura 2.8: Circuito elétrico equivalente do gerador síncrono de polos salientes

É importante ressaltar que, embora estejam representadas no mesmo circuito, as reatâncias de eixo direto x_d e de eixo em quadratura x_q não estão em série. As quedas de tensão em cada uma destas reatâncias estão defasadas entre si de 90 graus.

Desta forma, o diagrama fasorial para o circuito do gerador de polos salientes, é apresentado na Figura 2.9. Este diagrama também considera que a corrente de armadura ($\dot{I}_a = \dot{I}$) está atrasada da tensão terminal (\dot{V}_t) de um ângulo φ .

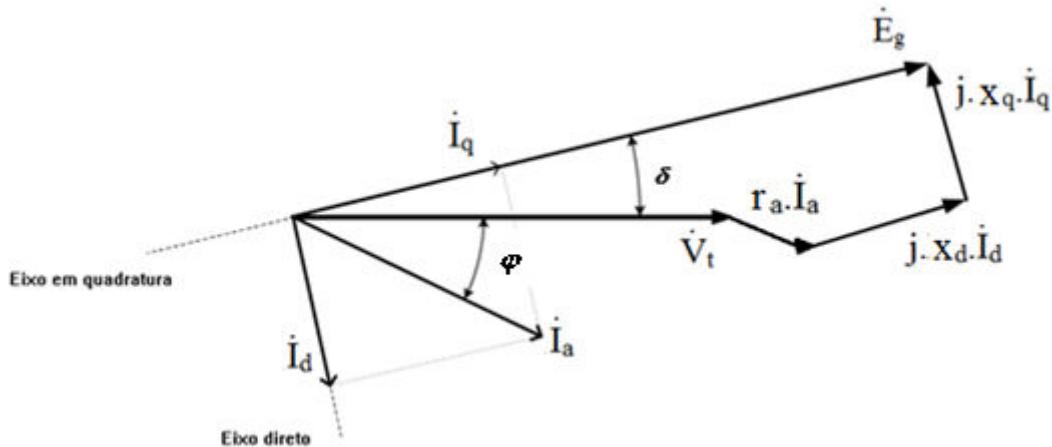


Figura 2.9: Diagrama fasorial para a máquina síncrona de polos salientes

O diagrama apresentado na Figura 2.9 mostra que a tensão interna da máquina (E_g) é a soma fasorial da tensão em seus terminais (V_t) e das quedas de tensão na resistência de armadura ($r_a I_a$), reatância de eixo direto (x_d) e reatância de eixo em quadratura (x_q), conforme mostra a expressão 2.9.

$$\dot{E}_g = \dot{V}_t + r_a \dot{I}_a + j x_d \dot{I}_d + j x_q \dot{I}_q \quad (2.9)$$

De acordo com [10] o valor do ângulo de potência (δ), mostrado na Figura 2.9, pode ser encontrado pela expressão 2.10.

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{x_q I_a \cos \varphi - r_a I_a \operatorname{sen} \varphi}{V_t + r_a I_a \cos \varphi + x_q I_a \operatorname{sen} \varphi} \right) \quad (2.10)$$

De acordo com [12] o aumento da inserção da geração distribuída pode afetar significativamente todos os tipos de estabilidade: frequência, tensão e ângulo do rotor (θ). Quando o desempenho de gerador síncrono é analisado em sistemas elétricos [11], é útil expressar o ângulo do rotor em termos de um ângulo elétrico que pode ser relacionado com a posição do rotor, denominado de ângulo de torque ou ângulo de potência (δ), sendo este o ângulo elétrico entre o fasor da força eletromotriz gerada (E_g) e o fasor da tensão terminal (V_t) resultante do gerador síncrono, como foi mostrado no diagrama fasorial da Figura 2.9. Nesse sentido, é de grande valia analisar o comportamento do ângulo de potência para estudos de estabilidade do sistema elétrico.

2.5 – POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS DOS GERADORES SÍNCRONOS

Para as análises aqui apresentadas será considerado o diagrama fasorial mostrado na Figura 2.9, desprezando a resistência do enrolamento de armadura (r_a).

As bibliografias consultadas durante o desenvolvimento desta dissertação consideram, na modelagem dos geradores síncronos, a resistência do enrolamento de armadura (r_a) como sendo desprezível. Normalmente, essa simplificação é adotada em geradores de grande porte, pelo fato do valor de r_a ser muito pequeno, em relação ao valor das reatâncias.

Ao decompor a tensão terminal (V_t) em suas componentes de eixo direto ($V_t \operatorname{sen} \delta$) e de eixo em quadratura ($V_t \cos \delta$), a potência ativa fornecida é determinada pela expressão 2.11 e a potência reativa pela expressão 2.12 [7].

$$P = I_d V_t \operatorname{sen} \delta + I_q V_t \cos \delta \quad (2.11)$$

$$Q = I_d V_t \cos \delta - I_q V_t \operatorname{sen} \delta \quad (2.12)$$

Do diagrama da Figura 2.9 podem-se obter também as correntes de eixo direto (I_d) e de eixo em quadratura (I_q), como apresentadas pelas expressões 2.13 e 2.14, respectivamente.

$$I_d = \frac{E_g - V_t \cos \delta}{x_d} \quad (2.13)$$

$$I_q = \frac{V_t \operatorname{sen} \delta}{x_q} \quad (2.14)$$

Substituindo as expressões (2.13) e (2.14) em (2.11), obtém-se a potência ativa fornecida, ilustrada pela expressão 2.15.

$$P = \frac{V_t E_g}{x_d} \operatorname{sen} \delta + \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \operatorname{sen}(2\delta) \quad (2.15)$$

Substituindo também as expressões (2.13) e (2.14) em (2.12), obtém-se a potência reativa fornecida, mostrada pela expressão 2.16.

$$Q = \frac{V_t E_g}{x_d} \cos \delta - V_t^2 \left(\frac{\operatorname{sen}^2 \delta}{x_q} + \frac{\cos^2 \delta}{x_d} \right) \quad (2.16)$$

O primeiro termo da expressão da potência ativa depende da força eletromotriz induzida na armadura (E_g) e da tensão terminal do gerador (V_t).

Este termo é denominado de Potência de Excitação (P_e), apresentada pela expressão 2.17.

$$P_e = \frac{V_t E_g}{x_d} \operatorname{sen} \delta \quad (2.17)$$

O segundo termo da expressão da potência ativa não depende da condição de excitação da máquina. Este termo é denominado de Potência de Relutância (P_r), ilustrada pela expressão 2.18, devido à diferença de relutância do entreferro em relação ao eixo direto e em quadratura.

$$P_r = \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \operatorname{sen}(2\delta) \quad (2.18)$$

As expressões (2.15) e (2.16) fornecem as potências trifásicas ativa e reativa, respectivamente, se as tensões E_g e V_t são expressas como tensões de linha, e as reatâncias como ohms/fase.

A expressão 2.15 é citada normalmente como característica do ângulo de potência (δ). Desta forma, a curva característica do ângulo de potência (P e δ) é mostrada na Figura 2.10, que é a composição das potências ativas do gerador.

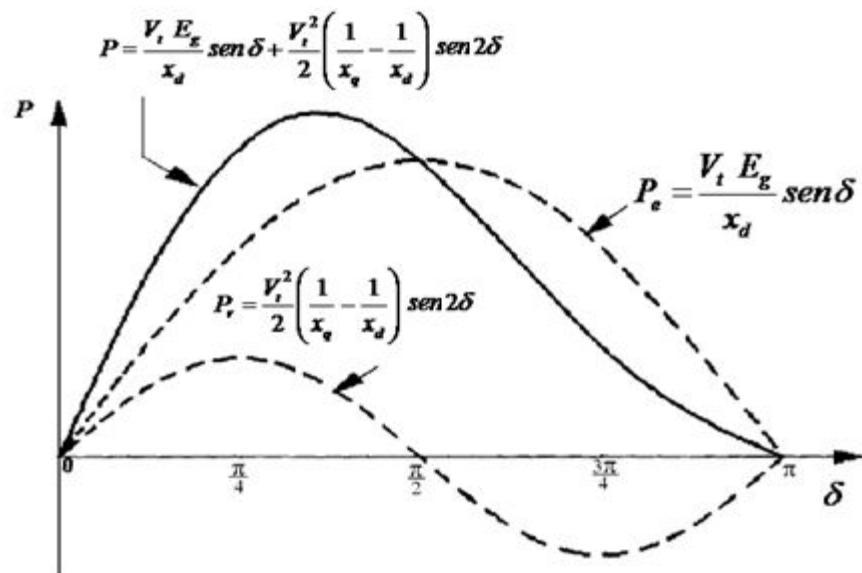


Figura 2.10: Curva característica do ângulo de potência do gerador (P e δ)

Para o caso de um gerador com rotor de polos lisos, em que a reatância de eixo direto (x_d) é igual à reatância de eixo em quadratura (x_q), as expressões das potências ativa e reativa se reduzem as equações 2.19 e 2.20, respectivamente.

$$P_e = \frac{V_t E_g}{x_d} \operatorname{sen} \delta \quad (2.19)$$

$$Q = \frac{V_t E_g}{x_d} \cos \delta - \frac{V_t^2}{x_d} \quad (2.20)$$

2.6 – EQUAÇÕES MECÂNICAS DA MÁQUINA SÍNCRONA

Após a obtenção das equações elétricas da máquina síncrona, será apresentada nesta seção a formulação das equações mecânicas do gerador, baseadas nas referências [10] e [11].

A equação de oscilação ou de balanço que controla o movimento do gerador, em sua forma básica, é expressa pela equação 2.21.

$$T_a = J\alpha_m = J \frac{d\omega_m}{dt} = J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.21)$$

Onde:

α_m = aceleração angular mecânica (rad/s^2)

ω_m = velocidade angular mecânica (rad/s)

θ_m = deslocamento angular mecânico (rad)

T_a = torque acelerante (N.m)

T_m = torque mecânico (N.m)

T_e = torque elétrico (N.m)

J = momento de inércia de todas as massas girantes (kg.m^2)

As grandezas elétricas e mecânicas podem ser relacionadas através das equações 2.22 e 2.23.

$$\theta_m = \frac{2}{P} \theta_e \quad (2.22)$$

$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega_e \quad (2.23)$$

Sendo:

θ_e = deslocamento angular elétrico (rad)

ω_e = velocidade angular elétrica (rad/s)

P = número de polos da máquina

A constante de inércia da máquina síncrona (H) e a energia cinética na rotação nominal (E_c) são definidas pelas equações 2.24 e 2.25, respectivamente.

$$H = \frac{E_c}{S_{no\ min\ al}} \quad (2.24)$$

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (2.25)$$

Sendo:

$S_{nominal}$ = potência aparente trifásica nominal da máquina (VA)

2.7 – MODELOS DA MÁQUINA SÍNCRONA DISPONÍVEIS NO *ATPDRAW*

O objetivo desta seção consiste em escolher o modelo mais adequado da máquina síncrona para ser utilizado nos estudos realizados nesta dissertação.

A biblioteca de modelos do *ATPDraw* disponibiliza dois tipos para as máquinas síncronas, a saber:

- Máquina síncrona Tipo SM 59 sem controle;
- Máquina síncrona Tipo SM 59 controlada.

De acordo com o programa *ATP* a modelagem dessas máquinas girantes compreende a parte elétrica (caracterizada pelos enrolamentos: de armadura (a, b e c), de campo, amortecedor e equivalentes fictícios situados sob os eixos d e q) e a parte mecânica (representação de todas as massas girantes). As equações elétricas e mecânicas utilizadas para a representação das máquinas síncronas estão de acordo com as expressões mostradas nas seções 2.3 e 2.4.

A escolha do modelo mais adequado da máquina síncrona depende do tipo de estudo a ser realizado pelo usuário e da disponibilidade dos dados solicitados pela máquina.

O modelo do gerador síncrono Tipo SM 59 sem controle, apresentado na Figura 2.11, é de grande importância quando se considera que os tempos de respostas dos controles da máquina síncrona (reguladores de tensão e de velocidade) são normalmente muito altos em relação ao tempo de duração de um fenômeno transitório. Ressalta-se que essa modelagem permite que os valores do módulo e ângulo da tensão terminal sejam ajustados antecipadamente para uma dada condição de operação.



Figura 2.11: Ícone da máquina síncrona sem controle do ATPDraw

Já o modelo do gerador síncrono Tipo SM 59 controlado, mostrado na Figura 2.12, é de grande valia quando se pretende inserir e analisar a atuação dos sistemas de controle da máquina (Reguladores de tensão e de velocidade e Estabilizador do Sistema). Ressalta-se que essa modelagem também permite que os valores do ângulo de potência e da tensão terminal sejam ajustados antecipadamente para uma dada condição de operação.

Esse tipo de modelagem demanda um conhecimento maior sobre dinâmica do sistema elétrico, critérios de estabilidade, compreensão sobre o sistema de controle utilizado nos reguladores de tensão e de velocidade e disponibilidade dos parâmetros do gerador síncrono e de seus controles. Ressalta-se que o programa *ATP* não disponibiliza em sua biblioteca os modelos dos sistemas de controle do gerador. Os modelos desses controladores serão desenvolvidos no Capítulo 3.

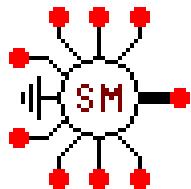


Figura 2.12: Ícone da máquina síncrona controlada do ATPDraw

Visualiza-se na Figura 2.12 que o modelo da máquina síncrona controlada disponível no *ATPDraw* apresenta nove nós, os quais oito possibilitam controlar ou ter acesso às suas variáveis internas, e um nó de saída trifásico, com a finalidade de fornecer as tensões terminais do gerador (fases A, B e C).

Através desses nós, pode-se controlar a tensão de campo (ou de excitação) e a potência mecânica, e ter acesso às variáveis elétricas da máquina, a saber:

corrente no enrolamento de armadura do eixo d, corrente no enrolamento de armadura do eixo q, corrente no enrolamento de armadura de sequência zero, corrente no enrolamento de campo, corrente no enrolamento amortecedor do eixo d, correntes parasitas (Foucault) no enrolamento, corrente no enrolamento amortecedor do eixo q, tensão aplicada ao eixo d, tensão aplicada ao eixo q, tensão de sequência zero, tensão aplicada ao enrolamento de campo, força magnetomotriz ($f.m.m$) no entreferro da máquina, ângulo entre as componentes de eixo q e d da $f.m.m$, torque eletromagnético da máquina, fluxo concatenado do eixo d, fluxo concatenado do eixo q, ângulo da massa rotativa, velocidade angular e torque no eixo da massa rotativa.

Como a quantidade de variáveis da máquina é maior que o número de nós disponíveis no ícone mostrado na Figura 2.12, adotou-se no programa *ATP* uma numeração para cada variável de 1 a 22, onde cada número correspondente a um tipo de variável de controle ou de saída. Desta forma, quando o usuário desejar controlar ou ter acesso a uma variável do gerador, ele deve digitar o número correspondente da variável escolhida, em um dos nós disponíveis do modelo da máquina síncrona. Nesse sentido, o programa *ATP* compreenderá que naquele nó deverá disponibilizar a grandeza especificada.

Dessa forma, como o objetivo desta dissertação é analisar o desempenho do gerador do sistema de geração independente com os seus controles e os impactos causados por este na operação dos sistemas de distribuição, será utilizado para a representação do gerador o modelo da máquina síncrona Tipo SM 59 controlada. Os controles da máquina síncrona (regulador de tensão e de velocidade e o estabilizador) atuam baseados nas variáveis da máquina: tensão terminal (V_t) e velocidade, e controlam duas variáveis internas do gerador: tensão de campo (ou de excitação) e potência mecânica. Portanto, nesta dissertação, será utilizado apenas quatro nós do ícone mostrado na Figura 2.12, restando cinco nós sem nenhuma utilização.

Diante das considerações abordadas, surgiu a ideia de desenvolver um novo ícone para o gerador, com as mesmas características da máquina síncrona controlada do *ATP*, porém, mais simples e sem precisar digitar o número correspondente da variável escolhida em um dos nós. Desta forma, o ícone desenvolvido disponibilizará apenas os nós necessários para os seus sistemas de controle, a saber: dois nós de entrada, um para controlar a tensão de excitação e outro a potência mecânica; um nó de saída para ter acesso à velocidade da máquina e um nó de saída trifásico, para fornecer a tensão terminal do gerador. Esta nova representação da máquina síncrona foi feita através da função *Data Base Modularization - DBM*, própria do *software ATP* [22], mostrada no ANEXO item I, que possibilita a criação de módulos para a representação de parte do sistema elétrico ou equipamentos, ou seja, customizar o programa de acordo com os interesses do usuário. A Figura 2.13 mostra o novo ícone criado para a representação da máquina síncrona.

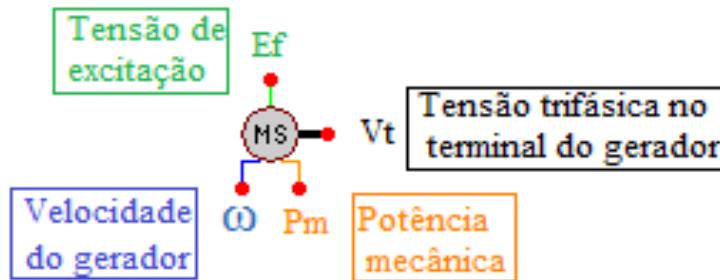


Figura 2.13: Novo ícone criado para a representação da máquina síncrona no ATPDraw

Desta forma, o usuário deve ter conhecimento das características e parâmetros do gerador síncrono, bem como informar os dados nominais e a condição inicial de operação. Sendo eles: potência aparente trifásica nominal do gerador (S_n) em MVA, tensão trifásica nominal (U_n) em kV, módulo e ângulo da tensão terminal da máquina (V_t) em kV, frequência (freq) em Hz, número de polos (P), resistência de armadura (r_a), reatância síncrona de eixo direto (x_d), reatância síncrona de eixo em quadratura (x_q), reatância transitória de eixo direto

(x'_d), reatância transitória de eixo em quadratura (x'_q), reatância subtransitória de eixo direto (x''_d), reatância subtransitória de eixo em quadratura (x''_q), constante de tempo transitório, circuito aberto, de eixo direto (T'_{d0}), constante de tempo transitório, circuito aberto, de eixo em quadratura (T'_{q0}), constante de tempo subtransitório, circuito aberto, de eixo direto (T''_{d0}), constante de tempo subtransitório, circuito aberto, de eixo em quadratura (T''_{q0}), reatância de sequência zero (x_0) e momento de inércia das massas rotativas ($J = 10^6 \text{ kg.m}^2$). Os valores da resistência de armadura e das reatâncias da máquina são dados em (pu), e os valores das constantes de tempo são dados em segundos (s).

Ressalta-se que as variáveis de saída que o modelo de gerador disponível no *ATPDraw* disponibiliza para o arquivo gráfico com extensão “.PL4”, não contemplam o ângulo de potência para estudos de estabilidade angular de um sistema após uma perturbação. Sendo assim, surgiu a ideia de desenvolver um dispositivo para determinar o ângulo de potência utilizando as variáveis disponíveis na modelagem da máquina (tensão terminal e corrente). As equações utilizadas e a modelagem do dispositivo são apresentadas na próxima seção (2.8).

2.8 – DESENVOLVIMENTO E MODELAGEM DO DISPOSITIVO PARA DETERMINAR O ÂNGULO DE POTÊNCIA

Nesta seção será desenvolvido um dispositivo que determina o ângulo de potência no domínio do tempo, tendo como base as grandezas em regime permanente, com o intuito de analisar a estabilidade angular de um sistema após uma perturbação.

Para o cálculo do ângulo de potência a expressão 2.10, embora pareça simples e imediata, é mais complexa do que parece, pois o seu emprego requer uma análise detalhada do sentido do fluxo de potência ativa e reativa proveniente das oscilações bruscas de carga, na definição do ângulo de fase da

corrente (φ). Esta expressão foi determinada analisando o diagrama fasorial da Figura 2.9, ou seja, o gerador está gerando potência ativa ($P > 0$) e reativa ($Q > 0$). Para outras condições, gerador sub-excitado ($P > 0$ e $Q < 0$) e gerador funcionando como motor superexcitado ($P < 0$ e $Q > 0$) ou como motor sub-excitado ($P < 0$ e $Q < 0$), deve-se analisar o diagrama fasorial de cada uma destas condições e obter, para cada situação, a expressão para o cálculo do ângulo de potência.

Desta forma, optou-se por utilizar as expressões de potência ativa e reativa (equações 2.15 e 2.16), para determinar o ângulo de potência (δ).

O dispositivo desenvolvido mede os valores da tensão e da corrente por fase (A, B e C) no nó do terminal do gerador. Os dados de entrada do dispositivo que devem ser especificados pelo usuário são: frequência (freq) em Hz, potência nominal trifásica (S_n) em MVA, tensão nominal (U_n) em kV, reatância de eixo direto (x_d), reatância de eixo em quadratura (x_q) e resistência de armadura (r_a), todas em por unidade dos valores nominais.

Este dispositivo fornece os seguintes resultados na sua saída:

- Valores eficazes (rms) de tensão e corrente,
- Potência ativa, reativa e aparente por fase ou trifásica,
- Fator de potência (FP),
- Ângulo do fator de potência (φ),
- Ângulo de potência – ou de torque – (δ),
- Tensão interna do gerador (E_g).

Para os cálculos necessários foi elaborado um método numérico empregando a linguagem de programação do *ATP* denominada *MODELS*, na qual é possível programar ações como algoritmos de controle e cálculos operacionais (iterações, combinações, loops, entre outros) [24]. O cálculo é

elaborado considerando um período imediatamente anterior ao instante considerado.

O algoritmo obedece à seguinte sequência de cálculos:

- I. Cálculo dos valores eficazes de tensão e corrente no ponto de análise para cada fase através das expressões (2.26) e (2.27). As integrais devem ser somente em um período de $t-T$ até t .

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{t-T}^t v^2(t)dt}{T}} [V] \quad (2.26)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{t-T}^t i^2(t)dt}{T}} [A] \quad (2.27)$$

Onde:

$v(t)$ = Valor instantâneo da tensão (V)

$i(t)$ = Valor instantâneo da corrente (A)

T = Período da frequência do sistema

- II. Cálculo dos valores das potências ativa (P), reativa (Q) e aparente (S), por fase, por meio das expressões apresentadas em (2.28), (2.30) e (2.31), respectivamente. As potências ativa e reativa também são calculadas de forma semelhante ao valor eficaz da tensão, fazendo a integração do valor vxi ao longo de um período. Foi necessário defasar o valor instantâneo da tensão de 90 graus, para calcular a potência reativa. Sendo assim, a expressão (2.29) representa o valor instantâneo desta tensão. A potência aparente pode ser calculada de duas formas: pela multiplicação dos valores eficazes da tensão e da corrente, e pela raiz quadrada da somatória das potências ativa e reativa ao quadrado. Os resultados obtidos, de cada maneira de calcular a potência aparente, foram verificados e comprovados

que são iguais. O dispositivo fornece os valores das potências aparente (S_t), ativa (P_t) e reativa (Q_t) trifásicas, através da soma da potência de cada fase.

$$P = \frac{\int_{t-T}^t v(t) \cdot i(t) dt}{T} [W] \quad (2.28)$$

$$v_{90} = \frac{v - v_{ant}(v)}{\Delta t} \left(-\frac{1}{2\pi f} \right) [V] \quad (2.29)$$

$$Q = \frac{\int_{t-T}^t v_{90}(t) \cdot i(t) dt}{T} [Var] \quad (2.30)$$

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} = \sqrt{(P^2 + Q^2)} [VA] \quad (2.31)$$

III. Cálculo do ângulo de potência (φ) e do fator de potência (fp) através das expressões mostradas em (2.32) e (2.33).

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1}(Q / P) [\text{radianos}] \quad (2.32)$$

$$fp = \cos(\varphi) \quad (2.33)$$

IV. As expressões 2.15 e 2.16, da seção 2.4.3, foram manipuladas com a finalidade de obter as equações do ângulo de potência (δ) e a tensão interna do gerador (E_g), representadas em (2.34) e (2.35). Para isso, foi necessária a utilização de parâmetros auxiliares denominados de A, B e C, para simplificar o equacionamento das expressões 2.34 e 2.35. Utilizando as expressões 2.15 e 2.16, o usuário tem a possibilidade de escolher se a máquina síncrona irá operar com rotor de polos lisos ou com rotor de polos salientes. Para o caso de um gerador com rotor de polos lisos, é necessário apenas adotar $x_d = x_q$.

$$A = V_{rms}^2 \left(\frac{\sin^2(\delta)}{x_q} + \frac{\cos^2(\delta)}{x_d} \right)$$

$$B = \frac{V_{rms} E_g}{x_d}$$

$$C = B + V_{rms}^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \left(\frac{Q+A}{B} \right)$$

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{PB}{(Q+A)C} \right) [\text{radianos}] \rightarrow \delta (\text{graus}) = \frac{\delta * 180}{\pi} \quad (2.34)$$

$$E_g = \frac{(Q + A) x_d}{V_{rms} \cos(\delta)} [V] \quad (2.35)$$

Observa-se que estas expressões são não lineares sendo impraticável explicitar qualquer variável. Assim para a solução do sistema de equações adotou-se o método numérico iterativo de Newton disponível na *MODELS*. O ângulo de potência é determinado adotando como referência de potência ativa e reativa gerada pela máquina como sendo positiva; o ângulo de potência positivo representa a tensão E_g adiantada em relação à tensão no terminal da máquina (V_t). Observa-se ainda que, as expressões de potência não contemplam o efeito da resistência de armadura, o qual, na maioria das vezes, é desprezível. Tal efeito deve ser considerado em máquinas menores típicas de produtores independentes.

2.8.1 – INCLUSÃO DO EFEITO DA RESISTÊNCIA DE ARMADURA

Na modelagem do dispositivo para determinar o ângulo de potência, a resistência do enrolamento de armadura (r_a) foi desprezada. Nesta seção, esta

resistência será considerada, com o intuito de disponibilizar ao usuário a opção de analisar o efeito desta resistência no ângulo calculado.

Como o dispositivo desenvolvido mede a tensão no terminal da máquina (V_t) e calcula a potência ativa fornecida (P), estas grandezas incluem o efeito da resistência de armadura (r_a). Desta forma, a queda de tensão na resistência r_a deve ser incorporada a tensão no terminal da máquina (V_t) e a potência dissipada nesta mesma resistência deve ser incorporada a potência ativa (P).

Então, para considerar o efeito da resistência de armadura poder-se-ia considerar uma máquina com resistência desprezível na armadura em série com a respectiva resistência para a conexão de seus terminais ao barramento de carga conforme é mostrado na Figura 2.14. A tensão nos terminais do gerador (V') e a potência ativa gerada (P'), sem considerar o efeito da resistência do enrolamento de armadura, podem facilmente ser determinadas conhecendo os respectivos valores no barramento de carga.

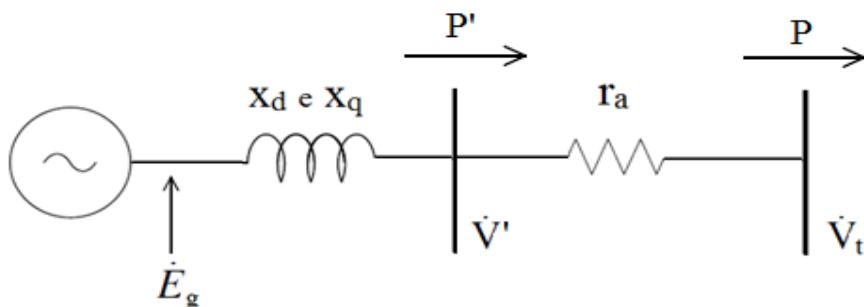


Figura 2.14: Circuito equivalente do gerador síncrono incluindo o efeito da resistência de armadura (r_a)

A queda de tensão na resistência de armadura é incorporada na tensão terminal, como é mostrado no diagrama fasorial da Figura 2.15. Deste diagrama pode-se determinar os valores para a tensão (V'), a potência ativa (P'), e a correção para o ângulo de potência (δ'), sem a resistência de armadura, através das expressões 2.36 e 2.37.

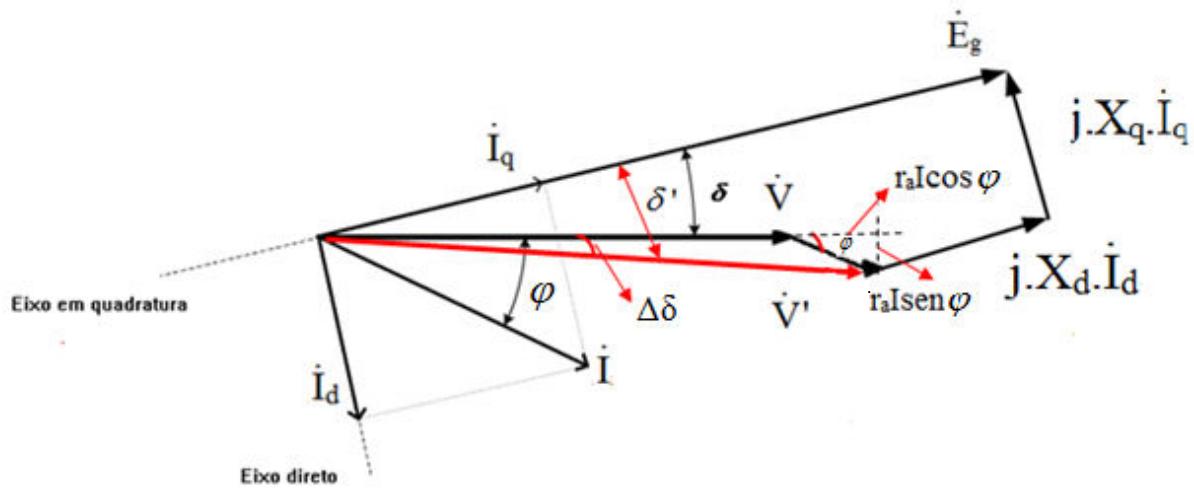


Figura 2.15: Diagrama fasorial para o gerador síncrono de polos salientes, com a inclusão da resistência de armadura

$$V' = \sqrt{\left((V_{rms} + r_a I_{rms} \cos \varphi)^2 + (r_a I_{rms} \sin \varphi)^2 \right)} \quad (2.36)$$

$$P' = P + r_a I_{rms}^2 \quad (2.37)$$

Como o valor do ângulo de potência é função de P, V_{rms} e Q, o novo valor para o ângulo de potência (δ'), sem a resistência de armadura, será em função de P', V' e Q. Sendo assim, foi calculado o novo valor para o ângulo e a tensão interna do gerador (E_g), a partir das expressões (2.38) e (2.39), bem como os novos valores para os parâmetros auxiliares (A', B' e C').

$$A' = V'^2 \left(\frac{\sin^2(\delta')}{x_q} + \frac{\cos^2(\delta')}{x_d} \right)$$

$$B' = \frac{V' E_g}{x_d}$$

$$C' = B' + V'^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \left(\frac{Q + A'}{B'} \right)$$

$$\delta' = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{P' B'}{(Q + A') C'} \right) [\text{radianos}] \rightarrow \delta' (\text{graus}) = \frac{\delta' * 180}{\pi} \quad (2.38)$$

$$E_g = \frac{(Q + A') x_d}{V' \cos(\delta')} [V] \quad (2.39)$$

Analizando o diagrama da Figura 2.15, pode-se determinar o valor de $\Delta\delta$ pela expressão 2.40.

$$\Delta\delta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{r_a I_{rms} \operatorname{sen}\varphi}{V + r_a I_{rms} \cos\varphi} \right) [\text{radianos}] \rightarrow \Delta\delta (\text{graus}) = \frac{\Delta\delta * 180}{\pi} \quad (2.40)$$

Após determinar δ' (ângulo sem considerar o efeito da resistência de armadura), e encontrar o valor de $\Delta\delta$, determina-se δ pela expressão 2.41.

$$\delta = \delta' - \Delta\delta [\text{graus}] \quad (2.41)$$

No ANEXO, item II, é mostrado as linhas de declarações, estruturadas na linguagem *MODELS* do *ATP*, para a implementação do dispositivo.

Após a elaboração do módulo do dispositivo, este foi associado a um ícone para ser utilizado no ambiente *ATPDraw*. Assim, a Figura 2.16 mostra o ícone incorporado ao dispositivo desenvolvido.

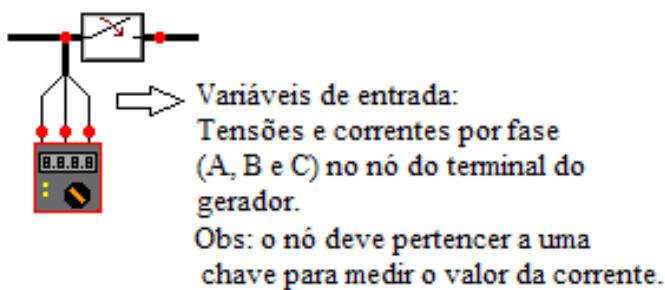


Figura 2.16: Ícone do dispositivo modelado no *ATPDraw*

Vale ressaltar que, no caso da máquina síncrona, em alguma situação, consumir potência ativa ($P < 0$) e possuir um ângulo de potência (δ) negativo, as expressões 2.36 e 2.41 devem ser modificadas para as expressões 2.42 e 2.43.

$$V' = \sqrt{((V_{rms} - r_a I_{rms} \cos\varphi)^2 + (r_a I \sin\varphi)^2)} \quad (2.42)$$

$$\delta = \delta' + \varphi' [\text{graus}] \quad (2.43)$$

2.8.2 – VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO DISPOSITIVO PARA DETERMINAR O ÂNGULO DE POTÊNCIA

Para a verificação do dispositivo desenvolvido para determinar o ângulo de potência, utilizou-se o esquema mostrado na Figura 2.17 modelado no *software ATPDraw*. Este circuito é apresentado por uma fonte de tensão (representando a tensão interna do gerador (E_g)), em série com a reatância síncrona da máquina ($x_s = x_d = x_q$) e com a resistência de armadura (r_a), conectados a um barramento infinito, representando a tensão terminal da máquina (V_t).

Dados das grandezas utilizadas:

- Fonte de tensão (E_g): módulo de 15500 [V] (valor de pico por fase) e ângulo de 20°. Ressalta-se que no *ATPDraw* a fonte de tensão determina que a sua amplitude deve ser de pico e por fase;
- Fonte de tensão infinita (V_t): módulo de 13000 [V] (valor de pico por fase) e ângulo de 0°;
- Reatância síncrona da máquina (x_s) = 1 [pu];
- Resistência de armadura (r_a) = 0,1 [pu].

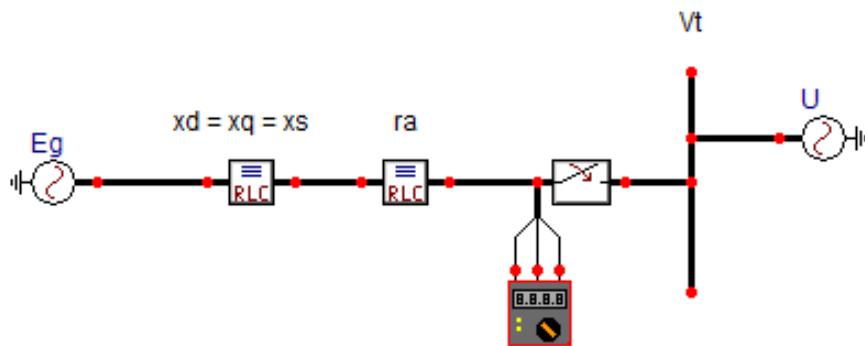


Figura 2.17: Circuito equivalente, modelado no ATPDraw, para verificação do desempenho do dispositivo modelado

Conforme foi mencionado na seção 2.6, o usuário deve inserir os dados de entrada do dispositivo desenvolvido. Desta forma, foi considerada uma frequência de 60 [Hz], potência nominal trifásica de 10 [MVA] e tensão nominal de 10 [kV].

Serão analisados três casos:

- Primeiro caso: A fonte de tensão (E_g) gerando potência ativa e reativa, com o módulo da tensão de 15500 [V] e ângulo de 20°.
- Segundo caso: A fonte de tensão (E_g) gerando potência ativa e “absorvendo” potência reativa ($Q < 0$), com o módulo da tensão de 15500 [V] e ângulo de 20°. Neste caso, o valor da tensão da fonte infinita foi aumentado para 16000 [V].
- Terceiro caso: A fonte de tensão (E_g) gerando potência reativa e “consumindo” potência ativa ($P < 0$), com o módulo da tensão de 15500 [V] e ângulo de -30°.

1) Primeiro caso

Ressalta-se que, para este caso, o ângulo de potência (δ) entre a tensão interna (E_g) e a tensão terminal (V_t) é de 20°. Portanto, este é o valor do ângulo que deve ser determinado pelo dispositivo desenvolvido.

Após a simulação do circuito apresentado pela Figura 2.17, o valor do ângulo de potência (δ) determinado pelo dispositivo é mostrado na Figura 2.18.

Desta forma, comprova-se que o valor do ângulo (δ) determinado é igual ao valor esperado (20°), validando o dispositivo desenvolvido.

Observa-se também, na mesma figura, o valor do ângulo de potência (δ'), sem incluir o efeito da resistência de armadura, sendo este um pouco maior do que o valor encontrado para o ângulo δ .

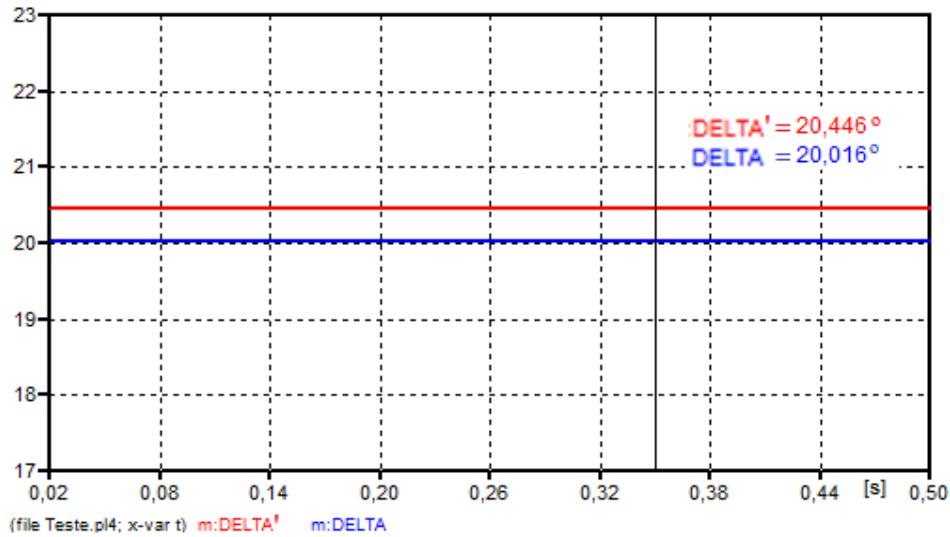


Figura 2.18: Ângulo de potência da máquina síncrona, com e sem o efeito da resistência de armadura (r_d), para o caso 1

As Figuras 2.19 e 2.20 mostram as variáveis de saída disponibilizadas pelo dispositivo. Observa-se pela Figura 2.19 que a fonte de tensão (E_g) está realmente fornecendo potências ativa e reativa.

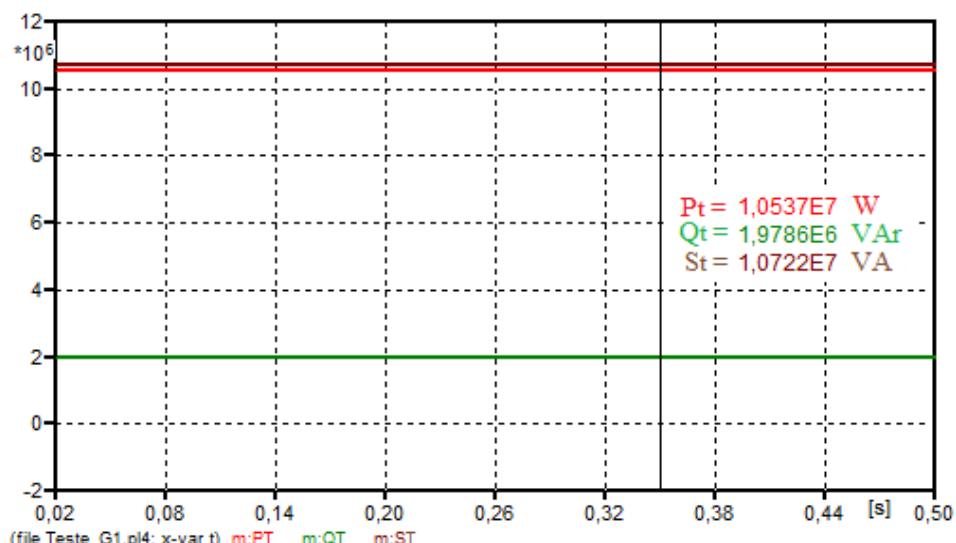
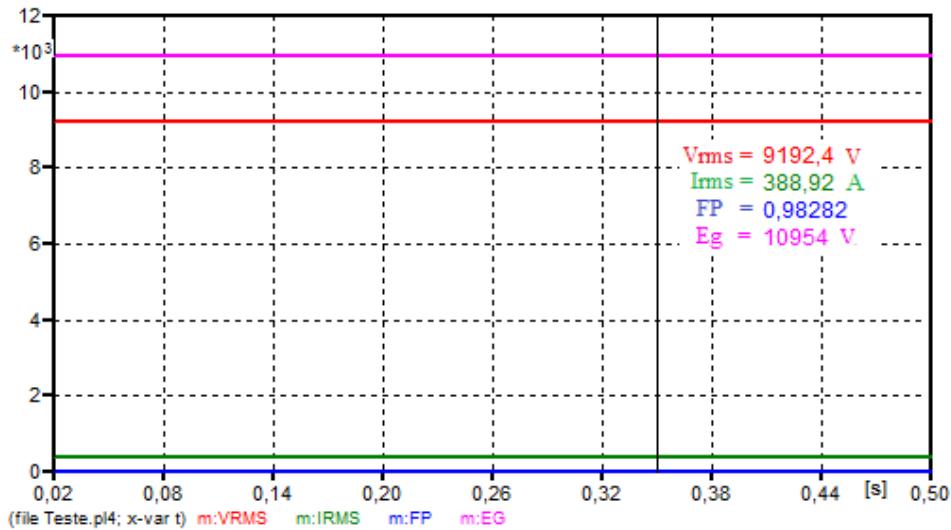


Figura 2.19: Potências aparente, ativa e reativa trifásicas geradas, para o caso 1

Na Figura 2.20 mostram-se os valores eficazes da tensão e da corrente, o fator de potência e a tensão interna do gerador síncrono (representado pela fonte de tensão - E_g).



2) Segundo caso

Neste caso, o ângulo de potência (δ) entre a tensão interna (E_g) e a tensão terminal (V_t) é de 20° . Porém, a fonte de tensão está “absorvendo” potência reativa.

Após a simulação do circuito apresentado na Figura 2.17, nota-se que o valor do ângulo de potência (δ) determinado continua sendo igual ao valor esperado (20°), como mostrado na Figura 2.21.

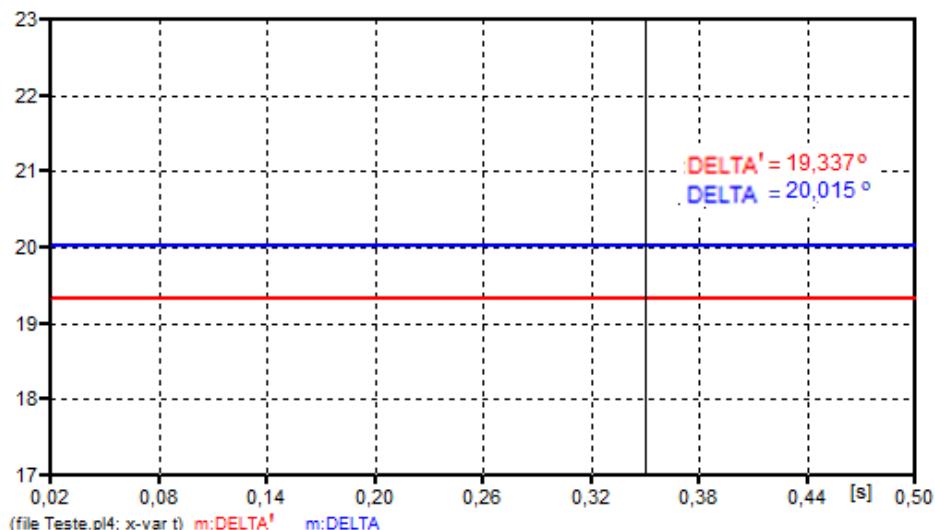
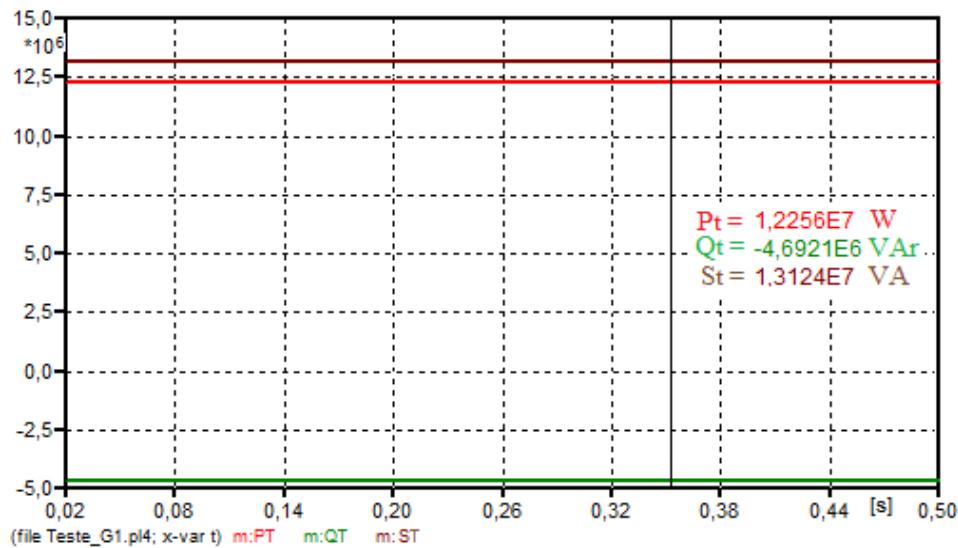
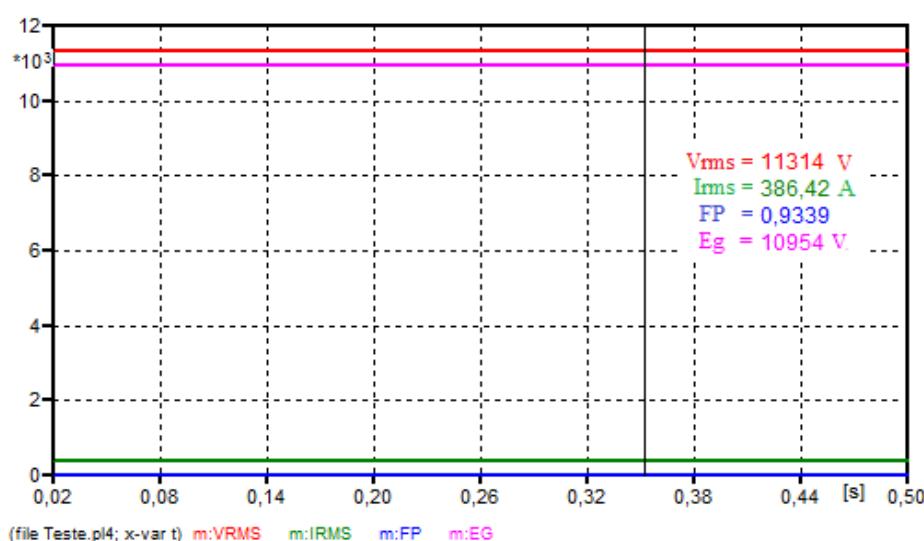


Figura 2.21: Ângulo de potência da máquina síncrona, com e sem o efeito da resistência de armadura (r_d), para o caso 2

As Figuras 2.22 e 2.23 apresentam as variáveis de saída disponibilizadas pelo dispositivo. Nota-se pela Figura 2.22 que a fonte de tensão (E_g) está fornecendo potência ativa e “absorvendo” potência reativa.



Na Figura 2.23 apresentam-se os valores eficazes da tensão e da corrente, o fator de potência e a tensão interna do gerador síncrono.



3) Terceiro caso

Neste último caso, o ângulo de potência (δ) entre a tensão interna (E_g) e a tensão terminal (V_t) é de -30° , ou seja, a fonte de tensão está “consumindo” potência ativa ($P < 0$).

Analizando a Figura 2.24, nota-se que, para este caso, o valor do ângulo de potência (δ) calculado, ficou negativo e com um valor de 30° . Desta forma, o dispositivo desenvolvido determina tanto o ângulo de potência negativo quanto positivo.

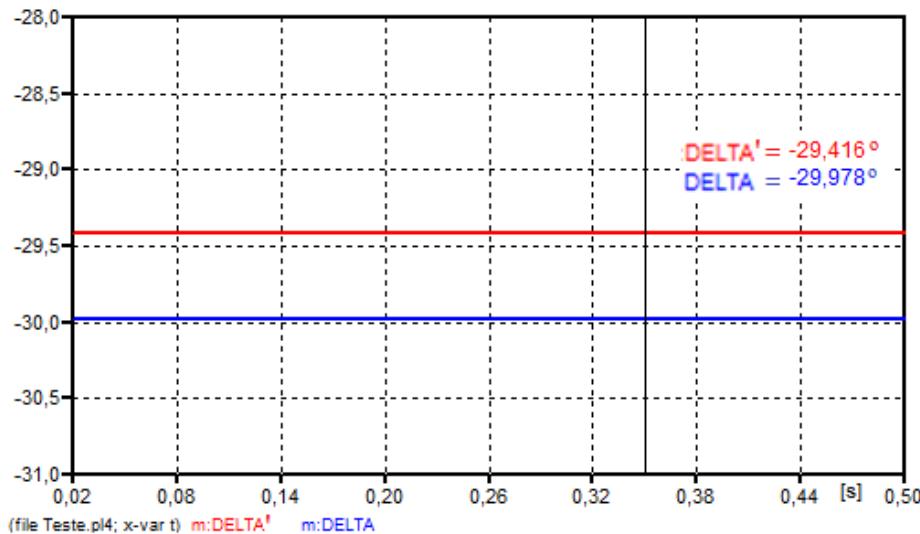


Figura 2.24: Ângulo de potência da máquina síncrona, com e sem o efeito da resistência de armadura (r_a), para o caso 3

As variáveis de saída disponibilizadas pelo dispositivo são mostradas nas Figuras 2.25 e 2.26. Nota-se pela Figura 2.25 que a fonte de tensão (E_g) está “consumindo” potência ativa e fornecendo potência reativa.

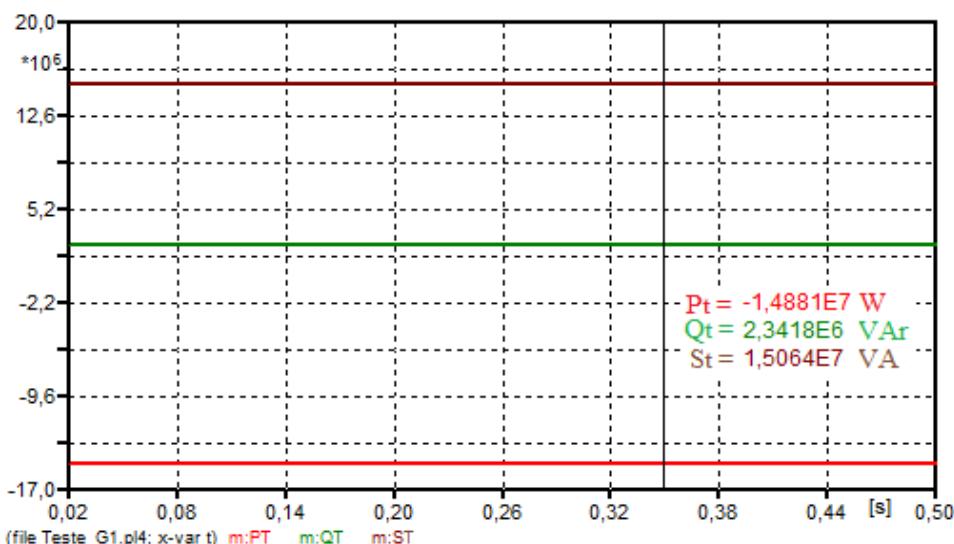


Figura 2.25: Potências aparente, ativa e reativa trifásicas geradas, para o caso 3

Na Figura 2.26 mostram-se os valores eficazes da tensão e da corrente, o fator de potência e a tensão interna do gerador síncrono.

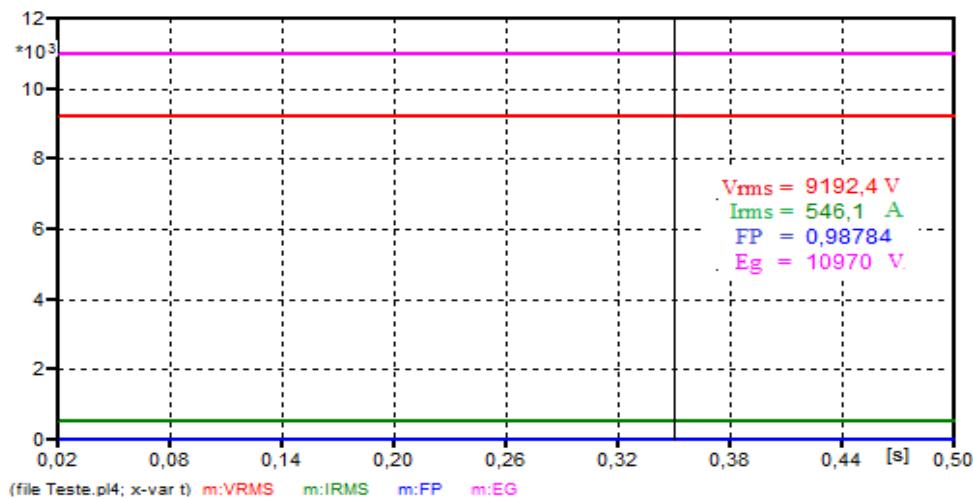


Figura 2.26: Grandezas disponibilizadas pelo dispositivo desenvolvido, para o caso 3

2.9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, inicialmente, destacaram-se as principais partes construtivas da máquina síncrona, com uma descrição detalhada do comportamento das mesmas no processo de geração de energia. Em seguida, foram ilustradas as diferenças entre a máquina com rotor de polos lisos e a máquina com rotor de polos salientes. Observou-se que a saliência dos polos contribui com a variação do valor da reatância em cada região: sobre o polo e na direção interpolar. Essa análise permitiu a base da formulação em termos de eixo direto (d), alinhado com o eixo polar, e em quadratura (q), centrada no espaço interpolar.

Vislumbrou-se de forma sucinta a simplificação das equações elétricas da resposta dinâmica da máquina síncrona, por meio da Transformação de Park. Na sequência foram apresentadas as equações elétricas e mecânicas utilizadas para a modelagem do gerador.

Foram também apresentados os diagramas fasoriais e os circuitos elétricos equivalentes do gerador síncrono com rotores de polos lisos e com rotores de

polos salientes, bem como as expressões da tensão interna gerada, do ângulo de carga e das potências ativa e reativa fornecidas pela máquina.

Constatou-se que o *software ATP* disponibiliza em sua biblioteca o modelo da máquina síncrona controlada. Porém, este modelo apresentou-se um pouco complexo para a utilização do usuário. Portanto, desenvolveu-se um novo ícone para o gerador com as mesmas características da máquina síncrona do *ATPDraw*, porém, disponibilizando apenas os nós necessárias para os seus controles e para o fornecimento de energia elétrica.

E por fim, foi desenvolvido um dispositivo, o qual determina o ângulo de potência no domínio do tempo, baseado nas expressões de potências ativa e reativa. Este ângulo pode ser determinado considerando o efeito da resistência de armadura em seu cálculo (δ) ou desprezando este efeito (δ'). Além disso, o dispositivo também disponibiliza em sua saída a tensão interna da máquina síncrona (E_g) e as variáveis elétricas da rede (tensão, potências aparente, ativa e reativa, fator de potência e ângulo do fator de potência). Através dos estudos de casos, observou-se que o dispositivo desenvolvido calcula o valor do ângulo de potência com uma precisão satisfatória. E, além disso, notou-se que, dependendo do sentido do fluxo de potência ativa ($P < 0$ ou $P > 0$), o ângulo de potência é determinado negativo ou positivo, como se esperava. Ademais, o dispositivo elaborado é de fácil uso e agrupa um cunho didático que o torna interessante no ensino de máquinas síncronas. Destaca-se, portanto, essa importante contribuição para o cálculo do ângulo de potência, fundamental em estudos para analisar a estabilidade angular de um sistema após uma perturbação.

CAPÍTULO III

MODELAGEM DOS REGULADORES DE TENSÃO E DE VELOCIDADE E DO ESTABILIZADOR DO SISTEMA

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A função dos controles de sistemas elétricos é manter o sistema operando em um determinado ponto de operação. Uma vez que estes atuam de forma a garantir o suprimento contínuo de energia, mantendo a frequência e a tensão dentro dos limites aceitáveis pré-definidos.

Desta forma, este capítulo apresentará uma breve descrição dos controladores utilizados nas máquinas síncronas, bem como as suas modelagens e implementações.

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

- Controle da excitação (Regulador Automático de Tensão, do inglês: *Automatic Voltage Regulator – AVR*);
- Controle primário de velocidade (Regulador de velocidade, do inglês: *Speed Governor – GOV*).
- Estabilizador do Sistema de Potência (do inglês: *Power System Stabilizer – PSS*).

Inicialmente, serão abordadas as funções dos sistemas de controle de excitação da máquina síncrona, bem como as suas características e efeitos de atuação. Posteriormente, são descritos os arranjos típicos e as configurações utilizadas para o regulador de tensão (*AVR*).

Em seguida, será apresentada a máquina primária e o mecanismo de atuação dos reguladores de velocidade (*GOV*). Além disso, os principais tipos desses reguladores são comentados e suas particularidades ressaltadas.

Uma visão geral dos princípios operacionais e das formas de modelagem e implementação computacional de um Estabilizador do Sistema será abordada. Será mostrada também a importância do regulador de tensão associado com o estabilizador, como dispositivos que proporcionam um torque elétrico positivo, sincronizante para a unidade geradora.

E, finalmente, será apresentada a estratégia utilizada para a implementação computacional dos reguladores de tensão e de velocidade e do *PSS*, abordando os mecanismos e efeitos de atuação de cada controle, bem como as suas modelagens no *software ATPDraw*.

3.2 – JUSTIFICATIVAS PARA A UTILIZAÇÃO DO REGULADOR AUTOMÁTICO 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 [11].

O *AVR* controla a saída da excitatriz de maneira que a corrente fornecida por ela e a potência reativa do gerador se modifiquem de forma desejada. Basicamente, este regulador deve monitorar a tensão terminal da máquina síncrona, durante todo o tempo, e compará-la com um valor de referência pré-

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. E, por fim, a presença de controles auxiliares pode melhorar o comportamento dinâmico de todo o processo envolvido no controle de tensão.

A ação do *AVR* não apenas fornece um perfil de tensão constante durante a operação em regime permanente, mas também auxilia a minimizar as oscilações de tensão durante períodos transitórios, proporcionando melhoria da estabilidade global do sistema [9].

3.2.1 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DO SISTEMA DE CONTROLE DA EXCITAÇÃO

A resposta do sistema de excitação a uma perturbação deve ser rápida, com o intuito de garantir um bom desempenho durante a estabilidade transitória. A Figura 3.1 mostra um diagrama simplificado com a configuração física do sistema de controle da excitação de um gerador síncrono.

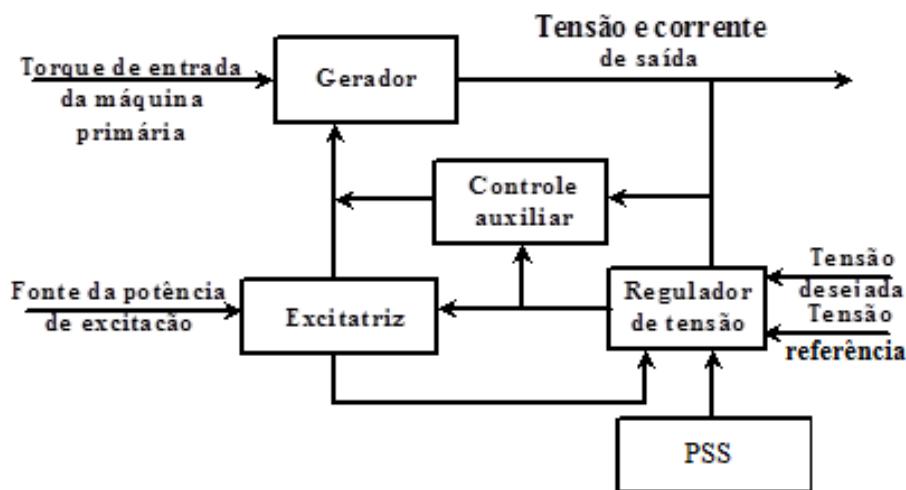


Figura 3.1: Diagrama esquemático de um sistema de controle da excitação (AVR)

Na Figura 3.1 o bloco denominado de controle auxiliar é responsável pela proteção do sistema elétrico. Este pode apresentar várias características somadas, como por exemplo, um amortecimento e um comparador. O

amortecimento pode ser introduzido para reduzir picos de tensões, e já um comparador pode ser utilizado para estabelecer um limite mínimo de excitação, prevenindo a instabilidade.

A excitatriz fornece toda (ou parte) da corrente de excitação para a bobina de campo do gerador. O regulador de tensão controla a saída da excitatriz de modo que a tensão gerada e a potência reativa variem da forma desejada. Um controle adicional pode ser fornecido pelo *PSS* a fim de reduzir as oscilações na frequência de saída do gerador.

A velocidade de ação do *AVR* é fundamental para os estudos de estabilidade do Sistema Elétrico. Por causa da alta indutância do enrolamento de campo da máquina, é difícil realizar rápidas modificações na corrente de campo. Desta forma, um atraso na resposta do controle é introduzido, sendo uma das principais barreiras a ser enfrentada ao se projetar um sistema de controle da excitação [11].

3.2.2 – TIPOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

A classificação com relação ao tipo de sistema de excitação é feita conforme a fonte de potência utilizada. Estes podem ser classificados em três tipos: Sistemas de excitação com Corrente Contínua (*DC excitation System*); Sistemas de excitação com Corrente Alternada (*AC excitation System*) e Sistemas de excitação Estáticos (*Static excitation System*) [10].

Os sistemas de excitação estáticos (sem máquinas rotativas) são empregados nos reguladores de tensão modernos. Não será realizada neste estudo uma análise detalhada de cada tipo de sistema de excitação, mas podem-se encontrar mais explicações nas referências [9], [10] e [11].

3.3 – MODELAGEM COMPUTACIONAL DO REGULADOR DE TENSÃO

A Figura 3.2 mostra um modelo geral para o regulador de tensão, em diagrama de blocos. Essa é uma representação mais detalhada de cada componente do *AVR*.

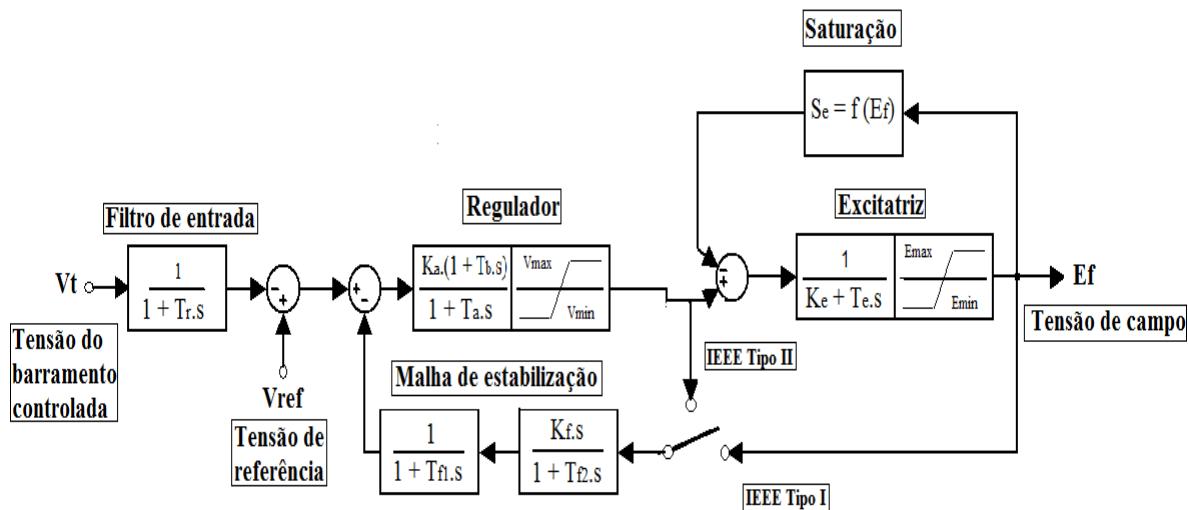


Figura 3.2: Modelo geral do regulador automático de tensão (AVR)

Considerando a impossibilidade de obter todos os dados solicitados pelo regulador de tensão da Figura 3.2, este pode ser reduzido a modelos mais simplificados [11], apresentados nas figuras de 3.3 a 3.6.

A Figura 3.3 apresenta um modelo mais simples do sistema de excitação, baseado no modelo geral da figura 3.2.

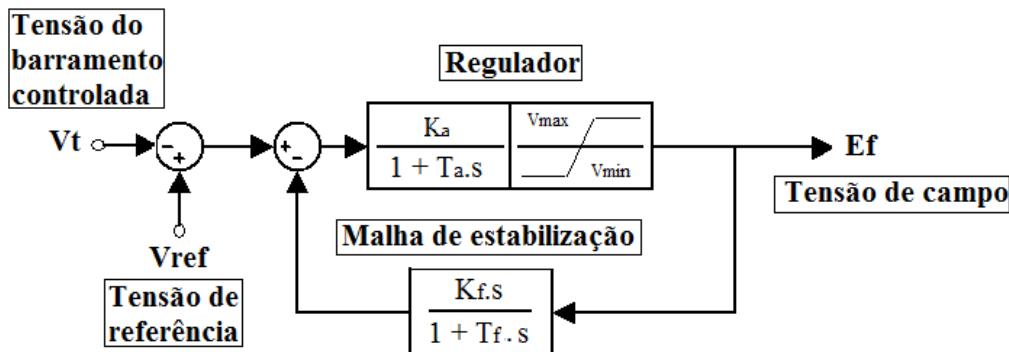


Figura 3.3: Modelo simples de regulador automático de tensão

Observa-se pela Figura 3.3 que o sinal proveniente da soma da tensão terminal da máquina (V_t) e da tensão de referência (V_{ref}) passa pelo caminho principal na função de transferência, com ganho K_a e constante de tempo T_a , além de passar também pelos limites máximo ($V_{máx}$) e mínimo ($V_{mín}$) do regulador.

Um sinal de amortecimento (de estabilização) proveniente da tensão de saída da excitatriz E_f é fornecido na malha de realimentação. Esse estabilizador apresenta uma função de transferência com ganho K_f e constante de tempo T_f .

A Figura 3.4 mostra uma representação mais avançada do que o *AVR* anterior, com as seguintes características adicionais: funções de transferência da excitatriz $1/(K_e + sT_e)$ seguida pelos seus limites ($E_{máx}$ e $E_{mín}$) e uma constante de tempo T_b para a representação do regulador.

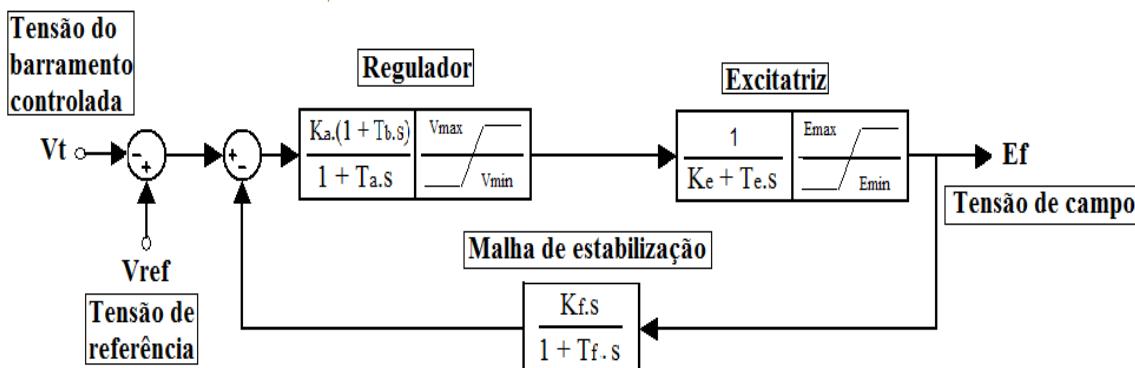


Figura 3.4: Modelo mais avançado de regulador automático de tensão

Os outros modelos apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6, normalmente referidos como IEEE tipo I e IEEE tipo II, respectivamente, são recomendados pelo IEEE Committee Report [14].

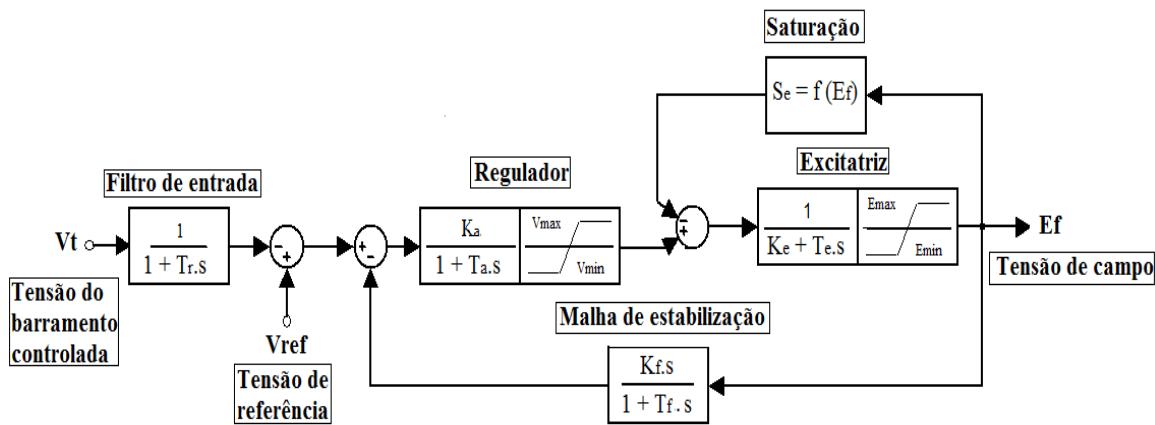


Figura 3.5: Modelo de regulador de tensão: Tipo I do IEEE

Nota-se pela Figura 3.5 que a tensão terminal (V_t), antes de ser comparada com a tensão de referência (V_{ref}), é filtrada e suavizada pelo filtro de entrada do regulador, usando uma constante de tempo T_r (embora esta seja geralmente bem pequena). O sinal resultante (o erro) da comparação entre as tensões V_{ref} e V_t , passa pela função de transferência do *AVR*, com ganho K_a e constante de tempo T_a , passando também pelos limites máximo ($V_{máx}$) e mínimo ($V_{mín}$) do *AVR*. Depois, este sinal, somado ao efeito de saturação da excitatriz, caracterizada pela função de saturação S_e , passa pela função de transferência da excitatriz, com ganho K_e e constante de tempo T_e , passando em seguida pelos seus limites ($E_{máx}$ e $E_{mín}$). O sinal obtido na saída deste último bloco é aplicado ao campo da máquina síncrona. Trata-se da tensão de excitação E_f a ser aplicada no enrolamento de campo do gerador. Este mesmo sinal é inserido por realimentação no somador (entrada do regulador) passando pela função de transferência do estabilizador, com ganho K_f e constante de tempo T_f .

A Figura 3.6 apresenta o modelo do *AVR* do IEEE tipo II.

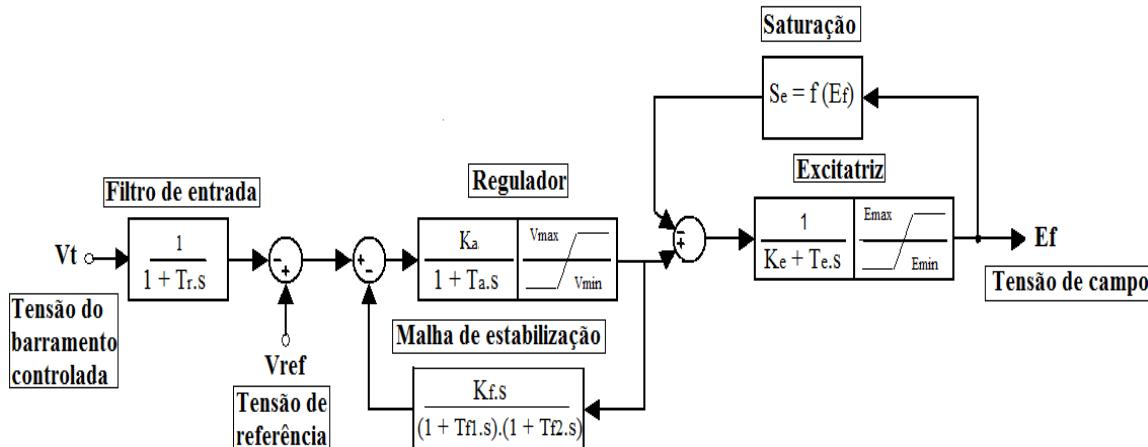


Figura 3.6: Modelo de regulador de tensão: Tipo II do IEEE

Comparando-se os modelos do IEEE Tipo I e Tipo II (Figuras 3.5 e 3.6, respectivamente), verifica-se que o sinal de entrada da malha de realimentação para o modelo Tipo II do IEEE, é inserido na saída do regulador. Já para o Tipo I, esse sinal de entrada é na saída da excitatriz. Além disto, o modelo tipo II inclui na malha de realimentação uma constante de tempo adicional T_{f2} , para compensar a exclusão da excitatriz nesta malha.

Ressalta-se que as constantes de tempo da malha de excitação (Figura 3.5 e Figura 3.6) são menores do que as constantes de tempo das malhas de regulação de velocidade, e desta forma, o controle de excitação torna-se muito mais efetivo em relação à manutenção da estabilidade de tensão do que no controle de velocidade [15].

3.4 – MODELAGEM COMPUTACIONAL DO REGULADOR DE TENSÃO NO ATPDRAW

O software *ATP* não apresenta em sua biblioteca os modelos de reguladores (*AVR* e *GOV*) e do estabilizador da máquina síncrona, mas possui mecanismos para a elaboração destes modelos que não estão disponíveis. Sendo assim, é necessário que o usuário desenvolva a modelagem dos controladores do gerador síncrono e faça a sua devida implementação no software.

Ressalta-se que a referência [20] implementou modelos de reguladores de velocidade e de tensão do gerador síncrono no *software ATP*. Porém, estes foram implementados utilizando declarações codificadas do programa que seguem uma formatação muito rígida proveniente do Fortran que os tornam pouco práticos para o usuário. Visando melhorar esse aspecto procurou-se neste trabalho agregar cada tipo de regulador dentro de um módulo e representá-los, por um ícone, na interface gráfica do programa denominada *ATPDraw*. Nesse sentido, uma das contribuições desta dissertação é a modelagem computacional dos reguladores (*AVR e GOV*) no programa *ATP* em sua interface *ATPDraw*. Nessa mesma linha, destaca-se também, como contribuição deste estudo, a implementação e modelagem do estabilizador no *software* mencionado.

Diante dessa premissa, o *ATP* dispõe de uma função, denominada *Data Base Modularization – DBM* [22], que possibilita a criação de bibliotecas de modelos, expandindo e facilitando o uso do programa em várias aplicações. Esta função permite que um ou mais componentes do programa possam ser agrupados num único módulo, o qual passaria a ser visto pelo *ATP* como se fosse um modelo. Os módulos são gerados em arquivos especiais (*.lib) que possuem argumentos possibilitando a sua inserção no programa repetidas vezes e em qualquer ponto do sistema.

Os diagramas de blocos dos sistemas de controle foram implementados, dentro do módulo, utilizando a rotina *TACS – Transient Analysis of Control Systems* do *ATP* [23]. Através desta rotina foi possível representar as funções de transferência dos controladores da máquina síncrona.

Abaixo é feita uma breve descrição do procedimento adotado para a implementação da malha de controle dos reguladores:

- Obter o diagrama de blocos do sistema de controle a ser implementado na *TACS*;

- Descrever cada um dos blocos de sistema de controle na *TACS*, nomeando as variáveis de entrada e de saída, sendo a elas atribuído um único valor a cada passo de integração;
- E por último, inserir os blocos ou expressões na ordem em que eles são executados.

Sendo assim, o módulo do regulador de tensão, Figura 3.5, foi implementado.

No ANEXO, item III, encontra-se o algoritmo utilizado para esta implementação.

Após a elaboração do módulo, foi criado um ícone, representação visual e inclusão do módulo do regulador de tensão Tipo I do IEEE (Figura 3.5) no programa *ATP* por meio da interface *ATPDraw*. A Figura 3.7 apresenta o ícone do regulador de tensão.

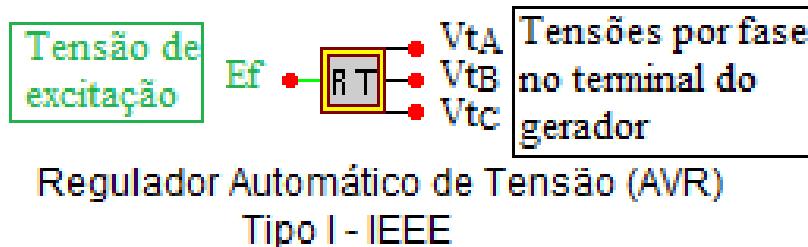


Figura 3.7: Ícone representando o regulador de tensão no *ATPDraw*

Para a utilização do modelo do regulador implementado (Figura 3.7), o usuário deve ter conhecimento dos parâmetros e dados de entrada do *AVR*. Este regulador tem como nós de entrada as tensões terminais do gerador (fases A, B e C) e como nó de saída a tensão de excitação da máquina (E_f). Os dados de entrada do regulador são: frequência (freque) em Hz, tensão nominal (U_n) em kV e tensão de referência (V_{ref}) em pu. Já os parâmetros do *AVR* que devem ser inseridos pelo usuário são: constante de tempo do filtro de entrada do *AVR* (T_r), ganho do regulador (K_a), constante de tempo do *AVR* (T_a), limites máximo

(V_{\max}) e mínimo (V_{\min}) da tensão na saída do controlador em pu, ganho da excitatriz relacionado com a autoexcitação do campo (K_e), constante de tempo da excitatriz (T_e), limites máximo (E_{\max}) e mínimo (E_{\min}) da tensão na saída do bloco de excitação em pu, ganho da malha de estabilização do regulador (K_f) e constante de tempo do estabilizador (T_f). Os valores dos ganhos são dados em pu, e os valores das constantes de tempo são dados em segundos (s).

3.5 – A MÁQUINA PRIMÁRIA E O REGULADOR DE VELOCIDADE

A máquina primária é responsável pelo acionamento mecânico de um gerador de energia elétrica. As máquinas primárias geralmente utilizadas para produzir potência motriz em sistemas de energia elétrica são: as turbinas a vapor, a gás e hidráulicas, e os motores diesel.

As turbinas a gás e os motores diesel são empregados em sistemas industriais e comerciais, isolados ou não, como por exemplo, os sistemas de geração em plataformas marítimas de prospecção de petróleo, em navios, sistemas de emergência em hospitais e outros.

As turbinas hidráulicas e a vapor são as máquinas mais utilizadas em sistemas interligados (geração de potência em grande escala). Informações a respeito das características relevantes dessas turbinas podem ser encontradas nas referências [9] e [11].

Normalmente, a máquina primária vem associada a um regulador de velocidade, cuja principal função é controlar a velocidade pelo ajuste do suprimento de potência mecânica no eixo do grupo gerador-máquina primária, de acordo com a necessidade da carga elétrica nos terminais do gerador.

Em outras palavras, o regulador de velocidade deve monitorar a variação de velocidade da máquina durante todo o tempo e em qualquer situação de carga, atuando no sentido de elevar ou reduzir a potência do grupo de geração, quando sua velocidade (ou frequência) se afasta da velocidade de referência.

Este mecanismo de regulação automática de velocidade é também responsável pela correta distribuição de potência entre as máquinas de um sistema multimáquinas, visto que a potência ativa é dependente da potência ou torque de acionamento imprimido pela máquina primária no eixo do gerador.

A ação do regulador de velocidade possibilita uma velocidade constante durante a operação da máquina síncrona em regime permanente. Se ocorrer alguma perturbação no sistema, durante o período transitório, o regulador atua no intuito de reduzir as variações de velocidade e frequência, contribuindo com a estabilidade global de um sistema elétrico.

3.6 – TIPOS DE REGULADORES DE VELOCIDADE

Para a operação em paralelo de dois ou mais geradores (síncronos) alimentando uma mesma carga, é necessário ter um controle preciso de velocidade. Pois é imprescindível sincronizar a velocidade e o deslocamento elétrico de fase de uma unidade que entrará em operação com aquelas que já estão fornecendo potência [11]. Além disso, a tensão terminal dessa unidade deve também se igualar com a do barramento onde estão conectados os demais geradores.

Desta forma, para uma máquina entrar em operação em paralelo, essa deve ser, primeiramente, sincronizada com as outras unidades geradoras, conforme mencionado anteriormente, para depois ser carregada ao nível de potência requerido pelo ajuste do regulador de velocidade.

Com o intuito de se garantir uma boa divisão de carga entre as unidades geradoras em paralelo, os reguladores devem incorporar uma característica denominada de “queda de velocidade”, “inclinação” ou “estatismo” (do inglês: *droop*), como mostra a figura 3.8.

No Brasil e nos Estados Unidos esta característica é normalmente fixada em 5%. Isto quer dizer que para carregar um gerador em vazio até a plena carga

(variação de carga de 100%) haverá uma queda de velocidade de 5 % (considerando a característica linear). Já na Europa o valor usualmente utilizado é 4%.

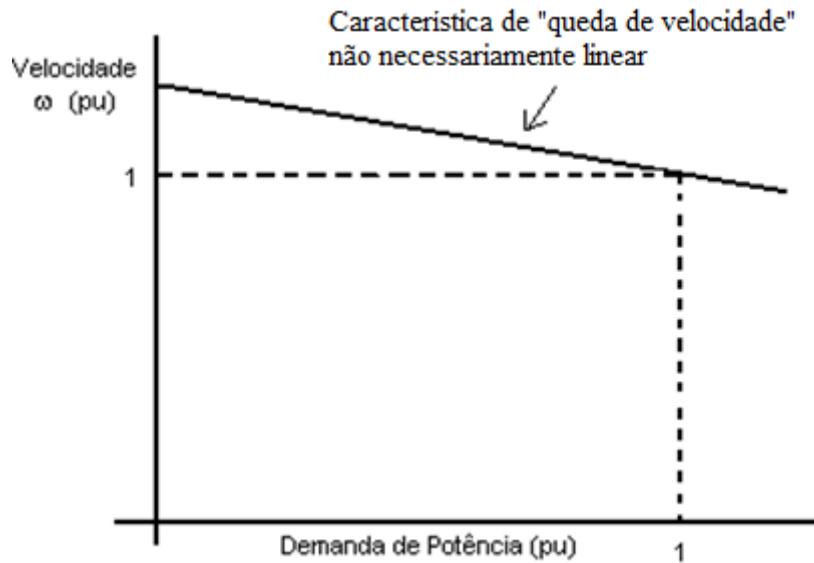


Figura 3.8: Característica de “queda de velocidade” de uma máquina operando em um sistema elétrico

O caso de duas máquinas com características de “queda de velocidade”, fornecendo energia a uma mesma carga, é apresentado na Figura 3.9.

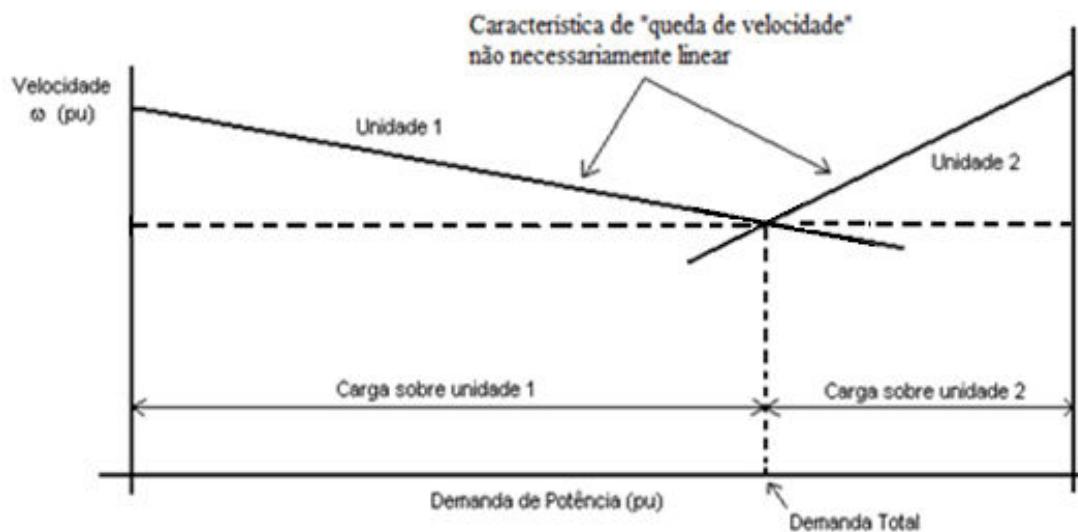


Figura 3.9: Diagrama esquemático para duas máquinas operando em paralelo com características de “queda de velocidade” diferentes suprindo uma mesma carga

Considerando as condições mostradas na Figura 3.9, e como as duas máquinas estão operando na mesma velocidade, a carga total a ser suprida será dividida desigualmente entre as máquinas primárias. Com o intuito de garantir uma distribuição igual de carga, ou para atender às especificações das máquinas, é necessário que a característica de “queda de velocidade” de cada máquina e de seu regulador devem ser idênticas.

Quando uma máquina opera sem “queda de velocidade”, ela usa uma característica chamada de “isócrona”, mostrada na figura 3.10.

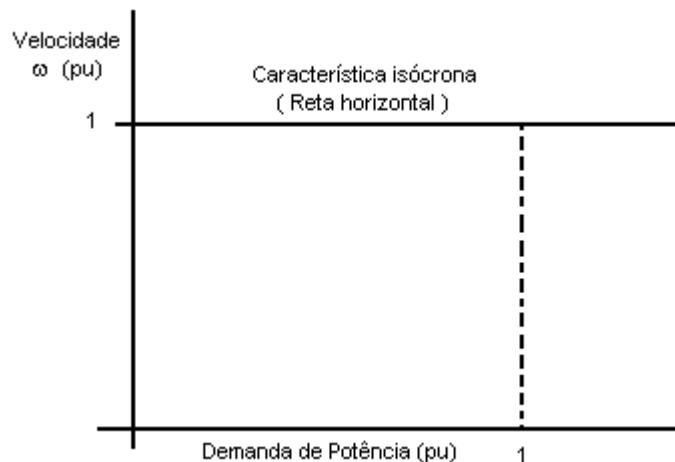


Figura 3.10: Característica isócrona de um gerador operando em um sistema elétrico

Pode-se explicar a diferença operativa entre as duas características citadas, considerando o seguinte exemplo: um sistema constituído de duas unidades, a primeira operando com característica isócrona e a segunda operando com “queda de velocidade”. A Figura 3.11 mostra este exemplo. A unidade isócrona deve operar em uma mesma velocidade para todas as cargas. Quando a demanda de carga variar, a segunda unidade, que opera com “queda de velocidade”, deverá operar em um valor de velocidade definido pela primeira unidade. Sendo assim, a segunda unidade com “queda de velocidade” deverá operar em uma única velocidade e carga, e a variação de carga somente será atendida pela primeira unidade que opera isocronamente.

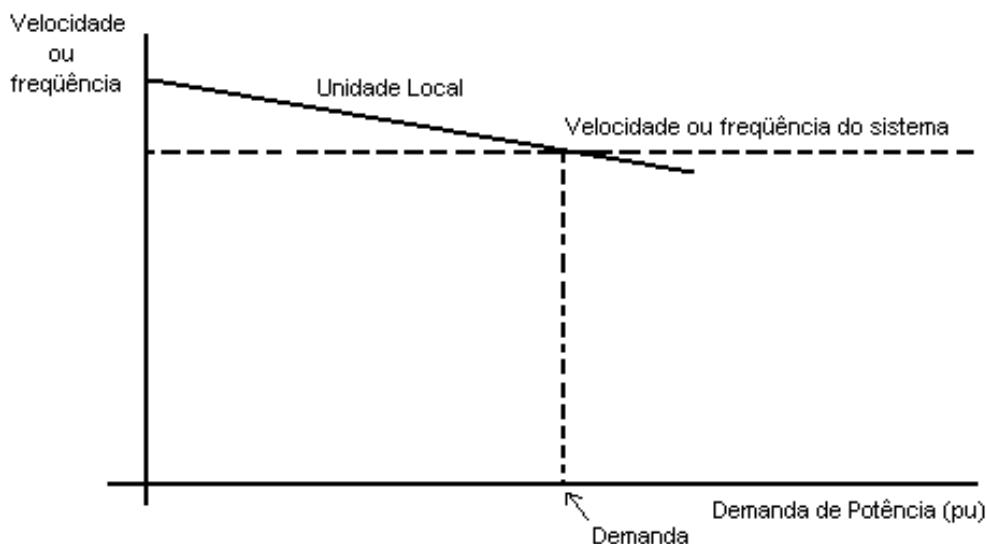


Figura 3.11: Representação esquemática de duas máquinas operando em paralelo, uma com característica de “queda de velocidade” e a outra isócrona

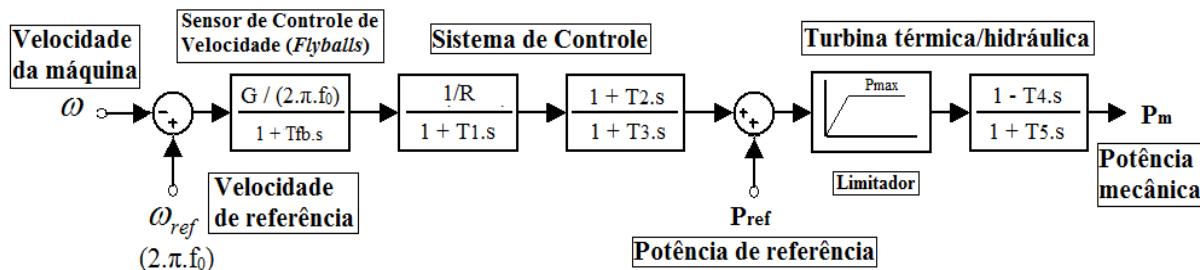
Se, por exemplo, as duas máquinas estivessem operando com características isócronas, as duas poderiam suprir a demanda total de carga e o resultado da distribuição de carga entre elas seria inesperado. Poder-se-ia acontecer que uma funcionaria como gerador assumindo 100% da carga e a outra em vazio, ou até mesmo poderia consumir potência.

O caso particular de uma máquina operando com característica isócrona e outra com “queda de velocidade” é geralmente empregado por grupos geradores operando em paralelo com o suprimento da concessionária de energia elétrica. Na Figura 3.11, o sistema da concessionária apresenta uma característica isócrona e o grupo gerador local é operado com “queda de velocidade”. Sendo assim, a máquina local fornecerá uma potência de saída constante enquanto a frequência da rede permanecer constante, e qualquer variação de carga será suprida pela concessionária. Se houver acréscimo de carga o gerador isócrono deverá assumir todo o acréscimo sozinho, por outro lado, se houver um decréscimo de carga o mesmo gerador será submetido a tal decréscimo.

3.7 – MODELAGEM COMPUTACIONAL DO REGULADOR DE VELOCIDADE NO ATPDRAW

O objetivo desta seção consiste em obter um modelo do regulador de velocidade que possa ser implementado computacionalmente no *ATPDraw*.

A figura 3.12 apresenta o diagrama de blocos, retirado da referência [20], empregado para representar um modelo simples de um regulador de velocidade associado a uma turbina térmica a vapor ou a uma turbina hidráulica.



Obs: Para turbina hidráulica tem-se $T_4 \neq 0$ ($T_4 = T_5 \times 2$).

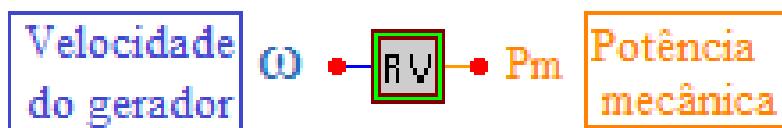
Figura 3.12: Diagrama de blocos representando um modelo simples de um regulador de velocidade

Observa-se pela Figura 3.12 que o sinal proveniente (erro) da comparação da velocidade da máquina (ω) com a velocidade de referência (ω_{ref}) passa, primeiramente, pela função de transferência dos *flyballs*, com ganho G e constante de tempo T_{fb} . Depois, este sinal é inserido na 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 obtido na saída desta última 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, por último, este sinal passa pelos limites máximo e mínimo de potência mecânica, e depois é aplicado no eixo do gerador síncrono. Desta forma, o *GOV* atua no sentido de elevar ou reduzir a potência do grupo de geração, quando sua velocidade se afasta da velocidade de referência.

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 ($T_4 = T_5 \times 2$) 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 [11]. Como um resultado dessa situação, a variação inicial da turbina é oposta à variação final.

Para a modelagem do regulador de velocidade no *ATPDraw* foi utilizada a mesma estratégia adotada para a implementação do regulador de tensão. Com o auxílio da função *DBM* foi criado o módulo para a implementação do arquivo a ser simulado. As funções de transferência que representam o regulador de velocidade, obtidas do diagrama de blocos da Figura 3.12, foram implementadas no software *ATP* através da rotina *TACS*. No ANEXO, item IV, apresenta-se o algoritmo utilizado para esta implementação. Após a elaboração do módulo, foi criado o ícone para representar, no *ATPDraw*, o regulador de velocidade, como mostrado na Figura 3.13.



Regulador de Velocidade (GOV)

Figura 3.13: Ícone representando o regulador de velocidade no ATPDraw

Como foi mencionado anteriormente, o usuário deve ter conhecimento dos parâmetros e dados de entrada do controlador. O regulador de velocidade modelado apresenta dois nós: um nó de entrada para a velocidade da máquina síncrona e um nó de saída para a potência mecânica. Os dados e parâmetros de entrada que devem ser especificados pelo usuário são: frequência (freque) em Hz, número de polos (P), potência de referência (P_{ref}) em pu, ganho do *flyballs* (G), constante de tempo do *flyballs* (T_{fb}), “regulação” ou “queda de velocidade” (R), constante de tempo de escoamento (T_1), tempo de escoamento do regulador

hidráulico (T_2), constante de tempo do regulador (T_3), tempo de partida da inércia da água - turbina hidráulica (T_4), constante de tempo da turbina hidráulica/térmica (T_5) e limites máximo ($P_{máx}$) e mínimo ($P_{mín}$) da potência mecânica em pu. Os valores dos ganhos são dados em pu, e os valores das constantes de tempo são dados em segundos (s).

3.8 – VERIFICAÇÃO DA CARACTERÍSTICA OPERACIONAL DOS REGULADORES DE VELOCIDADE

Para a verificação da característica operacional dos Reguladores de velocidade (*GOV*), simulou-se o sistema elétrico da Figura 3.14 modelado no *ATPDraw*. Este sistema é composto por dois geradores síncronos iguais, associados aos seus controles, fornecendo potência ativa e reativa para duas cargas iguais (A e B), modeladas como impedância constante, conectadas em paralelo.

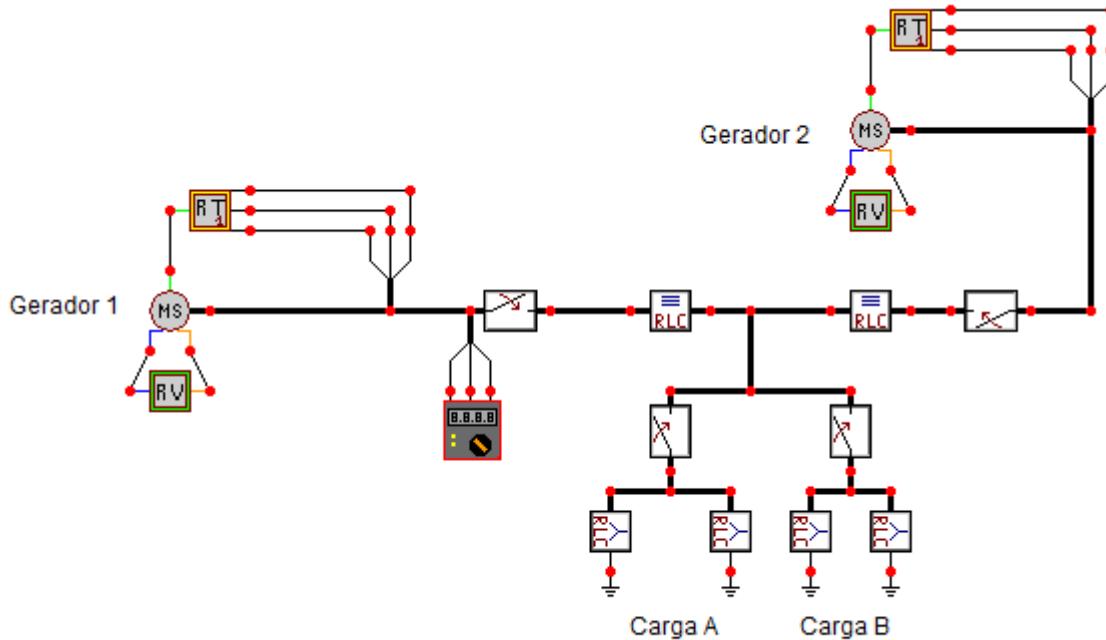


Figura 3.14: Sistema elétrico, modelado no ATPDraw, para verificação da característica operacional dos reguladores

A Tabela 3.1 mostra os dados e parâmetros de entrada das máquinas síncronas.

Tabela 3.1: Dados e parâmetros de entrada das máquinas síncronas

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
S_n (MVA)	10,0	x''_q (pu)	0,17
U_n (kV)	10,0	x_0 (pu)	0,046
freq (Hz)	60	T'_{d0} (s)	1,754
R_a (pu)	0,11	T'_{q0} (s)	0,0
x_L (pu)	0,1	T''_{d0} (s)	0,019
x_d (pu)	1,8	T''_{q0} (s)	0,164
x_q (pu)	1,2	H (s)	2,0
x'_d (pu)	0,166	P (polos)	2,0
x'_q (pu)	0,98	ω_S (rad/s)	377
x''_d (pu)	0,119		

A Tabela 3.2 mostra as potências ativa e reativa de cada carga.

Tabela 3.2: Potências ativa e reativa de cada carga

Potência ativa (P) (MW)	Potência reativa (Q) (MVAr)
4	3,02

A Tabela 3.3 apresenta os dados de entrada e parâmetros utilizados para as constantes do diagrama de blocos do *AVR* da Figura 3.5, retirados da referência [9].

Tabela 3.3: Dados e Parâmetros de entrada do AVR IEEE Tipo I

REGULADOR DE TENSÃO IEEE TIPO I	
- $f = 60$ [Hz]	- $K_f = 0,03$ [pu]
- U_n (eficaz) = 5773,5 [V]	- $T_f = 1,0$ [s]
- $V_{ref} = 1$ [pu]	- $T_r = 0,001$ [s]
- $K_a = 400$ [pu]	- $V_{min} = 0,5$ [pu]
- $T_a = 0,02$ [s]	- $V_{max} = 1,6$ [pu]
- $K_e = 1,0$ [pu]	- $E_{min} = 0,5$ [pu]
- $T_e = 0,8$ [s]	- $E_{max} = 1,5$ [pu]

A Tabela 3.4 apresenta os dados de entrada e parâmetros utilizados para as constantes do diagrama de blocos do *GOV* da Figura 3.12, retirados também da referência [9].

Tabela 3.4: Dados e Parâmetros de entrada do GOV

REGULADOR DE VELOCIDADE	
- $f = 60$ [Hz]	- $T_3 = 0,3$ [s]
- P (polos) = 2	- $T_4 = 0$ [s]
- $P_{ref} = 1$ [pu]	- $T_5 = 0,3$ [pu]
- $R = 0,05$ [pu]	- $G = 1$ [pu]
- $T_{fb} = 0,2$ [s]	- $P_{mín} = -1,6$ [pu]
- $T_1 = 0$ [s]	- $P_{máx} = 3$ [pu]
- $T_2 = 0$	

As simulações computacionais serão realizadas de forma que se possam avaliar as características de “queda de velocidade” dos reguladores de velocidade. Nesta seção, pode-se também verificar se os controles da máquina síncrona modelados, Figuras 3.7 e 3.13, estão atuando de forma correta. Será utilizado o dispositivo desenvolvido e modelado, mostrado na Figura 2.16, para disponibilizar as variáveis elétricas necessárias para o estudo deste caso.

Inicialmente, o sistema elétrico opera na condição de regime permanente. As condições iniciais de operação são mostradas nas Figuras 3.15 a 3.18. Nota-se que como as máquinas síncronas são iguais, inicialmente, elas irão compartilhar igualmente a carga total de 8 [MW] e 6,03 [MVar].

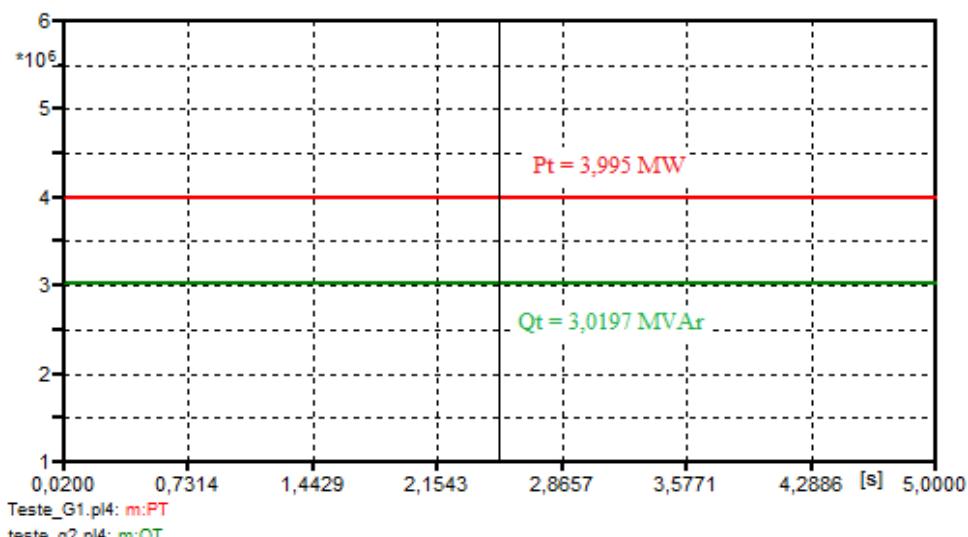


Figura 3.15: Potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador síncrono 1, em regime permanente

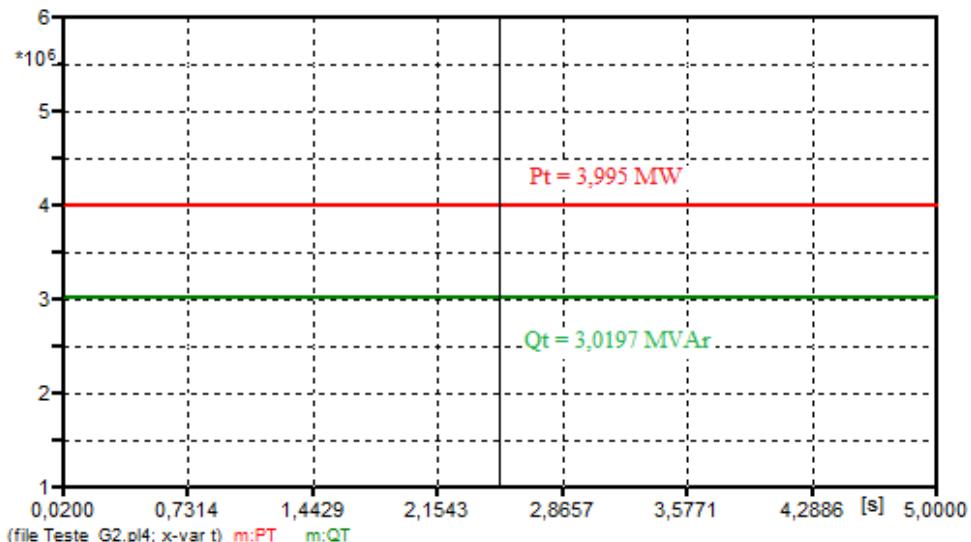


Figura 3.16: Potências ativa e reativa fornecidas pelo gerador síncrono 2, em regime permanente

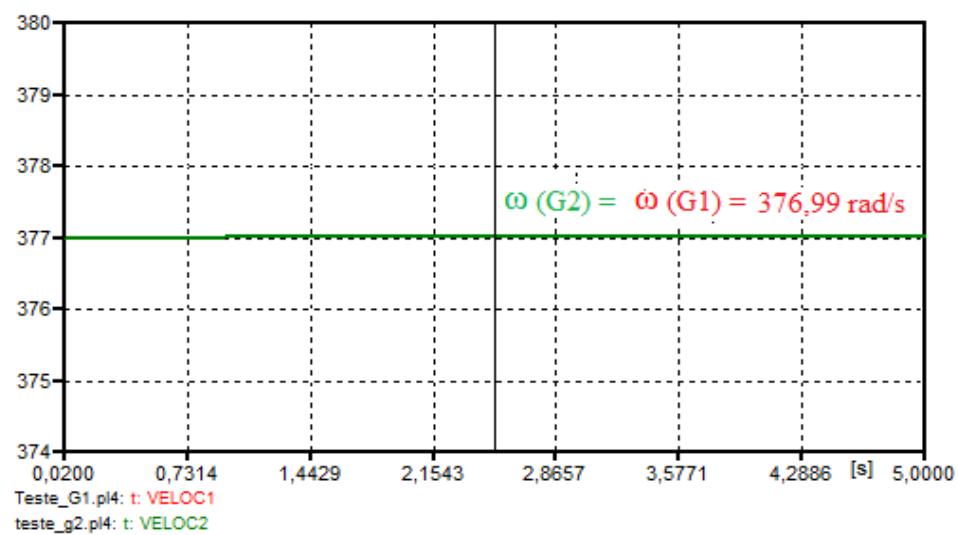


Figura 3.17: Velocidades dos geradores 1 e 2, em regime permanente

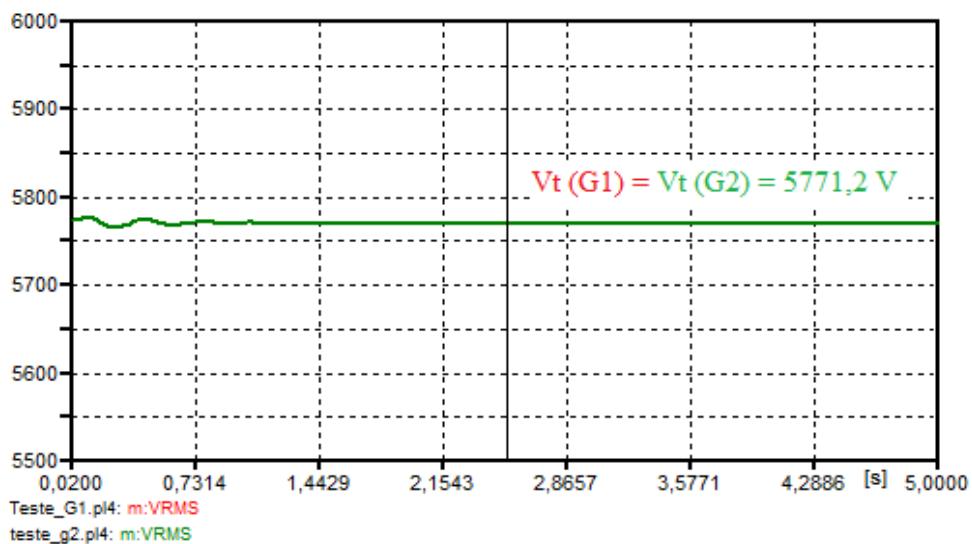


Figura 3.18: Tensões (V_t) nos terminais dos geradores 1 e 2 , em regime permanente

Pode-se verificar o valor do ângulo de potência determinado pelo dispositivo desenvolvido, no Capítulo 2, através da expressão 2.10, mostrada novamente neste capítulo. Como inicialmente, as máquinas são iguais e fornecem a mesma potência ativa as cargas, o ângulo de potência de ambas será igual a $17,63^\circ$, como mostrado na Figura 3.19.

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{x_q I_a \cos \varphi - r_a I_a \operatorname{sen} \varphi}{V_t + r_a I_a \cos \varphi + x_q I_a \operatorname{sen} \varphi} \right)$$

Sendo assim, os valores das variáveis elétricas da expressão acima são determinados pela simulação computacional, mostrados na Figura 3.19.

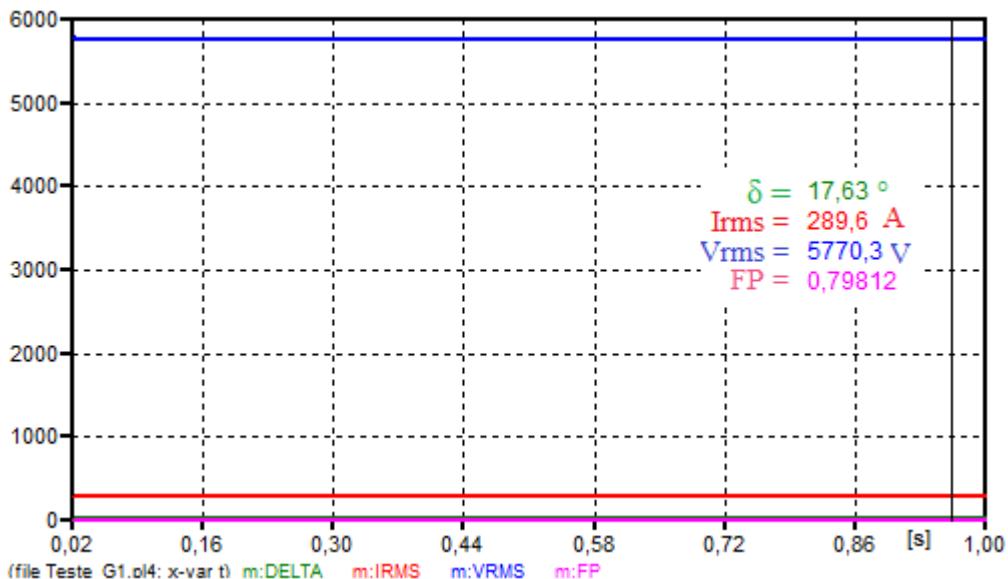


Figura 3.19: Variáveis elétricas para o cálculo do valor do ângulo de potência

Portanto, pode-se calcular o valor do ângulo de potência.

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{12 * 289,6 * 0,79812 - 1,1 * 289,6 * 0,6025}{5770,3 + 1,1 * 289,6 * 0,79812 + 12 * 289,6 * 0,6025} \right)$$

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1}(0,318) \rightarrow \delta = 17,64^\circ$$

Portanto, o valor do ângulo de potência calculado é igual ao valor do ângulo determinado pelo dispositivo desenvolvido.

3.8.1 – ESTUDOS DE CASOS

No instante $t = 1$ s, é então simulada uma perturbação no sistema mostrado na Figura 3.14: inserção de uma nova carga, $P_c = 4$ [MW] e $Q_c = 3,02$ [MVAr], conectada em paralelo com os geradores síncronos.

Para efeito de comparação, dois casos serão aqui investigados:

I – Os dois geradores síncronos com características de “queda de velocidade” iguais, de 5%;

II – O gerador 1 com “queda de velocidade” de 5% e o gerador 2 de 20%.

Caso I - Os dois geradores síncronos com características de “queda de velocidade” iguais, de 5%

Na Figura 3.20 mostra-se o comportamento das potências ativas fornecidas pelos geradores 1 e 2, após a inserção de carga. Considerando que os geradores são iguais e apresentam às mesmas características de “queda de velocidade”, a potência ativa requerida pela nova carga, foi distribuída igualmente entre as máquinas. Portanto, os dois geradores juntos fornecem uma potência total de 11,9752 [MW], para atender a demanda das três cargas (Cargas A e B, mais a carga inserida).

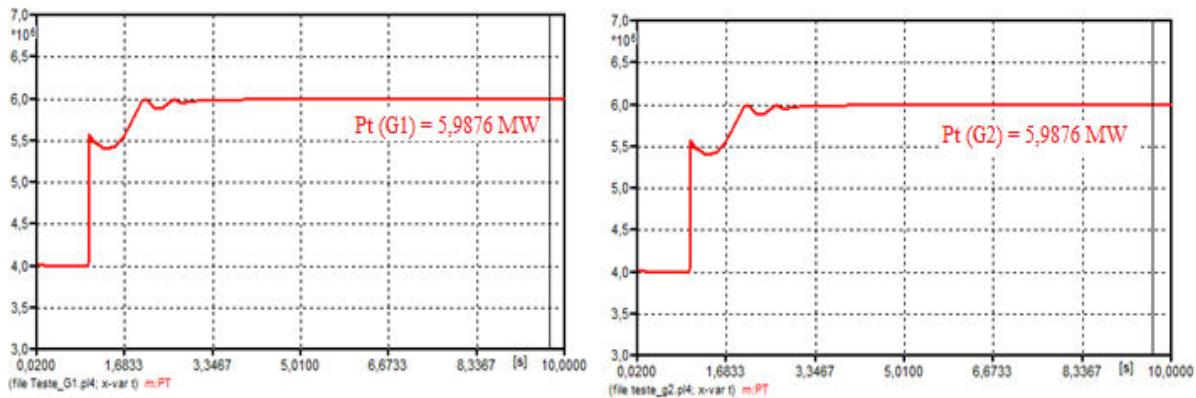


Figura 3.20: Potências ativas fornecidas pelos geradores 1 e 2, após a inserção de carga, com “queda de velocidade” de 5%

O comportamento das velocidades dos geradores síncronos 1 e 2 são mostrados na Figura 3.21. Observa-se que em cada máquina, após a inserção de carga, a velocidade diminui, ou seja, os geradores desaceleram, atingindo um valor mínimo de 364,45 [rad/s]. Porém, com a presença e atuação do *GOV*, no sentido de aumentar a potência do grupo de geração, a velocidade de cada máquina aumenta, estabilizando em um valor de 366,77 [rad/s].

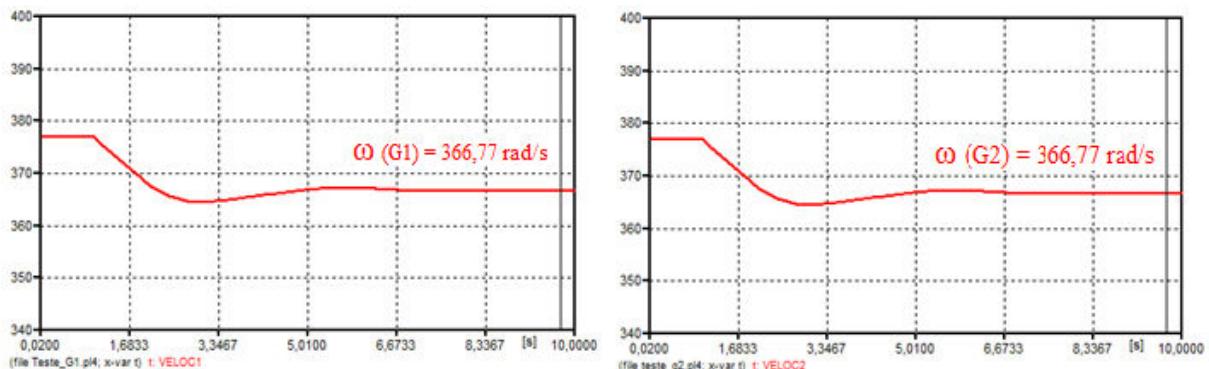


Figura 3.21: Velocidades dos geradores 1 e 2, após a inserção de carga, com “queda de velocidade” de 5%

Neste caso, será analisado o comportamento da tensão no terminal dos geradores 1 e 2, com o intuito de verificar o desempenho do regulador de tensão modelado.

Após a inserção de carga no instante 1 s, na Figura 3.22 mostra-se que a tensão terminal (V_t) de cada máquina decresceu. Porém, devido à presença e

atuação do *AVR*, a tensão terminal de cada gerador aumentou, apresentando um comportamento oscilatório, estabilizando em torno do seu valor pré-definido. Portanto, foi verificado e comprovado que o *AVR* está atuando de forma correta e eficaz, e diante disso, pôde-se validar o regulador modelado.

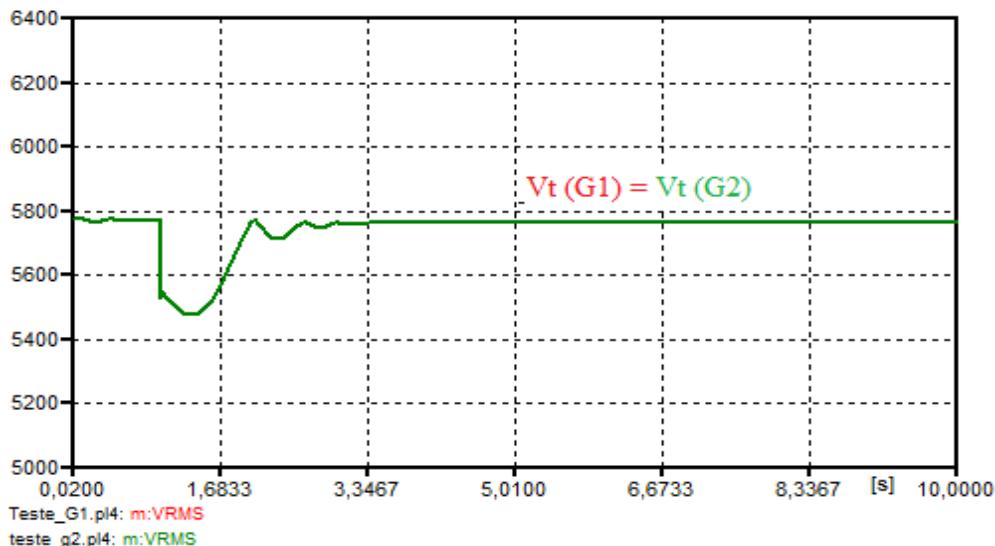


Figura 3.22: Tensões (V_t) nos terminais dos geradores 1 e 2, após a inserção de carga, com “queda de velocidade” de 5%

Caso II - O gerador 1 com “queda de velocidade” de 5% e o gerador 2 de 20%

O comportamento das potências ativas fornecidas pelos geradores 1 e 2 é apresentado na Figura 3.23.

As potências ativas são divididas em uma relação inversa da inclinação das características dos reguladores. Estas características determinam a forma com que a potência total de carga se distribui entre as máquinas. Sendo assim, a máquina com inclinação mais acentuada assumirá a menor parte da carga total.

Ressalta-se que as características são determinadas pela máquina primária (por exemplo, turbina) e, cada uma delas está associada a uma “dada abertura para a válvula”.

Desta forma, analisando a Figura 3.23, nota-se que o gerador 2, com maior “queda de velocidade”, forneceu a menor parte da potência ativa

$(P_t = 4,6778 \text{ [MW]})$ requerida pela carga. E o gerador 1, gerou a maior parte da potência necessária $(P_t = 7,2981 \text{ [MW]})$. Sendo assim, as duas máquinas continuam fornecendo uma potência total de 11,9759 [MW], para atender a demanda das três cargas.

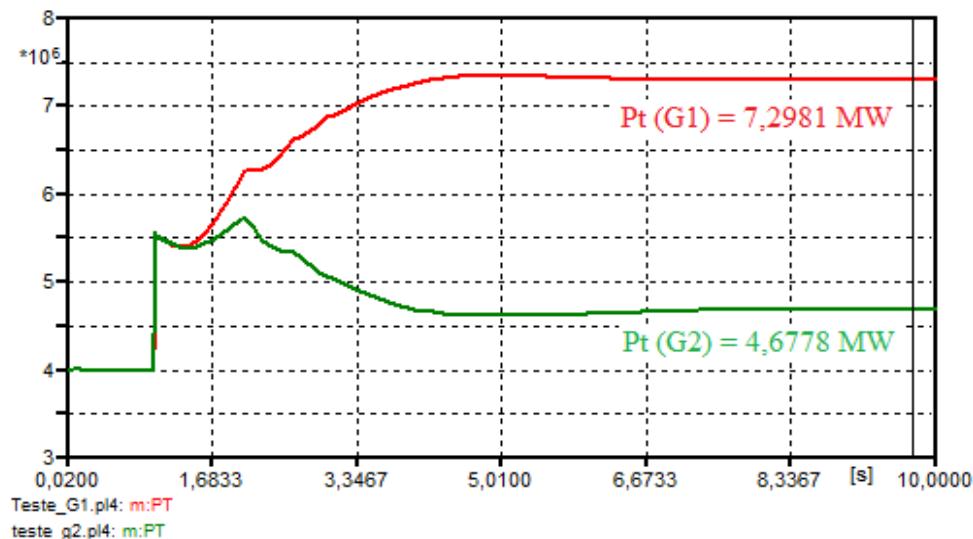


Figura 3.23: Potências ativas fornecidas pelos geradores 1 e 2, após a inserção de carga, com “queda de velocidade” de 5% (G_1) e 20% (G_2)

Portanto, pode-se verificar se a proporção da distribuição da potência ativa está de acordo com o esperado, através das expressões 3.1 e 3.2.

$$\Delta P_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * \Delta P_{carg\alpha} \quad (3.1)$$

$$\Delta P_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * \Delta P_{carg\alpha} \quad (3.2)$$

Onde:

ΔP_1 = acréscimo de potência ativa fornecida pelo G_1

ΔP_2 = acréscimo de potência ativa fornecida pelo G_2

R_1 = regulação do G_1

R_2 = regulação do G_2

$\Delta P_{carg\alpha}$ = acréscimo de potência ativa a ser suprida pelos geradores

Desta forma, calculou-se a contribuição de potência ativa de cada máquina síncrona.

$$\Delta P_1 = \frac{20}{25} * 4 * 10^6 = 3,2 [MW]$$

$$\Delta P_2 = \frac{5}{25} * 4 * 10^6 = 0,8 [MW]$$

Na simulação, o acréscimo de potência ativa fornecido pelos geradores é: $\Delta P_1 = 3,3$ [MW] e $\Delta P_2 = 0,68$ [MW]. Nota-se uma diferença entre os valores calculados e os simulados. Porém, essa diferença é pequena, e ocorreu devido às perdas no sistema, ou/e por causa da característica do regulador não ser totalmente linear. Portanto, os resultados obtidos estão coerentes e de acordo com a regulação esperada.

Na Figura 3.24 é apresentado o comportamento das velocidades dos geradores síncronos 1 e 2.

Observa-se que, após a inserção de carga, a velocidade do gerador 1 diminui, ou seja, a máquina desacelera, atingindo um valor mínimo de 359,5 [rad/s]. Porém, com a presença e atuação do *GOV*, a velocidade do gerador 1 aumenta, estabilizando em um valor de 360,47 [rad/s].

Analizando ainda a Figura 3.24, nota-se que a velocidade do gerador 2 também diminui, atingindo um mínimo valor de 359,49 [rad/s], estabilizando em 360,47 [rad/s].

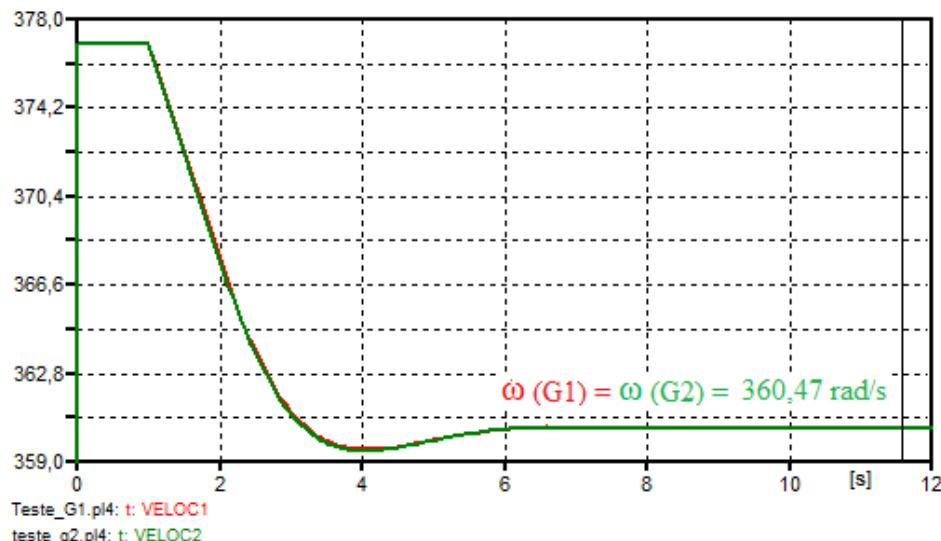


Figura 3.24: Velocidades dos geradores 1 e 2, após a inserção de carga, com “queda de velocidade” de 5% (G_1) e 20% (G_2)

3.9 – FUNÇÃO E MECANISMO DE ATUAÇÃO DE UM ESTABILIZADOR DO SISTEMA OU SINAL ADICIONAL ESTABILIZANTE

Se um sistema elétrico sofre alguma espécie de distúrbio, o rotor de cada máquina interligada poderá sofrer aceleração ou desaceleração, e consequentemente, modificações do torque elétrico do gerador síncrono, e o equilíbrio poderá ser perdido [11].

A estabilidade de um gerador síncrono depende da existência das duas componentes de torque elétrico: torque sincronizante ΔT_s (componente de torque em fase com a variação do ângulo de carga $\Delta\delta$) e torque de amortecimento ΔT_d (componente de torque em fase com o desvio na velocidade do rotor $\Delta\omega$) [16].

A divisão em torques de sincronização e de amortecimento é mostrada na Figura 3.25.

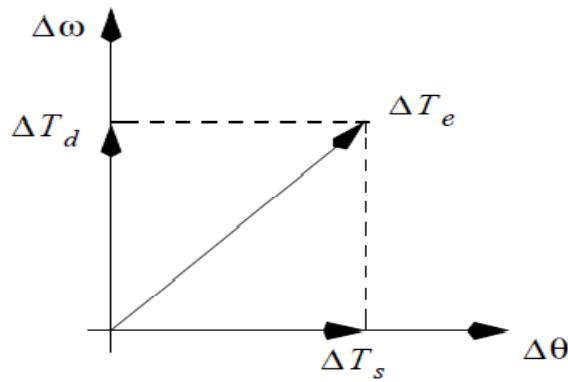


Figura 3.25: Decomposição do torque elétrico em componente de sincronização e de amortecimento

A ausência de torque sincronizante pode levar a perda de sincronismo da máquina com o sistema, e a ausência de torque de amortecimento pode causar problemas de instabilidade oscilatória [10].

Em sistemas muito carregados ou com interligações fracas, podem surgir oscilações pouca amortecidas em regime permanente na faixa de frequência de 0,2 a 2,5 [Hz], limitando a capacidade de transferência de potência [15]. Para o amortecimento dessas oscilações, um Estabilizador do Sistema de Potência (do inglês: *Power System Stabilizer – PSS*) pode ser inserido nos geradores síncronos.

O *PSS* é representado por uma malha de controle adicional inserida na referência de tensão do *AVR*, com a finalidade de fornecer um amortecimento adicional nas oscilações de baixa frequência em máquinas síncronas e no sistema elétrico. Desta forma, o estabilizador deve produzir uma parcela da componente do torque elétrico em fase com os desvios de velocidade do rotor, contribuindo com o amortecimento das oscilações.

O controle adicional estabilizante pode ser utilizado com qualquer tipo de sistema de excitação, dos sistemas rotativos aos estáticos, dos mais lentos aos mais rápidos [18].

Normalmente, o amortecimento adicional promovido pelo estabilizador é requerido em Sistemas Elétricos de Potência que possuem linhas de transmissões longas, para sistemas em condições de transmissão fracas e com

carga pesada, ou ainda em sistemas adequados de transmissão, mas operando em condições de distúrbios como, por exemplo, perda de geração, saída de linhas, e curto-circuito [13].

No entanto, com o advento da Geração Distribuída, os baixos valores das inércias dos geradores de pequeno porte associado aos elevados valores das reatâncias das linhas da rede de distribuição podem influenciar no aparecimento de oscilações pouco amortecidas do ângulo do rotor e das demais variáveis da rede (como tensão e frequência) ao longo do tempo [3]. Além disso, o aumento da quantidade de geradores síncronos conectados nos Sistemas Elétricos de Distribuição podem também prejudicar o amortecimento das variáveis citadas.

Nesse sentido, sugere-se a necessidade do emprego dos estabilizadores ou dos controladores amortecedores que possam melhorar o comportamento dinâmico de geradores síncronos operando nos sistemas de distribuição. Portanto, serão analisados os modelos de estabilizadores, bem como as suas características, para aplicação em redes de distribuição e subtransmissão com a presença de geradores síncronos.

Em [16] foi proposta uma estrutura para o estabilizador do sistema, conforme apresentada na Figura 3.26, constituída por um bloco do tipo *washout* (possui a finalidade de eliminar a ação de controle durante o regime permanente), blocos de avanço-atraso de fase (cuja função é compensar a defasagem angular que acontece entre a entrada do *AVR* e o laço eletromecânico do gerador), e um ganho de realimentação.

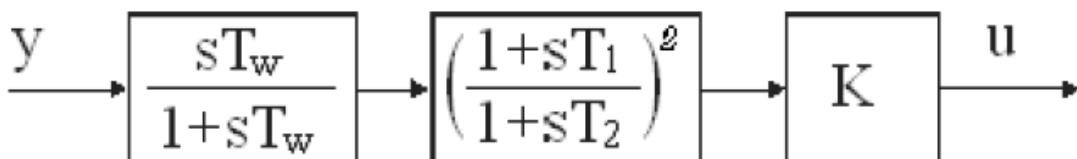


Figura 3.26: Estrutura básica de um estabilizador, retirado da referência [11]

Os principais tipos de estabilizadores são baseados nos sinais de entrada deste controlador: variação da velocidade ($\Delta\omega$), variação da velocidade e potência elétrica (P_e), e frequência (f) [10].

Em [10] também é proposta uma estrutura básica para o estabilizador que utiliza a variação da velocidade do rotor do gerador como sinal de entrada, conforme ilustrado na Figura 3.27. Esse estabilizador também consiste de três blocos: ganho, bloco de tratamento do sinal (*washout*) e um compensador de fase, além de incluir limites máximo e mínimo para o sinal de saída.

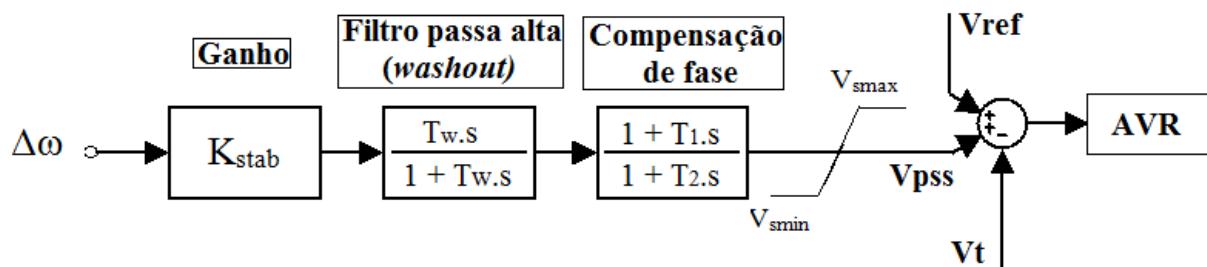


Figura 3.27: Diagrama de blocos representando o modelo do estabilizador (Kundur)

A figura 3.27 apresenta um único bloco de primeira ordem para a compensação de fase. Na prática, dois ou mais blocos de primeira ordem podem ser utilizados para conseguir a compensação desejada. Em alguns casos, são usados blocos de segunda ordem com raízes complexas.

Será feita uma breve descrição da configuração do controlador, ou seja, função de cada bloco que compõe esse controle, e algumas considerações para a seleção dos parâmetros.

O sinal de contribuição $\Delta\omega$, da Figura 3.27, passa primeiro por um filtro passa alta (bloco de tratamento do sinal - *washout*) para assegurar que desvios permanentes de frequência não contribuam com o sinal de entrada. A constante de tempo deste filtro (T_w) define a frequência de oscilação a partir do qual o estabilizador atua. Este parâmetro deve ser grande o suficiente para permitir que os modos de oscilação do rotor sejam detectados e pequeno o suficiente para que

indesejáveis excursões na tensão de campo não sejam causadas durante a operação em rede isolada.

O próximo bloco, que o sinal irá percorrer, é um compensador de avanço-atraso de fase, cuja função é deslocar a fase adequadamente para a frequência de oscilação crítica, de modo a fornecer uma contribuição positiva para o amortecimento. O ganho do estabilizador (K_{STAB}) determina a quantidade desta contribuição.

Nesse sentido, a constante K_{STAB} deve ser ajustada para um valor correspondente àquele necessário para conseguir o amortecimento buscado, uma vez que um valor muito alto para o ganho pode conduzir a efeitos indesejados. Na aplicação do estabilizador, deve-se tomar cuidado em assegurar que a estabilidade geral do sistema seja melhorada, e não apenas a estabilidade a pequenas perturbações.

De acordo com [10], o valor da constante T_w pode variar entre 1 a 20 segundos. Desta forma, $T_w = 1,5$ [s] é suficiente para amortecer o modo local que varia entre 4,4 [rad/s] e 12,6 [rad/s]; e $T_w = 10$ [s] ou maior é desejável para amortecer o modo interárea. A referência [17] cita que o valor típico da constante $T_w = 10$ [s].

Os valores típicos para o ajuste dos limites de saída do PSS fornecidos por [17] são: 0,1 [pu] (limite máximo) e - 0,1 [pu] (limite mínimo).

Já em [10] o limite de saída positiva do estabilizador é fixado em um valor relativamente grande no intervalo de 0,1 a 0,2 [pu]. Isso permite uma maior participação do controlador durante grandes oscilações. Do lado negativo, o limite entre - 0,05 e - 0,1 [pu] é apropriado. Isso permite um alcance de controle suficiente, proporcionando uma resposta satisfatória. Desta forma, evita-se que o estabilizador cause desligamentos inesperados do gerador devido à subtensão ou por atuação da proteção contra a perda de excitação.

3.10 – MODELAGEM COMPUTACIONAL DO ESTABILIZADOR NO *ATPDRAW*

Para a modelagem do estabilizador no *ATPDraw* foi utilizada a mesma estratégia adotada para a implementação dos reguladores de tensão e de velocidade.

Ressalta-se que, como o sinal adicional estabilizante é aplicado na referência de tensão do AVR, a malha de controle do estabilizador foi implementada junto com o diagrama de blocos do regulador de tensão (Figura 3.5).

Com o auxílio da função *DBM* foi criado o módulo para a implementação do estabilizador e do *AVR*. As funções de transferência que representam o regulador de tensão e o estabilizador, obtidas do diagrama de blocos das Figuras 3.5 e 3.26, foram implementadas no software *ATP* através da rotina *TACS*. No ANEXO, item V, apresenta-se o algoritmo utilizado para esta implementação.

A Figura 3.28 mostra o ícone modelado para representar, no *ATPDraw*, o estabilizador. Este controlador apresenta os seguintes nós: um nó de entrada para a velocidade da máquina síncrona (sinal de entrada devido a malha de controle do estabilizador), nós de entrada para as tensões terminais do gerador (fases A, B e C) e um nó de saída para a tensão de excitação da máquina (E_f).

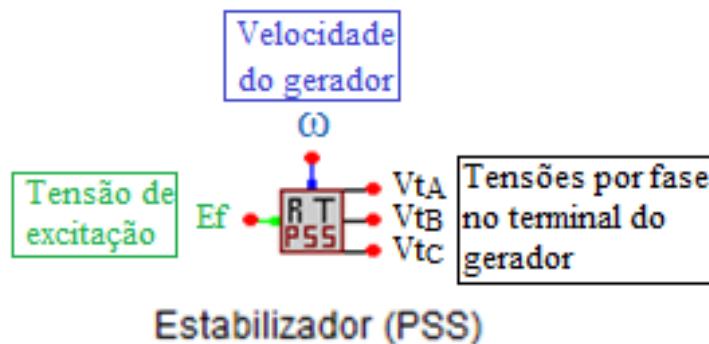


Figura 3.28: Ícone representando o estabilizador (junto com o AVR) no *ATPDraw*

Como já foi abordado, o modelo apresentado pela Figura 3,28, contempla o estabilizador mais o *AVR*. Desta forma, os dados de entrada que devem ser especificados pelo usuário, além das variáveis já mencionadas do regulador de tensão, são: ganho do estabilizador (K_{stab}) em pu, constante de tempo do bloco de tratamento do sinal (*washout*) ou filtro passa alta (T_w) e constantes de tempo do compensador de avanço/atraso de fase (T_1 e T_2) em segundos.

A verificação da atuação do estabilizador será feita no Capítulo 5, quando um sistema mais completo for simulado.

3.11 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentadas, neste capítulo, as funções dos reguladores de velocidade e de tensão; e do controle adicional estabilizante, bem como suas principais funções e o mecanismo de atuação de cada controle.

O regulador automático de tensão controla a saída da excitatriz de forma que a corrente fornecida por ela e a potência reativa do gerador se modifiquem de forma desejada, para manter a tensão terminal da máquina constante.

Através da simulação realizada na seção 3.8, constatou-se a operação do controle efetuado pelo regulador de tensão. Foi possível comprovar que este sistema de controle da excitação atuou de forma adequada e é extremamente necessário para uma melhor resposta do sistema elétrico.

A atuação do regulador de velocidade permite uma velocidade constante (velocidade síncrona) durante a operação em regime permanente de uma máquina síncrona. No regime transitório, este atua com o intuito de diminuir as variações de velocidade e de frequência, contribuindo com a estabilidade de um sistema elétrico.

Na simulação realizada, do sistema da Figura 3.14, verificou-se a influência do ajuste do “estatismo” ou “queda de velocidade” (R) na distribuição das potências entre geradores que operam em paralelo. Comprovou-se que a

distribuição total de carga entre as máquinas depende das características “de queda de velocidade” dos reguladores. Sendo assim, a máquina com inclinação mais acentuada assumiu a menor parte da carga total.

Nesta mesma simulação, investigou-se o desempenho dos reguladores de velocidade. Observou-se que estes atuaram de forma adequada, no sentido de aumentar a velocidade das máquinas, contribuindo com a estabilidade do sistema.

Desta forma, ressalta-se a praticidade oferecida ao usuário na utilização dos reguladores (*AVR e GOV*) modelados no *ATPDraw* para fazer ajuste de parâmetros como, por exemplo, a “queda de velocidade” (R), para definir uma condição de operação desejada. Diante disso, as modelagens desenvolvidas podem aprimorar o ensino e a aprendizagem dos estudantes e pesquisadores na área de máquinas síncronas, por meio de simulações computacionais no software *ATPDraw*.

Foi também explanada a necessidade do emprego dos sinais adicionais estabilizantes que possam melhorar o comportamento dinâmico de geradores síncronos operando nos sistemas de distribuição. Sob esse aspecto, foram analisados os modelos de estabilizadores, bem como as suas características, para aplicação em redes de distribuição e subtransmissão com a presença de geradores síncronos. O estabilizador analisado é representado por uma malha de controle adicional inserida na referência de tensão do *AVR*.

Espera-se que com a inclusão do estabilizador, este possa atuar e fornecer um amortecimento adicional as oscilações de baixa frequência das variáveis elétricas e mecânicas das máquinas síncronas e no sistema elétrico.

Portanto, uma das contribuições importantes deste capítulo foi implementar no *ATPDraw* e validar os modelos desenvolvidos dos componentes de controle essenciais ao estudo da geração distribuída (PI) de fácil utilização pelo usuário. Incluindo aqui a possibilidade de fazer ajustes nos parâmetros de controle para adequar e atender as exigências regulamentares. Sendo assim, no

próximo Capítulo, serão apresentados alguns procedimentos adotados para encontrar os valores mais adequados, dentro de uma faixa típica, para alguns parâmetros dos reguladores (*AVR e GOV*) da máquina síncrona.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE TENSÃO E DE VELOCIDADE NO DESEMPENHO DE UM GERADOR SÍNCRONO

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Alguns estudos de estabilidade e dinâmica dos sistemas elétricos estão sendo realizados, considerando, os valores típicos de projetos para os parâmetros das máquinas síncronas e de seus sistemas de controle (*AVR* e *GOV*). Esses parâmetros escolhidos são fornecidos para vários tamanhos de máquinas, com turbinas a vapor e hidráulica, e, além disso, são obtidos a partir de propostas dos fabricantes. Sendo assim, estes, em muitos casos, são as únicas informações conhecidas do gerador e de seus controles. Nesse sentido, muitas vezes é necessário para o engenheiro estimar ou calcular informações que faltam.

No entanto, é importante ressaltar que um bom projeto de reguladores de tensão e de velocidade, associado aos ajustes adequados de seus controles, são fatores imprescindíveis para um sistema atingir a estabilidade.

Tendo em vista tal propósito, este capítulo tem o objetivo de apresentar alguns procedimentos e técnicas adotadas para a análise de um sistema de

controle da excitação e de um regulador de velocidade, que permitam discutir os parâmetros empregados para ajustá-los, de acordo com a representação destes controles na forma de diagramas de blocos, verificando seus efeitos sobre o desempenho de um gerador síncrono.

De acordo com [19], as características desejadas de um sistema de controle podem ser analisadas e prescritas, a partir das especificações de desempenho no domínio do tempo. Estas especificações permitem verificar o comportamento de um sistema de controle no domínio do tempo, ou seja, descrever a resposta transitória de um sistema, devido a uma perturbação, a partir da sua função de transferência. Geralmente, os principais parâmetros utilizados para tal finalidade são: ultrapassagem (*overshoot*), tempo de crescimento (*rise time*) e tempo de assentamento (*settling time*). Estas características serão detalhadas na próxima seção (4.2).

Desta forma, deseja-se neste capítulo, encontrar os valores mais adequados, dentro de uma faixa típica, para os parâmetros dos controles da máquina síncrona de um Sistema Elétrico simulado, a partir das especificações no domínio do tempo.

4.2 – ESPECIFICAÇÕES DE DESEMPENHOS PARA UM SISTEMA DE CONTROLE

O projeto de um sistema de controle tem a finalidade de satisfazer as especificações de desempenho. Essas especificações são as limitações realizadas sobre as funções matemáticas que descrevem as características do sistema. Geralmente, classificam-se as especificações de desempenho em duas formas:

- Especificações no domínio do tempo – quantidades pertinentes expressas como funções do tempo;

- Especificações no domínio da frequência – quantidades pertinentes expressas como funções da frequência.

As características desejadas de um sistema podem ser analisadas e prescritas, seja em uma ou em ambas as formas usadas para especificar o desempenho de um sistema de controle. Elas especificam três propriedades importantes dos sistemas dinâmicos: estabilidade relativa, velocidade de resposta e precisão do sistema ou erro permissível.

Nesta dissertação será utilizada as especificações no domínio do tempo para definir a performance do sistema de controle.

4.2.1 – ESPECIFICAÇÕES NO DOMÍNIO DO TEMPO

As especificações de sistemas de controle, no domínio do tempo, são baseadas na curva da Figura 4.1. Esta curva mostra a resposta a uma mudança em degrau em uma das variáveis do sistema, por exemplo, na tensão terminal de um gerador.

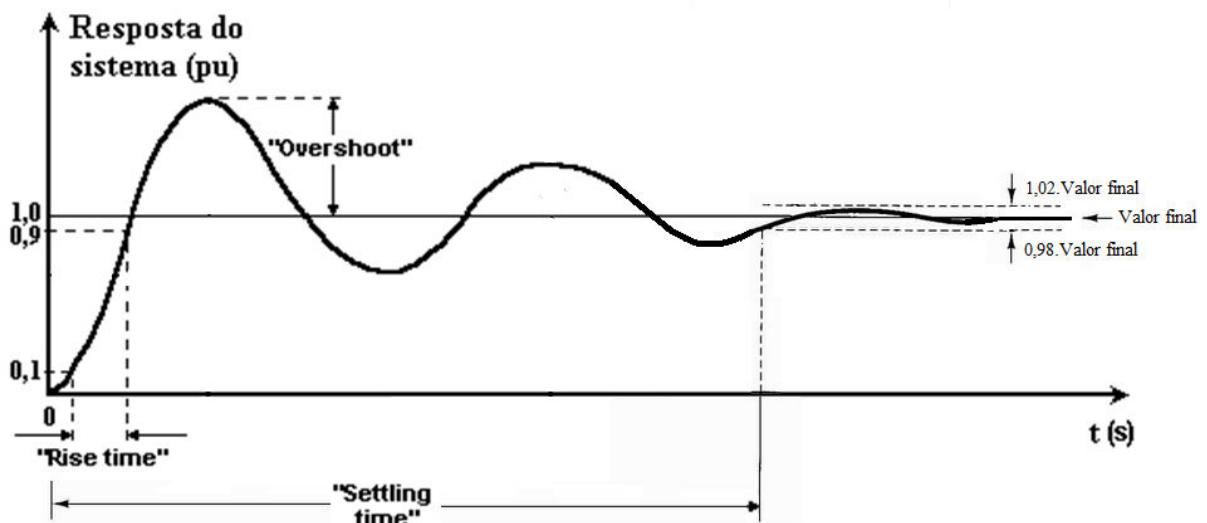


Figura 4.1: Resposta de uma variável do sistema (por exemplo: tensão terminal) a um degrau unitário

Na figura acima (Figura 4.1) estão indicados os principais parâmetros utilizados para especificar o desempenho de um sistema de controle no domínio

do tempo, ou seja, descrever a resposta transitória a um degrau unitário. Estas especificações estão definidas como a seguir [19]:

- 1) Valor da sobre-elevação ou ultrapassagem – do inglês: *overshoot*

É o quanto (quantidade) a resposta transitória, neste caso, a um degrau unitário de entrada, no instante do pico, ultrapassa o valor de estado estacionário, final, expresso como uma percentagem do valor de estado estacionário ou permanente.

- 2) Tempo de crescimento ou de subida – do inglês: *Rise time*

Tempo necessário para que a resposta transitória, a um degrau unitário de entrada, cresça de 10% a 90% do seu valor final ou de sua resposta em regime permanente.

- 3) Tempo de estabelecimento ou de assentamento – do inglês: *Settling time*

Tempo necessário para que as oscilações amortecidas do regime transitório entrem e permaneçam no interior de uma faixa de valores de $\pm 2\%$ em torno do valor de estado estacionário ou final.

As duas últimas especificações, *rise time* e *settling time*, fornecem informação a respeito da velocidade da resposta transitória.

Todas as definições citadas (*overshoot*, *settling time* e *rise time*) são também válidas para sistemas de ordem superior a 2, embora as expressões analíticas desses parâmetros (encontradas em [19]) não possam ser obtidas a menos que a resposta do sistema de ordem mais elevada possa ser aproximada como a de um sistema de segunda ordem. A referência [19] explica e mostra como deve ser feita a aproximação de sistemas com mais de dois polos e com zeros para sistemas de segunda ordem que possuem apenas dois polos dominantes complexos. Nos estudos que serão apresentados neste Capítulo, os sistemas de controle são de quarta ordem, mas a aproximação para sistemas de segunda ordem não será feita e nem comentada nesta dissertação, considerando

que o foco deste trabalho é o estudo do desempenho dinâmico dos geradores síncronos e de seus controles, isto é, na análise da resposta do sistema após um distúrbio.

4.3 – PONDERAÇÕES SOBRE OS ESTUDOS QUE SERÃO FEITOS

As ponderações, comuns às simulações realizadas, serão aqui explicitadas uma única vez para que o texto não se torne repetitivo.

Os procedimentos e técnicas de análises serão realizados para dois tipos de Sistemas Elétricos, quais sejam: Sistema de Distribuição de Energia Elétrica conectado ao gerador do PI, e um Sistema Elétrico de Potência composto por 9 barras e por três geradores com seus respectivos reguladores conectados.

A primeira análise computacional será feita para o sistema elétrico baseado no diagrama unifilar da referência [20], o qual retrata uma rede de distribuição de energia elétrica conectada, na barra 3 (Ponto de Acoplamento Comum - PAC), a um Produtor Independente de energia (PI) através de um disjuntor de interconexão e um transformador de isolamento (representado na Figura 4.2 por T_2) [21]. O sistema elétrico mencionado acima, modelado no software *ATP/ATPDraw*, é mostrado na Figura 4.2, contendo todos os dados dos componentes do sistema.

A Concessionária é representada por uma fonte de tensão infinita (G_1), em série com uma impedância representativa do nível de curto-circuito de 0,65 [Ω]. Esta fonte de tensão está conectada a um transformador, T_1 , através da barra 1, e este está ligado a duas linhas de distribuição de energia (LD_1 e LD_2) de 13,8 kV por meio da barra 2. Nesta barra estão conectados banco trifásico de capacitores (C_1) e três cargas iguais trifásicas (Cargas 1, 2 e 3), potência de cada carga: 4,167 [MVA]. As duas linhas de distribuição terminam na barra 3, sendo esta conectada ao transformador T_2 . Na barra 3, também encontra-se ligados banco trifásico de capacitores (C_2) e três cargas iguais trifásicas (Cargas 4, 5 e 6),

potência de cada carga: 4,167 [MVA]. O transformador T_2 é inserido para realizar a conexão entre a rede de distribuição e o gerador do sistema independente (conectado na barra 4). Nesta barra 4 existe outro transformador (T_3), o qual se conecta a barra 5, onde encontra-se a carga do PI.

O Sistema de distribuição possui uma carga total de 25 [MVA], sendo que, destes, o gerador independente contribui com a geração de 1 [MVA]. Além desta carga de 1 [MVA], o gerador ainda supre a demanda interna do sistema independente (carga PI), que é da ordem de 2,5 [MVA].

Destaca-se que o gerador do PI é representado pelo novo ícone da máquina síncrona desenvolvido no Capítulo 2, associado aos modelos de reguladores de tensão e de velocidade implementados no Capítulo 3.

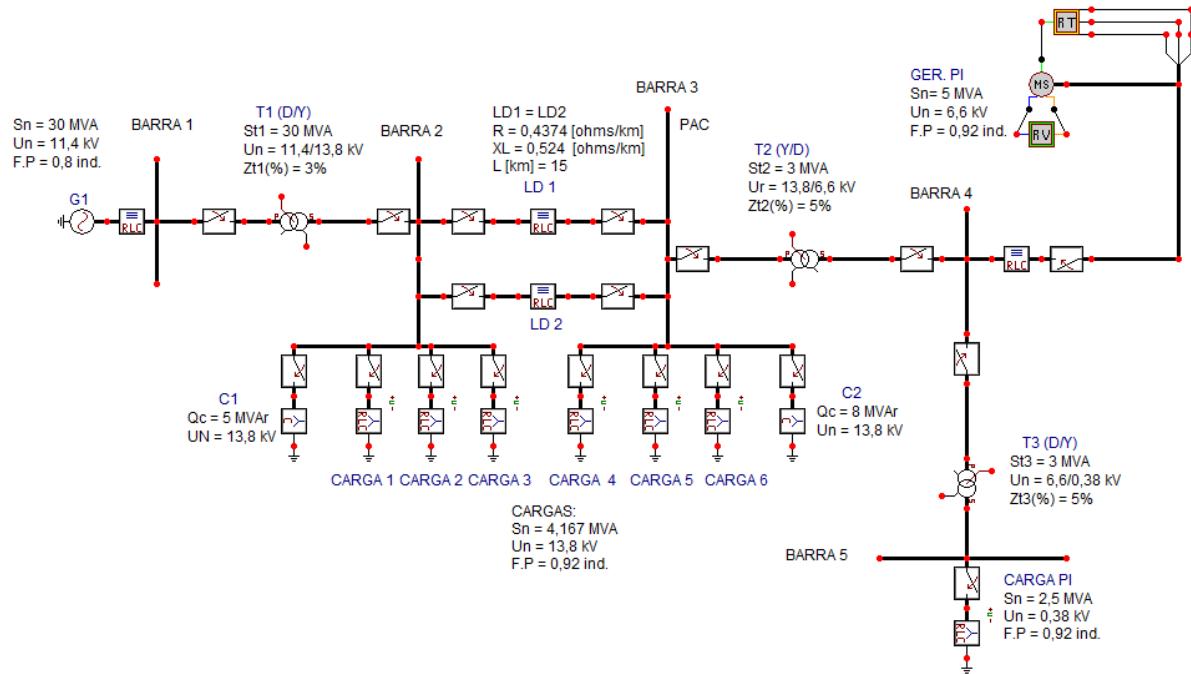


Figura 4.2: Sistema de distribuição conectado ao gerador do Produtor Independente de energia (PI) simulado no ATPDraw

Na Tabela 4.1 são apresentadas as potências ativas e reativas geradas pela concessionária (G_1 – barramento infinito) e pelo gerador do Produtor Independente (G_{PI}).

Tabela 4.1: Potências ativas e reativas geradas pelo sistema

Fonte	P _G [MW]	Q _G [MVAr]
G ₁	24,44	0,501
G _{PI}	3,525	1,454

Na Tabela 4.2 são mostrados os dados e parâmetros da máquina síncrona do PI.

Tabela 4.2: Dados e parâmetros de entrada da máquina síncrona do PI

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
S _n (MVA)	5	x'' _q (pu)	0,17
U _n (kV)	6,6	x ₀ (pu)	0,046
freq (Hz)	60	T' d ₀ (s)	1,754
R _a (pu)	0,004	T' q ₀ (s)	0,0
x _L (pu)	0,1	T'' d ₀ (s)	0,019
x _d (pu)	1,8	T'' q ₀ (s)	0,164
x _q (pu)	1,793	H (s)	2,0
x' _d (pu)	0,166	P (polos)	4,0
x' _q (pu)	0,98	ω _S (rad/s)	188,5
x'' _d (pu)	0,119		

A segunda análise será realizada para um Sistema Elétrico de Potência obtido da referência [9] e modelado no *ATPDraw*, como mostrado na Figura 4.3, contendo 3 geradores síncronos associados aos seus controles (G₁, G₂ e G₃), 9 barras, 9 linhas de transmissão e 3 transformadores. Esse sistema foi escolhido porque além de ser uma rede didática, o estudo apresentado pode ser aplicado às redes reais fornecendo resultados condizentes.

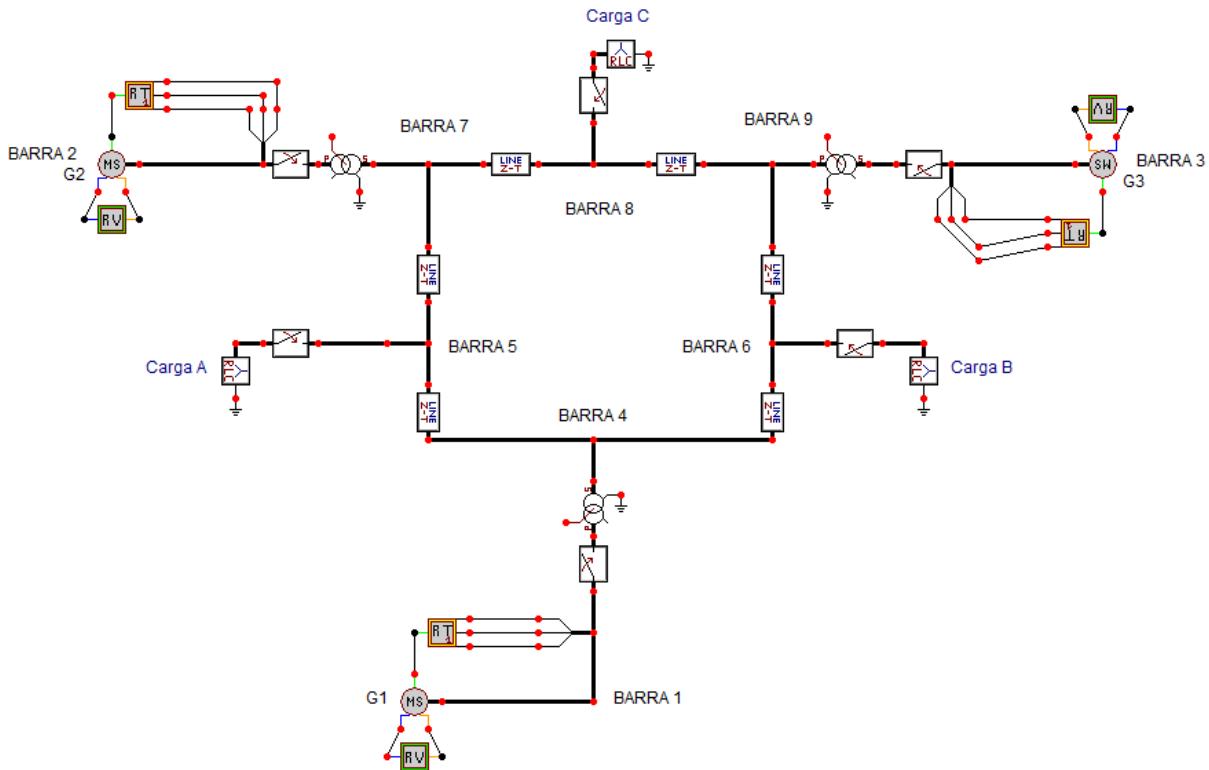


Figura 4.3: Sistema Elétrico de Potência de 9 barras simulado no ATPDraw

Na Tabela 4.3 são mostrados os dados e parâmetros dos geradores síncronos (G_1 , G_2 e G_3), retirados da referência [9].

Tabela 4.3: Dados e parâmetros de entrada das máquinas síncronas

Parâmetros	Gerador 1	Gerador 2	Gerador 3
S_n (MVA)	247,5	192,0	128,0
U_n (kV)	16,5	18,0	13,8
freq (Hz)	60	60	60
R_a (pu)	0	0	0
x_L (pu)	0,0336	0,0521	0,0742
x_d (pu)	0,1460	0,8958	1,3125
x_q (pu)	0,0969	0,8645	1,2578
x'_d (pu)	0,0608	0,1198	0,1813
x'_q (pu)	0,0969	0,1969	0,25
x''_d (pu)	0	0	0
x''_q (pu)	0	0	0
x_0 (pu)	0,046	0,046	0,046
T'_{d0} (s)	8,960	6	5,89
T'_{q0} (s)	0,0	0,535	0,6
T''_{d0} (s)	0,0	0	0
T''_{q0} (s)	0,0	0	0
H (s)	9,55	3,33	2,35
P (polos)	40	2,0	2,0
ω_S (rad/s)	18,85	377	377

Em seguida são apresentados na Tabela 4.4 os dados das linhas de transmissão e dos transformadores. Tais dados foram manipulados através de equações para que seus parâmetros ficassem em formatos compatíveis com os adotados no *ATPDraw*.

Destacam-se os tipos escolhidos para estes componentes, a saber: as linhas de transmissão são do tipo *LINEZT_3* que possuem como característica os parâmetros distribuídos, modelo de Clarke e são transpostas; os transformadores são do tipo *SatTrafo*, cuja característica principal é a possibilidade da inserção da curva de saturação; e, finalmente, as cargas são do tipo *RLCY3*, isto é, resistência, indutância e capacitância trifásicas ligadas em estrela.

Tabela 4.4: Dados dos transformadores e linhas de transmissão

Barra inicial	Barra final	Resistência série (pu)	Reatância série (pu)	Susceptância shunt (pu) (B/2)
1	4	0,0	0,0576	-
2	7	0,0	0,0625	-
3	9	0,0	0,0586	-
4	5	0,01	0,085	0,088
4	6	0,017	0,092	0,079
5	7	0,032	0,161	0,153
6	9	0,039	0,170	0,179
7	8	0,0085	0,072	0,0745
8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Finalmente os valores de potências consumidas pelas cargas, assim como os valores das potências geradas pelas máquinas síncronas, são mostrados na Tabela 4.5. Além disto, são também fornecidos os módulos e ângulos das tensões em todas as barras os quais correspondem a uma condição de regime permanente do sistema elétrico em questão.

Tabela 4.5: Dados de barra (potências e tensões)

Barra	Potência Gerada		Potência consumida		Módulo da tensão (pu)	Ângulo da tensão (º)
	Ativa (MW)	Reativa (MVAr)	Ativa (MW)	Reativa (MVAr)		
1	71,6	27,0	0,0		1,040	0,0
2	163,0	6,7	0,0		1,025	9,3
3	85,0	-10,9	0,0		1,025	4,7
4					1,026	-2,2
5			125,0	50,0	0,996	-4,0
6			90,0	30,0	1,013	-3,7
7					1,026	3,7
8			100,0	35,0	1,016	0,7
9					1,032	2,0

Constatou-se, por parte do autor desta dissertação, que a variação dos parâmetros K_a e K_f do *AVR* e T_4 do *GOV* interferiam de forma significativa na resposta do sistema. Diante disso, neste Capítulo, investigam-se as influências destes parâmetros, sugerindo os valores mais adequados a serem adotados para os mesmos, considerando que estes podem ser diferentes para cada gerador síncrono dependendo da configuração do sistema elétrico, multimáquinas ou sistema de distribuição com geração distribuída; e da característica do gerador.

Portanto, dois tipos de estudos serão feitos para cada sistema elétrico apresentado, a saber:

- Ajuste dos parâmetros K_a (ganho do regulador) e K_f (ganho da malha de estabilização) do diagrama de blocos do regulador de tensão do gerador, representado novamente na Figura 4.4;

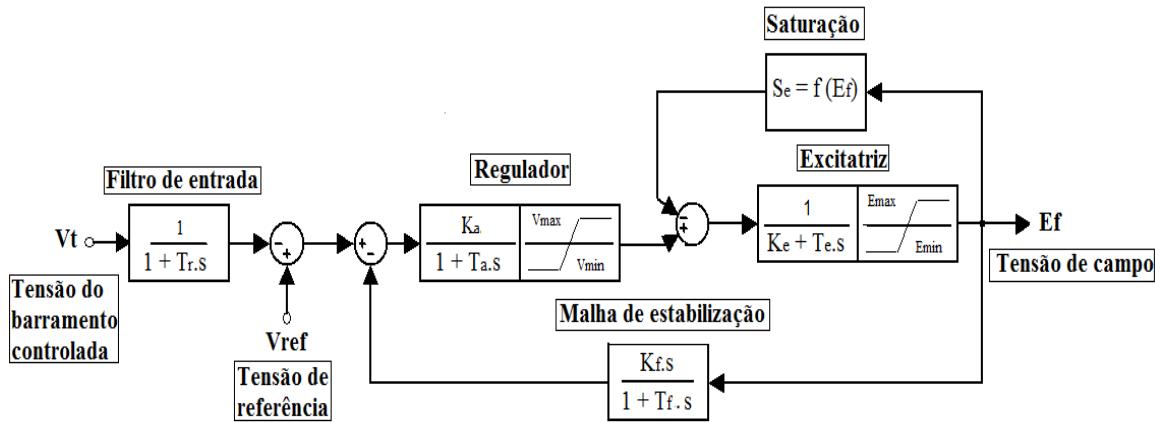


Figura 4.4: Modelo de regulador de tensão: Tipo I do IEEE

- Ajuste da constante de tempo T_4 do diagrama de blocos do regulador de velocidade da máquina mostrado novamente na Figura 4.5.

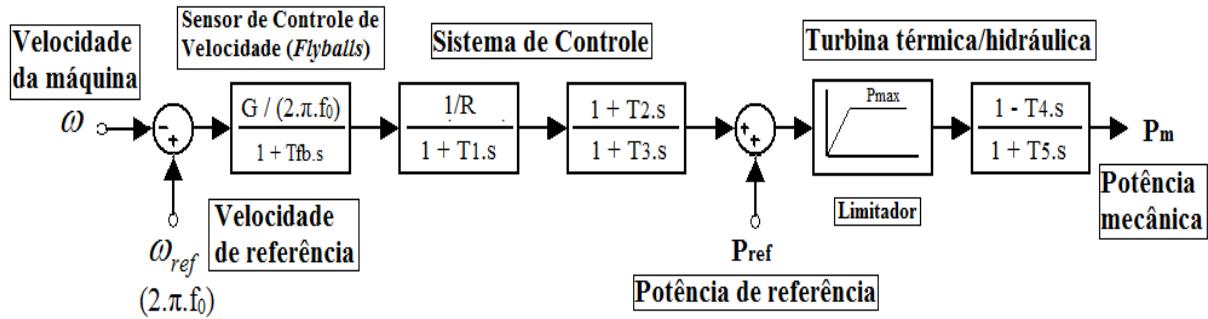


Figura 4.5: Diagrama de blocos representando um modelo simples de um regulador de velocidade

As análises serão feitas com o intuito de obter o valor mais adequado para os parâmetros mencionados, ou seja, ajustá-los de maneira eficiente para que a resposta do sistema seja mais rápida e amortecida.

Os estudos aqui realizados obedecem à seguinte sequência.

Simulações computacionais serão feitas, inicialmente, no *software Matlab*, pois este apresenta uma resposta mais apropriada para analisar os três principais parâmetros usados para especificar o desempenho de um sistema de controle no domínio do tempo, sendo eles: *settling time* (Tempo de estabelecimento ou de assentamento), *overshoot* (Sobre-elevação ou ultrapassagem) e *rise time* (Tempo de crescimento ou de subida) [19].

No software Matlab será modelado o diagrama de blocos do sistema de controle de excitação, Figura 4.4, associado ao gerador síncrono desprezando a saturação e os limites (não linearidades). A máquina e o amortecimento do sistema serão representados pela função de transferência, $\frac{1}{D + 2Hs}$, sendo H a constante de inércia do gerador e D o amortecimento do sistema, como pode ser visto na Figura 4.6.

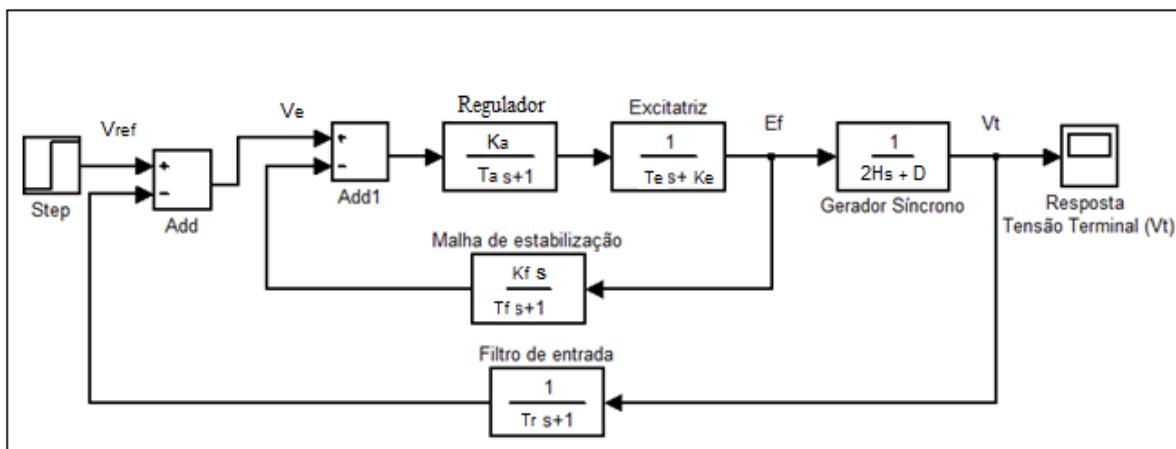


Figura 4.6: Esquema geral do Sistema de Controle da Excitação, modelado no Matlab/Simulink

O esquema apresentado na Figura 4.6 foi adotado com o intuito de verificar a influência dos parâmetros (K_a e K_f) do AVR no comportamento da tensão terminal da máquina, após uma perturbação.

Os valores de H são dados em MW.s/MVA ou segundos, e são definidos na construção da unidade geradora, e portanto, estes serão adotados de acordo com o tipo de unidade geradora modelada.

Desta forma, as análises serão feitas, inicialmente, para cada gerador, individualmente, dos dois sistemas elétricos analisados, Figuras 4.2 e 4.3, considerando que a inércia de cada máquina é diferente.

Portanto, serão feitas quatro análises para o sistema de controle da excitação, considerando que o gerador do PI, Figura 4.2, possui uma constante de inércia (H) igual a 2 [s]; e os outros três geradores do sistema elétrico de

potência, Figura 4.3, apresentam os seguintes valores para as suas constantes de inércia: $H_{G1} = 9,55$ [s], $H_{G2} = 3,33$ [s] e $H_{G3} = 2,35$ [s].

Para cada análise do sistema de controle da excitação, serão investigados dois casos. No primeiro caso (Caso 1), K_f será mantido constante enquanto que K_a é variado entre uma faixa de valores. Já no segundo caso (Caso 2), K_a é mantido constante em seu valor adotado no caso 1 enquanto que K_f é variado entre uma faixa de valores. Analisando o Apêndice D da referência [9], foi possível determinar essa faixa de valores típicos para estes parâmetros.

As respostas serão obtidas usando o *Simulink*, um pacote de *software* de simulação integrado ao *Matlab* para fornecer uma interface gráfica de usuário (GUI).

Após obter os resultados das simulações computacionais, deve-se analisar o comportamento da tensão terminal da máquina, após uma perturbação, e a partir da análise dos parâmetros: *settling time*, *overshoot* e *rise time*, encontrar os valores mais adequados para os ganhos K_a e K_f do *AVR* para cada gerador individualmente.

Depois disso, será verificado se estes ajustes estão adequados quando as máquinas estão conectadas ao sistema elétrico.

Desta forma, será utilizado o *software ATPDraw* para a simulação do gerador do PI conectado ao sistema elétrico de distribuição, Figura 4.2, e os geradores (G_1 , G_2 e G_3) conectados ao sistema elétrico de potência, Figura 4.3. Será verificado se as tensões terminais das máquinas apresentam um bom desempenho após uma perturbação com os valores dos parâmetros do *AVR* ajustados.

Os estudos realizados para o Sistema de Controle de Velocidade seguem a mesma linha de desenvolvimento do Sistema de Controle de Excitação. Porém, no *software Matlab* será modelado o diagrama de blocos do sistema de controle de velocidade da Figura 4.5, associado ao gerador síncrono, desprezando a saturação e os limites (não linearidades). A configuração desenvolvida no

Matlab, mostrada na Figura 4.7, foi realizada com o intuito de verificar a influência do parâmetro T_4 do regulador (*GOV*) no comportamento da velocidade da máquina síncrona.

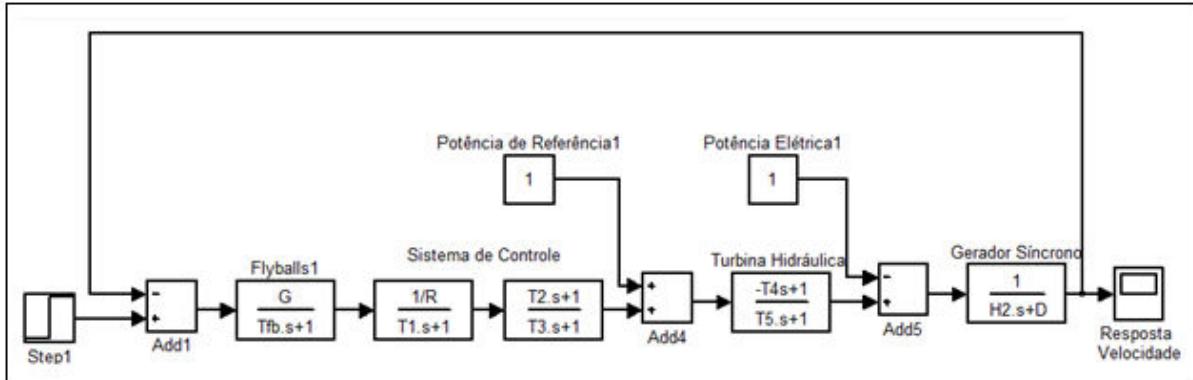


Figura 4.7: Esquema do Sistema de Controle da Velocidade, modelado no Matlab/Simulink

Considerando que apenas o gerador conectado a barra 1 do Sistema Elétrico mostrado na Figura 4.3 está associado a uma turbina hidráulica, com o valor de $T_4 \neq 0$, este estudo será feito apenas para este gerador. Sendo assim, será utilizada a solução computacional *Matlab/Simulink* para obter o “melhor” resultado para T_4 .

O critério de escolha dos parâmetros para o ajuste baseou-se nas experiências de tentativa e erro dos usuários, que variavam, aleatoriamente, alguns valores dos parâmetros do *AVR* e *GOV*, com o intuito de melhorar a resposta das variáveis elétricas do sistema após uma perturbação. Constatou-se, por parte do autor desta dissertação, que a variação dos parâmetros K_a e K_f do *AVR* e T_4 do *GOV* interferiam de forma significativa na resposta do sistema. Por isso, estes foram os parâmetros escolhidos para os estudos realizados neste trabalho.

4.4 – SISTEMA DE CONTROLE DA EXCITAÇÃO: INFLUÊNCIA DOS GANHOS K_a E K_f NA RESPOSTA DO SISTEMA

Apresentam-se nesta seção, alguns dos procedimentos utilizados para verificar a estabilidade de um Sistema de Controle da Excitação.

Os valores adotados para os parâmetros do *AVR* foram retirados da referência [9].

Na tabela 4.6 são apresentados os valores utilizados para os parâmetros do diagrama de blocos da Figura 4.6.

Tabela 4.6: Parâmetros utilizados para as constantes do diagrama de blocos da Figura 4.6

- K_a = valor a ser ajustado	- T_r = 0,001 [s]
- T_a = 0,02 [s]	- D = 1 [pu]
- K_e = 1,0 [pu]	- H_{PI} = 2 [s]
- T_e = 0,8 [s]	- H_{G1} = 9,55 [s]
- K_f = valor a ser ajustado	- H_{G2} = 3,33 [s]
- T_f = 1,0 [s]	- H_{G3} = 2,35 [s]

Onde:

K_a = Ganho do regulador (pu),

K_e = Constante de excitação relacionada com a autoexcitação do campo (pu),

K_f = Ganho da malha de estabilização do regulador (pu),

T_a = Constante de tempo do regulador (s),

T_r = Constante de tempo do filtro de entrada do regulador (s),

T_e = Constante de tempo da excitatriz (s),

T_f = Constante de tempo da malha de estabilização do regulador (s),

D = Amortecimento do sistema.

Os estudos serão feitos com o intuito de mostrar a influência dos ganhos K_a e K_f do *AVR* na resposta do Sistema Elétrico simulado. Sendo assim, será utilizada a solução computacional *Matlab/Simulink* para obter os “melhores” valores para K_a e K_f a fim de minimizar o “rise time” e “settling time” com o

mínimo “overshoot”. Ressalta-se que, nas análises realizadas, em situações onde não for possível encontrar valores para os ganhos que forneçam todas as minimizações requeridas, ao mesmo tempo, será priorizado o menor tempo de assentamento.

4.4.1 – ANÁLISE COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE CONTROLE DA EXCITAÇÃO PARA O GERADOR SÍNCRONO DE UM PRODUTOR INDEPENDENTE CONECTADO AO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO

Conforme mencionado anteriormente, as simulações iniciais serão feitas para cada gerador individualmente, e nesta seção, será analisado o diagrama de blocos mostrado na Figura 4.6, empregado para representar o modelo do *AVR* associado ao gerador síncrono do PI do sistema elétrico mostrado na Figura 4.2, contemplando os valores das constantes utilizadas.

Para este caso estudado, o valor de H (constante de inércia) é 2 s.

Foi feito uma variação de V_{ref} (tensão de referência) de 0 a 1 [pu] (entrada degrau unitária) no diagrama de blocos apresentado na Figura 4.6, para analisar a influência dos parâmetros K_a e K_f na resposta, no tempo, da amplitude (magnitude) da tensão terminal V_t .

Serão feitas duas análises para a Figura 4.6. No primeiro caso (Caso 1), K_f é mantido constante em 0,03 [pu] enquanto que K_a é variado nos seguintes valores: 40, 100, 200, 250, 300 e 400 [pu]. Já no segundo caso (Caso 2), K_a é mantido constante em seu valor adotado no caso 1 enquanto que K_f é variado nos seguintes valores: 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,08 e 0,10 [pu].

A) CASO 1: RESULTADO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO PARA K_F CONSTANTE E K_A

VARIANDO

As respostas no tempo de V_t para a variação de K_a , são mostradas na Figura 4.8, através do programa *Matlab*. Observa-se que variando o ganho K_a , para valores abaixo de 200 [pu], a resposta do sistema é mais oscilatória e demora mais para atingir o regime permanente. Já para K_a maior e igual a 200 [pu], a resposta é mais amortecida e atinge mais rápido o regime permanente.

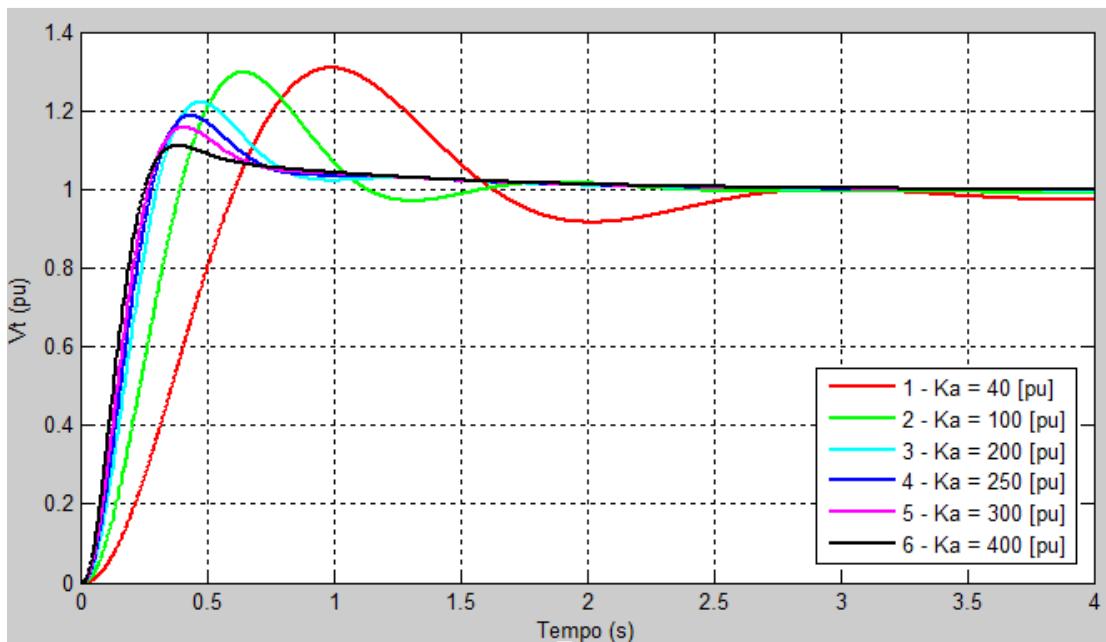


Figura 4.8: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t) para a variação de K_a , usando o Matlab

Os valores encontrados para a simulação computacional da Figura 4.8, são apresentados na Tabela 4.7. Sendo assim, analisando esta tabela, os valores para K_a acima e igual a 200 [pu], proporcionam uma resposta com um *settling time* e *rise time* mais reduzido e um *overshoot* menor. Desta forma, para este sistema em particular, o valor do ganho K_a mais adequado a ser adotado é acima de 200 [pu].

Tabela 4.7: Resultados obtidos da Figura 4.8

Caso	K_f (pu)	K_a (pu)	Settling time (s)	Overshoot (%)	Rise Time (10 a 90%)
1	0,03	40	3,20	34,0	0, 391
2	0,03	100	2,11	31,0	0, 254
3	0,03	200	1,72	22,7	0, 193
4	0,03	250	1,72	19,2	0, 179
5	0,03	300	1,72	16,1	0, 170
6	0,03	400	1,70	11,4	0, 158

Observa-se também, pela Tabela 4.7, que os valores para K_a acima de 200 pu apresentam o mesmo tempo de assentamento (*settling time*). Desta forma, com o intuito de escolher o valor mais adequado para o parâmetro K_a , será feita a simulação do Sistema Elétrico da Figura 4.2, através do software *ATPDraw*, contemplando o *AVR* analisado e as variações do ganho K_a , para verificar o comportamento da tensão terminal (V_t) da máquina síncrona do PI, após duas perturbações: rejeição da carga 4 ligada a barra 3 e inserção de uma nova carga no sistema. Os resultados das simulações e as análises das respostas no tempo da tensão terminal para a variação de K_a em 200, 250, 300 e 400 [pu], são mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10.

Na Figura 4.9, após a rejeição de carga no instante $t = 3$ [s], percebe-se que o comportamento da tensão e o valor de pico atingido por esta, para cada valor de ganho simulado, são aproximadamente iguais. Sendo assim, a variação de K_a (de 200 a 400 [pu]), pouco altera a resposta do sistema perante uma perturbação.

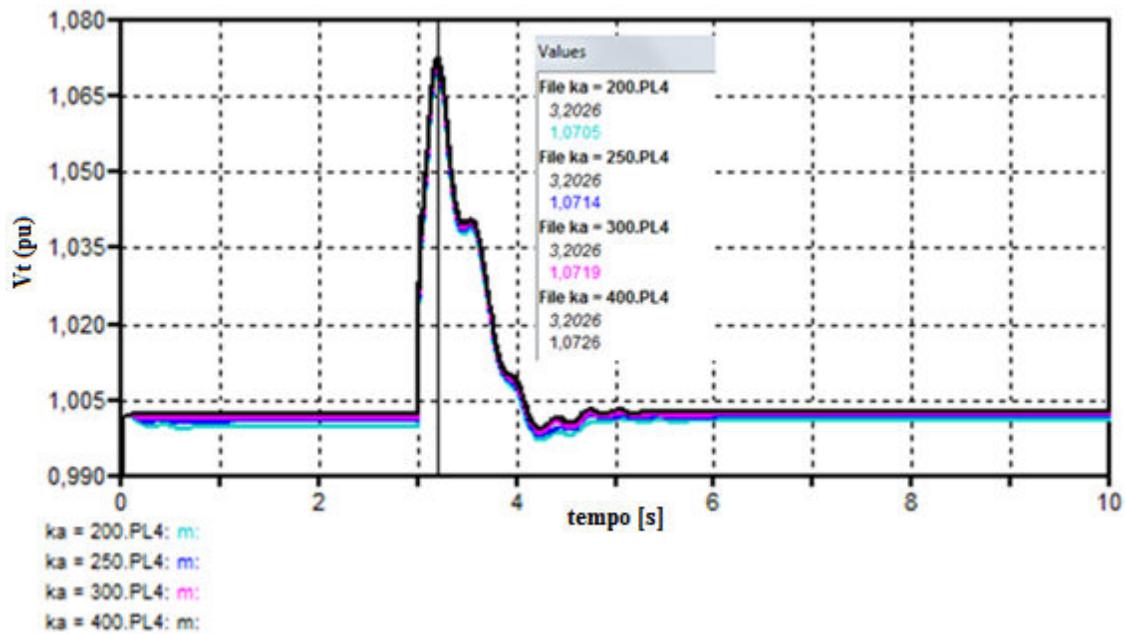


Figura 4.9: Comportamento da tensão terminal (V_t), para a variação de K_a , após rejeição da carga 4 ligada a barra 3, usando o ATPDraw

Depois, foi verificado o comportamento do sistema após outro tipo de perturbação: inserção de uma nova carga no instante $t = 3[s]$.

Na Figura 4.10, observa-se que, da mesma forma como apresentado na Figura 4.9, a variação do parâmetro K_a não modificou significativamente a resposta do sistema. Pois, mesmo com a variação do ganho, o comportamento da tensão, após a inserção de carga, foi praticamente o mesmo para todos os casos simulados.

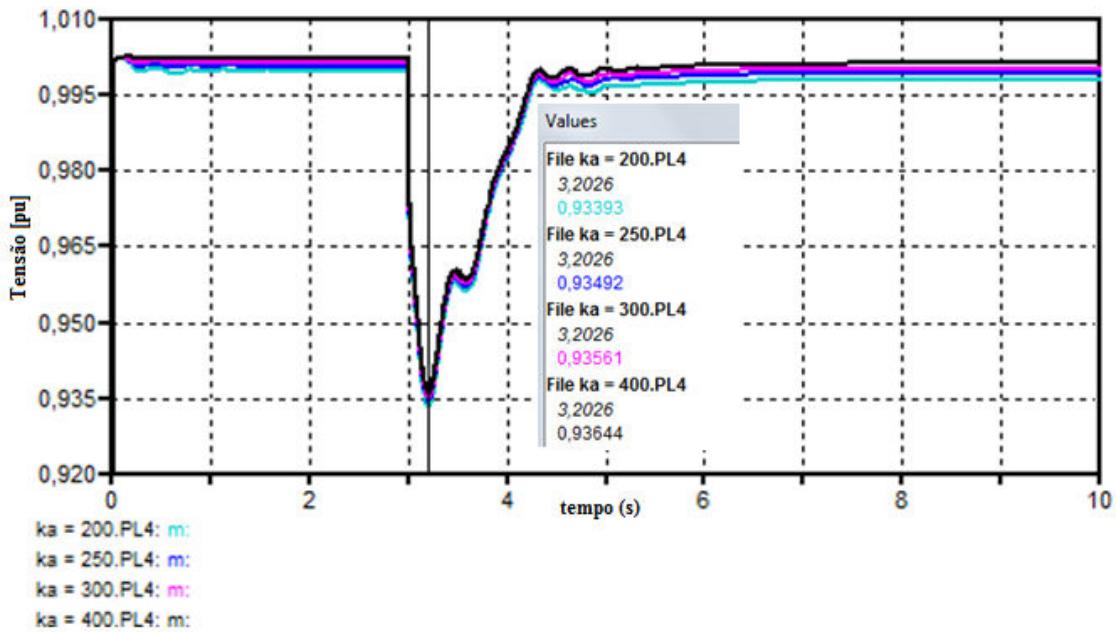


Figura 4.10: Comportamento da tensão terminal (V_t), para a variação de K_a , após inserção de uma nova carga no sistema, usando o ATPDraw

Portanto, para as simulações e análises de resultados do Sistema Elétrico apresentado foi adotado o valor de 400 [pu] para o ganho, já que a resposta dos mesmos é praticamente a mesma, e este apresenta um tempo de assentamento ligeiramente menor, observado na Tabela 4.7.

B) CASO 2: RESULTADO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO PARA K_a CONSTANTE E K_f

VARIANDO

Na Figura 4.11 são mostradas as respostas no tempo de V_t para a variação de K_f , mantendo K_a constante e igual a 400 [pu]. Nota-se que variando o ganho K_f , para valores abaixo e igual a 0,03 [pu], o comportamento da tensão, inicialmente, é de natureza oscilatório, sendo amortecido até alcançar um novo ponto de operação para o sistema. Já para K_f maior e igual a 0,05 [pu], a resposta é menos oscilatória, porém, demora mais para atingir o regime permanente.

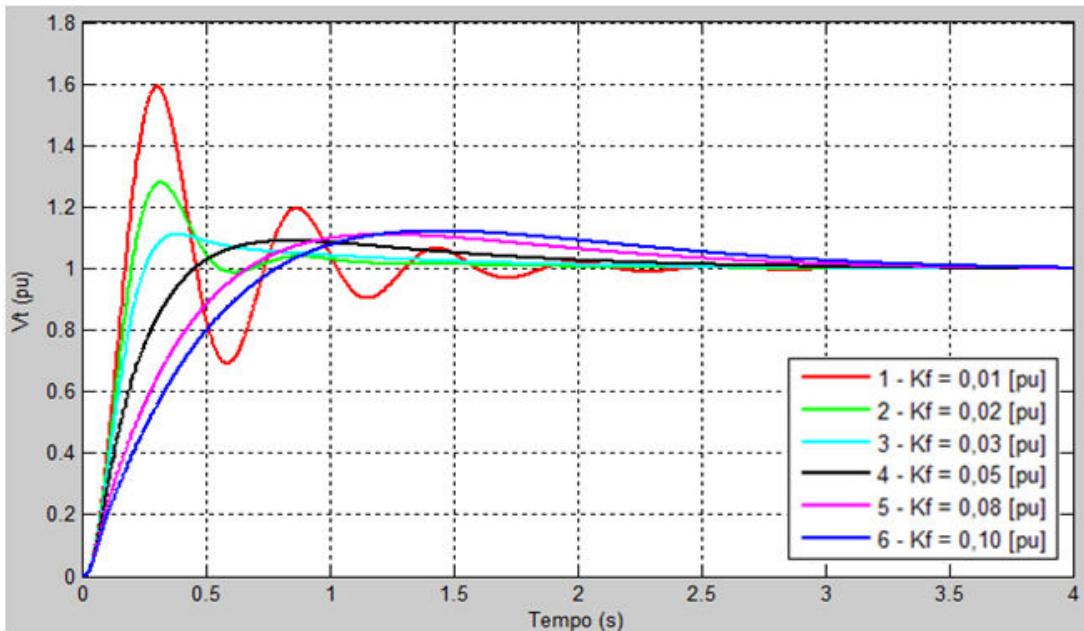


Figura 4.11: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t) para a variação de K_f usando o Matlab

Os valores encontrados para a simulação computacional da Figura 4.11 são apresentados na Tabela 4.8. Analisando esta tabela, e considerando que o sistema simulado deve ser sincronizado para otimizar a saída V_t , respondendo com um pequeno *overshoot* e bom amortecimento, o valor para K_f de 0,02 [pu], parece fornecer um tempo de assentamento (*settling time*) mais reduzido com um tempo de crescimento (*rise time*) menor.

Tabela 4.8: Resultados obtidos da Figura 4.11

Caso	K_f (pu)	K_a (pu)	Settling time (s)	Overshoot (%)	Rise Time (10 a 90%)
1	0,01	400	2,05	59,5	0,107
2	0,02	400	1,16	28,4	0,126
3	0,03	400	1,72	11,4	0,158
4	0,05	400	2,32	9,21	0,285
5	0,08	400	2,91	11,3	0,455
6	0,10	400	3,22	12,4	0,552

Com o intuito de escolher o valor mais adequado para o parâmetro K_f e verificar se para valores deste ganho maiores que 0,05 pu, a resposta do sistema é menos oscilatória e demora mais para atingir o regime permanente, será feita a simulação do gerador analisado conectado ao Sistema Elétrico mostrado na Figura 4.2. Inicialmente, o sistema elétrico opera na condição de regime

permanente e, no instante $t = 3$ [s], é então simulada a rejeição ou desligamento da carga 4, conectada na barra de número 3.

Na Figura 4.12, percebe-se que os valores de pico atingidos pelas tensões, para cada valor de ganho simulado, são aproximadamente iguais. Observa-se que para K_f maior que 0,05 [pu] o sistema é menos oscilatório, porém, a resposta demora mais para atingir o regime permanente. O comportamento da tensão para $K_f = 0,02$ [pu] apresenta um tempo de assentamento mais reduzido, mas, a resposta é mais oscilatória. Sendo assim, foi sugerido o valor de 0,03 [pu], para o ganho K_f do regulador do gerador do PI, pois este permite uma resposta menos oscilatória, com um tempo de assentamento pequeno.

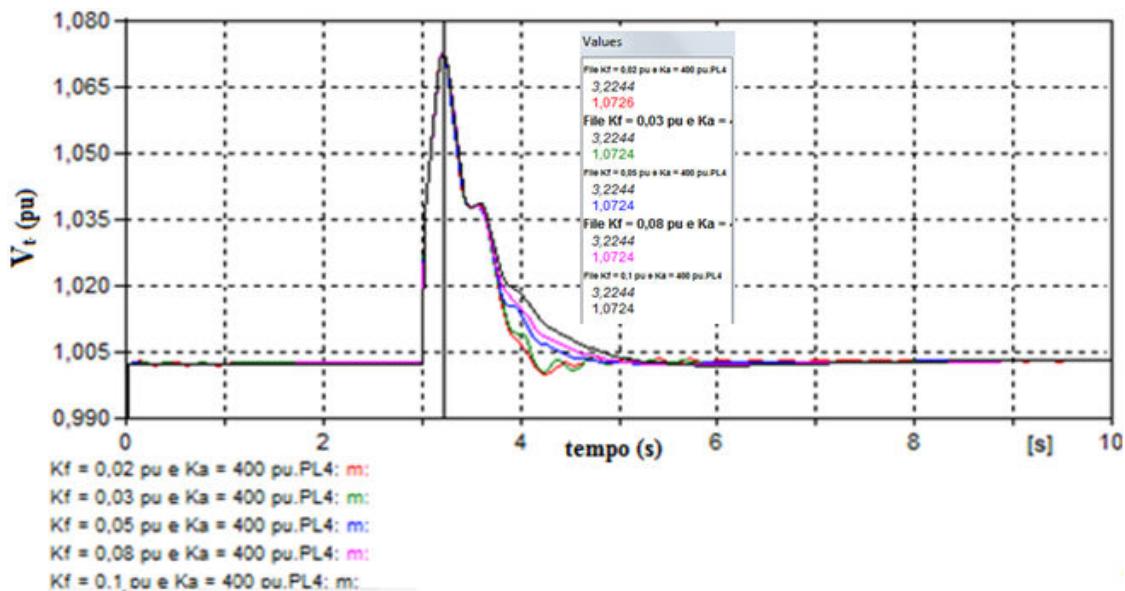


Figura 4.12: Comportamento da tensão terminal (V_t), para a variação de K_f , após rejeição da carga 4 ligada a barra 3, usando o ATPDraw

Verificou-se a variação de K_f com os outros valores de K_a (200, 250 e 300 [pu]), porém os resultados da simulação não serão apresentados para que o estudo não fique repetitivo. Desta forma, um breve comentário será explanado.

Notou-se que, para a variação de K_f tanto para os outros ganhos quanto para $K_a = 400$ [pu], o valor mais adequado para K_f é de 0,03 [pu], para as quatro situações simuladas, respondendo com um pequeno *overshoot* e bom

amortecimento. E que com um ganho de 400 [pu] a resposta do sistema apresenta um tempo de assentamento menor do que com os outros valores de ganho.

Sendo assim, para o sistema elétrico da Figura 4.2, os valores mais adequados para parâmetros K_a e K_f do *AVR* são: 400 [pu] e 0,03 [pu], respectivamente, pois através destes obteve-se o melhor resultado.

4.4.2 – ANÁLISE COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE CONTROLE DA EXCITAÇÃO PARA OS GERADORES SÍNCRONOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA COMPOSTO POR 9 BARRAS

Como já foi mencionado anteriormente, as análises serão feitas, inicialmente, através do *software Matlab*.

Como o sistema da Figura 4.3 apresenta três geradores síncronos, será feita uma análise do sistema de controle da excitação associado a cada máquina do sistema elétrico mostrado na Figura 4.3. Nesta seção, será analisado o diagrama de blocos mostrado na Figura 4.6 empregado para representar o modelo do *AVR* associado a cada um dos geradores (G_1 , G_2 e G_3), contemplando os valores das constantes utilizadas.

Para este caso estudado, os valores de H (constante de inércia) para os geradores simulados são: $H_1 = 9,55$ [s], $H_2 = 3,33$ [s] e $H_3 = 2,35$ [s].

Fez-se uma variação de V_{ref} de 0 a 1 [pu] (entrada degrau) no diagrama de blocos apresentado na Figura 4.6.

Serão feitas duas análises para cada gerador síncrono. No primeiro caso (Caso 1), K_f é mantido constante em 0,03 [pu] enquanto que K_a é variado nos seguintes valores: 40, 130, 200, 230, 300 e 400 [pu]. Já no segundo caso (Caso 2), K_a é mantido constante em seu valor adotado no caso 1 enquanto que K_f é variado nos seguintes valores: 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,08 e 0,10 [pu].

A) CASO 1: RESULTADO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO PARA K_F CONSTANTE E K_A

VARIANDO

I. ANÁLISE COMPUTACIONAL PARA O GERADOR 1 (G_1)

As respostas no tempo de V_t para a variação de K_a e os valores encontrados para a simulação computacional são mostrados na Figura 4.13 e na Tabela 4.9, respectivamente. Analisando os resultados simulados, nota-se que a resposta do sistema para o ganho de 200 [pu] apresentou um tempo de estabelecimento (*settling time*) mais reduzido com uma sobre-elevação (*overshoot*) pequena. O tempo de subida requerido pela resposta não foi o menor valor encontrado, porém, para a escolha do ganho mais adequado, será priorizado o amortecimento da resposta do sistema. Sendo assim, para este gerador, o valor de 200 [pu] parece ser o mais adequado para o parâmetro K_a .

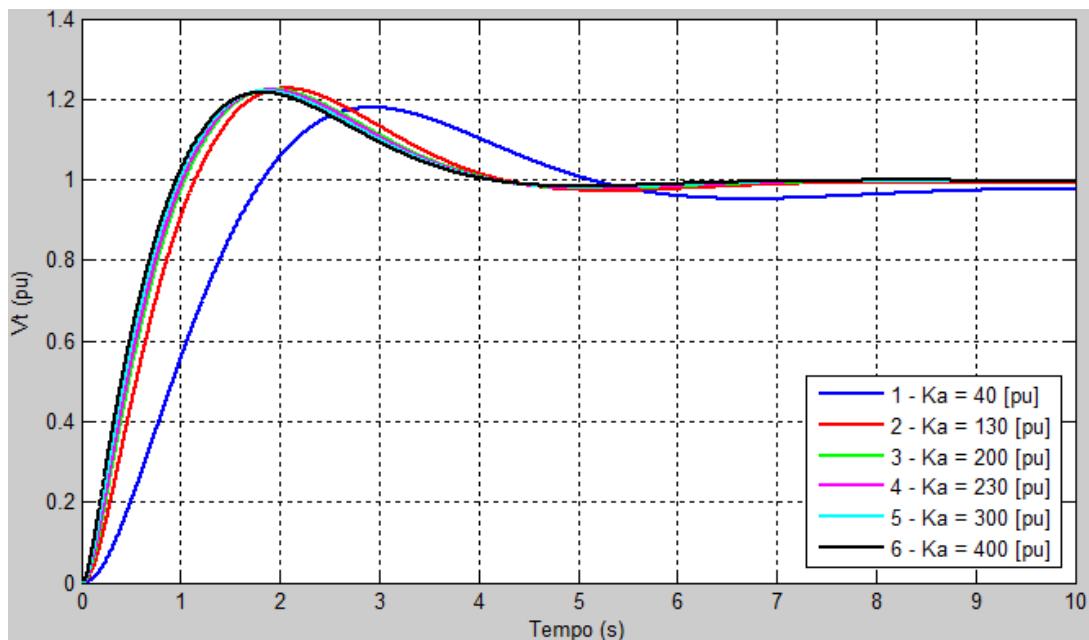


Figura 4.13: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t), para G_1 , usando o Matlab

Tabela 4.9: Resultados obtidos da Figura 4.13 – G_1

Caso	K_f (pu)	K_a (pu)	Settling time (s)	Overshoot (%)	Rise Time (10 a 90%)
1	0,03	40	7,25	20,8	1,210
2	0,03	130	4,05	23,6	0,786
3	0,03	200	3,09	22,9	0,725
4	0,03	230	3,87	22,7	0,712
5	0,03	300	3,82	22,3	0,725
6	0,03	400	3,78	22,0	0,681

II. ANÁLISE COMPUTACIONAL PARA O GERADOR 2 (G_2)

São apresentados, na Figura 4.14 e na Tabela 4.10, respectivamente, as respostas no tempo de V_t para a variação de K_a e os resultados gerados pelo *Matlab*. Observa-se pela resposta do sistema, que o valor de 130 [pu] forneceu um melhor amortecimento com um pequeno *overshoot*. Portanto, para este gerador, o valor mais indicado para o parâmetro K_a parece ser o de 130 [pu].

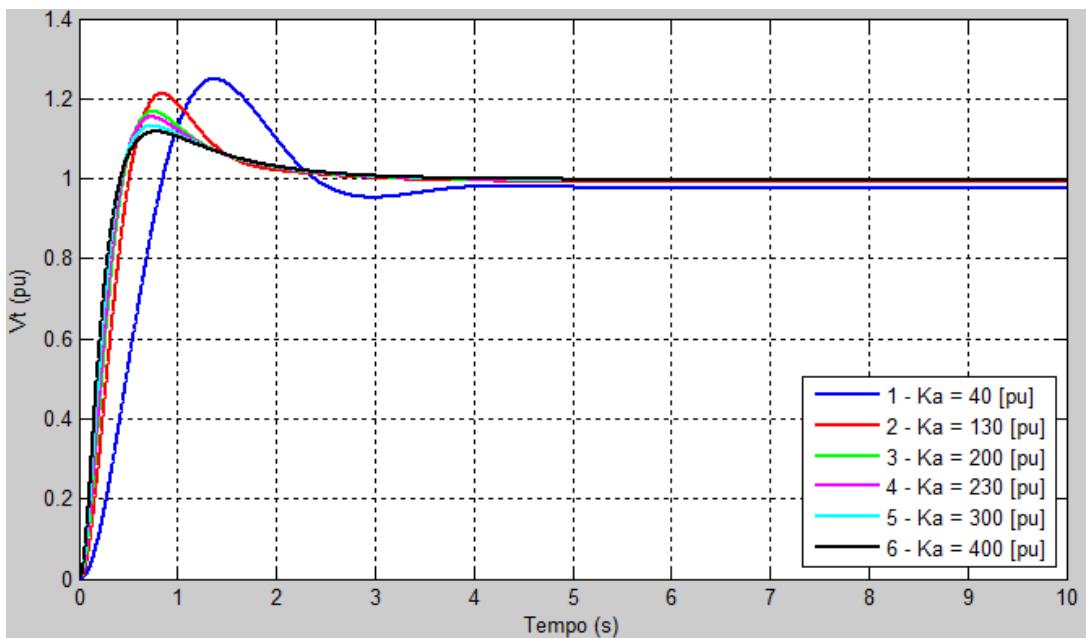
**Figura 4.14: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t), para G_2 , usando o Matlab**

Tabela 4.10: Resultados obtidos da Figura 4.14 – G₂

Caso	K _f (pu)	K _a (pu)	Settling time (s)	Overshoot (%)	Rise Time (10 a 90%)
1	0,03	40	3,19	28,0	0,553
2	0,03	130	2,34	22,1	0,336
3	0,03	200	2,38	17,4	0,296
4	0,03	230	2,38	15,9	0,286
5	0,03	300	2,39	13,6	0,274
6	0,03	400	2,39	12,0	0,269

III. ANÁLISE COMPUTACIONAL PARA O GERADOR 3 (G₃)

Na Figura 4.15 e na Tabela 4.11, observa-se as respostas no tempo de V_t para a variação de K_a e os valores obtidos da simulação no *Matlab*. Percebe-se que o tempo de assentamento (*settling time*) é aproximadamente igual para os valores de K_a acima de 200 [pu]. Porém, a taxa de ultrapassagem e o tempo de subida diminuem com o aumento do ganho. Desta forma, para este gerador, o valor de 400 [pu] parece ser o mais apropriado para o parâmetro analisado.

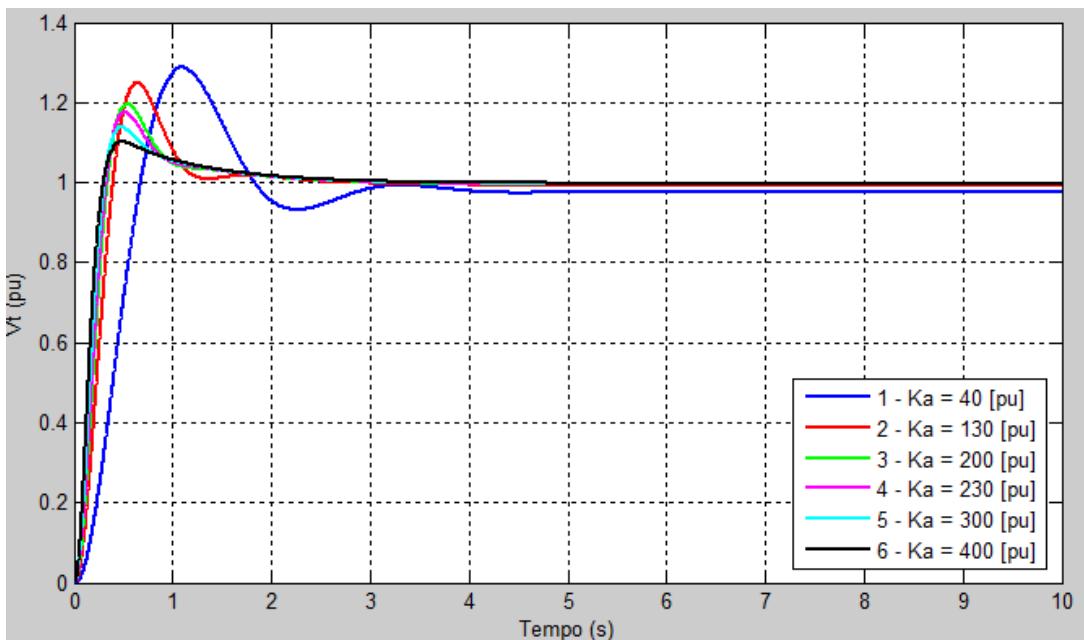
**Figura 4.15: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t), para G₃, usando o Matlab**

Tabela 4.11: Resultados obtidos da Figura 4.15 – G₃

Caso	K _f (pu)	K _a (pu)	Settling time (s)	Overshoot (%)	Rise Time (10 a 90%)
1	0,03	40	2,640	32,0	0,435
2	0,03	130	2,070	25,9	0,256
3	0,03	200	1,950	20,2	0,220
4	0,03	230	1,950	18,1	0,211
5	0,03	300	1,940	14,2	0,196
6	0,03	400	1,940	10,4	0,187

Com o intuito de verificar se os ganhos estimados para o parâmetro K_a proporcionam uma boa resposta dinâmica, será feita a simulação do Sistema Elétrico da Figura 4.3, através do programa *ATPDraw*, analisando o comportamento da tensão terminal (V_t) de cada gerador, após um curto-círcuito trifásico na barra 4, com duração de 120 [ms]. Foi adotado o instante 6 [s] como o tempo inicial para ocorrência da falta.

O comportamento das tensões terminais dos geradores 1, 2 e 3 do sistema de potência são apresentados na Figura 4.16. Os valores das tensões, em regime permanente para cada máquina são: V_{t-G1} = 1,0428 [pu], V_{t-G2} = 1,0251 [pu], V_{t-G3} = 1,0274 [pu]. Observa-se que o valor da tensão V_t, para o gerador 3, está um pouco acima do estipulado para esta barra, V_{t-G3} = 1,025 [pu]. Desta forma, será feita uma simulação, para a mesma perturbação, verificando se a variação do ganho K_a permite encontrar uma resposta mais satisfatória para o sistema.

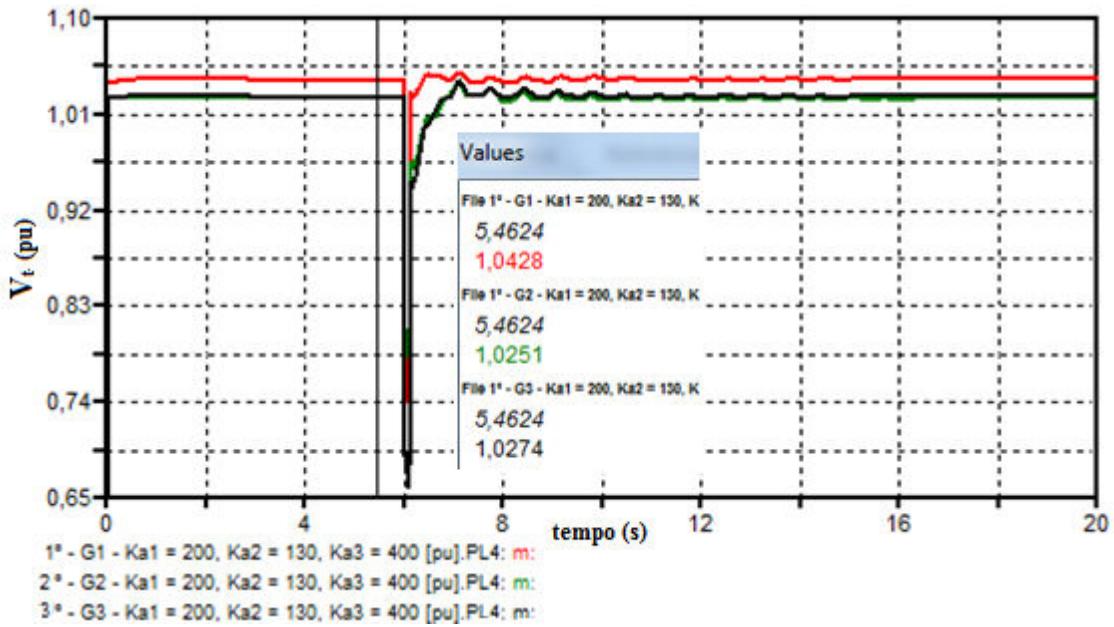


Figura 4.16: Comportamento da tensão terminal (V_t), para cada gerador, após um curto-circuito trifásico na barra 4, usando o ATPDraw

Na Figura 4.17 pode-se verificar o efeito da variação do parâmetro K_a no comportamento da tensão do G_3 . Nota-se que para um ganho de 200 [pu], o valor da tensão em regime permanente é de 1,025 [pu]. Sendo assim, será adotado este ganho para o AVR do gerador 3.

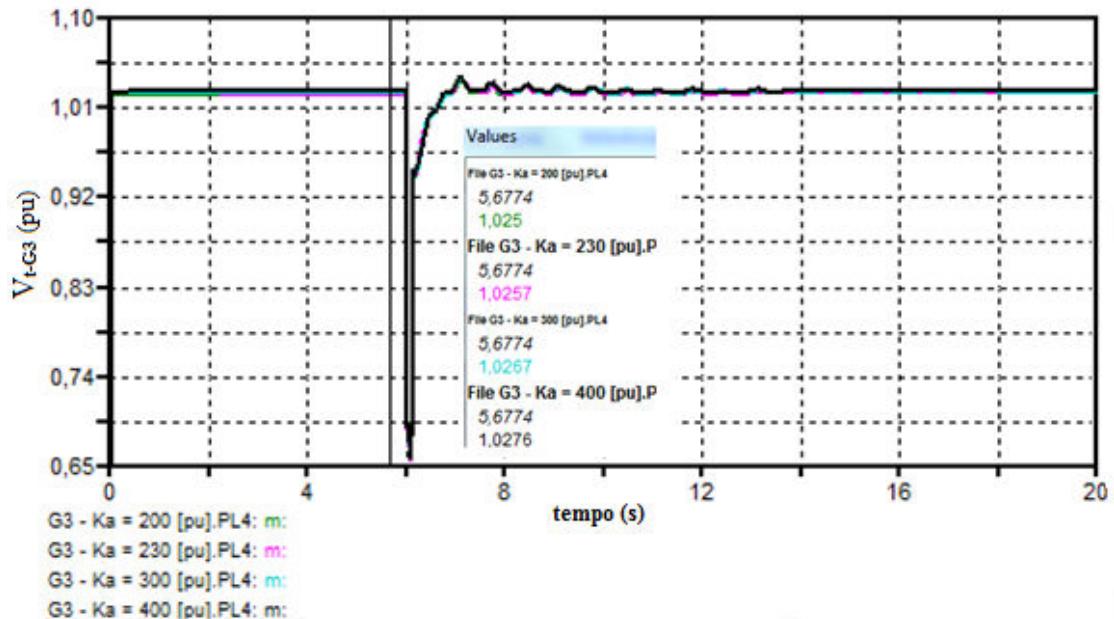


Figura 4.17: Comportamento da tensão terminal (V_t), para o G_3 , após um curto-circuito trifásico na barra 4

Observa-se também na Figura 4.17 que o parâmetro K_a do *AVR* para este caso simulado, pouco altera a resposta do sistema.

Portanto, para este sistema em estudo, $K_{a-G1} = 200$ [pu], $K_{a-G2} = 130$ [pu] e $K_{a-G3} = 200$ [pu] são os valores mais adequados a serem adotados, pois fornecem o melhor resultado para a resposta do sistema.

B) CASO 2: RESULTADO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO PARA K_A CONSTANTE E K_F VARIANDO

I. ANÁLISE COMPUTACIONAL PARA G_1

Na Figura 4.18 e na Tabela 4.12 pode-se observar, respectivamente, as respostas no tempo de V_t para a variação de K_f , mantendo K_a constante e igual a 200 [pu], e os valores encontrados para a simulação computacional dessa Figura. De acordo com os resultados analisados, o valor mais indicado para o parâmetro K_f é de 0,01 [pu]. Pois, neste caso, a resposta do sistema estabiliza mais rápida, com um tempo de assentamento mais reduzido, e apresenta um tempo de subida (*rise time*) menor.

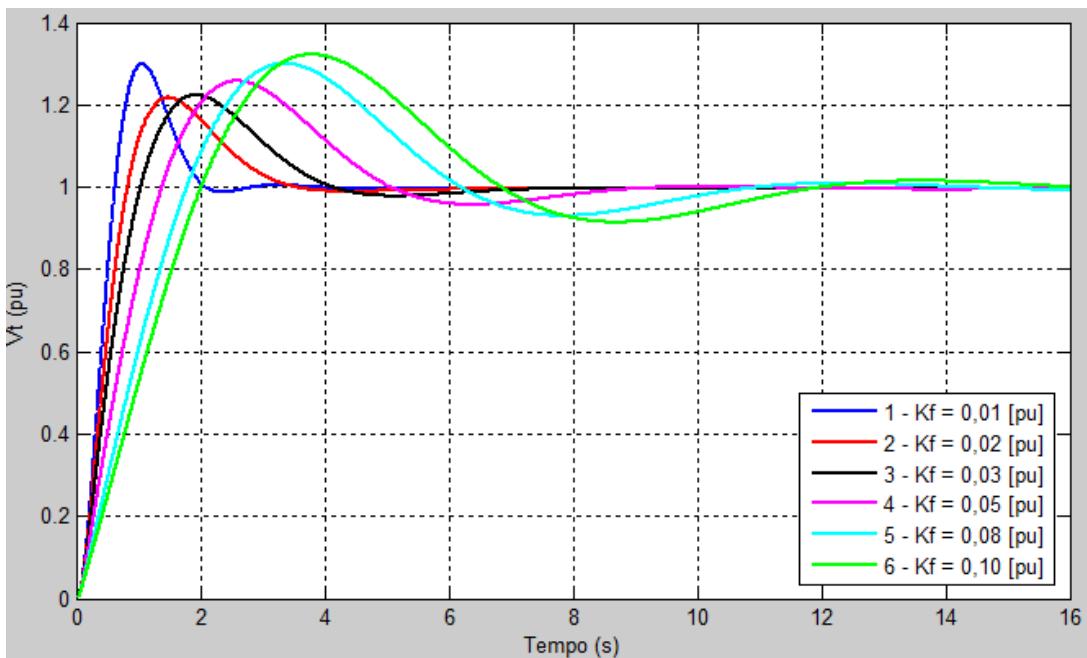


Figura 4.18: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t), para G_1 , usando o Matlab

Tabela 4.12: Resultados obtidos da Figura 4.18 – G_1

Caso	K_f (pu)	K_a (pu)	Settling time (s)	Overshoot (%)	Rise Time (10 a 90%)
1	0,01	200	1,98	30,7	0,416
2	0,02	200	3,22	22,3	0,561
3	0,03	200	3,90	23,0	0,725
4	0,05	200	7,66	26,4	1,010
5	0,08	200	9,90	30,6	1,340
6	0,10	200	13,70	32,8	1,520

II. ANÁLISE COMPUTACIONAL PARA G_2

O comportamento da tensão terminal do G_2 para a variação de K_f , mantendo K_a constante e igual a 130 [pu], e os resultados gerados pelo *Matlab* são apresentados na Figura 4.19 e na Tabela 4.13. Analisando os resultados obtidos, nota-se que à medida que o valor de K_f aumenta a resposta do sistema é menos oscilatória, porém, é mais lenta e requer um tempo maior para retornar ao regime permanente. Desta forma, o valor mais indicado para o parâmetro K_f é de 0,03 [pu], pois este ganho permite um tempo de amortecimento mais reduzido, com um pequeno valor da sobre-elevação, para a resposta do sistema.

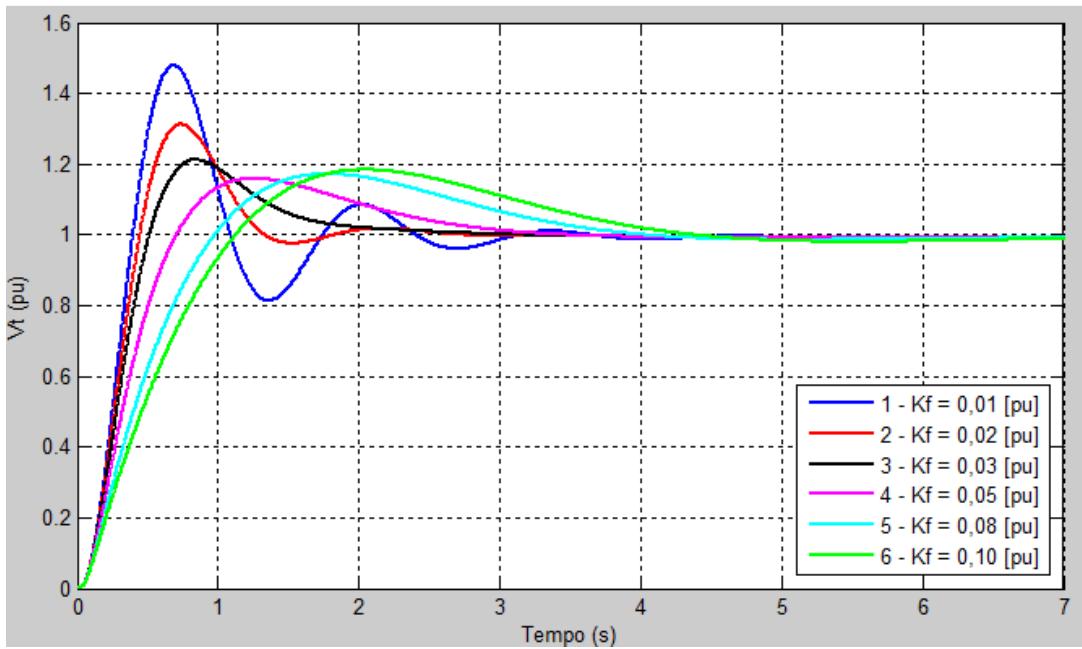


Figura 4.19: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t), para G_2 , usando o Matlab

Tabela 4.13: Resultados obtidos da Figura 4.19 – G_2

Caso	K_f (pu)	K_a (pu)	Settling time (s)	Overshoot (%)	Rise Time (10 a 90%)
1	0,01	130	2,89	49,1	0,252
2	0,02	130	2,39	32,3	0,289
3	0,03	130	2,34	22,1	0,336
4	0,05	130	3,00	16,8	0,465
5	0,08	130	3,72	18,1	0,675
6	0,10	130	4,12	19,2	0,797

III. ANÁLISE COMPUTACIONAL PARA G_3

Na Figura 4.20 e na Tabela 4.14 são apresentados, respectivamente, as respostas no tempo de V_t para a variação de K_f , mantendo K_a constante e igual a 200 [pu], e os valores obtidos da simulação no *Matlab*. Nota-se, pelos resultados obtidos da tabela, que o ganho de 0,02 [pu] possibilita a resposta do sistema estabilizar com um tempo de assentamento mais reduzido e um pequeno tempo de subida (*rise time*). Desta forma, para este gerador, esse valor parece ser o mais apropriado para o parâmetro analisado.

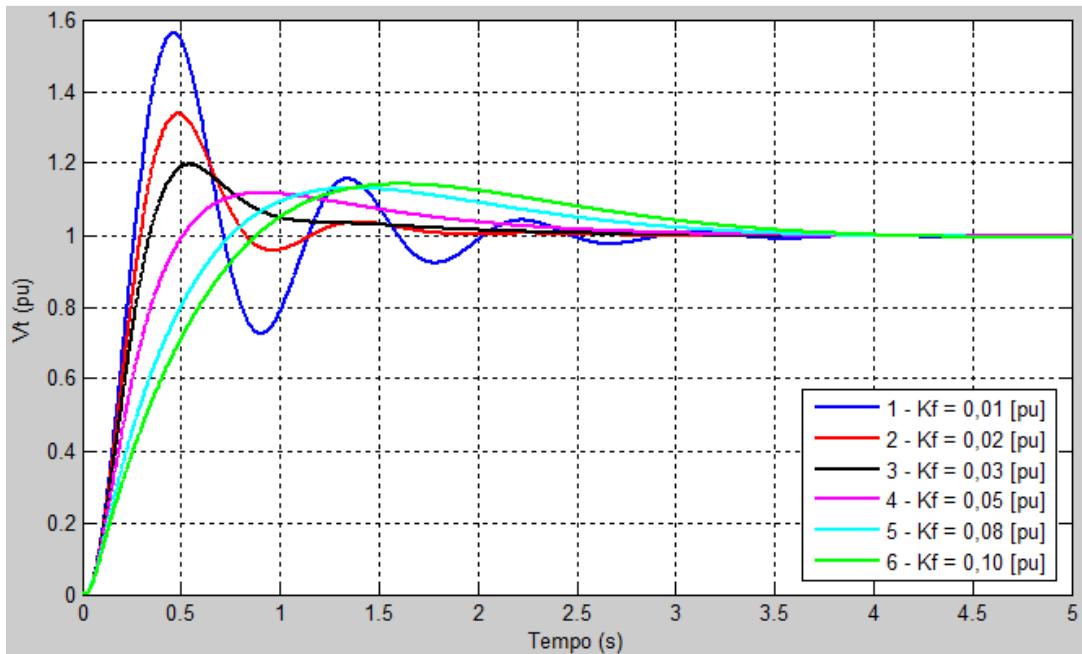


Figura 4.20: Respostas no tempo da tensão terminal (V_t), para G_3 , usando o Matlab

Tabela 4.14: Resultados obtidos da Figura 4.20 – G_3

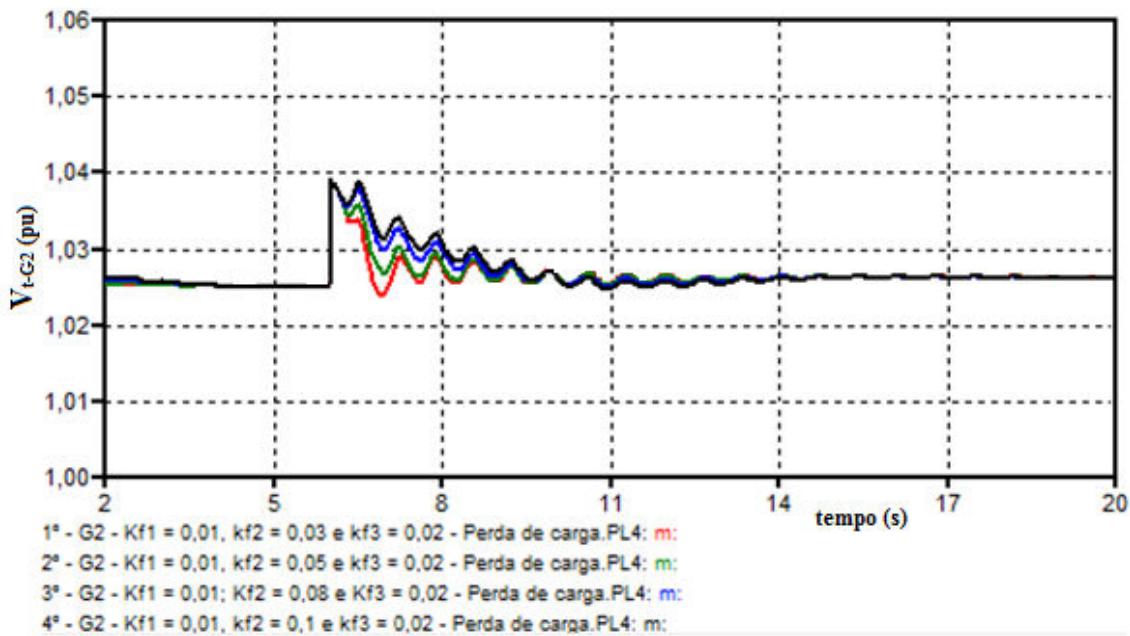
Caso	K_f (pu)	K_a (pu)	Settling time (s)	Overshoot (%)	Rise Time (10 a 90%)
1	0,01	200	2,40	57,0	0,164
2	0,02	200	1,66	34,3	0,188
3	0,03	200	1,95	20,2	0,220
4	0,05	200	2,54	12,2	0,325
5	0,08	200	3,15	13,6	0,510
6	0,10	200	3,49	14,7	0,616

Com o objetivo de verificar se os valores estipulados para o parâmetro K_f proporcionam uma boa resposta para o sistema, será feita a simulação do Sistema Elétrico da Figura 4.3, através do programa *ATPDraw*, analisando o comportamento da tensão terminal (V_t) do gerador 2.

Inicialmente, o sistema elétrico opera na condição de regime permanente e, no instante $t = 6$ [s], é então simulada a rejeição ou desligamento da carga C, conectada na barra de número 8.

Na Figura 4.21 é mostrado o efeito da variação do parâmetro K_f no comportamento da tensão do G_2 . Observa-se que para $K_f = 0,03$ [pu], o

comportamento da tensão é mais amortecido, com variações em torno do seu valor nominal, estabilizando mais rápido, ou seja, menor tempo de assentamento. Sendo assim, pela análise desta figura, comprova-se o que foi confirmado no item II desta seção.



Diante das análises realizadas, pode-se concluir que, os valores mais indicados para o parâmetro K_f do *AVR* do sistema elétrico da Figura 4.3, são: $K_{f-G1} = 0,01$ [pu], $K_{f-G2} = 0,03$ [pu] e $K_{f-G3} = 0,02$ [pu].

4.5 – SISTEMA DE CONTROLE DA VELOCIDADE: INFLUÊNCIA DA CONSTANTE DE TEMPO (T_4) NA RESPOSTA DO SISTEMA

Apresentam-se nesta seção, alguns dos procedimentos e técnicas utilizadas para análise do Sistema de Controle da Velocidade. Essas análises serão feitas considerando o modelo do regulador de velocidade, apresentado na

Figura 4.5, associado à turbina térmica a vapor (se $T_4 = 0$) ou a turbina hidráulica (se $T_4 \neq 0$).

Conforme mencionado anteriormente, apenas o gerador conectado a barra 1 do Sistema Elétrico mostrado na Figura 4.3 está associado a uma turbina hidráulica, com o valor de $T_4 \neq 0$. Desta forma, as simulações iniciais serão feitas para o diagrama de blocos empregado para representar o modelo do *GOV* associado ao gerador síncrono 1 (G1), modelado no programa *Matlab/Simulink*, desprezando a saturação e os limites (não linearidades), mostrado na Figura 4.7.

Os valores adotados para os parâmetros do *GOV* foram retirados da referência [9].

Na tabela 4.15 são apresentados os valores utilizados para os parâmetros do diagrama de blocos da Figura 4.7.

Tabela 4.15: Parâmetros utilizados para as constantes do diagrama de blocos da Figura 4.7

- G = 1	- $T_3 = 0,3$ [s]
- R = 0,05 [pu]	- T_4 (parâmetro analisado)
- $T_{fb} = 0,2$ [s]	- $T_5 = 0,3$ [pu]
- $T_1 = 0$ [s]	- D = 1 [pu]
- $T_2 = 0$	- $H_{G1} = 9,55$ [s]

Onde:

G = Ganho do flyball (pu),

T_{fb} = Constante de tempo do flyball (s),

T_1 = Primeira constante de tempo do sistema de controle (s),

T_2 = Segunda constante de tempo do sistema de controle (s),

T_3 = Terceira constante de tempo do sistema de controle (s),

T_4 = Constante de tempo da partida da água (turbina hidráulica), para turbina térmica $T_4 = 0$ (s)

T_5 = Constante de tempo da turbina hidráulica/térmica (s),

R = Regulação de velocidade.

4.5.1 – ANÁLISE COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE CONTROLE DA VELOCIDADE PARA O GERADOR CONECTADO A BARRA 1 DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA COMPOSTO POR 9 BARRAS

De acordo com as referências [9] e [16] T_4 deve possuir valores próximos de $T_5 \times 2$. Sendo assim, simulou-se a variação de T_4 ($T_4 = 0,15$ [s], $T_4 = 0,30$ [s], $T_4 = 0,60$ [s]) de acordo com a variação de T_5 ($T_5 = 0,075$ [s], $T_5 = 0,15$ [s], $T_5 = 0,30$ [s]). Analisando o Apêndice D da referência [9], foi possível determinar uma faixa de valores típicos para estes parâmetros.

Foi feito uma variação de ω_{ref} (tensão de referência) de 0 a 1 [pu] (entrada degrau unitária) no diagrama de blocos mostrado na Figura 4.7.

Após as simulações, na Figura 4.22 são mostradas as respostas no tempo da velocidade da máquina para a variação de T_4 , através do programa *Matlab*. Observa-se que variando a constante de tempo, para valores acima de 0,3 [s], o sistema é mais oscilatório e demora mais para atingir o regime permanente. Nota-se que para $T_4 = 0,6$ [s], o tempo para atingir 95% da velocidade nominal é considerado muito grande, ou seja, o tempo de assentamento (settling time) é de 53,3 [s]. Após um zoom na Figura 4.22, percebe-se que para T_4 igual a 0,15 [s], a resposta é mais amortecida e atinge mais rápido o regime permanente, como mostrado na Figura 4.23.

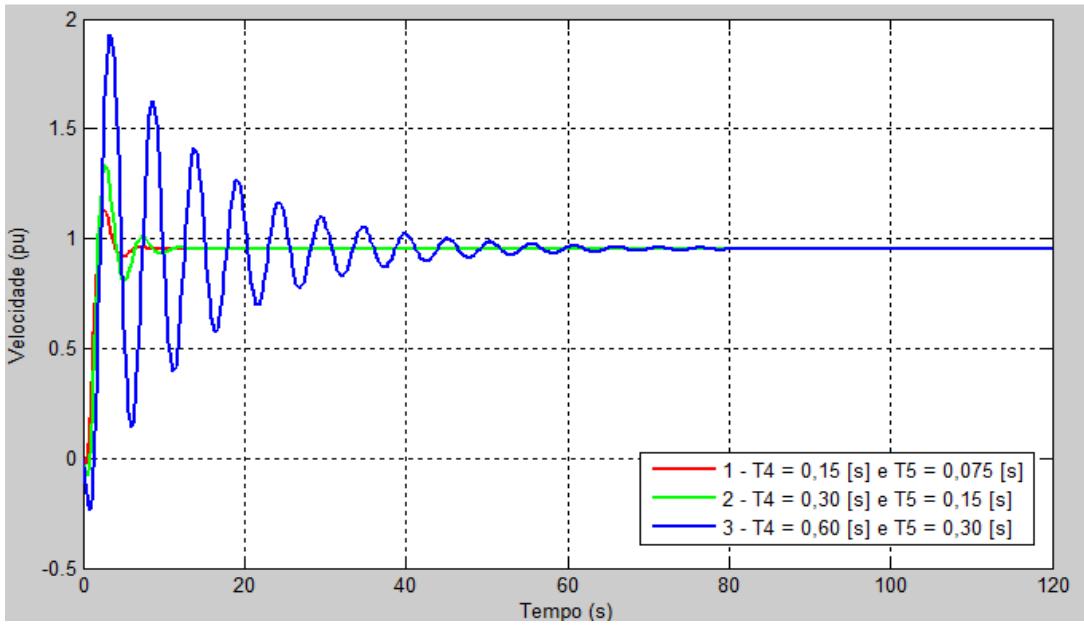


Figura 4.22: Respostas no tempo da velocidade da máquina para a variação de T_4 , usando o Matlab

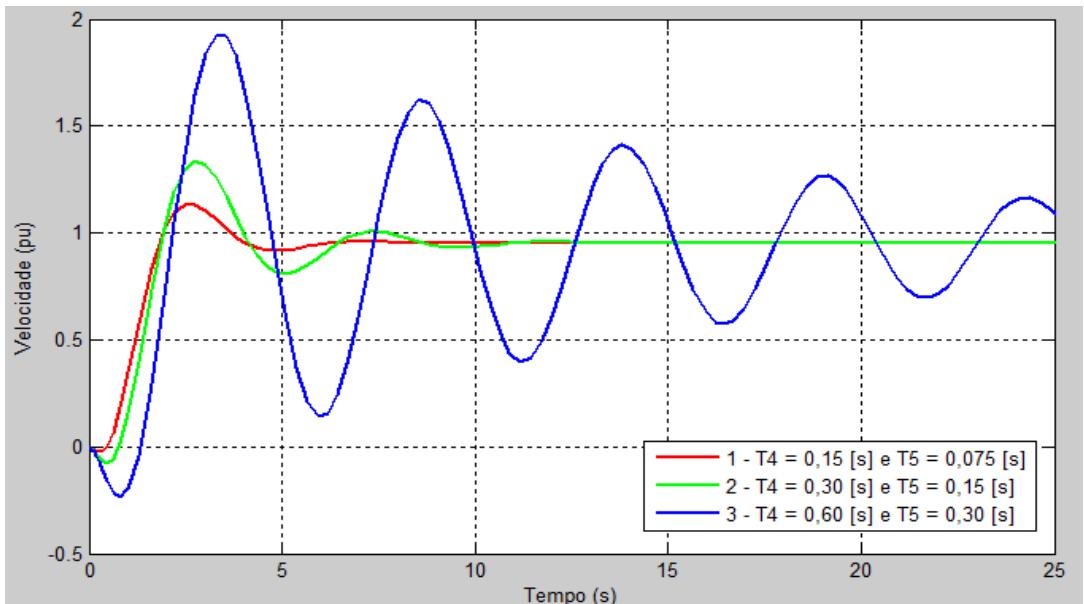


Figura 4.23: Respostas no tempo da velocidade da máquina para a variação de T_4 , com zoom da Figura 4.22

Na Tabela 4.16 são mostrados os valores encontrados para a simulação computacional das Figuras 4.22 e 4.23. Sendo assim, analisando esta tabela, nota-se que quanto menor o valor da constante de tempo T_4 , mais rápida é a resposta do sistema, com um menor *overshoot* e tempo de assentamento mais reduzido. Desta forma, para este gerador, valores abaixo de 0,30 [s] parecem ser os mais apropriados para o parâmetro analisado (T_4).

Tabela 4.16: Resultados obtidos da Figura 4.22

Caso	T_4 (s)	T_5 (s)	Settling time (s)	Overshoot (%)	Rise Time (10 a 90%)
1	0,15	0,075	5,56	19,0	0,996
2	0,30	0,15	8,29	39,4	0,852
3	0,60	0,30	53,3	99,1	0,671

Para a validação das afirmações anteriores, será feita uma análise do comportamento da velocidade das máquinas do sistema elétrico de potência da Figura 4.3.

Inicialmente, o sistema elétrico opera na condição de regime permanente. No instante $t = 6$ [s], é então simulado um curto-circuito trifásico na barra 4, com duração de 133 [ms].

Após as simulações, analisando os resultados apresentados na Figura 4.24, observa-se que a variação do parâmetro T_4 não modificou significativamente a resposta do sistema. Pois, mesmo com a variação desta constante de tempo, o comportamento da velocidade, após a falta, foi praticamente o mesmo para todos os casos simulados.

Ressalta-se que no início da simulação, com a conexão dos geradores as cargas, como mostrado na Figura 4.24, mesmo com a inicialização das variáveis do sistema, há uma pequena perturbação, que é amortecida, até atingir as condições nominais. Para valores de T_4 abaixo de 0,3 [s] a estabilização é atingida em torno de 3,6 [s]. Já para o valor de T_4 igual a 0,6 [s], o sistema não consegue atingir a estabilidade em um tempo menor que 6 [s], momento em que ocorre o curto-circuito.

Desta forma, será adotado o valor de 0,15 [s] para a constante de tempo T_4 , pois este apresenta um tempo de assentamento menor.

Nota-se que devido ao amortecimento total do sistema e a influência dos reguladores de velocidade das outras máquinas (G_2 e G_3), o comportamento da velocidade apresentado na Figura 4.24 é menos oscilatório e mais amortecido do que na Figura 4.22.

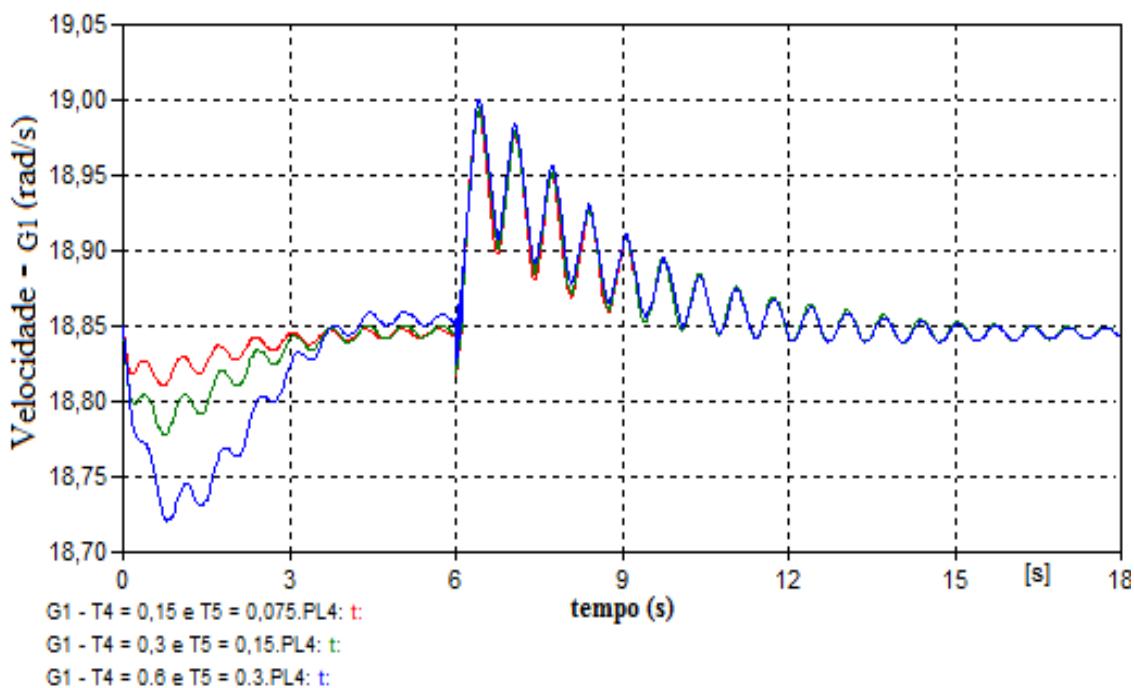


Figura 4.24: Comportamento da velocidade do gerador 1, após um curto-círculo trifásico na barra 4, variando o valor de T_4 e T_5 , usando o ATPDraw

Os outros geradores (G_2 e G_3) do Sistema Elétrico mostrado na Figura 4.3 estão associados a uma turbina térmica a vapor, com o valor de $T_4 = 0$. Desta forma, foi feita a análise da variação de T_5 , para verificar se o valor encontrado para essa constante de tempo do *GOV* do gerador 1 também proporciona uma boa resposta para esses geradores. Nas Figuras 4.25 e 4.26 são apresentados o comportamento das velocidades dos geradores 2 e 3, respectivamente. Percebe-se que o comportamento da velocidade para a variação de T_5 é semelhante para as três Figuras (4.24, 4.25 e 4.26), ou seja, a variação deste parâmetro também não modificou significativamente a resposta do sistema.

Nas Figuras 4.25 e 4.26, mesmo com a inicialização das variáveis do sistema, inicialmente, percebe-se também uma pequena perturbação, que é amortecida, até atingir as condições nominais. Para valores de T_4 abaixo de 0,3 [s] a estabilização é atingida em torno de 3,6 [s]. Já para o valor de T_4 igual a 0,6 [s], o sistema não consegue atingir a estabilidade em um tempo menor que 6 [s], momento em que ocorre o curto-círcito.

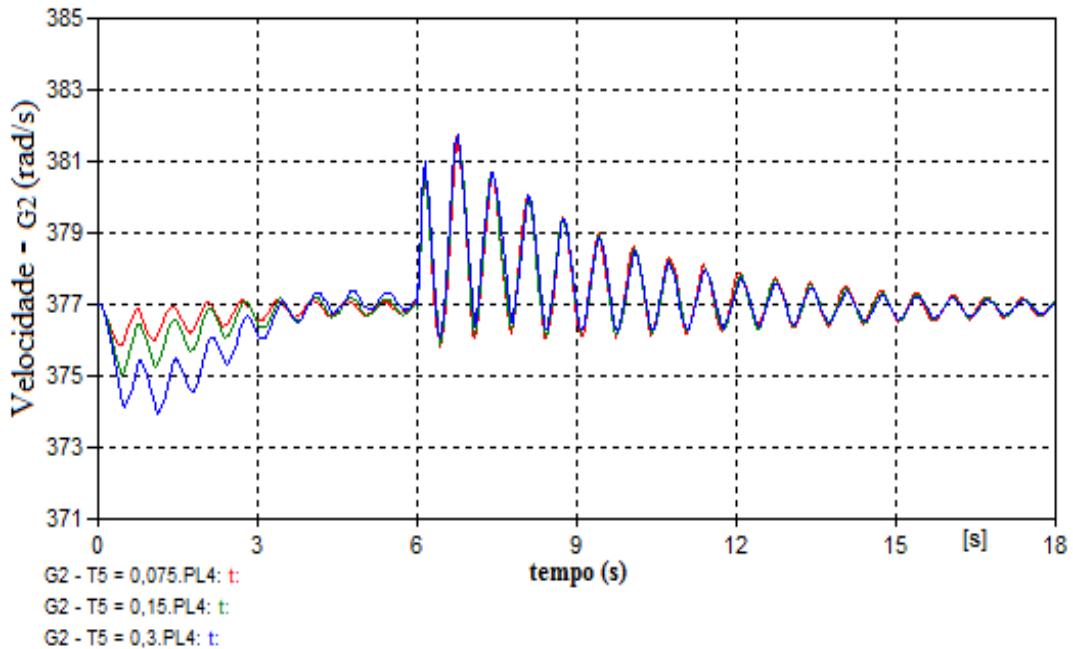


Figura 4.25: Comportamento da velocidade do gerador 2, após um curto-circuito trifásico na barra 4, variando o valor de T₅, usando o ATPDraw

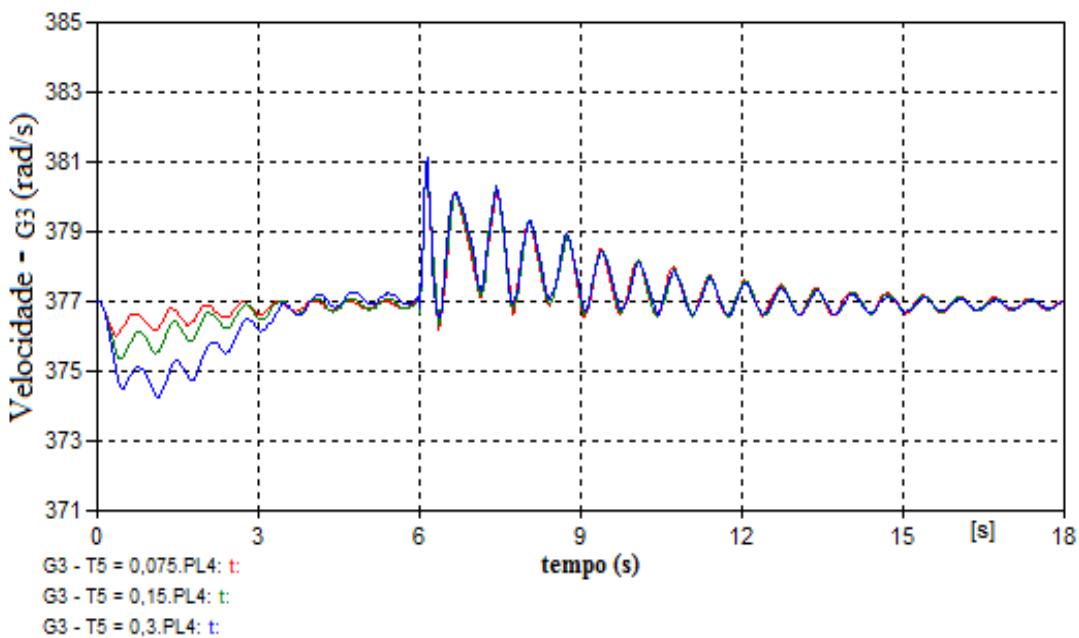


Figura 4.26: Comportamento da velocidade do gerador 3 ,após um curto-circuito trifásico na barra 4, variando o valor de T₅, usando o ATPDraw

Portanto, diante das análises realizadas, pode-se concluir que, para o gerador 1, T₄ = 0,15 [s] e T₅ = 0,075 [s] parecem ser os valores mais adequados

a serem usados no sistema de controle da velocidade, pois fornecem o melhor resultado para a resposta do sistema.

4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo foi utilizado para apresentar os procedimentos e técnicas utilizadas para análise dos sistemas de controle da excitação e da velocidade.

Os estudos, neste capítulo, foram realizados para dois tipos de Sistemas Elétricos: Sistema de Distribuição de Energia Elétrica conectado ao gerador do PI, e um Sistema Elétrico de Potência composto por 9 barras e por três geradores com seus respectivos reguladores interligados.

Os resultados apresentados mostraram que, no caso do gerador do PI do sistema elétrico mostrado na Figura 4.2, a variação dos valores (de 200 a 400 [pu]) do parâmetro K_a do regulador de tensão não influenciou de forma significativa na resposta do sistema. Desta forma, o valor adotado para K_a foi de 400 [pu], pois este apresentou um tempo de assentamento ligeiramente menor do que os outros ganhos. Já o valor mais apropriado para o parâmetro K_f do regulador de tensão foi de 0,03 [pu], pois com este ganho a saída V_t apresentou um comportamento menos oscilatório, com um tempo de assentamento pequeno.

No caso dos geradores síncronos (G_1 , G_2 e G_3) do sistema elétrico mostrado na Figura 4.3, os valores mais adequados para os ganhos K_a e K_f dos reguladores de tensão são: $K_{a-G1} = 200$ [pu], $K_{a-G2} = 130$ [pu] e $K_{a-G3} = 200$ [pu]; e $K_{f-G1} = 0,01$ [pu], $K_{f-G2} = 0,03$ [pu] e $K_{f-G3} = 0,02$ [pu]. Estes ganhos foram adotados, pois permitiram a resposta do sistema um tempo de assentamento mais reduzido com um pequeno *overshoot*.

A fim de minimizar o esforço executado por parte dos usuários na realização de várias simulações, possibilitando um rumo ao estudo realizado,

podem-se sugerir, com base nas simulações realizadas, os valores iniciais a serem adotados para os parâmetros analisados.

Sendo assim, sugere-se adotar, para máquinas síncronas com geração distribuída, normalmente com baixos valores de inércia, um valor de 400 [pu] para o ganho K_a e um valor de 0,03 [pu] para o ganho K_f do diagrama de blocos do regulador de tensão, considerando que estes valores proporcionaram a resposta do sistema um tempo de assentamento pequeno e um comportamento menos oscilatório.

Já para um sistema de potência com multimáquinas, de acordo com as simulações realizadas, sugere-se analisar os parâmetros aqui mencionados para o gerador de maior inércia, e adotar os valores encontrados para os ganhos K_a e K_f do diagrama de blocos do regulador de tensão para todos os geradores síncronos. E depois, se necessário, realizar alguns ajustes finos nos ganhos dos reguladores de tensão dos outros geradores do sistema de menor inércia com base nas análises aqui apresentadas. Ressalta-se que para geradores de menor valor de inércia não é aconselhável adotar valores muito pequenos para K_f , pois conforme observado nos resultados obtidos, para valores de K_f abaixo de 0,02 [pu] a resposta do sistema é mais oscilatória, e requer um tempo maior para o seu amortecimento.

Ressalta-se que o ideal seria fazer uma análise dos parâmetros citados, pois estes interferem de maneira diferente na resposta, dependendo da configuração do sistema elétrico, sistema de potência com multimáquinas ou sistema de distribuição com geração distribuída; e da característica do gerador.

Para o estudo do sistema de controle da velocidade, foi considerado apenas o gerador 1 da Figura 4.3, porque este é o único que está associado a uma turbina hidráulica. Neste caso, a constante de tempo $T_4 = 0,15$ [s] permitiu uma resposta mais rápida e um tempo de assentamento menor a uma variação da velocidade.

Conclui-se que os procedimentos e técnicas aqui utilizados são de grande valia para a modelagem correta e eficiente dos reguladores da máquina síncrona em condições isoladas ou em sistemas multimáquinas. Destaca-se ainda a praticidade da representação desses reguladores no *ATPDraw* facilitando ao usuário o ajuste de parâmetros para se obter melhores condições de operação.

CAPÍTULO V

ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DE UM GERADOR SÍNCRONO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO, COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dando continuidade aos estudos propostos nesta dissertação, no presente capítulo será feita uma análise do desempenho dinâmico do gerador síncrono de um Produtor Independente de energia (PI) conectado ao Sistema Elétrico de Distribuição, com vistas ao comportamento do mesmo após uma perturbação na rede. Serão avaliados aspectos da qualidade da energia elétrica (nível de tensão), o comportamento dos reguladores de velocidade e de tensão, e condições de estabilidade da máquina.

Tendo em vista tal propósito, também serão avaliadas as modelagens dos reguladores de tensão e de velocidade e do estabilizador descritas no Capítulo III, bem como os ajustes adequados dos parâmetros dos reguladores, analisados no capítulo IV, sendo adotado os valores dos ganhos (K_a e K_f) que forneceram a melhor resposta para o sistema elétrico simulado.

Nos estudos realizados neste capítulo, será utilizado o dispositivo modelado no Capítulo II, o qual determina o ângulo de potência, possibilitando analisar a estabilidade angular de um sistema após uma perturbação.

E finalmente, um breve estudo, analisando a operação de um sinal adicional estabilizante no sistema de controle da excitação do gerador síncrono de um PI, capaz de produzir uma componente de torque elétrico que esteja em fase com o desvio de velocidade angular, contribuindo com o amortecimento de oscilações pouco amortecidas.

5.2 – ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DO GERADOR

SÍNCRONO DO PI CONECTADO AO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO

Normalmente, estudos em redes de subtransmissão e distribuição não consideram os aspectos relacionados à estabilidade, considerando que, em geral, essas redes operam de modo estável sempre que os sistemas de geração e transmissão estiverem operando em condições estáveis [3]. Entretanto, com o advento da geração distribuída, essa concepção está sendo analisada, tendo em vista que problemas de estabilidade geralmente encontrados em sistema de transmissão podem passar a ocorrer também nas redes de distribuição devido à inserção dos Produtores Independentes de energia (PI).

Nesse sentido, é de suma importância analisar os impactos e as mudanças na operação dos sistemas de distribuição, com geração distribuída, uma vez que os mesmos não foram projetados para suportar uma inserção de unidades geradoras [12].

Dentro deste contexto, será feita uma análise do desempenho do gerador síncrono do PI conectado a um sistema de distribuição, mesmo sistema elétrico analisado no Capítulo IV, mostrado novamente na Figura 5.1, com os ajustes dos parâmetros do regulador de tensão, estabelecidos no capítulo anterior, que forneceram a melhor resposta para o sistema. Ressalta-se que a Concessionária (representada na Figura 5.1 por G_1) possui uma carga total de 25 [MVA] (4,167 [MVA] por bloco unitário de carga), sendo que, deste total, o gerador

independente contribui com a geração de 1 [MVA]. Além desta carga de 1 [MVA], o gerador ainda supre a demanda interna do sistema independente, que é da ordem de 2,5 [MVA].

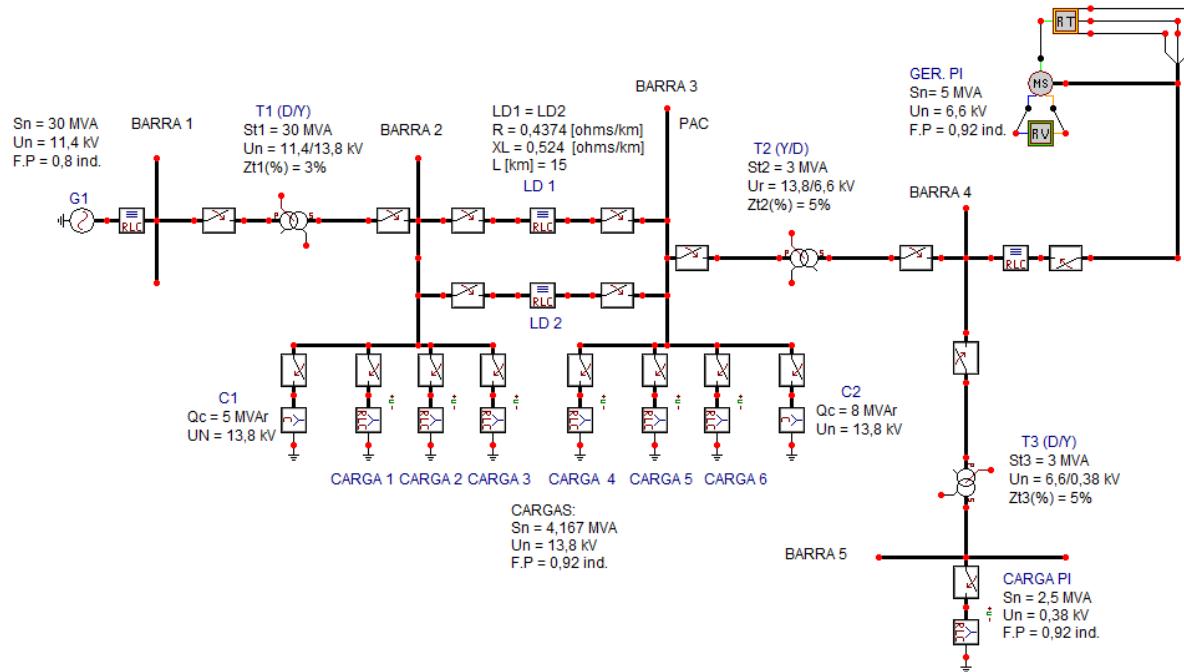


Figura 5.1: Sistema de distribuição conectado ao gerador do Produtor Independente de energia (PI) simulado no ATPDraw

5.2.1 – ESTUDO DE CASO: REJEIÇÃO DE CARGA

Para realizar a análise dinâmica do gerador do PI foi aplicado o seguinte tipo de perturbação no sistema: rejeição ou desligamento da carga 4, ($S_n = 4,167$ [MVA]) conectada na barra 3, isto é, no Ponto de Acoplamento Comum – PAC entre o gerador do PI e o sistema de distribuição. Para efeito de comparação, dois cenários serão aqui investigados:

I - Gerador do Produtor Independente (PI), conectado ao sistema elétrico, com os reguladores desativados;

II - Gerador do Produtor Independente (PI), conectado ao sistema elétrico, com os reguladores ativados.

Inicialmente o sistema elétrico opera na condição de regime permanente e, no instante $t = 3[\text{s}]$, é então simulada a rejeição de 16,87% da potência total fornecida pela concessionária, ou seja, desligamento da carga 4, conectada na barra de número 3.

Para um melhor entendimento dos resultados simulados, a resposta do sistema será apresentada pela curva na cor verde quando os reguladores de tensão e velocidade, do gerador do PI, estão ativados, e na cor vermelha, quando os mesmos estão desativados.

O comportamento das tensões no PAC (barra 3), na presença do PI, sem e com a atuação dos seus reguladores, podem ser observadas na Figura 5.2. Na situação sem reguladores, a tensão (cor vermelha) se eleva subitamente no instante do distúrbio, apresenta uma pequena oscilação e continua crescendo de forma suave, fato este explicado pelo excesso de potência reativa antes entregue à carga que foi rejeitada. Contudo, esta se estabiliza em 1,1458 [pu]. Ressalta-se que o valor nominal da tensão no PAC é de 1,051 [pu].

Com relação à situação com reguladores, a tensão (cor verde) também apresenta inicialmente uma elevação brusca de tensão, atingindo o valor máximo de 1,1367 [pu], e, em seguida, devido à atuação do regulador de tensão, esta se reduz com algumas pequenas oscilações até se estabilizar em 1,088 [pu]. Esses resultados deixam evidente a necessidade do regulador de tensão no produtor independente.

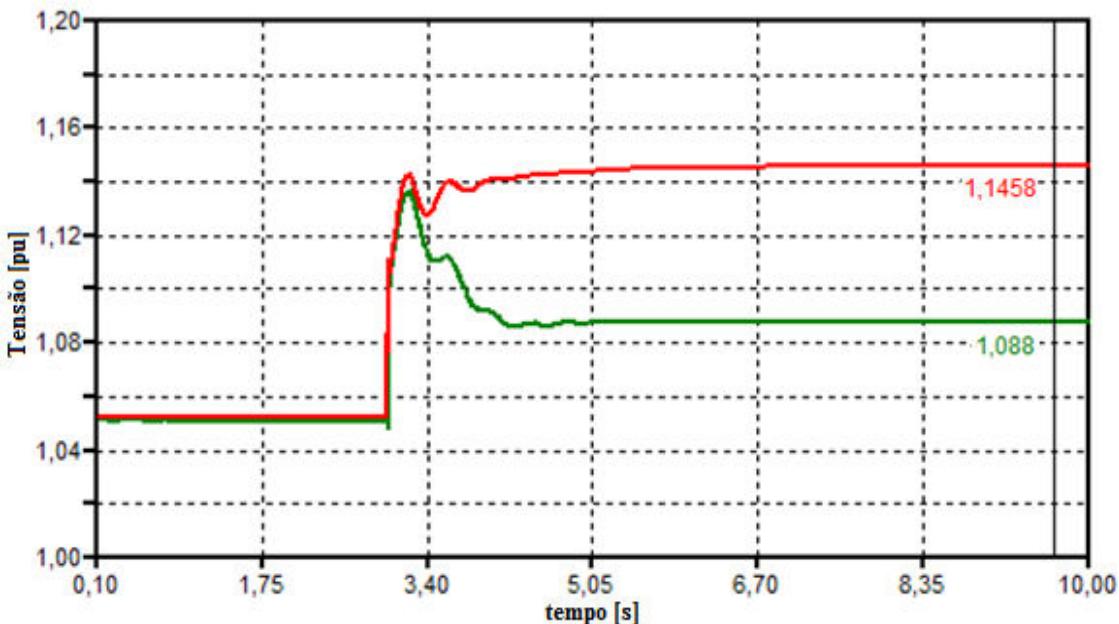


Figura 5.2: Tensões na barra 3: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde)

Neste contexto, observa-se que o valor da tensão do sistema com a operação dos controles da máquina eleva-se a uma amplitude menor do que quando estes estão inoperantes. Porém, nos dois casos, o valor da tensão eleva-se a uma amplitude perigosa para a operação do sistema. Pois, de acordo com a tabela 5.1, retirada da referência [25], as tensões acima de 1,05 [pu] são classificadas como tensões críticas. E conforme analisado na Figura 5.2, o valor da tensão, em regime permanente, está acima de 1,05 [pu]. Tal fato se reflete veementemente na qualidade da energia elétrica experimentada pelos consumidores diretamente instalados no PAC, uma vez que, tal anomalia, resulta em diminuição da vida útil dos equipamentos elétricos, e, além disso, pode originar operações indesejadas de equipamentos eletroeletrônicos microprocessados e computadorizados. Estes dispositivos foram projetados para operarem dentro de uma determinada faixa de variação de tensão, também conhecida como curva CBMA – *Computer Business Manufactures Association*, que trata de uma referência para a operação eficaz dos equipamentos computadorizados perante situações de sobre ou subtensão [26].

Dessa forma, uma medida corretiva deve ser aplicada, pois devido à sobretensão, observada na Figura 5.2, além dos danos materiais aos equipamentos elétricos há o risco de alterações no processo industrial. Como, por exemplo, uma medida corretiva seria a desconexão do banco de capacitores instalados no PAC, ou mesmo a instalação de um reator de núcleo saturado apto a absorver o excesso de reativo do sistema.

No que se refere à magnitude da tensão na barra de geração do PI, mostra-se na Figura 5.3 uma acentuada elevação de tensão na barra 4. Vislumbra-se através da curva em vermelho (sem controladores) uma sobretensão e sua posterior estabilização em 1,0887 [pu]. De acordo com a Tabela 5.1 este valor de tensão é crítico. E considerando que muitos equipamentos de uma instalação elétrica são projetados para operarem eficientemente somente dentro de uma determinada faixa de tensão, excursões para fora desta faixa poderão conduzir a um baixo desempenho e até mesmo danificar esses elementos.

Já na curva em verde observa-se inicialmente, uma elevação de tensão, valor máximo de 1,071 [pu], seguido de uma flutuação de tensão e decréscimo da mesma, estabilizando em 1,0019 [pu]. Isto ocorreu devido à atuação do regulador de tensão, retirando a excitação da mesma, ou seja, diminuindo a tensão aplicada no enrolamento de campo do gerador (E_f), de tal forma a alcançar, por alguns segundos, seu limite inferior de $E_{f\min} = 0,5$ [pu], como pode ser visto na Figura 5.4. Em seguida, o *AVR* aumenta a excitação da máquina, no sentido de manter o valor da tensão terminal do gerador do PI próxima do valor de referência nominal, estabilizando em aproximadamente 0,73 [pu]. Sendo assim, a excitação aplicada ao campo da máquina síncrona da geração independente passa a ser de apenas 73%.

Fica, portanto, comprovada a atuação do regulador de tensão de forma adequada às variações na magnitude de tensão da barra 4, comprovando-se, assim, sua eficácia na manutenção da tensão dentro do limite estabelecido.

Tabela 5.1: Faixas de Classificação de Tensões: Tensões de Regime Permanente – Pontos de Conexão em Tensão Nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV

Tensões de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão Contratada (TC)
Adequada	$0,93 \text{ TC} \leq \text{TL} \leq 1,05 \text{ TC}$
Precária	$0,90 \text{ TC} \leq \text{TL} < 0,93 \text{ TC}$
Crítica	$\text{TL} < 0,90 \text{ TC} \text{ ou } \text{TL} > 1,05 \text{ TC}$

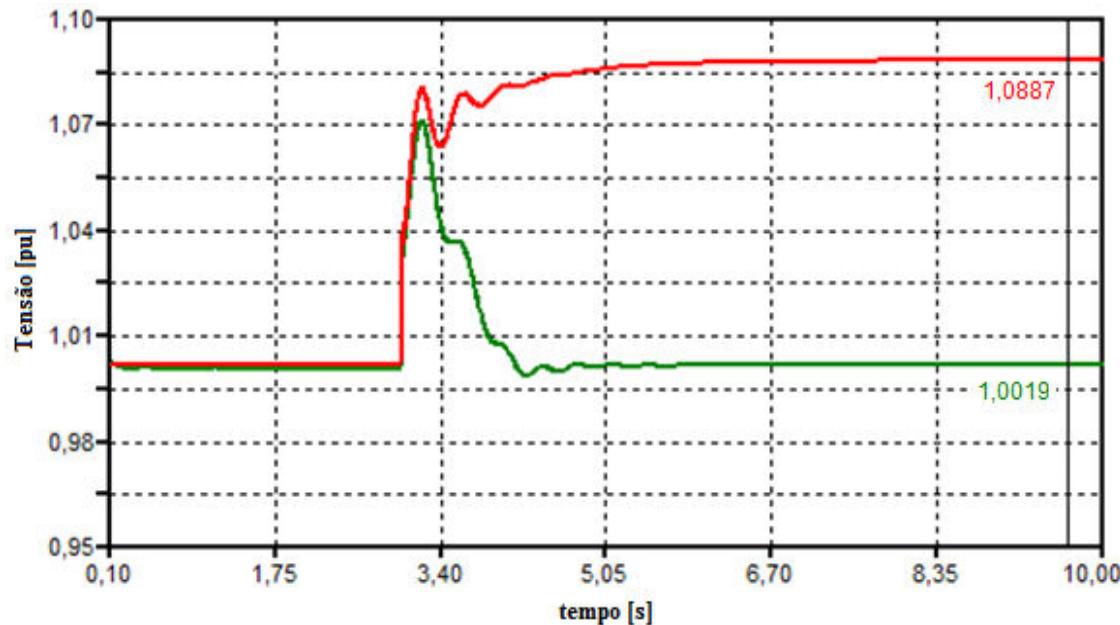


Figura 5.3: Tensões na barra 4: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde)

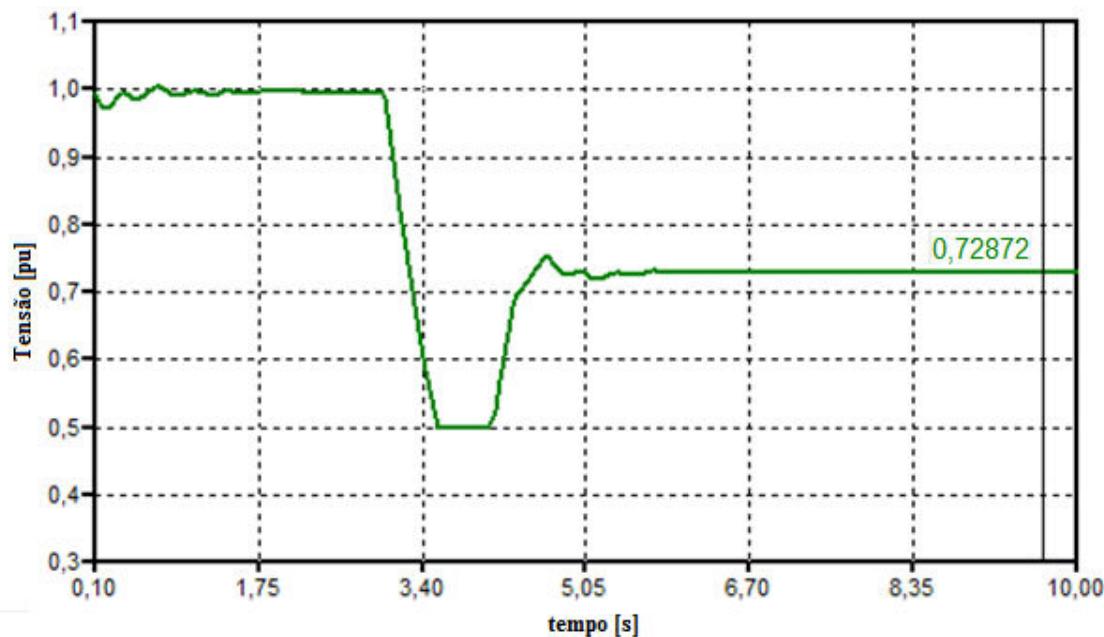


Figura 5.4: Resposta do regulador de tensão (tensão de excitação - E_d)

Vale ressaltar que antes da rejeição de carga aqui aplicada, carga 4, o gerador do PI, fornecia uma potência ativa de 3,53 [MW] (potência ativa total fornecida a sua carga local e a rede da concessionária de energia).

No instante imediatamente após a rejeição, a máquina do PI com reguladores ativados (em verde), sente um alívio de carga, com uma redução de 38,2% de sua potência ativa fornecida. Entretanto, o gerador está operando em paralelo com o suprimento da concessionária de energia elétrica, e sendo esta representada por uma fonte de tensão infinita, qualquer variação de carga será suprida por ela. Desta forma, como houve um decréscimo de carga, a concessionária será submetida a tal decréscimo, e sua potência ativa gerada, que antes era de 24,44 [MW], será reduzida de 14,44%, como pode ser visto na Figura 5.5. Desta forma, após a perturbação, a potência ativa fornecida pela máquina, com reguladores, aumenta, apresentando um comportamento oscilatório, sendo este amortecido até o sistema estabilizar em um valor de potência ativa semelhante ao valor anterior ao distúrbio, conforme apresentado na Figura 5.6. Portanto, o gerador do PI mantém constante a geração de potência ativa.

Considerando agora, o gerador do PI sem nenhuma regulação (em vermelho), após a perturbação, a concessionária também será submetida a tal decréscimo, e sua potência ativa gerada, que antes era de 24,44 [MW], será reduzida de 7,19%, como pode ser visto na Figura 5.5. Esta redução é menor devido ao valor da tensão no barramento do PAC, mostrado na Figura 5.2, ser maior do que no caso com reguladores ativados, e como as cargas são modeladas como impedância constante, a corrente fornecida pela concessionária, neste caso, é maior. Desta forma, o gerador do PI, com reguladores desativados, também mantém constante a geração de potência ativa, conforme mostrado na Figura 5.6.

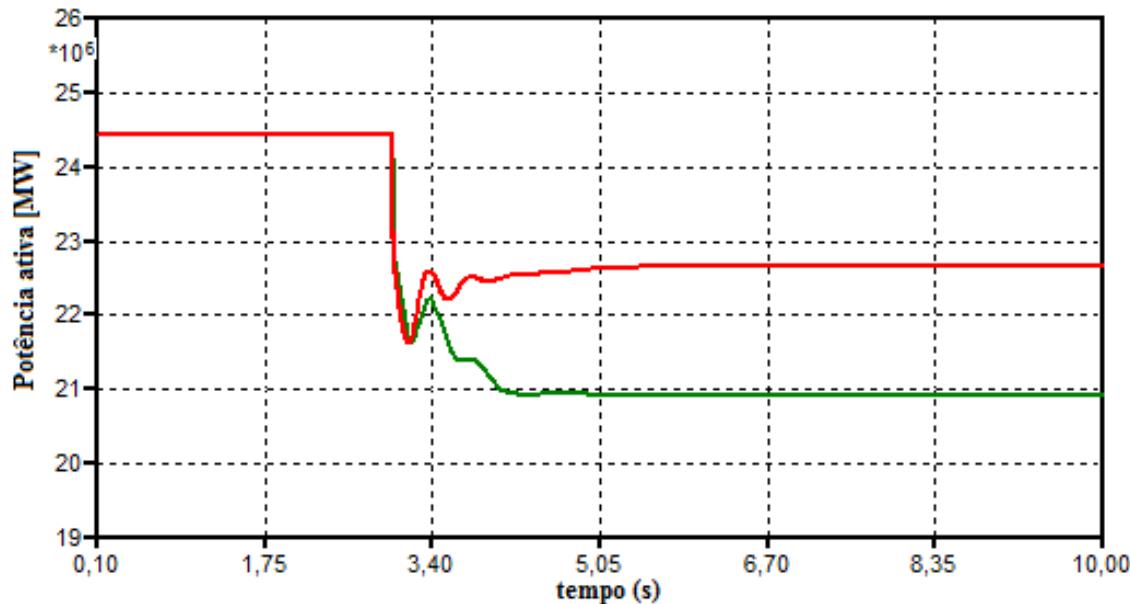


Figura 5.5: Potência ativa fornecida pela Concessionária: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde)

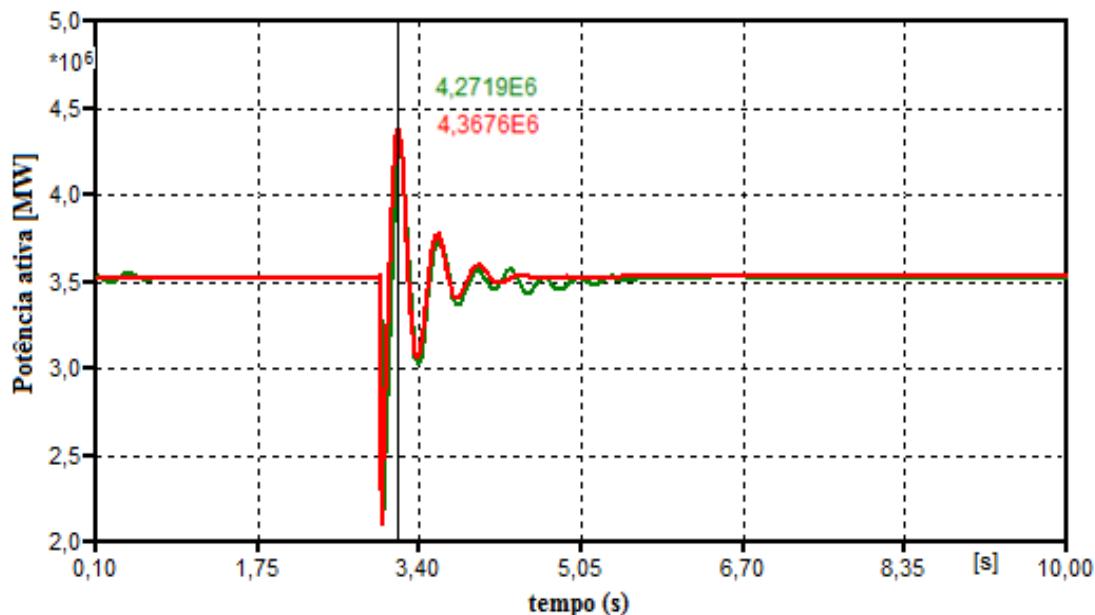


Figura 5.6: Potência ativa fornecida pelo gerador do PI: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde)

Na Figura 5.6 mostra-se também que o valor de pico atingido pela potência ativa, com os reguladores ativados, é 2,19% menor do que o valor atingido, quando os controles da máquina estão desativados.

O regulador de velocidade do gerador do PI percebe a variação da velocidade da máquina em torno de 0,36% de seu valor nominal (188,5 [rad/s]),

conforme apresentado na Figura 5.7, e atua no sentido de ajustar o suprimento de potência mecânica no eixo do grupo gerador-máquina primária, como apresentado na Figura 5.8.

Nota-se, que a atuação do regulador de velocidade não foi tão expressiva, visto que a variação de velocidade é apenas de 0,36% de seu valor nominal (188,5 [rad/s]). E, além disso, o amortecimento total do sistema e o decréscimo de carga atendido pela Concessionária contribuíram com a estabilização da velocidade da máquina do PI em um valor próximo do nominal. Ressalta-se que, desta forma, a frequência do sistema é mantida constante em 60 [Hz].

Nas Figuras 5.7 e 5.8 também são mostrados, respectivamente, a velocidade e a potência mecânica do gerador sem nenhuma regulação (em vermelho), evidenciando que esta permanece constante.

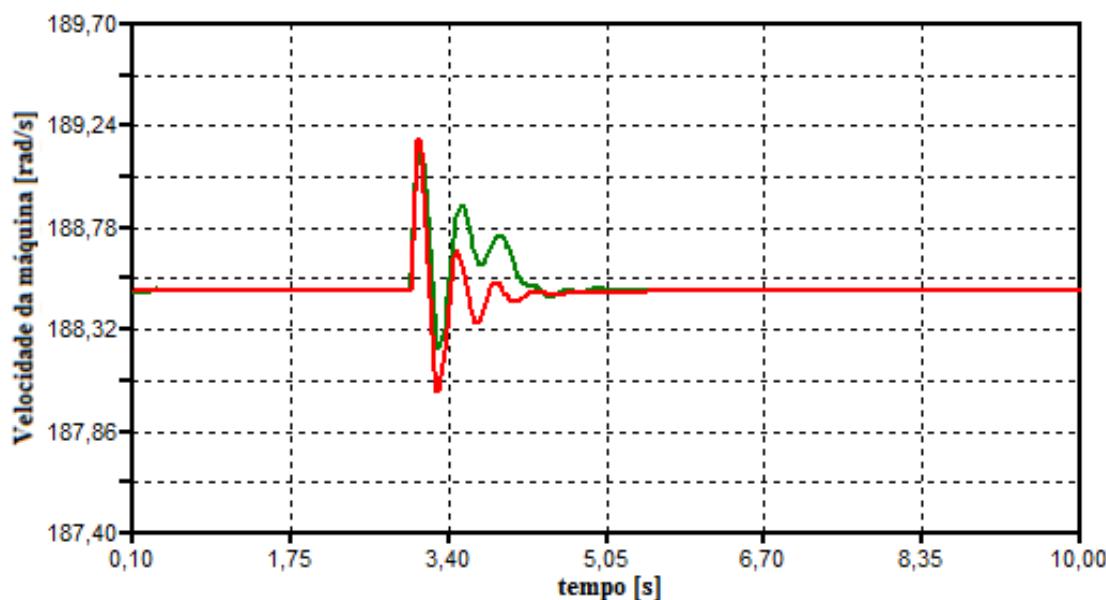


Figura 5.7: Velocidade do gerador do PI: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde)

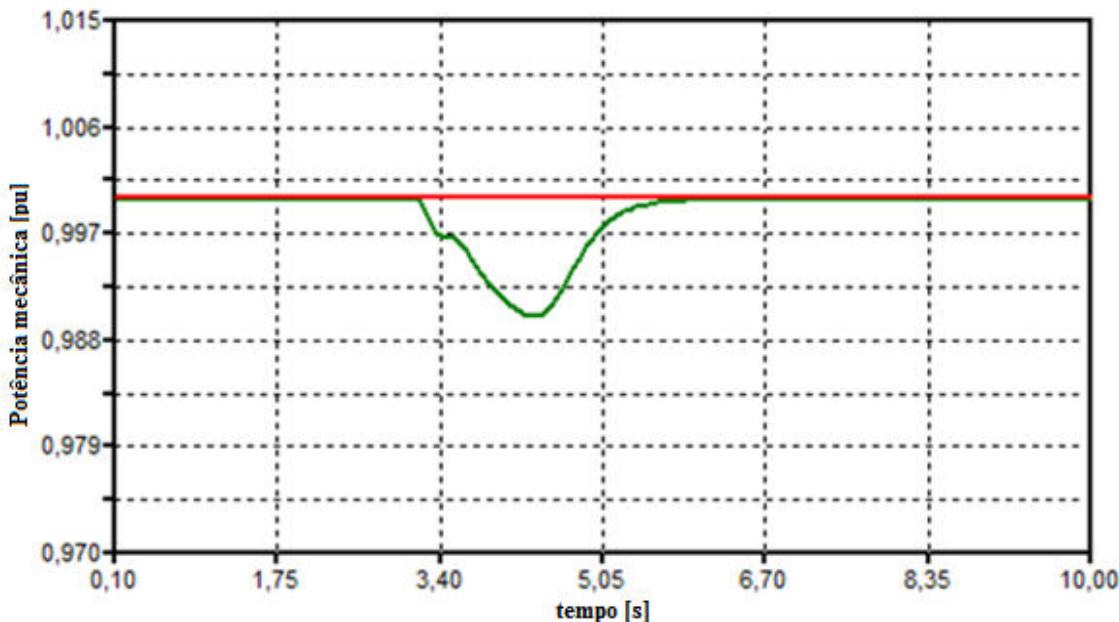


Figura 5.8: Potência mecânica do gerador do PI: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde)

Na Figura 5.9 é apresentado o comportamento do ângulo de potência do gerador do PI quando os reguladores da máquina estão ativados (em verde), e quando os mesmos estão desativados (em vermelho).

Inicialmente, será feita uma análise para a curva em vermelho. Após a rejeição da carga 4 do sistema, a tensão terminal (V_t) aumenta, de acordo com a Figura 5.3, e para manter a potência ativa constante o ângulo de potência deve diminuir, como é mostrado na Figura 5.9, estabilizando em $34,194^\circ$, mantendo a estabilidade do sistema.

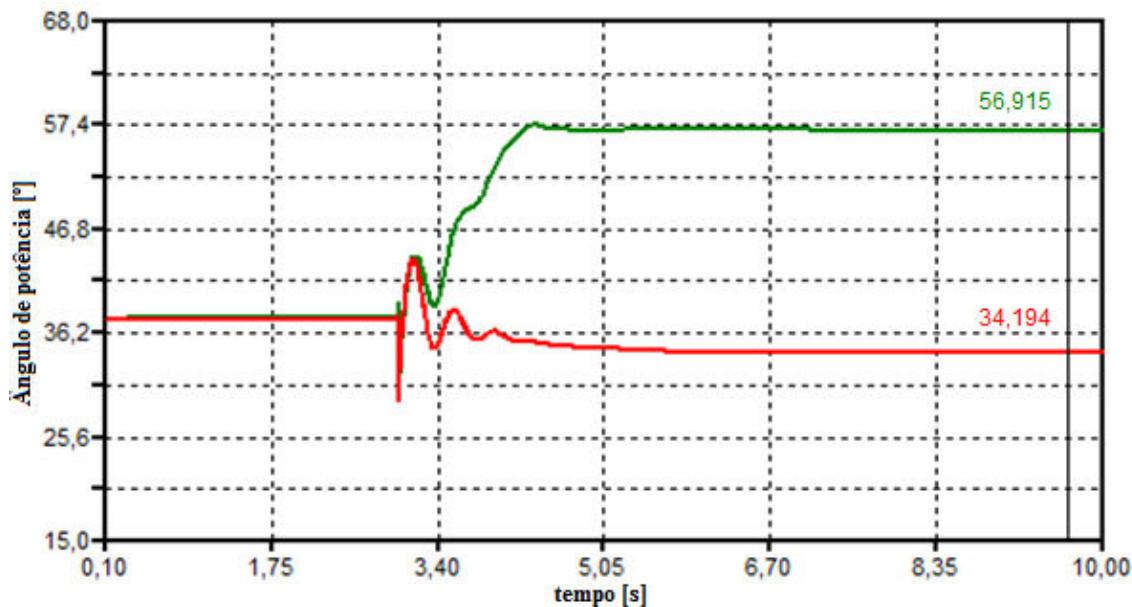


Figura 5.9: Ângulo de potência do gerador do PI: reguladores desativados (cor vermelha) e reguladores ativados (cor verde)

Conforme foi mostrado na Figura 5.4, o regulador de tensão atuou no sentido de diminuir a excitação do gerador e compensar o aumento de tensão detectado nos terminais da máquina. Sendo assim, sua ação manteve a tensão terminal (V_t) constante, como mostrado na Figura 5.3, mas a tensão interna do gerador (força eletromotriz - E_g) diminuiu, como um resultado direto da diminuição da corrente de excitação do gerador do PI. E, conforme mencionado anteriormente, após a rejeição de carga, a máquina síncrona mantém constante a sua geração de potência ativa. Portanto, em decorrência destes fatos, o gerador do PI aumentará o seu ângulo de potência, para continuar atendendo a sua demanda interna de energia elétrica e fornecer a mesma potência elétrica à rede de distribuição. O comportamento do ângulo de potência (em verde) é mostrado na Figura 5.9. Inicialmente, o valor deste ângulo é de $37,86^\circ$. Após a rejeição de carga, seu valor cai e depois se eleva veemente, apresenta uma pequena oscilação e estabiliza em torno de $56,9^\circ$, mantendo a estabilidade do sistema.

Observa-se que o crescimento do ângulo de potência tende a compensar o decréscimo da força eletromotriz (E_g), uma vez que a potência ativa é mantida constante. Nesta situação o gerador está consumindo reativo, visto que ele está

subexcitado. E, devido ao alto valor deste ângulo de operação, o gerador fica vulnerável a perda de sincronismo [11]. Nesta situação, para garantir a estabilidade do sistema poder-se-ia retirar do barramento do PAC um banco de capacitores de 3 [MVAr], próximo do equivalente a variação da potência reativa do sistema. Tal situação foi simulada e os resultados são apresentados na Tabela 5.2.

Analizando esta Tabela, nota-se que, após a retirada do banco de capacitores, o valor da tensão no PAC diminui, estabilizando em 1,0532 [pu]. No que se refere à magnitude da tensão terminal (V_t) do gerador do PI, esta foi mantida constante, devido a atuação do regulador de tensão. Verifica-se também, que após a retirada do banco de capacitores, a tensão interna do gerador (E_g) aumenta, como um resultado direto do aumento da tensão de excitação da máquina (E_f). E, para o gerador síncrono manter constante a sua geração de potência ativa, o seu ângulo de potência (δ) diminui, e estabiliza em 38,587°.

Tabela 5.2: Resultados obtidos da simulação, após a retirada do banco de capacitores

$V_{\text{barra}3}$ (PAC)	1,0532 [pu]
$V_{\text{barra}4}$ (PI)	1,001 [pu]
δ	38,587°
E_f	0,98 [pu]

Portanto, a presença da máquina síncrona do PI com os seus controles tiveram uma influência significativa no comportamento do sistema perante esta perturbação, no sentido de garantir o suprimento contínuo de energia, e ao mesmo tempo, respeitando os padrões de qualidade, que consistem basicamente na manutenção da frequência e tensão dentro dos limites adequados, conforme indicados na Tabela 5.1.

5.3 – ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO DO GERADOR

SÍNCRONO DO PI, COM ESTABILIZADOR, CONECTADO AO SISTEMA ELÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO

Controladores de amortecimento (estabilizadores) têm a finalidade de fornecer amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência em máquinas síncronas e no sistema elétrico, via sinal estabilizante aplicado no regulador de tensão do gerador.

Normalmente, a inércia dos geradores síncronos, de pequeno porte, utilizados em geração distribuída é baixa e os valores das reatâncias das linhas da rede de distribuição são elevados. Esses fatores, conforme já mencionados anteriormente, podem contribuir com o aparecimento de oscilações pouco amortecidas ao longo do tempo em variáveis elétricas e mecânicas (por exemplo: ângulo do rotor do gerador síncrono; e tensão e frequência da rede) dos sistemas com geração distribuída. Desta forma, o emprego dos estabilizadores, já utilizados nos sistemas de potência, podem melhorar o desempenho dinâmico de geradores síncronos operando nas redes de distribuição [3] e [12].

O propósito deste capítulo não é discutir detalhadamente técnicas e resultados de ajustes da malha de controle do estabilizador, mas sim, verificar o amortecimento adicional empregado por este para amortecer as oscilações das variáveis elétricas do gerador síncrono, com geração distribuída.

A estrutura clássica de um estabilizador e suas características foram abordadas no Capítulo III. Portanto, será empregado, para a análise sugerida, o modelo do estabilizador, mostrado na Figura 5.10, baseado na variação da velocidade ($\Delta\omega$) como sinal de entrada deste controlador.

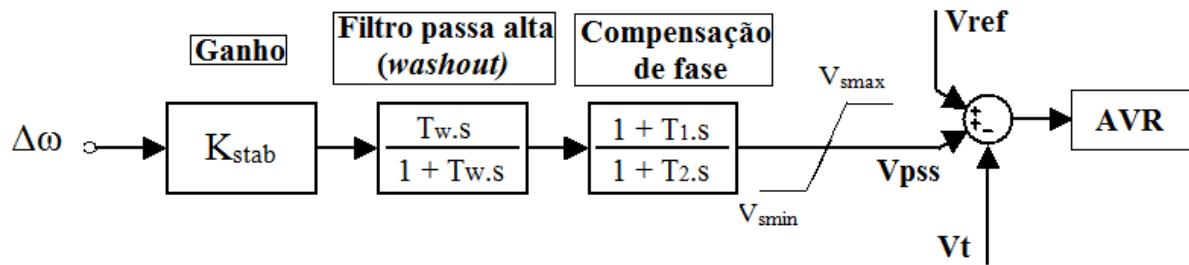


Figura 5.10: Estrutura de um estabilizador (Kundur)

Na Tabela 5.3 são mostrados os parâmetros de ajuste do estabilizador da Figura 5.10, segundo dados extraídos da referência [10].

Tabela 5.3: Valores dos parâmetros do PSS (Kundur) simulados no ATPDraw

K _{STAB} [pu]	T _w [s]	T ₁ [s]	T ₂ [s]	Limites [pu]
9,5	1,40	0,154	0,033	V _{smax} = 0,1 V _{smin} = -0,1

Para análise do controlador considerou o sistema elétrico analisado na seção anterior (Figura 5.1), mas agora, com a inclusão do estabilizador, conforme apresentado na Figura 5.11. Ressalta-se que nesta Figura o estabilizador foi implementado junto com o *AVR*, denominado de RT/PSS.

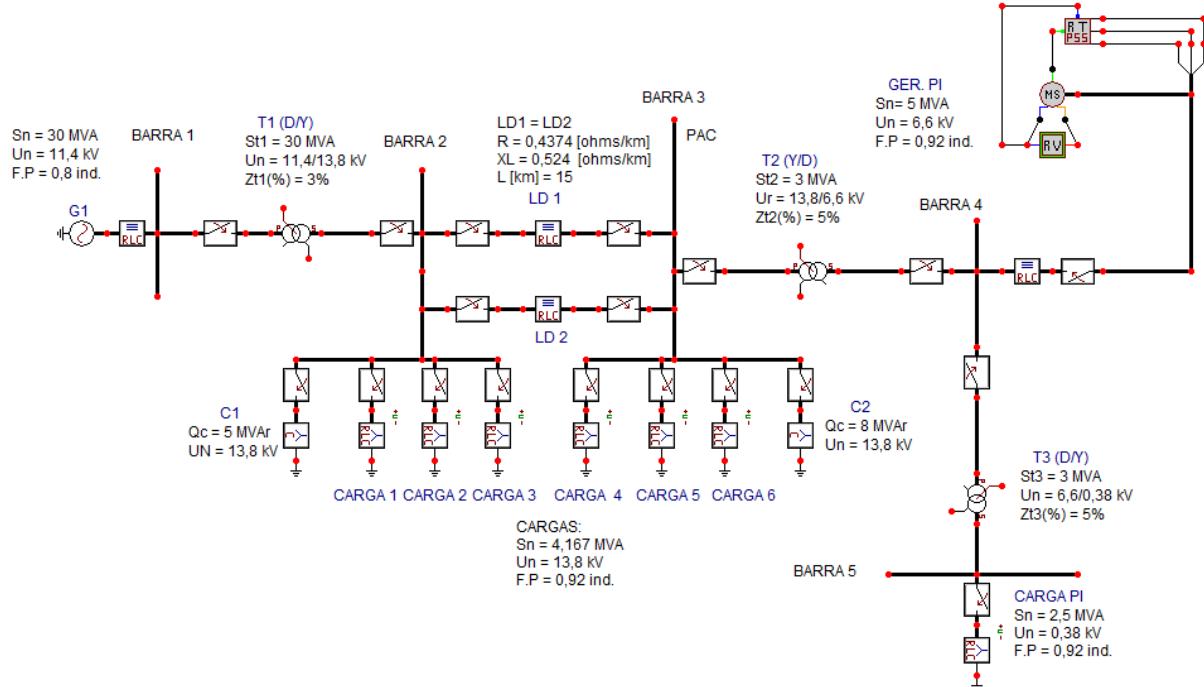
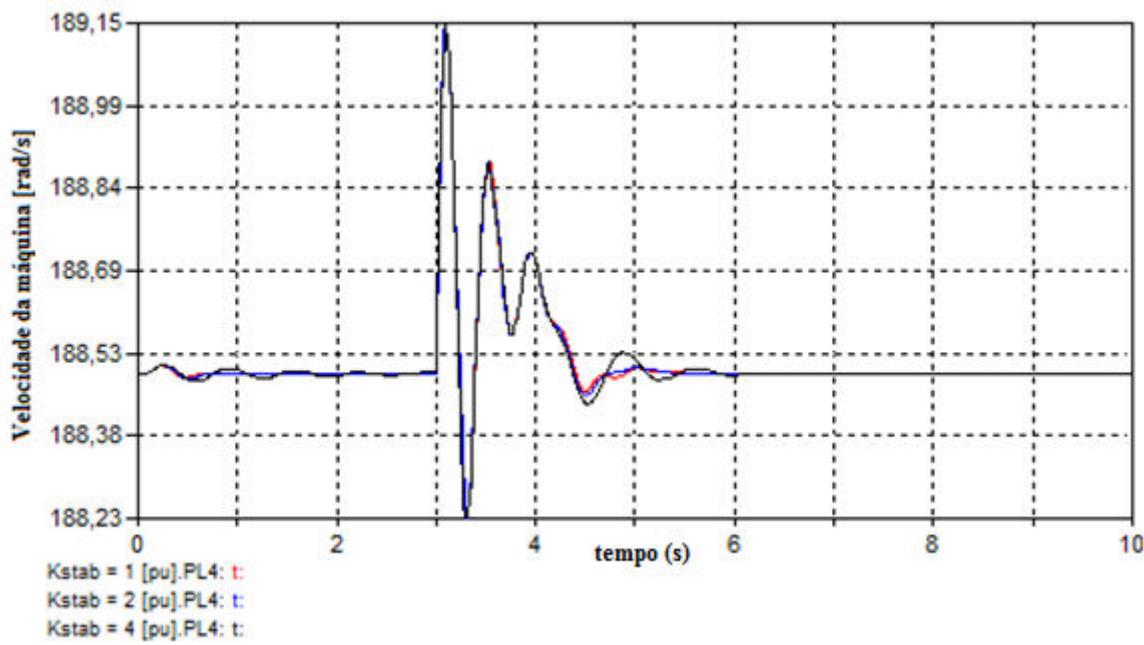


Figura 5.11: Sistema de distribuição conectado ao Produtor Independente de energia simulado no ATPDraw, com PSS

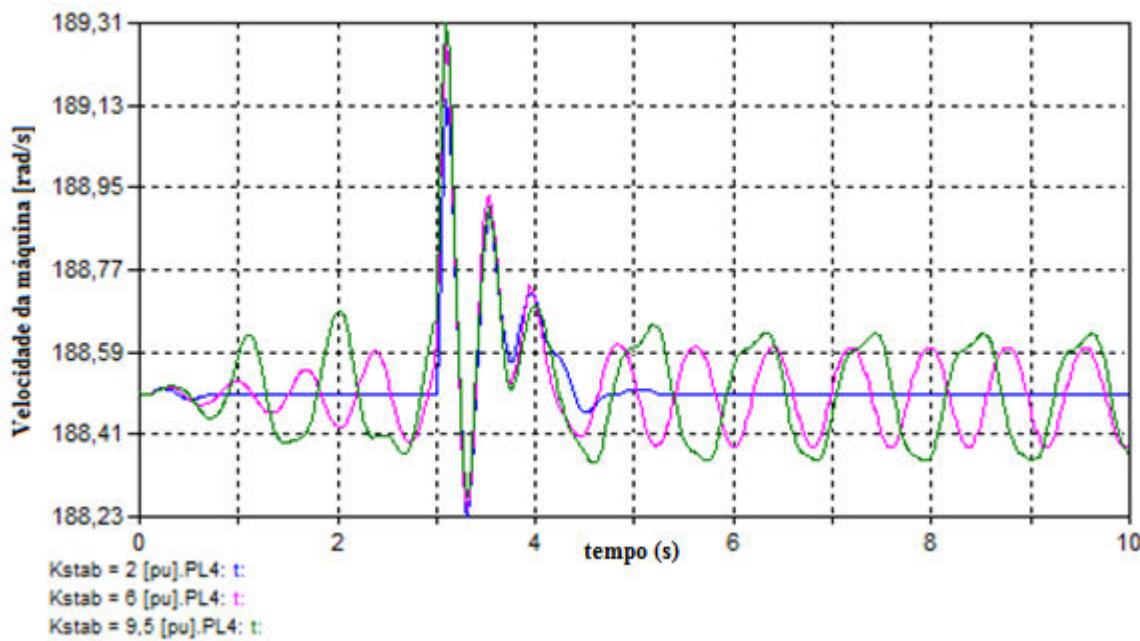
5.3.1 – SIMULAÇÃO DO ESTABILIZADOR APLICADO NO GERADOR DO PRODUTOR INDEPENDENTE DE ENERGIA

Para a análise do desempenho do estabilizador, foi aplicado no sistema da Figura 5.11 o mesmo tipo de distúrbio da seção 5.2, para fins de comparação de resultados, ou seja, a rejeição da carga 4 conectada na barra 3.

O ganho do controlador (K_{stab}) foi ajustado em diferentes valores, conforme apresentado nas Figuras 5.12 (a) e 5.12 (b), para que fosse possível analisar e comparar o comportamento transitório do sistema conforme o amortecimento das oscilações é variado em razão do aumento desse ganho. Os resultados das simulações feitas foram agrupados e apresentados em duas figuras, de acordo com K_{stab} , para melhor visualização e análise comparativa.



(a) Variação do ganho do estabilizador – $K_{STAB} = 1$, $K_{STAB} = 2$ e $K_{STAB} = 4$ [pu]



(b) Variação do ganho do estabilizador – $K_{STAB} = 2$, $K_{STAB} = 6$ e $K_{STAB} = 9,5$ [pu]
Figura 5.12: Comportamento da velocidade da máquina síncrona, para a variação de K_{STAB} , após a perturbação no sistema

É importante ressaltar que o valor do ganho de entrada do PSS, indicado na referência [10] é $K_{stab} = 9,5$ [pu]. No entanto, na simulação do sistema elétrico da Figura 5.11 empregou-se o valor de $K_{stab} = 2$ [pu], pois este se mostrou mais estável, durante a simulação envolvendo o sistema, do que os outros ganhos mostrados nas Figuras 5.12 (a) e 5.12 (b).

As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 mostram o comportamento transitório da máquina síncrona (velocidade, tensão terminal e potência mecânica gerada, respectivamente) com a inclusão do estabilizador em resposta a perda de carga 4 na barra 3 em $t = 3$ [s].

Na Figura 5.13 pode-se observar que, com exceção das duas primeiras oscilações, as amplitudes das oscilações da velocidade são menores e mais amortecidas com o estabilizador presente (cor preta) do que quando este não está operando (cor vermelha). Nota-se também que a unidade geradora tende a estabilizar mais rápido com o estabilizador operando, do que quando este está inoperante.

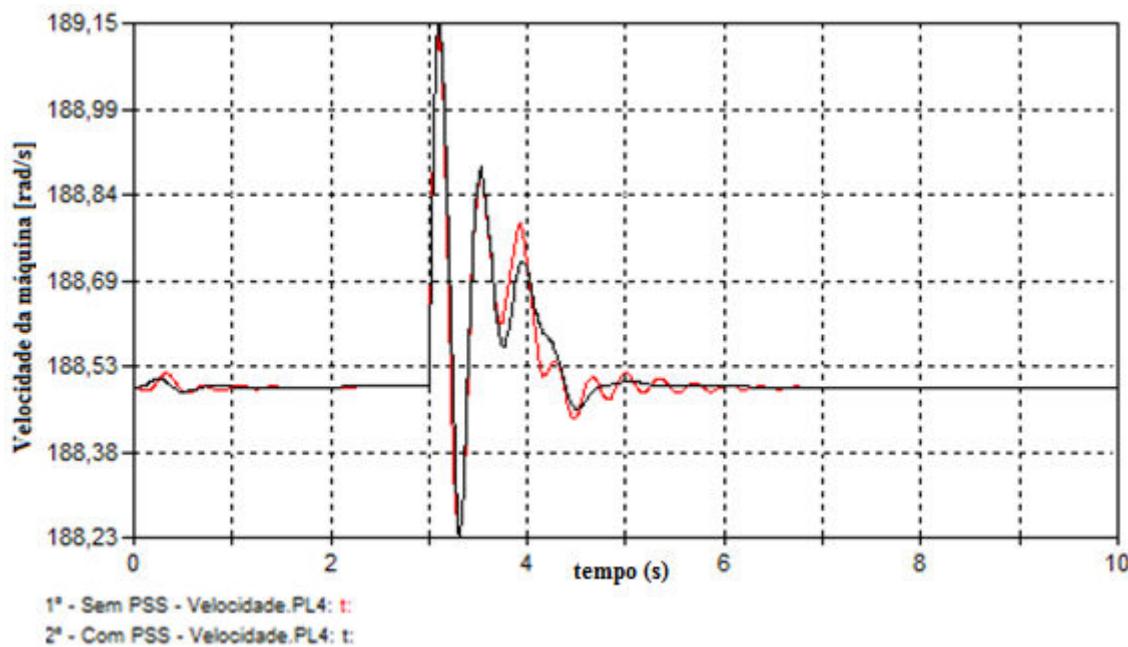


Figura 5.13: Resposta da velocidade do gerador do PI com a presença do estabilizador (curva preta) e quando este não está operando (curva vermelha)

A figura 5.14 mostra que a ação do controlador (curva preta) fez com que o limite da excursão mínima da oscilação de potência mecânica fosse menor do que quando este não esta operando (curva vermelha).

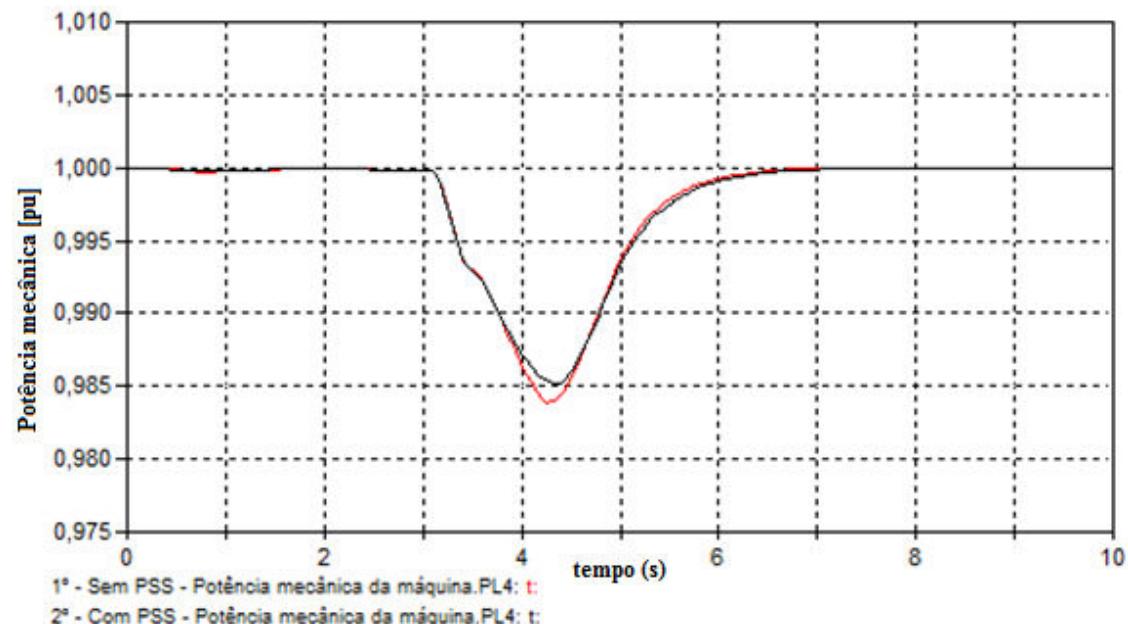


Figura 5.14: Resposta da potência mecânica do gerador do PI com a presença do estabilizador (curva preta) e quando este não está operando (curva vermelha)

No que se refere ao comportamento da tensão na barra de geração do PI, a Figura 5.15 mostra que o valor de pico da tensão atingido não se altera com a inserção do estabilizador, porém, nota-se um ligeiro amortecimento nas oscilações da tensão, atingindo um pouco mais rápido o regime permanente, do que quando o controlador está inoperante.

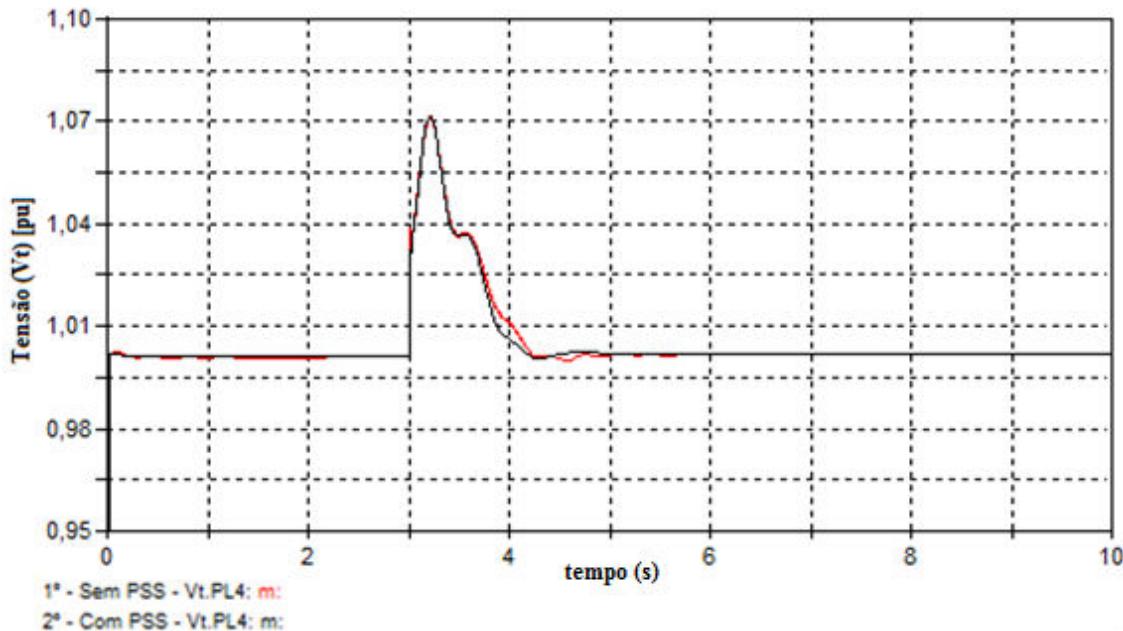


Figura 5.15: Resposta da tensão terminal do gerador do PI com a presença do estabilizador (curva preta) e quando este não está operando (curva vermelha)

Embora as oscilações das variáveis (tensão, velocidade e potência mecânica) não tenham sido expressivas para a solicitação de um amortecimento adicional, o estabilizador possibilitou um amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência das variáveis analisadas sem prejudicar a resposta do sistema durante o período transitório. Desta forma, deve haver um compromisso entre maximizar o amortecimento das oscilações e minimizar os efeitos da ação de controle na resposta da tensão terminal do gerador.

5.4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados das simulações, neste Capítulo, permitiram constatar o adequado desempenho da máquina do PI e de seus reguladores de tensão e velocidade, perante as solicitações que lhes foram impostas.

Algumas conclusões referentes à perturbação aplicada ao sistema elétrico com geração distribuída merecem destaque.

A presença dos reguladores do gerador do PI atenuou os efeitos de uma rejeição de carga no sistema da concessionária, contribuindo dessa forma, para uma melhoria no nível da magnitude da tensão na situação pós-perturbação.

A fim de sustentar a tensão na barra de geração, barra 4, o regulador de tensão atuou de forma eficiente, reduzindo a excitação da máquina para 0,5 pu. Decorrido o período transitório, o sistema atingiu o regime permanente com uma excitação de aproximadamente 0,73 [pu] a fim de manter a tensão na barra de geração em 1,0 [pu].

Desta forma, o regulador de tensão, do gerador do PI, reduz de forma eficiente e eficaz a excitação da máquina, contribuindo de forma veemente para o restabelecimento da tensão, na barra de geração, ao valor previamente estabelecido em seus controles.

O regulador de velocidade do gerador do PI não atuou de forma expressiva em virtude da pequena variação de velocidade de apenas 0,36% de seu valor nominal (188,5 [rad/s]). E, além disso, pode-se concluir que, o amortecimento total do sistema e o decréscimo de carga atendido pela Concessionária contribuíram com a estabilização da velocidade da máquina do PI em seu valor nominal (síncrono).

Portanto, de acordo com os resultados obtidos com a atuação dos reguladores da máquina, fica evidente a necessidade dos mesmos no gerador do produtor independente.

Conclui-se também, que após a rejeição de carga, através da análise do comportamento do ângulo de potência, houve a manutenção da estabilidade do gerador síncrono do PI com os seus reguladores. Porém, devido ao alto valor atingido por este ângulo, o gerador fica vulnerável a perda de sincronismo. Esse crescimento do ângulo de potência é devido à redução da excitação da máquina síncrona, sendo que tal alteração pode extrapolar o limite de estabilidade. Se isto acontecer, a retirada de um banco de capacitores, próximo do equivalente a variação da potência reativa do sistema, reduzirá o ângulo de potência, conforme observado nos resultados apresentados.

Foi proposta a utilização de um estabilizador, via sinal estabilizante aplicado no regulador automático de tensão da máquina, para fornecer amortecimento adicional às oscilações de baixa frequência em algumas variáveis do gerador síncrono (por exemplo: tensão terminal da máquina, velocidade e potência mecânica) em sistemas com geração distribuída.

Com relação ao emprego de um estabilizador, pode-se concluir que, embora as oscilações das variáveis (tensão, velocidade e potência mecânica) não tenham sido tão expressivas para a solicitação de um amortecimento adicional, este estudo permitiu analisar o emprego de estabilizadores para melhorar o comportamento dinâmico de geradores síncronos operando nos sistemas elétricos de distribuição, bem como contribuindo também com um amortecimento adicional as variáveis elétricas da rede.

Convém salientar que o desempenho do estabilizador pode ser melhorado, com técnicas de ajustes dos parâmetros dos estabilizadores. Contudo, o foco desta dissertação não é desenvolver um projeto de controladores de amortecimento e nem abordar métodos computacionais para o ajuste dos mesmos, assim, fica aqui uma sugestão para trabalhos futuros.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Não obstante os comentários próprios e considerações feitas ao longo de cada capítulo considera-se importante neste momento, evidenciar os principais resultados e conclusões obtidas dos estudos realizados ao longo desta dissertação proporcionando uma visão geral e sucinta desta pesquisa.

O Capítulo I foi direcionado a uma contextualização do tema central desta pesquisa, com destaque a apresentação de uma síntese dos principais documentos bibliográficos, e a apresentação do objetivo desta dissertação, bem como as metas a serem cumpridas para atingi-lo. Uma vez realizada tais tarefas, foi também estabelecida à estrutura da pesquisa que possibilitou a presente dissertação.

No Capítulo II foi realizada uma breve descrição do funcionamento do gerador síncrono, bem como a apresentação das principais equações elétricas e mecânicas utilizadas para a modelagem da máquina. Foi modelado um novo ícone para o gerador com as mesmas características da máquina síncrona do *ATPDraw*, porém, disponibilizando apenas os nós necessários para os seus controles e para o fornecimento de energia elétrica. Além disso, foi desenvolvido e implementado um dispositivo para determinar o ângulo de potência do gerador, baseado nas expressões de potências ativa e reativa. Desta

forma, verificou-se o desempenho deste dispositivo, utilizando-se um circuito simples, modelado no *ATPDraw*, composto por uma fonte de tensão (representando a tensão interna do gerador (E_g)), em série com a reatância síncrona da máquina e com a resistência de armadura. Dos resultados encontrados através de simulações computacionais, foi possível comprovar que o dispositivo determina o ângulo de potência do gerador de forma eficiente levando em conta o sentido dos fluxos de potências ativa e reativa. Sendo assim, este dispositivo pode ser utilizado em estudos para analisar a estabilidade angular de um sistema após uma perturbação. É importante salientar que o ângulo de potência é determinado com base nas equações de potência no domínio da frequência, as quais não apresentam precisão no período transitório. Contudo, para estudos de dinâmica das máquinas síncronas, cujo tempo de resposta é mais elevado, os resultados obtidos com essas equações são bastante satisfatórios. Portanto, as duas primeiras metas desta dissertação foram cumpridas.

O Capítulo III foi dedicado a um breve estudo sobre as características e mecanismos de atuação dos reguladores de tensão e de velocidade e do estabilizador (*PSS*), bem como a modelagem e implementação dos mesmos no *software ATPDraw*. Utilizando um sistema simples e hipotético, modelado no programa citado, em que dois geradores síncronos, associados aos seus reguladores, conectados em paralelo e fornecendo energia elétrica a duas cargas, foi possível realizar ajuste de parâmetros como, no caso estudado, a “queda de velocidade” (R), e por meio de simulações computacionais, analisou-se essa característica dos reguladores de velocidade. Verificou-se também, que os reguladores de tensão e de velocidade atuaram de forma eficaz e adequada, no intuito de manterem, respectivamente, a tensão terminal e a velocidade da máquina dentro de limites pré-estabelecidos. Deste modo, validaram-se os modelos desenvolvidos destes componentes de controle essenciais ao estudo da geração distribuída. Ressalta-se a praticidade oferecida ao usuário na utilização

dos reguladores modelados no *ATPDraw* para estudos na área de máquinas síncronas, por meio de simulações computacionais, aprimorando o ensino e o conhecimento adquirido por estudantes e pesquisadores. Portanto, a terceira meta desta dissertação foi cumprida.

No Capítulo IV foram apresentados procedimentos e técnicas para a análise dos parâmetros K_a e K_f dos sistemas de controle de tensão e do parâmetro T_4 do sistema de controle da velocidade, com o intuito de encontrar os valores mais adequados, dentro de uma faixa típica, para estes parâmetros analisados. Desta forma, investigaram-se a influência destes parâmetros sobre o desempenho de um gerador síncrono conectado tanto em sistemas elétricos multimáquinas quanto em redes de distribuição com geração distribuída. Deste modo, com base nas simulações realizadas, sugerem-se os valores mais adequados a serem adotados para os parâmetros estudados. Para as máquinas síncronas com geração distribuída, normalmente com baixos valores de inércia, sugere-se um valor de 400 [pu] para o ganho K_a e um valor de 0,03 [pu] para o ganho K_f do diagrama de blocos do regulador de tensão, considerando que estes valores proporcionaram a resposta do sistema um tempo de assentamento pequeno e um comportamento menos oscilatório. Já para um sistema de potência com multimáquinas, de acordo com as simulações realizadas, sugere-se analisar os ganhos K_a e K_f do diagrama de blocos do regulador de tensão para o gerador de maior inércia, e adotar os valores encontrados para os geradores síncronos. E depois, se necessário, realizar alguns ajustes finos nos ganhos dos reguladores de tensão dos outros geradores do sistema de menor inércia com base nas análises aqui apresentadas. Para a constante de tempo T_4 dos reguladores de velocidade dos geradores com turbina hidráulica, sugere-se adotar o valor de 0,15 [s], pois este permitiu uma resposta mais rápida e um tempo de assentamento menor a uma variação da velocidade. Portanto, conclui-se que os procedimentos e técnicas aqui utilizados são de grande valia para a modelagem correta e eficiente dos reguladores da máquina síncrona em

condições isoladas ou em sistemas multimáquinas. Destaca-se ainda a praticidade da representação desses reguladores no ATPDraw facilitando ao usuário o ajuste de parâmetros para se obter melhores condições de operação.

Já o Capítulo V teve como objetivo analisar o desempenho dinâmico do gerador síncrono de um Produtor Independente de energia (PI) conectado ao Sistema Elétrico de Distribuição, após uma perturbação no sistema. Foram avaliados aspectos da qualidade da energia elétrica (magnitude da tensão) e o comportamento dos controles de velocidade e de tensão do gerador. Desta forma, considerando as simulações apresentadas, bem como os comentários destacados ao final deste capítulo, chegou-se a conclusão de que, a presença do gerador do produtor independente com os seus controles teve uma influência significativa no comportamento do sistema perante a perturbação aplicada, no sentido de contribuir para uma melhoria no nível da magnitude da tensão na situação pós-perturbação. A ação do regulador de tensão não somente manteve a tensão terminal da máquina síncrona (gerador do PI) dentro de limites pré-definidos, como também auxiliou no restabelecimento do sistema, melhorando a estabilidade global do mesmo. Quanto ao regulador de velocidade do gerador do produtor independente, no caso analisado, verificou-se que o mesmo atuou de forma pouco expressiva, devido à pequena variação de velocidade. Com o dispositivo desenvolvido, no Capítulo 2, para determinar o ângulo de potência analisou-se a estabilidade angular do gerador síncrono do PI após a rejeição de carga. Observou-se que o crescimento do ângulo de potência tendeu a compensar à redução da excitação da máquina síncrona, sendo que tal alteração poderia extrapolar o limite de estabilidade. Nesta situação, para garantir a estabilidade do sistema, foi retirado um banco de capacitores, o que permitiu a redução do ângulo de potência, conforme observado nos resultados apresentados. Verificou-se também o emprego de estabilizadores em geradores independentes de energia operando nos sistemas elétricos de distribuição. Desta forma, este controlador possibilitou um amortecimento adicional às oscilações

de baixa frequência das variáveis analisadas (tensão, velocidade e potência mecânica).

Sendo assim, é essencial analisar o impacto que a inclusão de geradores distribuídos pode causar ao sistema, de modo que este possa atender consumidores com um padrão adequado de qualidade de energia. Portanto, é importante ressaltar que a modelagem proposta neste trabalho da máquina síncrona e de seus controles, associados aos procedimentos de ajustes dos seus parâmetros, se mostraram fatores essenciais para uma simulação computacional eficaz para o estudo de sistemas com geração distribuída, e para aplicações acadêmicas no ensino de sistemas de geração com os seus respectivos reguladores.

Neste contexto, sugere-se o desenvolvimento de temas de pesquisa que irão contribuir para o avanço dos assuntos discutidos nesta dissertação, conforme abaixo esclarecido:

- Maiores estudos sobre o projeto de controladores para o amortecimento de oscilações em sistemas elétricos com geração distribuída, apresentando técnicas de ajuste para os mesmos;
- Análises comparativas entre geradores síncronos e geradores de indução para aplicação em sistemas de geração distribuída, utilizando o *ATPDraw*;
- Avaliação do sistema de excitação de máquinas síncronas atuando como um regulador de fator de potência, e análise comparativa entre este e o regulador de tensão;
- Ajustes especiais de reguladores de tensão e velocidade para aplicações específicas relacionadas à geração distribuída, levando em consideração critérios de estabilidade da máquina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LORA, E. E.; Haddad, J.; et al ; - “*Geração Distribuída: Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais*”, Editora Interciência Ltda, 2006.
- [2] ARCKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SODER, L.; - “*What is Distributed Generation?*” International Symposium on Distributed Generations: Power System and Market Aspects. Estocolmo, Suécia, Jun, 2001.
- [3] KUIAVA, R.; - “*Projeto de Controladores para o Amortecimento de Oscilações em Sistemas Elétricos com Geração Distribuída*”, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2010.
- [4] GONÇALVES, L. F.; - “*Contribuições para Estudo Teórico e Experimental de Sistemas de Geração Distribuída*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- [5] Instituto Nacional de Eficiência Energética, - “*Biomassa e Energia*”, Disponível em: http://www.inee.org.br/biomassa_sobre.asp?Cat=biomassa. Acesso em: 22/01/2013.
- [6] BRASIL. Decreto Nº 2003, de 10 de setembro de 1996, - “*Regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor e dá outras providências*”. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2003.htm. Acesso em: 03/02/2013.
- [7] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D.; - “*Máquinas Elétricas*”. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [8] JORDAO, R. G.; - “*Máquinas Síncronas*”, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1980.

- [9] ANDERSON , P. M.; FOUAD, A.A., - “**Power System Control and Stability**”, Second Edition. Iowa, IEEE Press, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2003.
- [10] KUNDUR, P.; - “**Power Systems Stability and Control**”, McGraw-Hill, EPRI, Power Systems Engineering Series, New York, 1994.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] CALDEIRA, N.S.; - “**Aplicação de Estabilizadores de Sistemas de Potência em Reguladores de velocidade e turbinas**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Itajubá, 2009.
- [14] IEEE Committee Report - “**Computer Representation of Excitation Systems**” –IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems – Vol. PAS-87, pp.1460-1464, Jun/1968.
- [15] 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.
- [16] DEMELLO, F. P.; CONCORDIA, C; - “**Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control**”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS – 88(4), 1969.
- [17] IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. IEEE 421.5:2005. - “**IEEE Recommended practice for excitation system models for power system stability studies**”. Nova Iorque, Estados Unidos da América, 2005.

- [18] MOTTA, D. S.; - “*Técnicas de ajuste de Estabilizadores do Sistema de Potência*”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- [19] NISE, N. S; - “*Engenharia de Sistemas de Controle*”, 3^a Edição- LTC Editora, 2002.
- [20] MOURA, F. A. M., - “*Geração distribuída - impactos e contribuições para a Qualidade da Energia Elétrica e Dinâmica dos Sistemas Elétricos - uma Análise através do ATP-EMTP*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- [21] Long Island Power Authority - LIPA, - “*Control and Protection Requirements for Independent Power Producers, Primary Distribution Interconnections*”, Disponível em: http://www.nyiso.com/public/webdocs/services/planning/ferc_form_715/part4/lipa_interconnection_guide.pdf. Acesso em: 22/09/2012.
- [22] RULE BOOK- Alternative Transients Program (ATP) - “**DATA BASE MODULE to modularize for \$INCLUDE arguments**”, RB–19E, Capítulo: XIX – F, 2002.
- [23] RULE BOOK- Alternative Transients Program (ATP) - “**TACS elements and card formats**”, RB – 03 A, Capítulo: III - E, 2002.
- [24] RULE BOOK- Alternative Transients Program (ATP) - “**MODELS: more powerfull, flexible, and newer than TACS**”, RULE BOOK, RB – 03 F, Capítulo: III – F, 2002.
- [25] PRODIST - “*Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8, Qualidade de Energia Elétrica*”, 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idarea=82>. Acesso em: 22/09/2012.
- [26] BOLLEN, M. H.; - “*Understanding Power Quality Problems: Voltage Sag and Interruptions*”, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.

ANEXO

ALGORITMOS IMPLEMENTADOS NO ATP

I – ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA REPRESENTAR O NOVO ÍCONE DA MÁQUINA SÍNCRONA NO ATPDRAW

```
BEGIN NEW DATA CASE NOSORT
DATA BASE MODULE
C ****
CUNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CDESENVOLVIDO POR LARISSA MARQUES PERES E MARCELO LYNCE R. CHAVES
CMODELO DO NOVO ÍCONE DESENVOLVIDO PARA A MÁQUINA SÍNCRONA
C ****
$ERASE
ARG,BARRA,POTMEC,SPEED1,VFREGT
ARG,VOLTTB_____,FREQUE_____,ANGULO_____,NP_____
ARG,SMOVTB_____,SMOVTQ_____,POTMVA_____,TENNKV_____
ARG,AGLINE_____,RESTARRAAR,XL_____,XD_____,XQ_____
ARG,XDD_____,XQQ_____,XDDD_____,XQQQ_____,TDOP_____
ARG,TQOP_____,TDOPP_____,TQOPP_____,XO_____,XCAN_____
NUM,VOLTTB_____,FREQUE_____,ANGULO_____,NP_____
NUM,SMOVTB_____,SMOVTQ_____,POTMVA_____,TENNKV_____
NUM,AGLINE_____,RESTARRAAR,XL_____,XD_____,XQ_____
NUM,XDD_____,XQQ_____,XDDD_____,XQQQ_____,TDOP_____
NUM,TQOP_____,TDOPP_____,TQOPP_____,XO_____,XCAN_____
C -----DADOS ELETRICOS DA MAQUINA SÍNCRONA-----
/SOURCE
59BARAA VOLTTB_____,FREQUE_____,ANGULO_____
    BARRAB
    BARRAC
C -----DADOS DA MAQUINA SÍNCRONA-----
PARAMETER FITTING      2.
  1 1NP_SMOVTB_____,SMOVTQ_____,POTMVA_____,TENNKV_____,AGLINE_____
BLANK
RESTARRAARXL_____,XD_____,XQ_____,XDD_____,XQQ_____,XDDD_____,XQQQ_____
TDOP_____,TQOP_____,TDOPP_____,TQOPP_____,XO_____,XCAN_____
C -----DADOS MECANICOS DA MAQUINA SÍNCRONA-----
  1      EXTRS_____,HICO_____,DSR_____,DSM_____
BLANK
C -----SAIDAS DESEJADAS-----
  11
  21
  31
  41
  51
BLANK
72POTMEC          1
74SPEED1
71VFREGT
    FINISH
/TACS
33SPEED1
33POTMEC
33FREQHZ
```

```
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH,MAQSIN.LIB
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
$EOF
```

II – ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA O DISPOSITIVO DESENVOLVIDO PARA DETERMINAR O ÂNGULO DE POTÊNCIA

```
MODEL disposit
COMMENT -- comentários

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA
DESENVOLVIDO POR LARISSA MARQUES PERES E MARCELO LYNCE R. CHAVES
DISPOSITIVO DESENVOLVIDO PARA DETERMINAR O ÂNGULO DE POTÊNCIA
Medidor de tensão e corrente rms;
ALÉM DO ÂNGULO DE POTÊNCIA, OUTRAS VARIÁVEIS DETERMINADAS EM SUA SAÍDA:
potência ativa; potência aparente e reativa trifásicas;
fator de potência; ângulo do fator de potência; tensão gerada (fem).

ENDCOMMENT

INPUT -- grandezas de entrada

va      -- Tensão A no nó no qual o medidor está conectado (fase terra ATP) [V]
vb      -- Tensão B no nó no qual o medidor está conectado (fase terra ATP) [V]
vc      -- Tensão C no nó no qual o medidor está conectado (fase terra ATP) [V]
ia      -- corrente A no nó (este nó deve pertencer a uma chave) [A].
ib      -- corrente B no nó (este nó deve pertencer a uma chave) [A].
ic      -- corrente C no nó (este nó deve pertencer a uma chave) [A].

-- OUTPUT -- Grandezas de saída para serem utilizadas na rede do ATP

DATA   -- dados de entrada
freq {DFLT: 60} -- Hz
Sn {DFLT: 100} -- Potência Nominal trifásica [MVA]
Un {DFLT: 69} -- tensão nominal (linha) [kV]
xd {DFLT: 1.2} --reatância de eixo direto [pu]
xq {DFLT: 0.8} --reatância de eixo em quadratura [pu]
ra {DFLT: 0.004} --resistência da armadura [pu]

-- CONST -- constantes utilizadas no modelo

VAR
S       -- potência aparente [VA]
S1     -- potência aparente [VA], calculada de outra
maneira:S1:=sqrt((P*P)+(Q*Q))
P       -- potência ativa [W]
Pa     -- potência ativa A [W]
Pb     -- potência ativa B [W]
Pc     -- potência ativa C [W]
Pt     -- potência ativa T [W]
Pnovo  -- potência ativa [W]
Q       -- potência reativa [VAr]
Qa     -- potência reativa A [VAr]
Qb     -- potência reativa B [VAr]
Qc     -- potência reativa C [VAr]
Qt     -- potência reativa T [VAr]
varms -- valor rms da tensão A [V]
vbrms -- valor rms da tensão B [V]
vcrms -- valor rms da tensão C [V]
vrms  -- valor rms da tensão t [V]
vnovo  -- valor rms da tensão [W]
iarms  -- valor rms da corrente A [A]
ibrms  -- valor rms da corrente B [A]
icrms  -- valor rms da corrente C [A]
fp    -- fator de potência
va90  -- valor instantâneo da tensão A defasada de 90°
vb90  -- valor instantâneo da tensão B defasada de 90°
vc90  -- valor instantâneo da tensão C defasada de 90°
vaant -- valor anterior da tensão A
vbant -- valor anterior da tensão B
vcant -- valor anterior da tensão C
va2   -- valor instantâneo da tensão ao quadrado A
vb2   -- valor instantâneo da tensão ao quadrado B
vc2   -- valor instantâneo da tensão ao quadrado C
```

```

ia2      -- valor instantâneo da corrente ao quadrado A
ib2      -- valor instantâneo da corrente ao quadrado B
ic2      -- valor instantâneo da corrente ao quadrado C
vaia     -- potência aparente instatânea ( $va^*ia$ )
vbib     -- potência aparente instatânea ( $vb^*ib$ )
vcic     -- potência aparente instatânea ( $vc^*ic$ )
iva2     -- integral de  $va^2$ 
ivb2     -- integral de  $vb^2$ 
ivc2     -- integral de  $vc^2$ 
ija2     -- integral de  $ia^2$ 
iib2     -- integral de  $ib^2$ 
iic2     -- integral de  $ic^2$ 
ivaia    -- integral de  $vaia$ 
ivbib   -- integral de  $vbib$ 
ivcic   -- integral de  $vcic$ 
    iva90ia  -- integral de  $va90ia$ 
    ivb90ib  -- integral de  $vb90ib$ 
    ivc90ic  -- integral de  $vc90ic$ 
    va90ia   -- potência aparente instatânea ( $va90*ia$ )
    vb90ib   -- potência aparente instatânea ( $vb90*ib$ )
delta    -- ângulo de potência [graus]
delta1   -- ângulo de potência [graus], considerando a resistência de armadura
Eg       -- tensão de excitação da máquina (fem)
A        -- parâmetro
B        -- parâmetro
C        -- parâmetro
D        -- parâmetro
E        -- parâmetro
xd1      -- reatância de eixo direto [ohms]
xq1      -- reatância de eixo em quadratura [ohms]
teta     -- angulo do fator de potência [radianos]
total    -- angulo do fator de potência [graus], considerando a resistência de
armadura
    vbarra  -- valor pu da tensão [pu]
-- angfp   -- angulo do fator de potência [graus]

```

TIMESTEP MIN: 1e-5

DELAY

```

CELLS(iva2):1/freq/timestep +1
CELLS(ivb2):1/freq/timestep +1
CELLS(ivc2):1/freq/timestep +1
CELLS(jia2):1/freq/timestep +1
CELLS(jib2):1/freq/timestep +1
CELLS(jic2):1/freq/timestep +1
CELLS(ivaia):1/freq/timestep +1
CELLS(ivbib):1/freq/timestep +1
CELLS(ivcic):1/freq/timestep +1
    CELLS(iva90ia):1/freq/timestep
    CELLS(ivb90ib):1/freq/timestep
    CELLS(ivc90ic):1/freq/timestep

```

-- FUNCTION -- funções utilizadas no modelo

-- HISTORY -- histórico das variáveis

INIT -- condições iniciais das variáveis;

```

delta:=0
delta1:=0
Eg:=0
va90:=0
vb90:=0
vc90:=0
vaant:=0
vbant:=0
vcant:=0
S:=0
S1:=0
P:=0
Pnovo:=0
Q:=0
fp:=0
integral(va2):=0
integral(vb2):=0
integral(vc2):=0
integral(ia2):=0
integral(ib2):=0
integral(ic2):=0
integral(vaia):=0
integral(vbib):=0
histdef(iva2):=0
histdef(ivb2):=0
histdef(ivc2):=0
histdef(jia2):=0

```

```

histdef(jib2):=0
histdef(jic2):=0
histdef(vaia):=0
histdef(ivbib):=0
histdef(ivcic):=0
    histdef(iva90ia):=0
    histdef(ivb90ib):=0
    histdef(ivc90ic):=0
histdef(integral(va2)):=0
histdef(integral(vb2)):=0
histdef(integral(vc2)):=0
histdef(integral(ia2)):=0
histdef(integral(ib2)):=0
histdef(integral(ic2)):=0
histdef(integral(vaia)):=0
histdef(integral(vb90ib)):=0
histdef(integral(vc90ic)):=0
histdef(delta):=0
histdef(delta1):=0
histdef(A):=1
histdef(B):=1
histdef(C):=1
histdef(Eg):=1
period:=recip(freq)
ENDINIT

EXEC
-- *****
-- Cálculos iniciais
-- *****

xd1:=xd*((Un)**2/Sn)
xq1:=xq*((Un)**2/Sn)
ra1:=ra*((Un)**2/Sn)
vaant:=va
vbant:=vb
vcant:=vc

if t > timestep then
    va90:= ((va-prevval(vaant))/timestep)*(-1/(2*pi*freq))
    vb90:= ((vb-prevval(vbant))/timestep)*(-1/(2*pi*freq))
    vc90:= ((vc-prevval(vcant))/timestep)*(-1/(2*pi*freq))
endif

va90ia:=va90*ja
vb90ib:=vb90*ib
vc90ic:=vc90*ic
va2:=va*va
vb2:=vb*vb
vc2:=vc*vc
ia2:=ia*ia
ib2:=ib*ib
ic2:=ic*ic
vaia:=va*ia
vbib:=vb*ib
vcic:=vc*ic
iva2:=integral(va2)
ivb2:=integral(vb2)
ivc2:=integral(vc2)
ija2:=integral(ia2)
iib2:=integral(ib2)
iic2:=integral(ic2)
ivaiia:=integral(vaia)
ivbib:=integral(vb90ib)
ivcic:=integral(vc90ic)
    iva90ia:=integral(iva90ia)
    ivb90ib:=integral(ivb90ib)
    ivc90ic:=integral(ivc90ic)

-- *****
-- Valor rms da tensão e corrente
-- *****

varms:=sqrt((iva2-delay(iva2,period))/period)
vbrms:=sqrt((ivb2-delay(ivb2,period))/period)
vcrms:=sqrt((ivc2-delay(ivc2,period))/period)
vrms:=((varms+vbrms+vcrms)/3)
iarms:=sqrt((ija2-delay(jia2,period))/period)
ibrms:=sqrt((iib2-delay(iib2,period))/period)
    
```

```

icrms:=sqrt((iic2-delay(iic2,period))/period)
irms:=((iarms+ibrms+icrms)/3)

-- *****
-- Potência aparente
-- *****

S:=vrms*irms

-- *****
-- Potência Ativa
-- *****

Pa:=(ivaia-delay(ivaia,period))/period
Pb:=(ivbib-delay(ivbib,period))/period
Pc:=(ivcic-delay(ivcic,period))/period
Pt:=(Pa+Pb+Pc)
P:=(Pa+Pb+Pc)/3

if P >= S then
    P:=S

ENDIF
-- *****
-- Potência Reativa
-- *****

Qa:=(iva90ia-delay(iva90ia,period))/period
Qb:=(ivb90ib-delay(ivb90ib,period))/period
Qc:=(ivc90ic-delay(ivc90ic,period))/period
Qt:=(Qa+Qb+Qc)
Q:=(Qa+Qb+Qc)/3
S1:=sqrt((Pt*Pt)+(Qt*Qt))

-- *****
-- Fator de Potência e ANGULO DO FATOR DE POTÊNCIA
-- *****

if P > 0 then

    teta:=atan(Q/P)
    fp:= cos(teta)
    D:=(vrms+r1*irms*cos(teta))*(vrms+r1*irms*cos(teta))
    E:=(r1*irms*sin(teta))*(r1*irms*sin(teta))
    vnovo:=sqrt(D+E)
    total1:=atan((r1*irms*sin(teta))/(vrms+r1*irms*cos(teta)))
    Pnovo:=(P+r1*irms*irms)
    cada:=atan((xq1*irms*cos(teta)-r1*irms*sin(teta))/
    (vrms+r1*irms*cos(teta)+xq1*irms*sin(teta)))
    -- *****
    -- ANGULO DE CARGA (delta) E TENSÃO GERADA (Eg)
    -- *****

COMBINE ITERATE {10} AS caso_1
A:=vnovo*vnovo*((sin(delta1)**2/xq1)+(cos(delta1)**2/xd1))
B:=(vnovo*Eg/xd1)
C:=(B+vnovo*vnovo*(1/xq1-1/xd1)*((Q+A)/B))
delta1:=atan((Pnovo*B)/((Q+A)*C))
Eg:=((Q+A)/(vnovo*COS(delta1)))*xd1

ENDCOMBINE

delta1:=delta1*180/pi
total1:=total1*180/pi
delta:=delta1-total1
vbarra:=vrms/(132790.562)

ENDIF

if P < 0 then

    teta:=atan(Q/P)
    fp:= cos(teta)

    D:=(vrms-r1*irms*cos(teta))**2
    E:=(r1*irms*sin(teta))**2
    vnovo:=sqrt(D+E)
    total1:=atan((r1*irms*sin(teta))/(vrms-r1*irms*cos(teta)))
    Pnovo:=(P+r1*irms*irms)

    -- *****
    -- ANGULO DE CARGA (delta) E TENSÃO GERADA (Eg)
    -- *****

```

```

COMBINE ITERATE {10} AS caso_1
  A:=vnovo*vnova*((sin(delta1)**2/xq1)+(cos(delta1)**2/xd1))
  B:=(vnovo*Eg/xd1)
  C:=(B+vnovo*vnova*(1/xq1-1/xd1)*(Q+A)/B))
  delta1:=atan((Pnovo*B)/((Q+A)*C))
  Eg:=((Q+A)/(vnovo*COS(delta1)))*xd1

ENDCOMBINE

delta1:=delta1*180/pi
teta1:=teta1*180/pi
delta:=delta1+teta1
vbarra:=vrms/(132790.562)

ENDIF

ENDEXEC

ENDMODEL

RECORD
  disposit.ra1 as ra1
  disposit.S1 as S1
  disposit.Pt as Pt
  disposit.Qt as Qt
  disposit.fp as fp
  disposit.vrms as vrms
  disposit.vbarra as vbarra
  disposit.vnovo as vnovo
  disposit.irms as irms
  disposit.delta as delta
  disposit.delta1 as delta1
  disposit.Eg as Eg
  disposit.teta as teta

```

III – ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA REPRESENTAR O REGULADOR DE TENSÃO NO ATPDRAW

```

BEGIN NEW DATA CASE NOSORT
DATA BASE MODULE
C ****
CUNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CDESENVOLVIDO POR LARISSA MARQUES PERES E MARCELO LYNCE R. CHAVES
CMODELO DESENVOLVIDO PARA O REGULADOR DE TENSÃO
C ****
$ERASE
ARG,BARRTA,BARRTB,BARRTC,VFREGT,FREQUE,TENNOM,GANHOI,TR_____
ARG,TENREF,GANHOJ,KA_____,LMVMIN,LMVMAX,TB_____,TA_____
ARG,GANHOK,GANHOL,LMEMIN,LMEMAX,KE_____,TE_____
ARG,GANHOM,KF_____,TF_____
NUM,FREQUE,TENNOM,GANHOI,TR_____
NUM,TENREF,GANHOJ,KA_____,LMVMIN,LMVMAX,TB_____,TA_____
NUM,GANHOK,GANHOL,LMEMIN,LMEMAX,KE_____,TE_____
NUM,GANHOM,KF_____,TF_____
DUM,INPUTA,INPUT2,INPUTB,INPUT3,INPUTC,INPUT4,INPUTT
C -----CARTÃO DE FUNÇÕES DA TACS-----
/TACS
77INPUTT 1.
77SAIDA1 1.
77SAIDA2 0
77SAIDA3 1
90BARRTA
98INPUTA66+BARRTA          FREQUE
98INPUT2 =INPUTA/TENNOM
90BARRTB
98INPUTB66+BARRTB          FREQUE
98INPUT3 =INPUTB/TENNOM
90BARRTC
98INPUTC66+BARRTC          FREQUE
98INPUT4 =INPUTC/TENNOM
98INPUTT =(INPUT2+INPUT3+INPUT4)/3
98TENSA_ =TENREF
C -----CONTROLE DA EXCITAÇÃO-----
1SAIDA1      +INPUTT          GANHOI
1.

```

```

1. TR_____
0SAIDA2 -SAIDA1 +TENSA_ -SAIDA6 GANHOJ
1SAIDA3 +SAIDA2 KA____LMVMINLMVMAX
    1. TB_____
    1. TA_____
0SAIDA4 +SAIDA3 GANHOK
1VFREGT +SAIDA4 GANHOLLMEMINLMMEMAX
    1.
KE____TE_____
1SAIDA6 +VFREGT GANHOM
    KF_____
    1. TF_____
C -----SAIDAS DESEJADAS-----
33VFREGT
33INPUTT
33INPUT2
33TENSA_
33BARRTA
33INPUTA
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH,REGTEN.LIB
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
$EOF

```

IV – ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA REPRESENTAR O REGULADOR DE VELOCIDADE NO ATPDRAW

```

BEGIN NEW DATA CASE NOSORT
DATA BASE MODULE
C ****
CUNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLANDIA
CDESENVOLVIDO POR LARISSA MARQUES PERES E MARCELO LYNCE R. CHAVES
CMODELO DESENVOLVIDO PARA O REGULADOR DE VELOCIDADE
C ****
$ERASE
ARG,SPEED1,POTMEC,FREQUE,NP_
ARG,GANHOA,GANHOB,PARA_ATROA,GANHOC,TFB_____,GANHOD
ARG,PARA_BTROB,TUM_____,GANHOE,TDOIS_____,TTRES_____,POTREF,GANHOF
ARG,GANHOG,LMPMIN,LMPMAX,GANHOH,TQUATRO_____,TCINCO_____
NUM,FREQUE,NP_,GANHOA,GANHOB,PARA_ATROA
NUM,GANHOC,TFB_____,GANHOD,PARA_BTROB,TUM_____
NUM,GANHOE,TDOIS_____,TTRES_____,POTREF,GANHOF
NUM,GANHOG,LMPMIN,LMPMAX,GANHOH,TQUATRO_____,TCINCO_____
DUM,REFERE,POTENC,INREGV,PBREGV,CIREGV,CIIRGV,CIIIRV,TESTEE
$ERASE
C -----CARTÃO DE FUNÇÕES DA TACS-----
/TACS
77SPEED1 18.85
77REFERE 18.85
77POTMEC 1
77INREGV 0
77PBREGV 0
77CIREGV 0
77CIIRGV 0
77CIIIRV 1
77CIVRGV 1
98REFERE =((120*FREQUE)/NP_)*(2*PI/60)
98POTENC =POTREF
92SPEED
C -----CONTROLE DA VELOCIDADE-----
0INREGV +REFERE -SPEED1 GANHOA
1PBREGV +INREGV GANHOB
PARA_ATROA GANHOC
    1. TFB_____
    1CIREGV +PBREGV GANHOD
    PARA_BTROB
        1. TUM_____
        1CIIIRGV +CIREGV GANHOE
            1. TDOIS_____
            1. TTRES_____
0CIIIRV +CIIRGV +POTENC GANHOF
0CIVRGV +CIIIRV GANHOG LMPMINLMPMAX
98TESTEE =CIVRGV*1
1POTMEC +TESTEE GANHOH
    1. TQUATRO_____
    1. TCINCO_____
C -----SAIDAS DESEJADAS-----

```

```

33POTMEC
33SPEED1
33REFERE
33POTENC
33FREQHZ
BEGIN NEW DATA CASE
$PUNCH,REGVEL.LIB
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
BLANK
$EOF

```

V – ALGORITMO IMPLEMENTADO PARA REPRESENTAR O REGULADOR DE TENSÃO JUNTO COM O PSS NO ATPDRAW

```

BEGIN NEW DATA CASE NOSORT
DATA BASE MODULE
C ****
CUNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CDESENVOLVIDO POR LARISSA MARQUES PERES E MARCELO LYNCE R. CHAVES
CMODELO DESENVOLVIDO PARA O REGULADOR DE TENSÃO JUNTO COM O PSS
C ****
$ERASE
ARG,BARRTA,BARRTB,BARRTC,VFREGT,SPEED1,FREQUE,TENNOM,GANHOI,TR_____
ARG,TENREF,GANHOJ,KA_____,LMVMIN,LMVMAX,TB_____,TA_____
ARG,GANHOK,GANHOL,LMEMIN,LMEMAX,KE_____,TE_____
ARG,GANHOM,KF_____,TF_____,TW1_____,TW2_____
ARG,GANHOR,T_1_____,T_2_____,KPSS_____
NUM,FREQUE,TENNOM,GANHOI,TR_____
NUM,TENREF,GANHOJ,KA_____,LMVMIN,LMVMAX,TB_____,TA_____
NUM,GANHOK,GANHOL,LMEMIN,LMEMAX,KE_____,TE_____
NUM,GANHOM,KF_____,TF_____,TW1_____,TW2_____
NUM,GANHOR,T_1_____,T_2_____,KPSS_____
DUM,INPUTA,INPUT2,INPUTB,INPUT3,INPUTC,INPUT4,INPUTT
DUM,TENSA_,SAIDA1,SAIDA2,SAIDA3,SAIDA4,SAIDA7,SAIDA6,SAIDA9
DUM,ENTPSS,SPEED2
C -----CARTÃO DE FUNÇÕES DA TACS-----
/TACS
77VFREGT 1.0
77INPUTT 1.0
77SAIDA1 1.
77SAIDA2 0
77SAIDA3 1
77SPEED2 1
77SAIDA7 0
77ENTPSS 0
90BARRTA
98INPUTA66+BARRTA                      FREQUE
98INPUT2 =INPUTA/TENNOM
90BARRTB
98INPUTB66+BARRTB                      FREQUE
98INPUT3 =INPUTB/TENNOM
90BARRTC
98INPUTC66+BARRTC                      FREQUE
98INPUT4 =INPUTC/TENNOM
98INPUTT =(INPUT2+INPUT3+INPUT4)/3
98TENSA_=TENREF
98SPEED2 =SPEED1/SPEEDN
98REFERE =SPEEDN/SPEEDN
C -----CONTROLE DA EXCITAÇÃO E DO PSS-----
1SAIDA1          +VTBARR          GANHOI
 1.
 1. TR_____
 0INREGV +REFERE -SPEED2
 0SAIDA9 +INREGV          KPSS_____
 1SAIDA7 +SAIDA9
    TW1_____
    1. TW2_____
 1ENTPSS +SAIDA7          GANHOR
    1. T_1_____
    1. T_2_____
 0SAIDA2 -SAIDA1 +TENSA_ -SAIDA6 +ENTPSS      GANHOJ
 1SAIDA3 +SAIDA2          KA_____,LMVMIN,LMVMAX
    1. TB_____
    1. TA_____
 0SAIDA4 +SAIDA3          GANHOK
 1VFREGT +SAIDA4          GANHOLL,LMEMIN,LMEMAX
 1.
```

KE_____TE_____
1SAIDA6 +VFREGT
KF_____
1. TF_____

C -----SAIDAS DESEJADAS-----

33VFREGT
33SAIDA1
33SAIDA2
33SAIDA3
33SPEED2
33SAIDA7
33ENTPSS
33INPUTT
33TENSA_
33BARRTA
33INPUTA
BEGIN NEW DATA CASE
\$PUNCH,RTEPSS.LIB
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
\$EOF