



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS
MESTRADO PROFISSIONAL

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR COMPUTACIONAL PARA
ESTUDOS DINÂMICOS DE COMPENSADORES SÍNCRONOS E SUA
APLICAÇÃO EM TESTES PARA SINTONIA DE REGULADOR
AUTOMÁTICO DE TENSÃO**

Pedro Wenilton Barbosa Duarte

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientadores: Walter Barra Junior

Wilson Negrão Macêdo

Belém

Dezembro de 2017

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR COMPUTACIONAL PARA
ESTUDOS DINÂMICOS DE COMPENSADORES SÍNCRONOS E SUA
APLICAÇÃO EM TESTES PARA SINTONIA DE REGULADOR
AUTOMÁTICO DE TENSÃO**

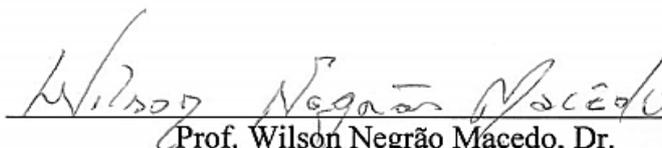
Pedro Wenilton Barbosa Duarte

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓSGRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO
PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



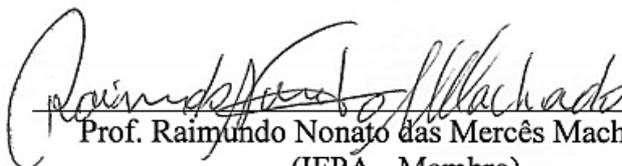
Prof. Walter Barra Junior, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA - Orientador)



Prof. Wilson Negrão Macedo, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA - Coorientador)



Prof. Petrónio Vieira Junior, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA - Membro)



Prof. Raimundo Nonato das Mercês Machado, Dr.
(IFPA - Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

DEZEMBRO DE 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Duarte, Pedro Wenilton Barbosa, 1955-
Desenvolvimento de um simulador computacional para estudos dinâmicos de compensadores síncronos e sua aplicação em testes para sintonia de regulador automático de tensão/
Pedro Wenilton Barbosa Duarte - 2017.

Orientadores: Walter Barra Junior
Wilson Negrão Macêdo

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, 2017

1. Máquinas síncronas 2. Sistemas de energia elétrica - Automação 3 Reguladores de voltagem 4. - Energia elétrica- Estabilidade I. Título

CDD 22.ed.621.3134

Dedico este trabalho aos professores amigos e colegas que sempre apoiaram, incentivaram e de alguma forma contribuíram para a elaboração do mesmo. Em particular aos meus filhos pelo incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao colega e amigo Professor Carlos Tavares da Costa Junior pela ajuda e direcionamento para o mestrado profissional.

Ao colega e amigo Professor Walter Barra Junior, pela orientação, ajuda e parceria na elaboração desta dissertação.

Ao amigo Professor João Nazareno Nonato Quaresma, pela coordenação do curso e pelas aulas ministradas.

Aos colegas do PPGEF pelo incentivo e colaboração.

A Deus pela oportunidade e condições para prosseguir na luta por este objetivo.

“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas pois, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar aonde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz.”

(Bill Gates)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGE/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR COMPUTACIONAL PARA
ESTUDOS DINÂMICOS DE COMPENSADORES SÍNCRONOS E SUA
APLICAÇÃO EM TESTES PARA SINTONIA DE REGULADOR
AUTOMÁTICO DE TENSÃO**

Pedro Wenilton Barbosa Duarte

Dezembro/2017

Orientadores: Walter Barra Junior

Wilson Negrão Macêdo

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Neste trabalho são apresentados e discutidos os resultados obtidos no desenvolvimento de um programa simulador da dinâmica de compensadores síncronos, com ênfase no detalhamento dos subsistemas de excitação e de regulação automática de tensão. O estudo visa fornecer subsídios para a modernização dos sistemas de proteção e dos compensadores síncronos de Marabá e Vila do Conde, Estado do Pará, Brasil, os quais são operados pelas Centrais Elétricas do Norte do Brasil (Eletronorte). Primeiramente são apresentados os detalhes relevantes a respeito da funcionalidade dos compensadores síncronos. Tais compensadores são sistemas que apresentam longo tempo de operação, sendo que alguns de seus subsistemas de proteção e automação já atingiram a vida útil estimada. Em vista disto, os compensadores passaram a exibir um número considerável de defeitos e falhas, principalmente a partir do ano 2002. Inicialmente foram modeladas as máquinas síncronas através de modelos do tipo pu standard de quinta ordem, levando-se em conta a dinâmica rotativa, a dinâmica do enrolamento de campo e a dinâmica associada aos enrolamentos amortecedores. Em seguida, utilizando dados dos sistemas dos compensadores de Vila do Conde e Marabá, foi desenvolvido em ambiente Matlab/Simulink um modelo dinâmico do sistema. O referido modelo implementa tanto

a dinâmica da máquina síncrona quanto as dinâmicas dos subsistemas de excitação, regulação automática de tensão e seus subsistemas de respectivas proteções associados. Para validar o modelo, foram realizados testes de resposta ao degrau para diferentes condições operacionais da planta. Os resultados foram comparados com dados obtidos em testes no sistema real e o nível de concordância obtido foi elevado, validando o modelo. Para fins de modernizar a estratégia de controle, foi investigado o desempenho dinâmico de uma estratégia de controle PID para o regulador de tensão, a qual foi baseada na técnica de projeto via posicionamento de polos. Os resultados computacionais obtidos mostraram o bom desempenho do controlador projetado, demonstrando ser promissora a sua implantação no sistema real.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL SIMULATOR FOR DYNAMIC STUDIES OF SYNCHRONOUS COMPENSATORS AND ITS APPLICATION IN TESTS FOR THE TUNING OF AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR

Pedro Wenilton Barbosa Duarte

December/2017

Advisors: Walter Barra Junior

Wilson Negrão Macêdo

Research Area: Process Engineering

In this work the obtained results are presented and discussed in the development of a simulator program of the dynamics of synchronous compensators, with emphasis on the detailed subsystems of excitation and automatic voltage regulation. The study aims to provide subsidies for the modernization of the protection systems and the synchronous compensators of Marabá and Vila do Conde, State of Pará, Brazil, which are operated by Eletronorte. First, the relevant details regarding the functionality of the synchronous compensators are presented. These compensators are systems that have a long operating time, and some of their protection and automation subsystems have already reached the estimated useful life. In view of this, the compensators began to show a considerable number of defects and failures, mainly from the year 2002. Initially, the synchronous machines were modeled using standard fifth-order pu models, taking into account the rotational dynamics, the field winding dynamic and the dynamics associated with the damping windings. Then, using data from the Vila do Conde and Marabá compensator systems, a dynamic model of the system was developed in Matlab/Simulink environment. This model implements both the dynamics of the synchronous machine and the dynamics of the subsystems of excitation, automatic voltage regulation and its subsystems of associated protections. To validate the model, step response tests were performed for different operating conditions of the plant. The results were compared with data obtained

in tests in the real system and the level of agreement obtained was high, validating the model. In order to modernize the control strategy, we investigated the dynamic performance of a PID control strategy for the voltage regulator, which was based on the pole positioning technique. The computational results obtained showed the good performance of the designed controller, demonstrating that its implementation in the real system is promising.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 - OBJETIVOS.....	2
1.2.1 - Objetivo geral.....	2
1.2.2 - Objetivos específicos.....	3
1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	3
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	3
CAPÍTULO 2 – DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS DOS COMPENSADORES SÍNCRONOS.....	5
2.1 - OS PROBLEMAS.....	5
2.2 - O PROBLEMA EM EVIDÊNCIA NESTA DISSERTAÇÃO.....	6
2.3 - DO PROJETO, INSTALAÇÃO E TESTES DOS RAT’S MODERNOS.....	6
2.3.1 - Participação no projeto.....	6
2.3.2 - Os compensadores síncronos de Vila do Conde.....	7
2.3.3 - Ações corretivas.....	8
2.4 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO.....	9
2.5 - O COMPENSADOR SÍNCRONO.....	9
2.6 – CONSIDERAÇÕES.....	10
2.7 - DESCRIÇÃO SUCINTA DO FUNCIONAMENTO DOS COMPENSADORES.....	11
2.8 - MODOS DE OPERAÇÃO DOS COMPENSADORES.....	15
CAPÍTULO 3 - DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS INVESTIGADOS.....	16
3.1 - CARACTERÍSTICAS DAS INSTALAÇÕES.....	16
3.2 - DA INSTALAÇÃO À SUBSTITUIÇÃO DOS PRIMEIROS RAT’S.....	17
3.3 - A CONCEPÇÃO DO PROJETO DOS RAT’S MODERNOS.....	17
3.4 - A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS NO COMPENSADOR DE MARABÁ.....	17
3.5 - A UTILIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE DESCARGA DE CAMPO.....	18
3.5.1 - Resumo do processo - Compensador síncrono parado.....	18
3.5.2 - Resumo do processo de partida do compensador síncrono.....	19
3.5.3 - Resumo do processo - Excitação do compensador síncrono.....	20
3.5.4 - Resumo do processo - Compensador síncrono parando.....	21

3.5.5 - Propostas do fornecedor.....	23
3.5.5.1 – A primeira proposta do fornecedor.....	24
3.5.5.2 - Segunda proposta do fornecedor.....	24
3.6 - ANÁLISE DAS PROPOSTAS DO FORNECEDOR.....	25
3.7 - FUNCIONAMENTO COM A RD ORIGINAL.....	25
3.8 - ANÁLISE DA PRIMEIRA PROPOSTA FEITA PELO FORNECEDOR.....	25
3.9 - ANÁLISE DA SEGUNDA PROPOSTA FEITA PELO FORNECEDOR.....	26
3.10 - A DECISÃO DA ELETRONORTE.....	27
3.11 – OS PROBLEMAS REMANESCENTES NOS COMPENSADORES SÍNCRONOS DE VILA DO CONDE E MARABÁ.....	28
3.12 - CONCLUSÃO.....	30
CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DO CONJUNTO COMPENSADOR SÍNCRONO E SISTEMA DE EXCITAÇÃO.....	31
4.1 - A MÁQUINA SÍNCRONA.....	31
4.2 - O MOTOR SÍNCRONO.....	32
4.2.1 - Princípios básicos de operação de um motor síncrono.....	32
4.2.2 - O circuito equivalente de um motor síncrono.....	33
4.2.3 - A reação de armadura.....	34
4.2.3.1 - Algumas medidas para redução do efeito de reação de armadura.....	37
4.2.4 - O motor síncrono visto da perspectiva do campo magnético.....	38
4.2.5 - O motor síncrono e a correção do fator de potência.....	39
4.2.6 - O capacitor síncrono ou condensador síncrono.....	40
4.2.7 - Comparação entre um compensador síncrono e um banco de capacitores.....	41
4.2.8 - O efeito das mudanças da corrente de campo sobre um motor síncrono	41
4.2.9 - A curva “V”	43
4.2.10 - Curvas compostas.....	44
4.3 - CONTROLE DAS TENSÕES TERMINAIS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	45
4.4 - ESPECIFICAÇÕES NOMINAIS DE UM MOTOR SÍNCRONO.....	46
4.5 - OS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO.....	47
4.5.1 - Requisitos de sistemas de excitação.....	47
4.5.2 - Elementos de um sistema de excitação.....	48

4.5.3 - Tipos de sistemas de excitação.....	49
4.5.4 - Funções de controle e proteção.....	52
4.5.5 - Circuitos de estabilização e limitação do sistema de excitação.....	53
4.6 - MODELAGEM DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO.....	55
4.6.1 - Modelagem de um sistema de excitação completo.....	56
4.7 - DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO STA1 – IEEE.....	57
4.8 - MODELAGEM DE LIMITADORES.....	58
4.9 - A CURVA DE CAPABILIDADE.....	61
4.10 – CONCLUSÕES.....	62
CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÃO DOS COMPENSADORES SÍNCRONOS	
DE VILA DO CONDE E MARABÁ.....	64
5.1 - A MÁQUINA SÍNCRONA UTILIZADA EM VILA DO CONDE E MARABÁ.....	64
5.1.1 - A partida dos compensadores síncronos.....	64
5.1.2 - O fluxo de potência e o sistema de monitoramento.....	66
5.1.3 - Algumas características funcionais dos compensadores síncronos de Vila do Conde e Marabá.....	69
5.1.4 - O sistema de excitação.....	70
5.1.5 - O controlador PID.....	71
5.1.6 - A utilização dos compensadores síncronos nos sistemas de potência de Vila do Conde e Marabá.....	73
5.2 - UM SIMULADOR BASEADO NOS DADOS DO FORNECEDOR.....	72
5.2.1 - Outros dados necessários para a implementação do simulador.....	74
5.2.2 - O primeiro modelo para simulação.....	74
5.2.3 - O compensador funcionando absorvendo reativos da rede.....	75
5.2.3.1 - Resultados da simulação retirados do Matlab, na absorção de reativos.....	76
5.2.4 - Compensador funcionando cedendo reativos para a rede.....	76
5.2.4.1 - Resultados da simulação retirados do MATLAB, quando cedendo reativos.....	77
5.3 - O MODELO REPRESENTADOR DO RAT ATUAL.....	77
5.3.1 - A implementação de um modelo de RAT, o mais próximo possível do RAT real.....	78
5.3.2 - Descrição do sistema em estudo.....	78

5.3.2.1 - O compensador síncrono.....	79
5.3.2.2 - Alguns comentários sobre a manutenção dos compensadores.....	79
5.3.2.3 – Os modos de operação do regulador automático de tensão (RAT).....	79
5.3.2.4 - Proteções do regulador de tensão.....	80
5.3.2.5 - A descrição do simulador com as funções de controle e proteção.....	82
5.4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	83
5.4.1 - A partida do compensador síncrono.....	83
5.4.2 - Degrau na referência de tensão.....	84
5.4.3 - Teste do limitador de mínima excitação.....	85
5.4.4 - Teste do limitador de máxima excitação.....	87
5.5 – CONCLUSÕES.....	88
CAPÍTULO 6 - PROJETO DE UM NOVO RAT E CONCLUSÃO.....	89
6.1 - A TÉCNICA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM NOVO SIMULADOR... ..	89
6.2 - O TRATAMENTO DOS DADOS PARA O PROJETO.....	89
6.3 - O PROJETO DE UM RAT MUNICIADO DE RECURSOS, PARA PROMOVER A ESTABILIDADE FRENTE ÀS DIVERSAS MUDANÇAS NO SISTEMA.....	89
6.3.1 - O modelo (função de transferência) do compensador síncrono.....	90
6.3.2 - Teste através da aplicação de de grau.....	91
6.3.3 - Projeto por posicionamento dos polos.....	91
6.3.4 - O desenvolvimento dos polinômios.....	93
6.4 - A CONSTRUÇÃO DO ALGORITMO.....	94
6.4.1 - Condições para funcionamento do algoritmo.....	95
6.4.2 - O fluxograma representativo do algoritmo.....	95
6.5 - DISCRETIZAÇÃO DO MODELO PROJETADO PARA O RAT.....	96
6.6 - SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL, APÓS CALCULADOS OS PARÂMETROS ATRAVÉS DO ALGORITMO.....	97
6.7 - A CONSTRUÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.....	97
6.8 - TESTE ATRAVÉS DA RESPOSTA AO DEGRAU.....	97
6.9 - CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
APÊNDICI A.....	102
ANEXO I.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Os dois compensadores síncronos de Vila do Conde.....	10
Figura 2.2	O compensador síncrono de Marabá.....	10
Figura 2.3	Parte do sistema hidromecânico dos compensadores de Vila do Conde.....	13
Figura 2.4	Parte do sistema hidromecânico dos compensadores de Vila do Conde.....	13
Figura 3.1	Resistência RD (de descarga de Campo) ligada ao rotor da máquina.....	19
Figura 3.2	Resistência RDA (de partida) ligada ao rotor da máquina, no processo de partida do compensador.....	20
Figura 3.3	Resistências RD (de descarga de Campo) e RDA (de partida) desligadas.....	21
Figura 3.4	Resistência RD (de descarga de Campo) ligada ao rotor da máquina, no processo de parada do compensador.....	22
Figura 3.5	Representação unifilar dos compensadores de Vila do Conde e Marabá parados (desligados do Sistema)	23
Figura 3.6	Representação unifilar dos compensadores de Vila do Conde e Marabá ligados ao sistema.....	23
Figura 3.7	Nova resistência de descarga de campo, sugerida pela primeira proposta do fornecedor.....	24
Figura 3.8	Nova resistência RD de descarga de campo, sugerida pela segunda proposta do fornecedor.....	24
Figura 3.9	Desempenho da RD original.....	25
Figura 3.10	Gráfico comparativo da constante de tempo de $\frac{RDA}{4}$	26
Figura 3.11	Funcionamento em caso da descarga de campo ser feita somente através da resistência do rotor.....	27
Figura 3.12	Desligamentos por equipamento de 01.01.15 a 13.11.16.....	28
Figura 3.13	Estratificação de desligamentos por família de equipamento no período de 01.01.15 a 13.11.16.....	29
Figura 4.1	Representação genérica de uma máquina síncrona com polos salientes.....	31

Figura 4.2	Rotores das máquinas síncronas: a) com polos lisos e b) com polos salientes.....	32
Figura 4.3	Motor síncrono de dois polos.....	33
Figura 4.4	Diagrama representativo de uma fase de um motor síncrono em regime permanente.....	33
Figura 4.5	A tensão E_A produz um fluxo de corrente atrasado, quando é ligada uma carga reativa atrasada.....	34
Figura 4.6	A corrente no estator produz seu campo magnético B_S , o qual produz sua própria tensão E_{est} nos enrolamentos do estator.....	35
Figura 4.7	O campo magnético B_S é somado a B_R , distorcendo-o e resultando $B_{líq}$. A tensão E_{est} é somada a E_A , produzindo V_ϕ na saída da fase.....	36
Figura 4.8	Circuito representativo da equação $V_\phi = E_A - jXI_A$	36
Figura 4.9	Interação entre o fluxo polar e de armadura, deslocando o neutro magnético. Uma visão vetorial.....	37
Figura 4.10	Diagrama fasorial de um motor síncrono.....	38
Figura 4.11	O respectivo diagrama de campo magnético.....	39
Figura 4.12	Diagrama fasorial de um capacitor síncrono, ou compensador síncrono operando em vazio.....	40
Figura 4.13	Motor síncrono operando com fator de potência atrasado.....	41
Figura 4.14	O efeito do aumento da corrente de campo sobre o funcionamento do motor.....	42
Figura 4.15	Curvas V do motor síncrono.....	43
Figura 4.16	Diagramas fasoriais: (a) motor síncrono absorvendo reativos e (b) motor síncrono cedendo reativos ao sistema.....	44
Figura 4.17	Forma característica das curvas compostas.....	45
Figura 4.18	Diagrama funcional de blocos, do sistema de controle de um gerador síncrono.....	48
Figura 4.19	Retificador de sistema de excitação, tipo alternador com campo controlado.....	50
Figura 4.20	Sistema de excitação tipo <i>brushless</i> (sem escovas)	51
Figura 4.21	Sistema de excitação estático.....	53
Figura 4.22	Sistema de excitação, controle e circuitos de proteção.....	53

Figura 4.23	Estabilização de sistema de controle de excitação, através de alimentação derivativa.....	53
Figura 4.24	Curto circuito de campo utilizando-se um Crowbar.....	55
Figura 4.25	Modelo de sistema de excitação, tipo ST1A – IEEE.....	57
Figura 4.26	Modelo de um limitador de subexcitação.....	59
Figura 4.27	a) e b); Região e forma de atuação do limitador de subexcitação respectivamente.....	59
Figura 4.28	Modelo de limitador Volts/Hertz.....	60
Figura 4.29	Modelo de limitador da corrente de campo, ou de sobre excitação.....	61
Figura 4.30	Detalhes construtivos com região definida na curva de capacidade.....	61
Figura 4.31	Quadrantes de funcionamento os geradores e dos motores.....	62
Figura 5.1	Gráfico correspondente à potência reativa do compensador nº 01 de Marabá no dia 02.09.2017.....	68
Figura 5.2	Representação genérica de uma máquina síncrona com o sistema de excitação.....	70
Figura 5.3	Representação genérica de uma ponte retificadora controlada a thyristores.....	70
Figura 5.4	Representação genérica do ângulo de disparo para tiristores.....	71
Figura 5.5	a) e b) – Representação de circuitos para disparo dos tiristores.....	71
Figura 5.6	Diagrama (básico) de blocos de um sistema de controle PID.....	72
Figura 5.7	Diagrama representativo do sistema de potência de Marabá.....	73
Figura 5.8	Diagrama (básico) de blocos (em Simulink e MATLAB) de um sistema e controle com um RAT do tipo P (proporcional) de $K=50$	75
Figura 5.9	Curvas de resposta ao degrau do modelo mostrado na Figura 5.8.	75
Figura 5.10	Diagrama de blocos de um modelo (em Simulink e MATLAB), com vários pontos para medição de grandezas.....	78
Figura 5.11	Diagrama representativo do sistema automático de controle.....	80
Figura 5.12	Diagrama de blocos completo de um sistema de controle com RAT do tipo PID.....	83
Figura 5.13	Partida do compensador síncrono.....	84

Figura 5.14	Teste de aplicação e posterior retirada de um degrau de 2% na referência de tensão.....	85
Figura 5.15	Teste do limitador de mínima excitação.....	86
Figura 5.16	Teste (em campo) do limitador de mínima excitação.....	86
Figura 5.17	Teste do limitador de mínima excitação.....	87
Figura 5.18	Teste (em campo) do limitador de máxima excitação.....	88
Figura 6.1	Curva de resposta ao degrau, da função de transferência do compensador síncrono.....	91
Figura 6.2	Representação em malha fechada, das funções de transferências calculadas.....	92
Figura 6.3	Fluxograma contendo os principais passos e elementos do algoritmo.....	96
Figura 6.4	Comparação da resposta do sistema em malha aberta e malha fechada, para uma entrada degrau.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Dados de placa dos compensadores síncronos.....	10
Tabela 3.1	Resumo do processo - compensador síncrono parado.....	19
Tabela 3.2	Resumo do processo de partida do compensador síncrono.....	20
Tabela 3.3	Resumo do processo de excitação do compensador síncrono	21
Tabela 3.4	Resumo do processo - compensador síncrono parando.....	22
Tabela 3.5	Tempos gastos nas paradas do compensador nº 02 de Vila do Conde.....	29
Tabela 5.1	Listagem do sequencial de partida do compensador de Vila do Conde.....	65
Tabela 5.2	Apresenta os 24 pontos monitorados pelo sistema SIMME.....	66
Tabela 5.3	Alguns dados característicos do compensador síncrono de Vila do Conde.....	74

NOMENCLATURA

A	AMPERE
AC	CORRENTE ALTERNADA
Albras	ALUMÍNIO BRASILEIRO S.A.
Alunorte	ALUMINA DO NORTE BRASILEIRO S.A.
ANEEL	AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
AT2 01	AUTO TRANSFORMADOR EM 13.8 KV, Nº 01
bar	UNIDADE DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA
<i>Bliq</i>	TORQUE LÍQUIDO (RESULTANTE)
<i>BR</i>	CAMPO MAGNÉTICO DO ROTOR
<i>BS</i>	CAMPO MAGNÉTICO DO ESTATOR
Celpa	CENTRAIS ELÉTRICAS DO PARÁ
CO ₂	GÁS CARBÔNICO
DC	CORRENTE CONTÍNUA
DJ 41	DISJUNTOR 41 (DO CAMPO, ROTOR)
<i>Et</i>	TENSÃO TERMINAL
FDR	FIELD DISCHARGE RESISTOR
Hz	HERTZ
H ₂	HIDROGÊNIO PESADO
<i>IF</i>	CORRENTE DE CAMPO
<i>I_{fd}</i>	CORRENTE DE CAMPO
<i>I_{LR}</i>	CORRENTE LIMITE DO ROTOR
<i>K_{LR}</i>	GANHO LIMITE DO ROTOR
kV	KILO VOLT
L/R	INDUTÂNCIA/RESISTÊNCIA
m	METRO
MBCS2-01	MARABÁ COMPENSADOR SÍNCRONO EM 13.8 KV, Nº 01
MEL	MINIMUM EXCITATION LIMIT
MVA	MEGA VOLT AMPERE
MVA _r	MEGA VOLT AMPERE REATIVO
MXL	MAXIMUM EXITATION LIMIT
ONS	OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA

OXL	OVER EXCITATION LIMIT (LIMITE DE SOBRE EXCITAÇÃO)
PID	PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO
Q	POTÊNCIA REATIVA
RAT	REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSÃO
RD	RESISTÊNCIA DE DESCARGA DE CAMPO
RDA	RESISTÊNCIA DE PARTIDA
Ref.	REFERÊNCIA
RPM	ROTAÇÕES POR MINUTO
SIMME	SISTEMA DE MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS
STA1/IEEE	TIPO DE SISTEMA DE EXCITAÇÃO
TC	TRANSFORMADOR DE CORRENTE
T'_{do}	CONSTANTE DE TEMPO DE EIXO DIRETO
TH1 E TH2	THIRISTORES 1 E 2 (COMPONENTES ELETRÔNICOS)
TP	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL
trip	DESLIGAMENTO DE UM EQUIPAMENTO, POR FALHA OU DEFEITO
UEL	UNDER EXCITATION LIMIT (LIMITE DE SUBEXCITAÇÃO)
UHE	USINA HIDRELÉTRICA
URAL	UNDER REACTIVE AMPERE LIMIT (LIMITADOR AMPERE REATIVO DE SUBEXCITAÇÃO)
V	VOLT
Vale	EMPRESA DE MINERAÇÃO
VCCS2-02	VILA DO CONDE COMPENSADOR SÍNCRONO EM 13.8 KV
VCDJ2-11	VILA DO CONDE DISJUNTOR Nº 11 EM 13.8 KV
$VF1$	SINAL DE CONTROLE DA MALHA 1
$VF2$	SINAL DE CONTROLE DA MALHA 2
$VF3$	SINAL DE CONTROLE DA MALHA 3
$VF4$	SINAL DE CONTROLE DA MALHA 4
$V > 90\%$	VELOCIDADE MAIOR QUE 90 %

δ	ÂNGULO DE CARGA
	ÂNGULO ENTRE A TENSÃO E A CORRENTE DE UM
θ	MOTOR SÍNCRONO
Φ	FLUXO NO FERRO DA MÁQUINA
Σ	SOMADOR

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Diante da manifestação de problemas técnicos na planta, é comum as empresas do setor elétrico se socorrerem do conhecimento de sua equipe de profissionais mais experientes, em particular daqueles engenheiros e técnicos que acumulam grande experiência de campo na operação, instalação e operação da planta alvo. Em geral tais problemas costumam ser tecnologicamente desafiadores. Com efeito, o conhecimento dos técnicos e engenheiros mais experientes tem contribuído fortemente para mitigar problemas muitas vezes não antecipados pelos próprios fabricantes e fornecedores dos equipamentos. Via de regra, tais deficiências dos sistemas originais decorrem de falta de uma investigação mais aprofundada do problema. Isso tanto durante a fase de projeto quanto durante as fases de instalação e operação da planta.

Por muitas vezes chega a ser providencial, quando o profissional de determinada área técnica, possui também conhecimento de outras áreas correlatas, como, por exemplo, o engenheiro mecânico ter bom conhecimento sobre eletricidade ou eletrônica, ou o engenheiro eletricista ter bom conhecimento sobre hidráulica e eletrônica. Tal matriz de conhecimentos facilita muito as ações desses profissionais diante de situações adversas, onde, além do conhecimento, os profissionais deverão estar seguros e confiantes na sua capacidade de analisar apropriadamente os eventos e propor estratégias para mitigação do problema.

No caso do trabalho que motivou esta dissertação, trata-se de mais um exemplo em que a empresa precisa das soluções dos problemas e para isso, conta com o seu corpo técnico.

Então, diante da imposição de equipamentos que não funcionam bem, primeiro as equipes deverão se municiar de ferramentas e meios para simular e testar, a fim de que depois os resultados sejam analisados e tomadas as melhores decisões.

1.1 - MOTIVAÇÃO

Trabalhando na Divisão de Transmissão de energia elétrica de Marabá, foi possível acompanhar o desenvolvimento dos trabalhos de modernização do compensador síncrono daquela Divisão, sendo que teve-se a oportunidade de verificar que muitos dos

problemas (de concepção do projeto, na execução e durante a operação com a máquina energizada), não foram resolvidos deixando margens para estudos posteriores, com foco na solução.

Após os trabalhos em Marabá, as observações se Voltaram para Vila do Conde, que possui mais dois compensadores síncronos idênticos ao de Marabá, apresentando também problemas idênticos aos que ocorreram em Marabá.

As soluções encontradas para os problemas em quase todas as áreas, basearam-se na teoria e constatação visual, porém no caso dos controladores de tensão os quais são equipamentos eletrônicos digitais parametrizados através de programas computacionais, aplica-se a teoria, porém a constatação visual direta, não é suficiente para as tomadas de decisão na solução dos problemas, o que motivou o desenvolvimento de estudos, com a finalidade de criar as ferramentas para ensaios e testes nos referidos controladores, a fim de investigar e auxiliar na solução dos problemas que forem encontrados. Dessa forma, esta dissertação é focalizada na realização de estudos dos sistemas de excitação e de controle através dos Reguladores Automáticos de Tensão. Para isso foi desenvolvido um programa computacional capaz de simular situações típicas, para avaliar os impactos de novos ajustes, evitando outros problemas futuros.

1.2 - OBJETIVOS

Esta dissertação é focalizada na realização de estudos dos sistemas de excitação e de controle através dos Reguladores Automáticos de Tensão, para identificar possíveis problemas que ainda estejam ocultos.

1.2.1 - Objetivo geral

Projetar e construir um Regulador Automático de Tensão, o qual servirá de plataforma de testes e simulações, a fim de funcionar como ferramenta de simulação e testes, auxiliando na identificação de problemas de controle dos Compensadores síncronos de Marabá e Vila do Conde.

1.2.2 - Objetivos específicos

- Conhecer e utilizar os parâmetros e dados de fabricação dos compensadores síncronos de Marabá e Vila do Conde, a fim de se ter os subsídios para iniciar o projeto;
- Desenvolver estudos para elaborar as funções de transferência que serão utilizadas no projeto de um Regulador Automático de Tensão, de forma que este seja específico para os compensadores já citados;
- Implementação do modelo teórico completo de um Regulador Automático de Tensão através do programa computacional MATLAB, o qual utilizará técnicas modernas na identificação de sistemas de controle;
- Municiar o corpo técnico da empresa Eletronorte de conhecimentos a nível de engenharia de controle, para que possam utilizar recursos similares com a certeza de aplicação segura das técnicas de identificação de problemas em sistemas de controle de grandes máquinas.

1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está voltada para a solução de problemas em plantas industriais onde existem compensadores síncronos com grandes dimensões, portando com tecnologia rara no mundo. Uma grande contribuição está no aprendizado do autor, pois após este trabalho, estará muito mais confiante para investigar compensadores síncronos de todas as dimensões e fabricantes. O autor também estará preparado para repassar os conhecimentos às equipes de manutenção da empresa onde trabalha, viabilizando assim, a disseminação e o crescimento do conhecimento na mesma.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta a motivação, os objetivos, as contribuições da dissertação, a rápida noção dos problemas encontrados nos compensadores síncronos de Marabá e Vila do Conde, a rápida descrição dos sistemas que compõem a planta e os modos de operação dos compensadores síncronos do Pará.

O capítulo 3 apresenta as características das instalações que possuem compensadores síncronos no Pará, bem como a participação do autor no projeto de modernização dos compensadores, a solução de problemas na planta de Marabá, a evidência e solução do problema na substituição da resistência de descarga de campo pela resistência de partida e os problemas encontrados nos compensadores síncronos de Vila do Conde.

O capítulo 4 enfatiza os estudos sobre a máquina síncrona e a modelagem do controlador de tensão, iniciando os estudos sobre o motor síncrono, mostrando o circuito equivalente, a reação de armadura, o motor síncrono e a correção do fator de potência, as curvas em “V” e as curvas compostas.

Sobre os sistemas de excitação, mostra-se uma análise aprofundada, apresentando os requisitos e elementos de um sistema de excitação, os tipos de sistemas de excitação, as funções de controle e proteção, os circuitos de estabilização, a modelagem de um sistema de excitação completo, a modelagem dos limitadores e a curva de capacidade.

O capítulo 5 apresenta a sequência de eventos na partida de um compensador síncrono, os sistemas de monitoramento, o controlador PID, a utilização dos compensadores síncronos nos sistemas de potência de Vila do Conde e Marabá, a implementação de um simulador baseado nos dados do fornecedor, o compensador funcionando cedendo reativos para a rede, bem como absorvendo reativos da rede, o modelo representativo do regulador de tensão atual, proteções do regulador de tensão, a descrição do simulador com as funções de controle e proteção, as simulações em modelo completo de PID, a apresentação dos resultados e a discussão sobre os mesmos.

O capítulo 6 mostra o Projeto de um Novo Regulador Automático de tensão, o tratamento dos dados, o modelo da função e transferência do compensador síncrono, a utilização da técnica para o projeto por posicionamento dos polos, a determinação dos parâmetros através do algoritmo em MATLAB, a discretização do modelo e o teste através da resposta ao degrau.

O Apêndice A, mostrando todas as linhas escritas e calculadas do Algoritmo em MATLAB, utilizado para testes e também calcular os parâmetros necessários para a implementação do projeto do controlador eletrônico digital.

Referências Bibliográficas, apresentam a listagem de todos os livros, artigos e relatórios utilizados como fonte de estudos e/ou fonte de pesquisas, para reunir a maioria das informações utilizadas nesta dissertação.

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO SOBRE OS PROBLEMAS DOS COMPENSADORES SÍNCRONOS

2.1 - OS PROBLEMAS

A presente dissertação, sugere solução para problemas existentes nos compensadores síncronos em operação no estado do Pará. Pois tratando-se de máquinas antigas operando em regime contínuo, vários componentes dos sistemas de proteção e comando e controle chegaram ao final da vida útil, promovendo altas taxas de falha. Apresenta-se abaixo uma breve relação dos problemas constatados, a partir de 2002:

- Erros na leitura do tacômetro, criando problemas para o sincronismo destas máquinas;
- O sistema de comando e controle, à base de relés eletrônicos analógicos, operavam de modo a dificultarem o sincronismo e a operação normal das máquinas, frequentemente desligando-as intempestivamente;
- Indisponibilidade de peças sobressalentes, levando a equipe de engenheiros e técnicos da operadora a ter que improvisar subsistemas;
- Para alguns componentes como os dos tacômetros, a Eletronorte não possuía sobressalentes e além da dificuldade em importar peças de um modo geral, várias já não eram fabricadas;
- Engenheiros e técnicos estavam improvisando, a fim de resolverem os problemas;
- Por volta de 2006, as cobranças através de órgãos reguladores como a ANEEL e ONS, estavam cada vez mais acirradas, através de auditorias nas instalações, com aplicação de multas de altas cifras;
- Aproximavam-se as mudanças de legislação no setor elétrico, onde não se admite o desligamento de equipamentos instalados nas redes básicas do Sistema Elétrico Nacional. Cada equipamento desligado, deve retornar ao sistema no tempo de 2 min; acima deste tempo se iniciam a contagem de altas multas.

2.2 - O PROBLEMA EM EVIDÊNCIA NESTA DISSERTAÇÃO

A Empresa Eletronorte, constatando que estas máquinas já não estavam operando com o desempenho satisfatório, resolveu modernizar diversos sistemas inerentes a estas máquinas, a fim de devolver-lhes boas condições operativas.

As grandes quantidades de novos problemas aconteceram devido à forma como a Empresa Eletronorte (operadora dos compensadores síncronos), procedeu na modernização dos sistemas de comando e controle, proteção e supervisão destas máquinas, utilizando-se de uma forma contratual denominada *turn key* (giro da chave), através da qual o fabricante faz tudo e deve entregar o equipamento já funcionando ligado ao Sistema.

A forma *turn key* de modernizar, deixou oportunidades para o surgimento de falhas na funcionalidade dos equipamentos, conforme descreveremos a seguir.

2.3 - DO PROJETO, INSTALAÇÃO E TESTES DOS RAT'S MODERNOS

Em 2003 iniciou-se o projeto de modernização primeiramente nas partes de proteção e comando e controle e posteriormente já em 2005, com as partes relativas ao sistema de excitação, porém com uma equipe composta por oito integrantes, os quais deixaram a Empresa Eletronorte antes da aquisição dos equipamentos.

A partir da assinatura do contrato, iniciaram-se os trâmites para fabricação e testes do produto, sendo este processo acompanhado por técnicos da Eletronorte.

No segundo semestre de 2006 já começaram a chegar os primeiros painéis fabricados.

2.3.1 – Participação no projeto

Trabalhando na Divisão de Transmissão de Marabá, o autor sendo um especialista em automação, não teve como participar totalmente da parte técnica deste projeto, mas na função de gerente da referida divisão, procurou prestar todo o apoio necessário.

Após a chegada dos fabricantes, iniciaram-se os trabalhos de montagem e de comissionamento, porém também se iniciaram as reuniões referentes à busca de soluções para os problemas encontrados e para o andamento dos serviços.

A presença do autor foi solicitada em várias reuniões e juntamente com as coordenações de cada especialidade, percebeu-se determinadas situações (problemas), as quais foram listadas como não conformidades do projeto. Dentre várias situações podemos citar algumas:

- Tentativa de remover a resistência de descarga de campo projetada (com quase trinta anos em serviço sem apresentar problema) e colocar a resistência de partida do compensador para fazer também a função de descarga de campo, sem nenhum cálculo e/ou sem nem uma simulação que fornecesse o embasamento para um bom funcionamento;
- A não apresentação da sequência dos testes e de ajustes preliminares do novo RAT (para atender às especificações da Máquina e do Sistema), antes de colocar o Compensador Síncrono conectado ao Sistema Elétrico, pois na atual política do Operador Nacional do Sistema – ONS, não é permitido parar por várias vezes, com a finalidade de testar, aplicar degraus e tentar quantas vezes forem necessárias até que tenhamos atendido aos critérios de ajustes estáticos e dinâmicos. A filosofia é que sejam feitos todos os ajustes previstos no RAT, antes da máquina ser colocada no sistema, e em uma ou duas paradas e/ou aplicações de degraus, já se consiga ajustes aceitáveis;
- No campo, também percebeu-se problemas como os barramentos de potência (situados na parte traseira dos painéis do RAT), muito próximos da carcaça e sem isolamentos, o que denunciava a probabilidade de curtos circuitos quando o RAT fosse energizado.

2.3.2 – Os compensadores síncronos de Vila do Conde

Na modernização dos dois Compensadores Síncronos de Vila do Conde esperava-se que o fabricante (o mesmo que atuou no Compensador Síncrono de Marabá) eliminasse todos os problemas encontrados, porém o autor chegou à Divisão de Transmissão de Vila do Conde em Agosto de 2013 e, no decorrer de oito meses juntamente com sua equipe, deparam-se com vários problemas nos dois Compensadores Síncronos de Vila do Conde, a saber:

- Comando de parada de emergência (durante o ciclo de partida) dos compensadores, não deve ser acionado, pois erros internos na parametrização dos

- processadores, liberam outros comandos que permaneceram chaveando o transformador de partida (com alto risco de queima deste transformador e explosão do disjuntor de potência) e quando é liberado o comando de parar o compensador, os freios não são aplicados;
- Os contatos do sensor de cada ventilador, os quais sinalizam ventilador desligado (na ponte retificadora), ao fechar o contato para esta situação, emite sinal que impede a energização do transformador de partida. Sendo (do nosso ponto de vista), uma filosofia que precisa ser discutida e se for o caso, mudada;
 - Muitos erros na instrumentação eletrônica, em relação aos níveis de “trip” ou seja, nível de 1º estágio e 2º estágio;
 - Congelamento (paralização) da AK, sendo que por vezes estas centrais pararam de processar e as máquinas permaneceram no mesmo ponto (imediatamente anterior ao problema) de operação, até que fosse promovida a parada do compensador correspondente, a fim de que fosse dado um “reset” e a situação se normalizasse.

2.3.3 – Ações corretivas

Observando-se os problemas acima descritos, os quais são posteriores à modernização e analisando-se sobre os reguladores de tensão destas máquinas, as seguintes considerações podem ser observadas:

- No problema das resistências de descarga de campo, verifica-se a falta de segurança do fornecedor, para lidar com um projeto que do ponto de vista técnico, jamais poderia ser feito por tentativa e erro;
- Até então inferiu-se que os reguladores utilizados para a modernização dos sistemas de excitação dos Compensadores Síncronos do Pará, estariam com várias não conformidades, exigindo assim total atenção dos técnicos da Eletronorte durante toda a fase de implantação deste projeto;
- As divisões de transmissão Marabá e Vila do Conde iniciaram uma série de planos de ação e acompanhamento dos trabalhos dos fornecedores em diversas áreas, iniciando também ações de estudos, preocupadas com o desempenho futuro dos sistemas de excitação dos seus compensadores, até pelos rumos tomados pelo Sistema Elétrico Nacional (na construção de grandes usinas a exemplo de Belo

Monte) os quais, possivelmente, mudarão os níveis de transmissão. No presente momento ainda não se conhece o que poderá ser exigido destas máquinas e controladores.

Conforme foi observado, existe certa insegurança nos posicionamentos do fornecedor, mudando as suas propostas (sem nem um subsídio de cálculo e/ou simulação) em todas as vezes que a equipe da Eletronorte discordou dos seus posicionamentos em relação aos novos Reguladores Automáticos de Tensão.

A Empresa Eletronorte, entende que não pode permanecer na incerteza sobre o desempenho dos reguladores automáticos de tensão, exigindo dos seus gerentes, ações preventivas e a solução, de preferência agindo antecipadamente. Para auxiliar na solução dos problemas, o corpo técnico de cada divisão desenvolveu dois tipos de ação:

1. Ações de análise e reparo;
2. Ações que carecem de estudos.

2.4 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO

O sistema a ser estudado é composto pelo conjunto Máquina Síncrona (Compensador Síncrono) e Sistema Automático de Excitação (Controlador PID Digital Automático), os quais serão descritos a seguir.

2.5 - O COMPENSADOR SÍNCRONO

O Compensador Síncrono, é uma máquina síncrona trifásica. Trata-se de um motor síncrono trifásico, com algumas características especiais, bem diferentes daquelas normalmente utilizada na maioria dos motores elétricos, em particular em relação à potência mecânica no seu eixo, para o acionamento de cargas e sistemas mecânicos. As características especiais, as quais permitem sua utilização como controlador de níveis de energia reativa tanto em subestações quanto nas redes de transmissão de energia elétrica, são obtidas quando controla-se a corrente do rotor, variando para valores positivos e negativos por meio de um sistema de excitação.

Sobre os Compensadores Síncronos de Vila do Conde e Marabá, descrevem-se abaixo algumas informações gerais, porém de grande importância, bem como uma visão sucinta de como estas máquinas são operadas e mantidas.

Nas Figuras 2.1 e 2.2, é possível visualizar o arranjo dos compensadores síncronos

de Vila do Conde e Marabá respectivamente. Na Tabela 2.1 é possível verificar alguns dados nominais constantes nas placas dos referidos compensadores e sistemas auxiliares.



Figura 2.1 - Os dois compensadores síncronos de Vila do Conde.



Figura 2.2 - O compensador síncrono de Marabá.

Tabela 2.1 - Dados de placa dos compensadores síncronos

Parâmetro Físico	Valor do Parâmetro
Potência Nominal	150 MVar
Tensão Nominal	13,8 kV
Corrente Nominal por Fase	6,276 A
Frequência	60 Hz
Velocidade Nominal	900 rpm
Velocidade Máxima	1080 rpm

2.6 – CONSIDERAÇÕES

Através das Figuras 2.1 e 2.2, pode-se observa-se também o seguinte:

- Os dois compensadores síncronos de Vila do Conde e o compensador de Marabá são máquinas horizontais;
- Três grandes "dutos" horizontais, chegando até os compensadores, efetuam a conexão dos mesmos com o lado de 13,8 kV de um transformador de 230/13,8 kV/160 MVA. Estes três grandes tubos possuem diâmetro de aproximadamente 1 m, sendo que no interior dos tubos estão os condutores (barramentos) propriamente ditos, os quais são apoiados em isoladores. A este arranjo de condutores enclausurados e apoiados em isoladores, chama-se barramento blindado. Os barramentos blindados dos compensadores síncronos, acima referidos, são projetados para serem pressurizados com 0,6 bar, representando mais um processo de manutenção e conseqüentemente custos. Neste sistema existem vários problemas preocupantes, em termos de segurança operacional, pois a entrada da alta umidade presente no norte do Brasil, por vezes, chega a romper o dielétrico dos isoladores, provocando curtos circuitos do tipo fase-terra;
- Já existem recomendações para que em um futuro processo de *retrofitting* destas máquinas, sejam eliminados os barramentos blindados, construindo-se subestações de 13,8 kV expostas "a céu aberto", a exemplo de inúmeras outras subestações em 13,8 kV existentes no Brasil;
- Três grandes "dutos" verticais derivados daqueles horizontais que fazem a conexão da rede de 13,8 kV, a um transformador trifásico de 13,8 kV/514 V, 0,790 MVA por fase, sendo este o transformador de excitação. Ressalta-se que todos os outros equipamentos de potência inerentes aos compensadores, tais como transformador de partida e disjuntores, são conectados através de barramentos blindados, da mesma forma observada no transformador de excitação;
- A estrutura suspensa, com tubos verdes de grosso calibre: trata-se do painel de radiadores, os quais em número de seis, fazem a troca de calor através de um circuito fechado de água tratada;
- Chama-se à atenção para os cilindros (na cor amarela) empilhados. Este conjunto de cilindros interconectados através de mangueiras, é a fonte que abastece o sistema de hidrogênio, uma vez que no interior do compensador síncrono, este gás é o maior responsável pelo resfriamento do compensador.

2.7 - DESCRIÇÃO SUCINTA DO FUNCIONAMENTO DOS COMPENSADORES

Os Compensadores Síncronos de Vila do Conde e Marabá, são motores síncronos com a corrente de campo controlada, o que possibilita estas máquinas rastrear todas as variações de potência reativa, ocorridas entre + 150 e -90 MVar. Ressalta-se que, no que diz respeito às compensações de reativos, o setor de Engenharia da Empresa Eletronorte já se pronunciou sobre a possibilidade de futura aquisição de compensadores estáticos. Porém, sabe-se que as máquinas rotativas continuam sendo preferidas quando se deseja rastrear qualquer tipo de curva de carga, principalmente com variações de todas as formas e amplitudes. Além disso, em comparação com as diversas tecnologias de existentes para compensadores estáticos que geram muitos harmônicos, o compensador síncrono rotativo possui a grande vantagem de gerar uma quantidade desprezível de harmônicos.

Sobre as máquinas citadas acima, descreveremos também sucintamente os principais subsistemas e acessórios necessários ao seu funcionamento:

- Sistema de Excitação: composto basicamente de uma excitatriz estática, possuindo duas pontes retificadoras (controladas) a tiristores, sendo que cada ponte pode fornecer até 1.331 A, o suficiente para manter a corrente máxima de excitação por tempo indeterminado, em caso de problemas técnicos que prejudiquem o funcionamento de uma das duas pontes. Ressalta-se que as duas pontes possuem sistema de extração para fora do painel, o que possibilita darmos a devida manutenção fora do painel e depois inserirmos a ponte reparada, tudo com a máquina em operação contínua;
- Sistema Hidromecânico (lubrificação): Compreende os subsistemas de óleo de levantamento do eixo, bem como a lubrificação direta dos mancais e ar comprimido.

Nas Figuras 2.3 e 2.4 é possível visualizar algumas partes dos sistemas hidráulicos, as quais ficam em um subsolo embaixo do piso da sala de comando dos compensadores.

Ressalta-se que neste subsolo também está instalada grande parte da instrumentação aplicada nas medições de grandezas hidráulicas, as quais são utilizadas na automação e controle dos compensadores síncronos. Através das Figuras 2.3 e 2.4 também é possível ter-se uma noção da complexidade destas máquinas.



Figura 2.3 - Parte do sistema hidromecânico dos compensadores de Vila do Conde.
Fonte: DUARTE *et al.* (2015).



Figura 2.4 - Parte do sistema hidromecânico dos compensadores de Vila do Conde.
Fonte: DUARTE *et al.* (2014).

- Sistema de Automação: Compreende os subsistemas de Proteção, Comando e Controle, e supervisão, estando estes muito bem "misturados" no gerenciamento das máquinas de um modo geral, compondo todos os comandos locais e remotos de preparação, partida e parada, bem como a emissão de todos os pontos de alarme e de *trip*, composição da lista de eventos e parte do monitoramento. O Hardware destes sistemas é composto de Unidades Digitais (parametrizadas) as quais elaboram todas as funções dos relés de proteção e supervisão. Estas Unidades de Controle, direcionam as tomadas lógicas de decisão, para uma última Unidade de Controle chamada AK, a qual libera estas decisões, principalmente as de "parada de máquina" ou "alarme", frente a um defeito ou falha;
- Sistema de selagem: Compõem principalmente os selos de vedação (mecânico

hidráulico), os quais vedam as duas extremidades do eixo evitando o escapamento do Hidrogênio que ocupa o espaço entre o rotor e o estator e, ainda preserva também o óleo de lubrificação dos próprios mancais, evitando que este óleo entre na máquina;

- Sistema de CO₂: É necessário para fazer a varredura, ou seja, expulsar o Hidrogênio dos espaços onde pessoas deverão trabalhar dentro da máquina, evitando a possibilidade de incêndio repentino descontrolado (explosão), pelo fato da possibilidade de existência de hidrogênio (gás altamente inflamável);
- Sistema de Hidrogênio H₂: Este é o responsável pela baixa temperatura das máquinas, pois sua molécula sendo a menor molécula do espectro químico, penetra nos menores espaços livres retirando calor com alta eficiência. A eficiência deste sistema é tão alta que o tamanho das máquinas é considerado pequeno para a potência gerada, se comparadas com geradores resfriados a água, ou por outros fluídos conhecidos;
- Sistema de água tratada: É um sistema composto por uma pequena central de tratamento por osmose reversa (retém os minerais da água) de água, com a finalidade de retirar moléculas que provocariam a oxidação das partes (tubulações, colmeia de radiadores etc.) metálicas, pois havendo moléculas que ataquem estas partes, causariam furos e os consequentes vazamentos da água, inutilizando os sistemas de resfriamento. A finalidade deste sistema é entregar água de boa qualidade ao sistema de resfriamento;
- Sistema de Resfriamento: Composto por vários radiadores (em nº de 11), e moto ventiladores. A grande finalidade deste sistema é auxiliar na retirada de calor pelo hidrogênio deixando este calor nos radiadores, os quais o entregam para a atmosfera;
- Sistema de Frenagem: Constituído basicamente de um conjunto de resistores de aço inox, dissipadores da corrente gerada pela tensão terminal da máquina após este ser desligado da rede e ainda permanecer girando. A parada se dá em um curto espaço de tempo, devido ao campo elétrico contrário imposto ao movimento do rotor;
- Sistema de Descarga de Campo: É um sistema que faz a dissipação da energia acumulada nas bobinas do rotor. Quando são feitos desligamentos intempestivos, não dando tempo de programar uma desexcitação da máquina, toda a energia armazenada nas bobinas do rotor, retorna para dentro da excitatriz, podendo causar danos irreparáveis a esta. Desta forma coloca-se um resistor (nos

compensadores em referência, são utilizados varistores) em paralelo com o campo, imediatamente antes da abertura do disjuntor de campo, para que a energia seja dissipada por efeito Joule em um circuito RL. Nos compensadores do Pará, a inserção deste resistor se dá há cerca de 2 ms antes da abertura do disjuntor de campo;

- Sistemas de Monitoramento: Compreende o sistema denominado SIMME, o qual permite o monitoramento online e à distância de várias grandezas dos Compensadores Síncronos de Vila do Conde e Marabá. Este sistema possui a listagem dos 25 pontos monitorados, a Figura 4.2.

2.8 - MODOS DE OPERAÇÃO DOS COMPENSADORES

Os Compensadores Síncronos de Vila do Conde e Marabá, são utilizados no controle da potência reativa nas barras de 230 kV. Esses compensadores estando ligados às barras de 230 kV, funcionam como motor síncrono trifásico, com controle da tensão (tensão de campo) do rotor e operam em duas formas distintas a saber: sobre-excitado e subexcitado.

Quando sobre-excitado conseguem injetar potência reativa na rede (fator de potência adiantado), cedendo potência reativa para o sistema elétrico. Neste caso, a potência reativa é injetada nas barras de acordo com as necessidades do despacho de carga. Quando operando subexcitado, conseguem absorver potência reativa da rede (fator de potência atrasado), absorvendo potência reativa do sistema elétrico. Neste caso, a potência reativa é enviada das barras para a máquina, de acordo com as necessidades.

CAPÍTULO 3

A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS INVESTIGADOS

3.1 - CARACTERÍSTICAS DAS INSTALAÇÕES

As subestações de Marabá e Vila do Conde foram inauguradas em outubro de 1981. A Subestação de Marabá; Localiza-se na região Norte, no sudeste do Pará, integrando o Sistema Norte-Nordeste de Transmissão da ELETRONORTE, interligada a UHE Tucuruí. Clientes: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A., REDE CELPA e VALE.

Para fins de fornecer suporte de potência reativa ao sistema de transmissão, a Subestação de Marabá possui um Compensador Síncrono, utilizado desde o início do funcionamento da Subestação. Esse compensador contribui para regular a tensão no lado das barras de 230 kV. Seguem, abaixo, alguns dados característicos da subestação de Marabá:

- Possui um banco de autotransformadores 500/ 230 kV - 300 MVA, um banco de autotransformadores 500/ 230 kV - 450 MVA, três transformadores trifásicos 230/69 kV - 33 MVA e um transformador 230/13,8 kV - 160 MVA, um Compensador Síncrono, dois bancos de condensadores trifásicos (em série) de 348 e 283 MVar respectivamente, doze bancos de reatores de 60 MVA;
- A Subestação Vila do Conde, localiza-se no Município de Barcarena, na região Norte, no Nordeste do Pará, integrando o Sistema de Transmissão da ELETRONORTE, interligada à UHE Tucuruí. Clientes: ELETRONORTE - Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A., REDE CELPA, ALBRAS E ALUNORTE; para fins de fornecer suporte de potência reativa ao sistema, a subestação de Vila do Conde possui dois Compensadores Síncronos, utilizados desde o início do funcionamento da Subestação, os quais contribuem para regular a tensão no lado das barras de 230 kV. Seguem abaixo alguns dados característicos da subestação de Vila do Conde;
- Possui quatro bancos de autotransformadores 500/ 230 kV - 750 MVA, quatro bancos de reatores de 60 MVar, dois transformadores 230/13,8 kV - 160 MVA (conectados aos Compensadores Síncronos) e dois transformadores de 230/69 kV - 200 MVA.

3.2 - DA INSTALAÇÃO À SUBSTITUIÇÃO DOS PRIMEIROS RAT'S

Os compensadores síncronos de Vila do Conde e Marabá são máquinas idênticas com potência de 150 MVA_r, rotação nominal de 900 RPM e 8 polos.

Inicialmente funcionaram muito bem, porém a partir do início dos anos 2000, sua performance começou a mudar devido ao envelhecimento e obsolescência de vários componentes das partes eletro/eletrônica, trazendo transtornos para as equipes de manutenção, as quais tinham dificuldades para manter o bom desempenho, frente à falta de sobressalentes, dificuldades de importação e também pela não fabricação de vários componentes.

No ano de 2005, a Empresa Eletronorte chegou à conclusão que deveria substituir estes reguladores de tensão (assim como grande parte dos seus sistemas de proteção), em um processo chamado de RETROFIT. Desta forma, os RAT's instalados no início dos anos 80, deram lugar aos RAT's mais modernos do tipo eletrônico digital, parametrizados.

3.3 - A CONCEPÇÃO DO PROJETO E INSTALAÇÃO DOS RAT'S MODERNOS

Iniciou-se o projeto com uma equipe composta por oito integrantes, os quais deixaram a Empresa Eletronorte, antes da aquisição dos equipamentos. A partir da assinatura do contrato, iniciaram-se os trâmites para fabricação e testes do produto, sendo este processo acompanhado por técnicos da Eletronorte.

No segundo semestre de 2006, começaram a chegar os primeiros painéis fabricados.

3.4 - A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS NO COMPENSADOR DE MARABÁ

Sobre vários problemas e em especial aquele relacionado com a resistência de descarga de campo; após várias tentativas de mostrar ao fabricante a não conformidade e os riscos inerentes às suas propostas, até pelos motivos já citados acima, esta situação foi resolvida em Brasília (sede da Eletronorte), em uma reunião decisiva com o fabricante, onde entre os diversos assuntos a serem tratados, estava em pauta o questionamento sobre a resistência de descarga de campo. Após nossas análises e na função de gerente da planta, demos o nosso parecer documentado, não aceitando a solução do fabricante e ao mesmo

tempo solicitando a permanência da resistência (de descarga de campo) original, pois com esta resistência, os compensadores funcionaram por mais de trinta anos sem apresentarem quaisquer tipos de problemas.

Ressalta-se ainda, que a solução dada para o compensador síncrono de Marabá, foi recomendada para os dois compensadores síncronos de Vila do Conde, pois os projetos das máquinas de Marabá e Vila do Conde são exatamente iguais. Para este problema (da resistência de descarga de campo) especificamente, descreveremos as análises feitas e o desfecho final para a solução, conforme a seguir.

3.5 - A UTILIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE DESCARGA DE CAMPO

Devido à importância das resistências de descarga de campo e da resistência de partida, no funcionamento dos compensadores síncronos e sendo estes sistemas afetados pela modernização, faremos um resumo do funcionamento destas resistências (principalmente da resistência de descarga de campo) e de como este problema foi resolvido.

- A resistência de Descarga de Campo, funciona como dissipador (por efeito Joule) da energia armazenada nas bobinas do rotor, quando esta máquina está excitada e o disjuntor de descarga de campo é aberto repentinamente;
- Nas figuras e tabelas, é possível visualizar o resumo dos processos de compensador parado, partida, excitação e desexcitação (no processo do compensador parando) dos compensadores síncronos do Pará, mostrando como os disjuntores, a resistência de descarga de campo e a resistência de partida são utilizados.

3.5.1 - Resumo do processo - Compensador síncrono parado

O compensador síncrono está parado, devido a um comando de parada recebido anteriormente por uma parada programada, ou pelos comandos da proteção devido a um defeito qualquer. Em ambos os casos, a sua resistência de descarga de campo foi inserida 2 ms antes da abertura do disjuntor de campo. A resistência de partida já se encontrava desligada antes do início do processo de parada. Na Tabela 3.1 é possível visualizar a sequência de eventos e na Figura 3.1 é possível visualizar o estado dos componentes neste processo.

Tabela 3.1 - Resumo do processo - compensador síncrono parado.

RESUMO DO PROCESSO - COMPENSADOR SÍNCRONO - PARADO			
Equipamento	Componente	Estado	Função
Disjuntor 19 D	Contato 01	Fechado	Energizar a Resistência (RD) de Descarga de Campo
	Contato 02	Aberto	Desenergizar a Resistência (RDA) de Partida
Disjuntor 41	Contato 01	Aberto	Desenergizar o Rotor - Campo
	Contato 02	Aberto	Desenergizar o Rotor - Campo
	Contato 03	Fechado	Energizar a Resistência (RD) de Descarga de Campo
Resistência	(RDA) de Partida	Desligada	Limitar a corrente no rotor, durante a partida do Compensador
	(RD) de Partida	Ligada	Absorver a energia armazenada no rotor, na abertura do Disjuntor de Campo

Na Figura 3.1 está ilustrado o estado dos compensadores síncronos parados.

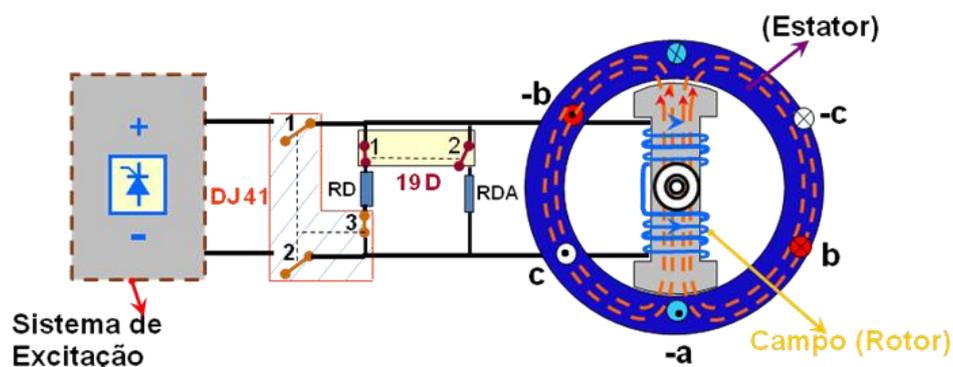


Figura 3.1 - Resistência RD (de descarga de Campo) ligada ao rotor da máquina.

3.5.2 - Resumo do processo de partida do compensador síncrono

Na partida do compensador síncrono devido a um comando de partida, a sua resistência de descarga de campo é imediatamente desligada, sendo inserida também imediatamente a resistência de. Na Tabela 3.2 é possível visualizar a sequência de eventos deste processo e na Figura 3.2 a ilustração do estado dos componentes neste processo.

Tabela 3.2 - Resumo do processo de partida do compensador síncrono.

RESUMO DO PROCESSO - PARTIDA DO COMPENSADOR SÍNCRONO			
Equipamento	Componente	Estado	Função
Disjuntor 19 D	Contato 01	Aberto	Desenergizar a Resistência (RD) de Descarga de Campo
	Contato 02	Fechado	Energizar a Resistência (RDA) de Partida
Disjuntores D3 e D4	Contatos Principais	Fechados	Conectar o estator do Compensador, ao Transformador de Partida;
Transformador de Partida	-	Energizado	Energizar o rotor do Compensador, em 3,5 kV;
Rotor do Compensador	-	Energizado	Iniciar o giro, ir aumentando a rotação lentamente, até alcançar a rotação nominal;

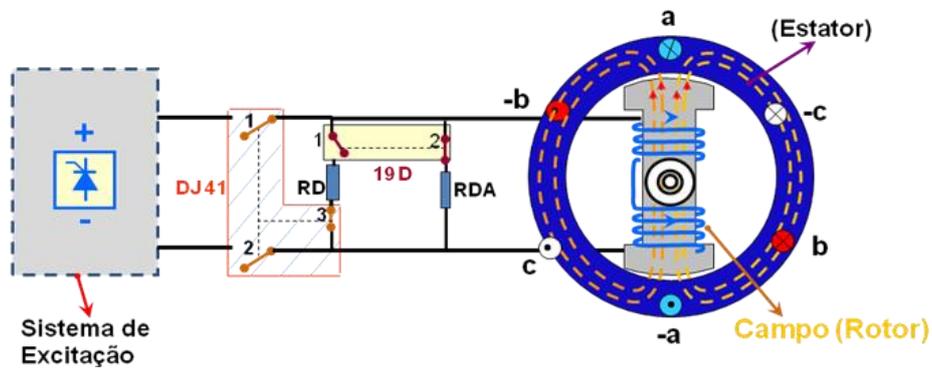


Figura 3.2 - Resistência RDA (de partida) ligada ao rotor da máquina, no processo de partida do compensador.

3.5.3 - Resumo do processo - Excitação do compensador síncrono

Estando próximo das 900 rpm, o compensador recebe o comando automático de excitação. Neste momento a resistência de desligada, a resistência de descarga de campo já estava desligada e o disjuntor de campo é fechado, ligando o sistema de excitação. Na Tabela 3.3 é possível visualizar a sequência de eventos e na Figura 3.3 visualiza-se a ilustração do estado dos componentes dos compensadores síncronos, neste processo.

Tabela 3.3 - Resumo do processo de excitação do compensador síncrono.

RESUMO DO PROCESSO - EXCITAÇÃO DO COMPENSADOR:			
Equipamento	Componente	Estado	Função
Disjuntor 41	Contato 01	Fechado	Energizar o Rotor - Campo (excitando a máquina)
	Contato 02	Fechado	Energizar o Rotor - Campo (excitando a máquina)
	Contato 03	Aberto	Desligar a Resistência (RD) de Descarga de Campo
Disjuntor 19 D	Contato 01	Fechado	Garantir a energização da Resistência (RD) de Descarga de Campo
	Contato 02	Aberto	Desligar a Resistência (RDA) de Partida
Rotor		Girando	Na rotação nominal e excitado

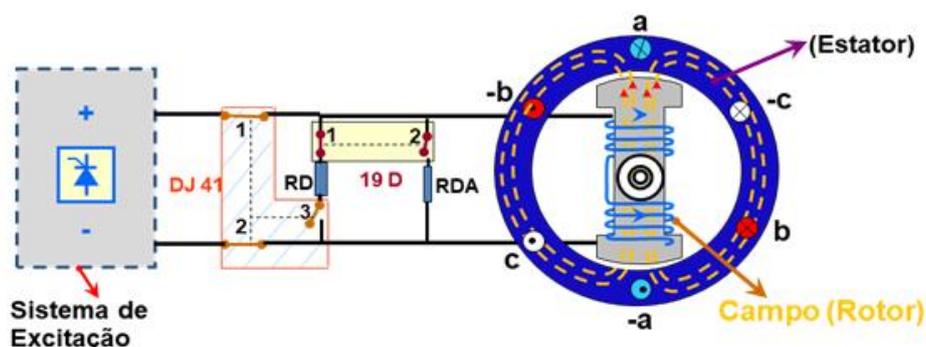


Figura 3.3 - Resistências RD (de descarga de Campo) e RDA (de partida) desligadas.

3.5.4 - Resumo do processo - Compensador síncrono parando

Devido a um comando de parada programada, ou pelos comandos da proteção devido a um defeito qualquer, o disjuntor de linha D1 é aberto e imediatamente o disjuntor de campo DJ 41 também é aberto, sendo que entre seus contatos, surge uma sobre tensão de até seis vezes a tensão de excitação no momento da abertura do disjuntor de campo. A resistência de descarga de campo, tendo a função de receber da corrente reversa, provocada pela energia armazenada no rotor, é inserida 2 ms antes da abertura do disjuntor de campo. A resistência de partida já se encontrava desligada antes do início do comando de parada. Na Tabela 3.4 é possível visualizar a sequência de eventos e na Figura 3.4 visualiza-se a ilustração do estado dos componentes dos compensadores neste processo.

Tabela 3.4 - Resumo do processo - compensador síncrono parando.

RESUMO DO PROCESSO - COMPENSADOR SÍNCRONO - PARANDO			
Equipamento	Componente	Estado	Função
Disjuntor D1	Contato	Aberto	Desligar o Compensador da rede elétrica
Disjuntor 41	Contato 03	Fechado	Energizar a Resistência (RD) de Descarga de Campo
	Contato 01	Aberto	Desenergizar o Rotor (desexcitando a máquina)
	Contato 02	Aberto	Desenergizar o Rotor (desexcitando a máquina)

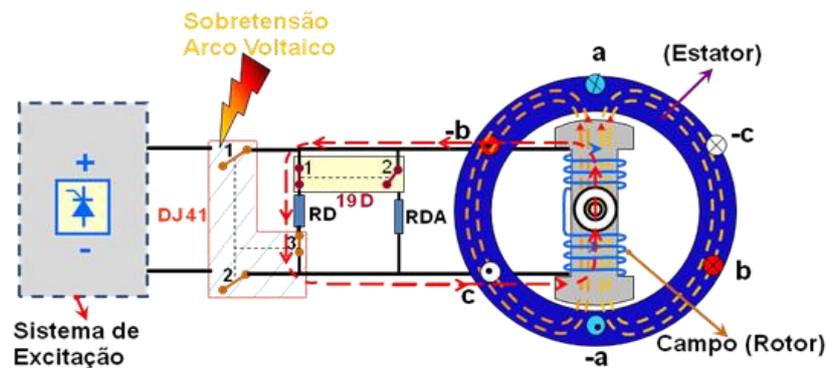


Figura 3.4 - Resistência RD (de descarga de Campo) ligada ao rotor da máquina, no processo de parada do compensador.

Observações:

Local,

- A finalidade da RD inserida, é absorver toda a energia armazenada nas bobinas do rotor;
- Na Figura 3.5 é possível visualizar o estado dos disjuntores de potência utilizados no chaveamento dos compensadores dos compensadores síncronos, estando parados (desligados do sistema);
- Na Figura 3.6 é possível visualizar, o estado dos disjuntores de potência utilizados no chaveamento dos compensadores, estando funcionando conectados ao sistema.

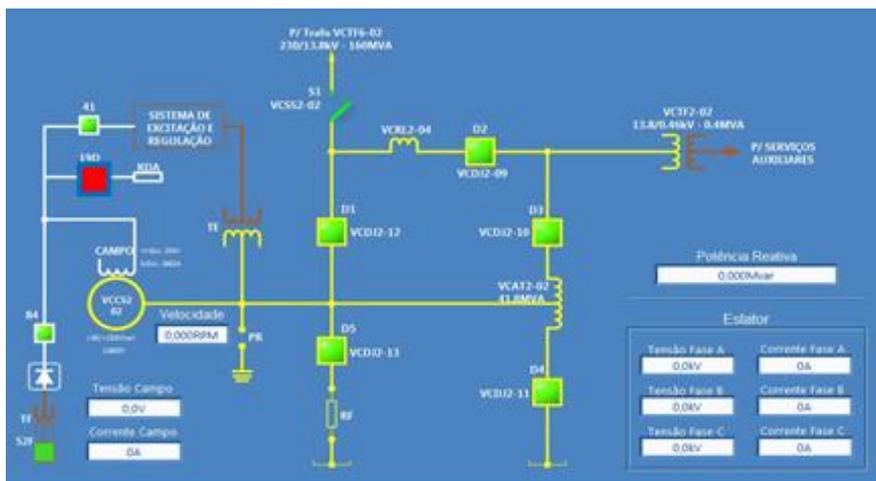


Figura 3.5 - Representação unifilar dos compensadores de Vila do Conde e Marabá parados (desligados do Sistema).
Fonte: DUARTE (2012).

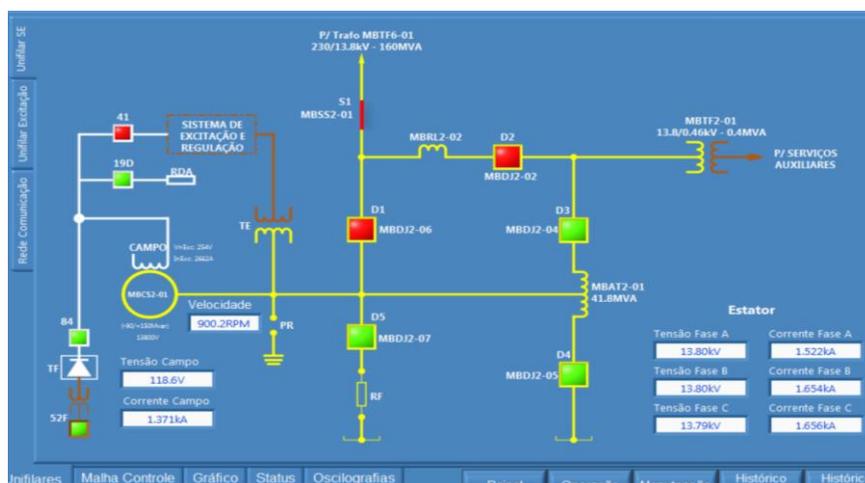


Figura 3.6 - Representação unifilar dos compensadores de Vila do Conde e Marabá ligados ao Sistema.
Fonte: DUARTE (2012).

3.5.5 - Propostas do fornecedor

O Fornecedor verificou a possibilidade de substituir o Resistor de Descarga de Campo (banco de varistores) do projeto original, colocando a resistência de partida, para fazer o processo de partida e descarga de campo ao mesmo tempo. Cita-se a seguir as propostas do mesmo:

3.5.5.1 - A primeira proposta do fornecedor

- Eliminação do Disjuntor 19 D;
- Retirada da RD (original) e utilizar a $\frac{RDA}{4}$ fazendo as funções de partida e descarga de campo;
- Adicionar os *thiristores* TH1 e TH2, para funcionarem como direcionadores da corrente. Na Figura 3.7 é possível visualizar o arranjo físico descrito na primeira proposta.

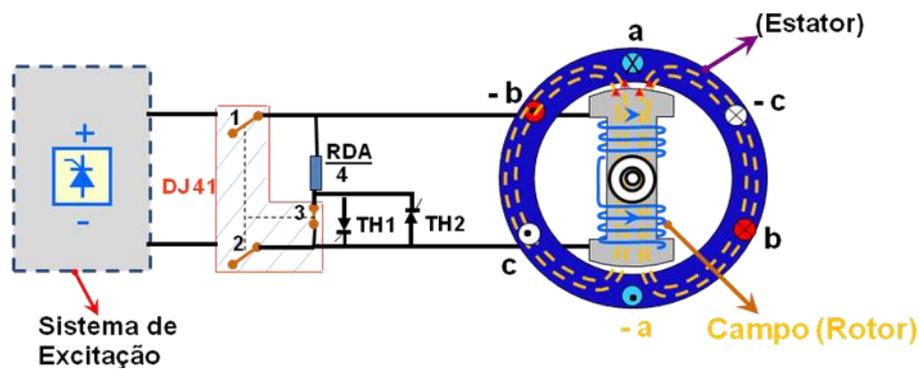


Figura 3.7 - Nova Resistência de descarga de campo, sugerida pela primeira proposta do fornecedor.

3.5.5.2 - Segunda proposta do fornecedor

- Eliminação do Disjuntor 19 D;
- Retirar a RD e utilizar a RDA para as funções de partida e descarga de campo;
- Adicionar os *thiristores* TH1 e TH2, para funcionarem em situações especiais.

Na Figura 3.8 é possível visualizar o arranjo físico.

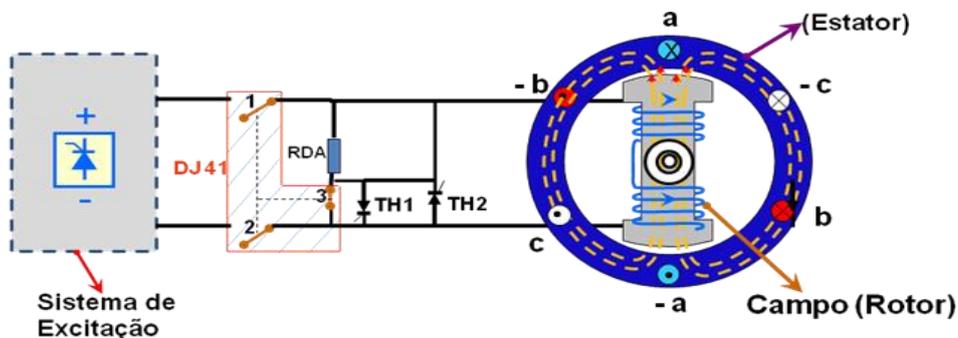


Figura 3.8 - Nova resistência RD de descarga de campo, sugerida pela segunda proposta do fornecedor.

3.6 - ANÁLISES DAS PROPOSTAS DO FORNECEDOR

Foram feitas as avaliações técnicas e cálculos a nível de engenharia e exigidas alterações no projeto do fornecedor, pois foi constatado o não atendimento de requisitos vitais do projeto original, conforme a seguir:

3.7 - FUNCIONAMENTO COM A RD ORIGINAL

Esta análise servirá de base para comparação com os valores propostos pelo fornecedor.

A RD original, foi projetada segundo a constante de tempo de eixo direto ($T'_{do} = 4,12$ s), tempo exigido pela máquina, para dissipação da energia ($E = \frac{1}{2}Li^2$) armazenada no rotor, segundo a equação exponencial $I(t) = I_0.e^{-R(t)/L}$, a qual se aproxima muito da reta calculada para a descarga de campo. Na Figura 3.9 é possível visualizar e comparar a descarga prevista pela curva calculada (curva azul) e a descarga real através da resistência de descarga do projeto original (curva vermelha).

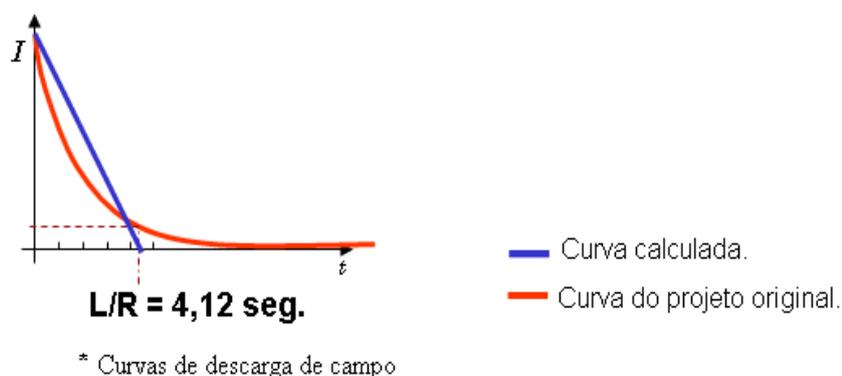


Figura 3.9 - Desempenho da RD original.

Fonte: DESOER (1979).

O projeto proposto pelo fornecedor possuía duas alterações significativas, as quais foram divididas em dois casos:

3.8 - ANÁLISE DA PRIMEIRA PROPOSTA FEITA PELO FORNECEDOR

Caso 1: Retirar a RD e utilizar a $\frac{RDA}{4}$ para fazer as funções de partida e descarga de campo.

A resistência RDA é praticamente duas vezes o valor de RD, o que fornece a constante de tempo $L/R = 2,06$ s, considerada muito pequena para dissipar a energia armazenada no rotor. Na Figura 3.10 é possível visualizar (a reta em vermelho) o tempo (bem menor) de descarga através da resistência da primeira proposta.

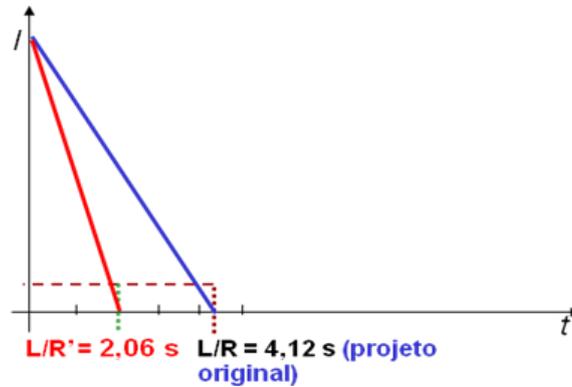


Figura 3.10 - Gráfico comparativo da Constante de tempo de $\frac{RDA}{4}$.

Este tempo de 2,06s poderia não ser suficiente para garantir a integridade do Resistor, pois a descarga muito rápida produz sobrecorrentes, com a possibilidade de gerar também maiores sobretensões no momento da descarga. O Valor RDA/4 compromete totalmente a rampa de partida da máquina, com a possibilidade de causar problemas mecânicos com relação aos polos.

3.9 - ANÁLISE DA SEGUNDA PROPOSTA FEITA PELO FORNECEDOR

Caso 2: Adicionar os *thiristores* TH1 e TH2, para funcionarem em situações especiais.

Durante a parada, em caso de condução indevida ou curto circuito do thiristor **TH2**, o rotor da máquina estaria curto circuitado e a energia seria dissipada somente na resistência do enrolamento do rotor (0,08295 Ω). Na Figura 3.11 é possível visualizar o tempo (pela reta em vermelho) muito maior que o tempo do projeto original (pela reta em azul).

Com este valor de resistência o tempo para descarga alcançaria 17,034 s, cerca de quatro vezes maior que o tempo de descarga calculado. Isto poderia expor o rotor ao sobre aquecimento.

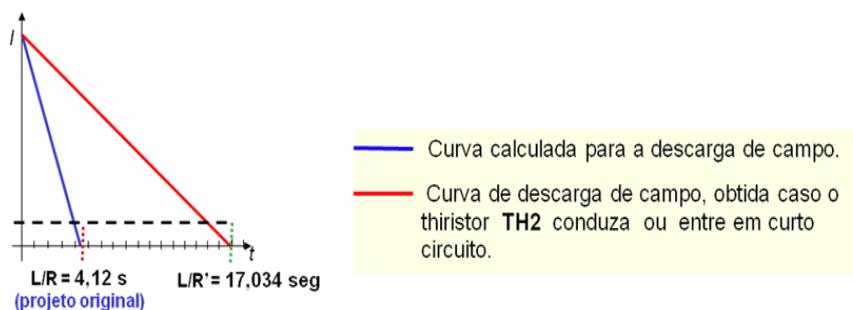


Figura 3.11 - Funcionamento em caso da descarga de campo ser feita somente através da resistência do rotor.

3.10 - A DECISÃO DA ELETRONORTE

No período de 27 a 31/07/09 houve reunião entre a empresa contratante e a empresa fornecedora (do Sistema de Excitação), sendo que a contratante se posicionou não concordando com nenhuma das soluções propostas, uma vez que este valor de $0,125 \Omega$, afeta o tempo de partida e poderá causar problemas ao rotor da máquina, pois alterando-se este valor de resistência, está se desprezando o parâmetro T'_{do} (dado de projeto da máquina), o qual é a base para os cálculos do tempo da descarga de campo. Ressalta-se que o T'_{do} é calculado em função de $e^{L/R}$, onde L é a indutância do rotor e em R está aplicada a resistência descarga de campo, sendo por esta razão inviável a alteração destes parâmetros (DUARTE, 2015).

Sobre os demais problemas relativos aos ensaios e ajustes, envolveu-se o pessoal de estudos de Brasília e esta nova equipe, auxiliou na determinação dos modelos e parâmetros, bem como nos ensaios estáticos e dinâmicos e tudo ficou resolvido, de modo que o Compensador Síncrono de Marabá, o qual entrou no sistema em dezembro de 2009, mostra até hoje um bom desempenho.

Com a chegada de novos integrantes na equipe de proteção, comando e controle, tivemos a oportunidade de treinar esta equipe direcionada para o Regulador Automático de Tensão - RAT, da referida máquina e desta forma, esta equipe foi se familiarizando, de modo a ter o domínio do software e hardware, sendo capaz de resolver quase todos os problemas que apareceram.

3.11 - OS PROBLEMAS REMANESCENTES NOS COMPENSADORES SÍNCRONOS DE VILA DO CONDE E MARABÁ

O primeiro Compensador a ser retrofitado (modernizado) foi o de Marabá (em 2009). Os compensadores de Vila do Conde foram modernizados um ano depois (em 2010), porém os problemas deixados em Vila do Conde, foram em maior quantidade que em Marabá.

A partir de Agosto de 2013, iniciaram-se uma grande variedade de demandas técnicas corretivas junto aos fornecedores, bem como de treinamentos para o corpo técnico da Eletronorte, a fim de resolverem as pendências deixadas nestas máquinas.

Com as referidas equipes mais bem treinadas e com ações integradas entre as Divisões de Vila do Conde e Marabá, foi possível obter-se um avanço considerável na solução dos problemas já citados (DUARTE, 2015).

Nesta jornada de solução de problemas, existem alguns fatores a comentar:

- Dos três compensadores do Pará, o mais problemático (o pior) deles até o ano de 2016, foi o compensador Síncrono nº 02 de Vila do Conde, com um recorde de **quinze desligamentos** entre 01.01.15 a 13.11.16, no qual a disparidade é grande, pois o compensador de Marabá (MBCS2 01) e o compensador nº 01 de Vila do Conde VCCCS2 01, tiveram juntos **doze desligamentos** no mesmo período. Na Figura 3.12 é possível visualizar o desempenho dos principais equipamentos do sistema no Pará rito acima.



Figura 3.12 - Desligamentos por equipamento de 01.01.15 a 13.11.16.

Para um melhor esclarecimento sobre o que significou (para a empresa) as quinze paradas do compensador síncrono nº 2 de Vila do Conde, na Tabela 3.5, é possível visualizar o registro de cada parada com a data da ocorrência, o motivo e o tempo gasto desde a parada até a partida, após a solução de cada problema.

Tabela 3.5 - Tempos gastos nas paradas do compensador nº 02 de Vila do Conde.

Data	HORA	CAUSA	TEMPO DA PARADA
28/01/2015	11:55	Falha em Relé Auxiliar	1 h e 1 min
30/01/2015	10:42	Baixo Nível de Água de Resfriamento	54 min
12/04/2015	07:56	Falha Humana e Manobra	2 h e 56 min
12/04/2015	12:48	Umidade no Disjuntor FKG	10 h e 15 min
07/07/2015	02:41	Cartela Eletrônica; perda comunicação	1 h e 21 min
07/07/2015	05:29	Cartela Eletrônica; perda comunicação	36 h
09/07/2015	12:03	Umidade no Disjuntor FKG	52 min
27/10/2015	13:11	Umidade no Disjuntor FKG	4 h
07/12/2015	10:51	Cartela Eletrônica; perda comunicação	3 h
08/12/2015	16:04	Baixa isolamento na Fiação AC/CC	1 h e 6 min
09/12/2015	12:28	Baixo Fluxo de Água	33 min
09/12/2015	16:39	Cartela Eletrônica; perda comunicação	24 h
22/08/2016	15:01	Umidade no Disjuntor FKG	7 h e 1 min
06/10/2016	12:55	Umidade no Disjuntor FKG	9 h e 28 min
26/10/2016	15:36	Falha Humana; erro operacional	46 min
Tempo total de parada por falhas			103 h e 13 min

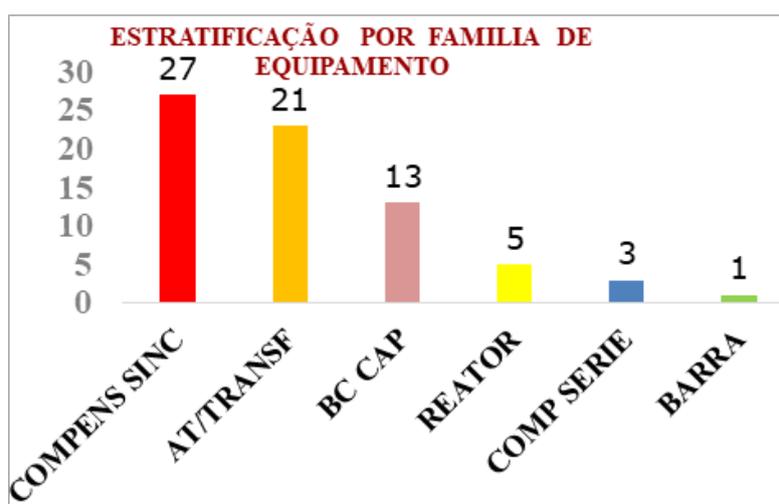


Figura 3.13 - Estratificação de desligamentos por família de equipamento no período de 01.01.15 a 13.11.16.

Na Figura 3.13 é possível visualizar os paretos dos desligamentos dos três compensadores síncronos juntos, nota-se que no período de 01.01.15 a 13.11.16, estas

três máquinas juntas desligaram mais que as centenas de outros equipamentos operando nas subestações da Eletronorte no Pará.

Com um novo processo de gestão as equipes se mobilizaram, aplicaram as técnicas possíveis para a identificação dos problemas e trabalharam de forma programada, agindo na causa identificada para cada problema, de modo que em 2017, o compensador síncrono de Vila do Conde, tido anteriormente como a pior máquina da Eletronorte no estado Pará, não desligou nem uma vez por falha ou defeito. Não tendo nem um desligamento no período de 30.11.2016 a 30.11.2017, portanto sem nem um desligamento no período de um ano, apresentando um desempenho de excelência, melhor que muitas máquinas mais novas.

3.12 – CONCLUSÃO

Conforme foi mostrado neste capítulo pelo exemplo do emprego indevido da resistência de descarga de campo no lugar da resistência de partida, alterando o sistema de descarga de campo e o sistema de partida, isto poderia trazer problemas adicionais para os compensadores síncronos. Este foi um problema detectado e resolvido pela equipe mantenedora, antes de ser implementado no projeto, porém tornam-se necessárias ações preventivas nos principais sistemas modernizados, a fim de tentar-se diagnosticar e resolver quaisquer outros problemas que por acaso ainda estejam em estado latente. O caso dos compensadores de Vila do Conde é preocupante, pois o fornecedor (apesar da experiência anterior no compensador síncrono de Marabá) não melhorou sua performance, deixando outra quantidade de problemas para serem resolvidos em Vila do Conde. Atualmente esta situação é de inteira responsabilidade das equipes mantenedoras, pois a garantia contratual já aspirou.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DO CONJUNTO COMPENSADOR SÍNCRONO E SISTEMA DE EXCITAÇÃO

4.1 - A MÁQUINA SÍNCRONA

A máquina síncrona pode ser utilizada tanto como motor quanto como gerador de energia, sendo mais comum este último caso. Construtivamente, as principais partes da referida máquina são o estator (parte estacionária) e o rotor (parte móvel).

Um outro termo bastante utilizado nas definições de máquinas elétricas é a "ARMADURA". Usualmente o enrolamento de campo se encontra no rotor, e os enrolamentos de armadura no estator. Na Figura 4.1 é possível visualizar em detalhes, as partes básicas de uma máquina síncrona.

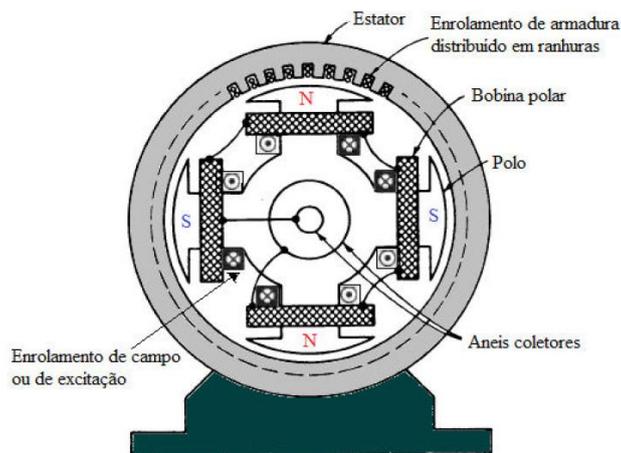


Figura 4.1 – Representação genérica de uma máquina síncrona com polos salientes.
Fonte: ESTEPHEN (2013).

Uma outra grande diferença entre tipos de máquinas síncrona, está nos rotores, que de acordo com as suas velocidades (baixa e alta) se classificam como rotores de polos lisos, apropriados para máquinas de alta velocidade (acima de 900 rpm) e, os rotores de polos salientes, apropriados para as máquinas de baixa velocidade. Na Figura 4.2, a) e b), é possível visualizar a diferença entre os rotores de polos lisos e polos salientes.

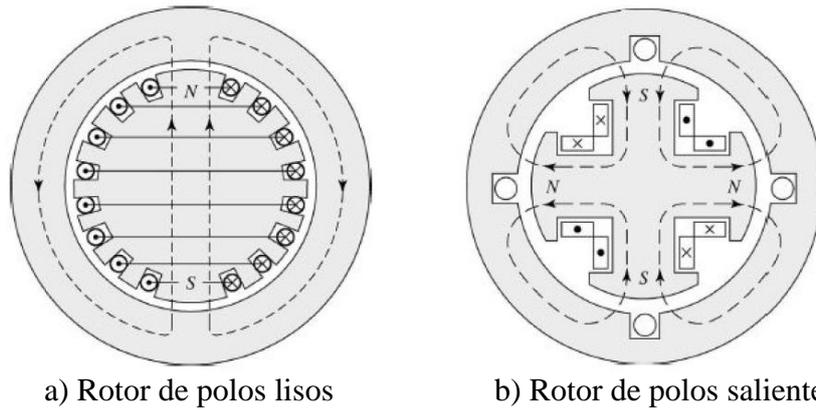


Figura 4.2 – Rotores das máquinas síncronas: a) com polos lisos e b) com polos salientes.

4.2 - O MOTOR SÍNCRONO

Detalhes funcionais e analíticos do motor síncrono serão abordados a seguir, pois o conhecimento deste tipo de motor é fundamental para as análises e cálculos dos sistemas de excitação, os quais controlarão a corrente do rotor e estabelecerão os limites e demais proteções relativas a estas máquinas.

4.2.1 - Princípios básicos de operação de um motor síncrono

Na Figura 4.3 é possível visualizar um motor síncrono de dois polos. Assim se torna mais fácil compreender o princípio básico de um motor síncrono, onde corrente de campo I_F , produz um campo magnético B_R em regime permanente.

Um conjunto trifásico de tensões é aplicado ao estator da máquina, produzindo um fluxo trifásico de correntes nos enrolamentos, que por sua vez produz um campo girante B_s . Portanto, há dois campos magnéticos presentes na máquina o campo do rotor, tenderá a se alinhar com o campo do estator, exatamente como duas barras imantadas tenderão a se alinhar, se forem colocadas próximas entre si. Como o campo magnético está girando, o campo magnético do rotor (e o próprio rotor) tentará constantemente se alinhar. Quanto maior for o ângulo entre os dois campos magnéticos (até um certo valor máximo), maior será o conjugado no rotor da máquina. O princípio básico de operação do motor síncrono, é que o rotor "persegue" em círculo o campo magnético girante do estator, sem nunca se alinhar com ele.

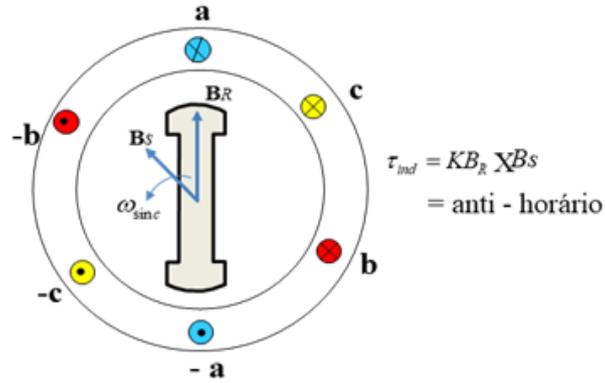


Figura 4.3 - Motor síncrono de dois polos.

4.2.2 - O circuito equivalente de um motor síncrono

Um motor síncrono é o mesmo que um gerador síncrono sob todos os aspectos, exceto pelo fato de o sentido do fluxo de potência ser invertido. Como este sentido é invertido, pode-se esperar que o sentido do fluxo de corrente no estator, também seja invertido. Portanto, o circuito equivalente de um motor síncrono é exatamente o mesmo que o circuito equivalente de um gerador síncrono, exceto pelo fato de o sentido de referência de I_A ser invertido. Na Figura 4.4 é possível visualizar o circuito equivalente por fase de um motor síncrono, onde nota-se a corrente no sentido da rede para a máquina.

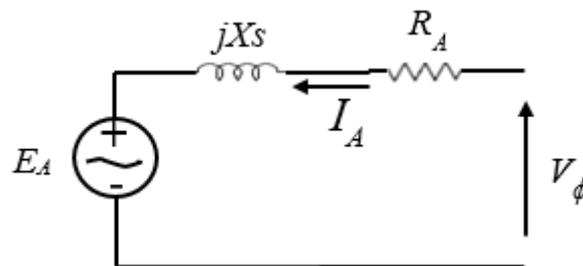


Figura 4.4 - Diagrama representativo de uma fase de um motor síncrono em regime permanente.

- E_A = Tensão interna (de excitação) da máquina síncrona;
- V_ϕ = Tensão nos terminais;
- R_A = Resistência de enrolamento de armadura;
- X_s = Reatância síncrona;
- I_A = Corrente de armadura.

Devido à mudança no sentido de I_A , a equação da lei das tensões de Kirchoff para o circuito equivalente também muda. Desta forma, a equação para o novo circuito equivalente é:

$$V_\phi = E_A + jX_s I_A + R_A I_A \quad (4.1)$$

Ou,

$$E_A = V_\phi + jX_s I_A + R_A I_A \quad (4.2)$$

Essa Eq. (4.2) é exatamente a mesma equação (agora para um gerador), considerando-se o fato do sinal do termo de corrente ter sido invertido.

4.2.3 – A reação de armadura

A tensão E_A é a tensão gerada interna produzida em uma fase da máquina síncrona, porém esta tensão não é usualmente a que aparece nos terminais. De fato ela só é igual à tensão de saída V_ϕ , quando não há corrente na armadura.

Ao girar o rotor, uma tensão E_A é induzida no enrolamento do estator do gerador e aplicando-se uma carga, fluirá também corrente no estator, que criará o seu próprio campo magnético, o qual interage com o campo original do rotor, criando uma distorção e alterando a tensão de fase resultante. Este efeito de distorção, é a *reação de armadura*.

Supondo que aos terminais do gerador, seja ligada uma carga reativa atrasada, na Figura 4.5, é possível visualizar que o pico de corrente ocorrerá em um ângulo após o pico de tensão.

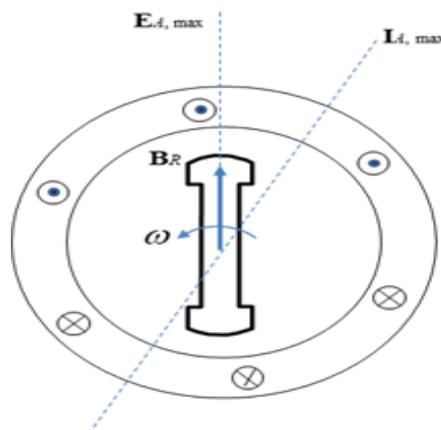


Figura 4.5 – A tensão E_A produz um fluxo de corrente atrasado, quando é ligada uma carga reativa atrasada.

Na Figura 4.6 é possível visualizar que a corrente no estator produz o campo magnético B_S , o qual produz uma tensão no estator, denominada E_{est} .

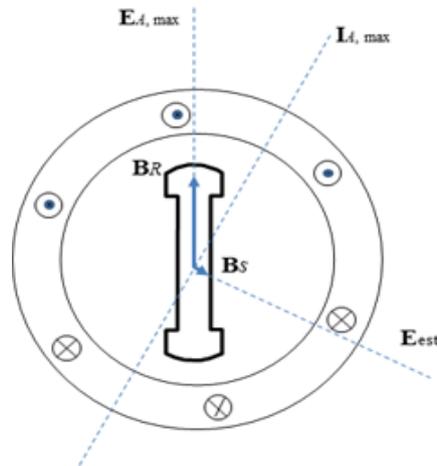


Figura 4.6 - A corrente no estator produz seu campo magnético B_S , o qual produz sua própria tensão E_{est} nos enrolamentos do estator.

Com duas tensões presentes no estator, a tensão total em uma fase, é simplesmente a soma destas duas tensões, produzindo a tensão V_ϕ . Então:

$$V_\phi = E_A + E_{est} \quad (4.3)$$

O campo magnético $B_{líq}$ é a soma dos campos magnéticos do rotor e do estator. Assim:

$$B_{líq} = B_R + B_S \quad (4.4)$$

Como os ângulos de E_A e B_R são os mesmos e os ângulos de E_{est} e B_S são os mesmos, na Figura 4.7 é possível visualizar que o campo magnético $B_{líq}$ coincidirá com a tensão líquida V_ϕ na saída da fase, ao que chamamos de tensão nos terminais da máquina.

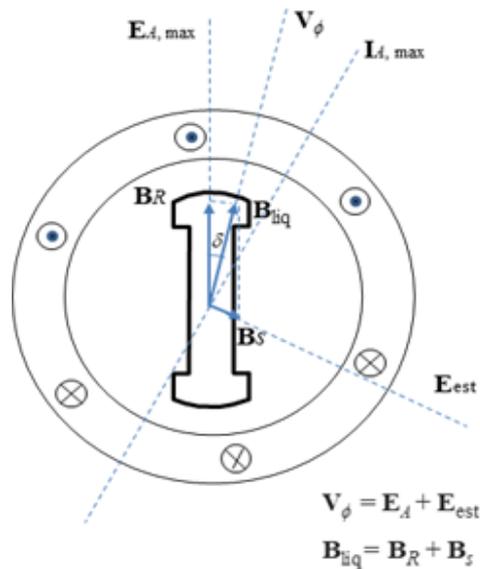


Figura 4.7 – O campo magnético \mathbf{B}_s é somado a \mathbf{B}_R , distorcendo-o e resultando \mathbf{B}_{liq} . A tensão \mathbf{E}_{est} é somada a \mathbf{E}_A , produzindo \mathbf{V}_ϕ na saída da fase.

O ângulo entre \mathbf{B}_R e \mathbf{B}_{liq} é conhecido como ângulo interno, ou ângulo de conjugado da máquina, sendo proporcional à quantidade de potência fornecida pelo gerador.

Para modelar os efeitos da reação de armadura sobre a tensão de fase, observemos dois pontos:

- A tensão \mathbf{E}_{est} está em um plano de 90° atrás da corrente máxima \mathbf{I}_A ;
- A tensão \mathbf{E}_{est} é proporcional à máxima \mathbf{I}_A .

Se X for uma constante de proporcionalidade, então a tensão de reação de armadura poderá ser expressa como $\mathbf{E}_{est} = -jX\mathbf{I}_A$;

A tensão em uma fase será portanto $\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - jX\mathbf{I}_A$. Esta igualdade nos permite criar um circuito elétrico onde na Figura 4.8 é possível visualizar o circuito representativo de uma fase. Pela lei das tensões de *Kirchhoff* e a equação $\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - jX\mathbf{I}_A$, é a mesma que descreve a reação de armadura.

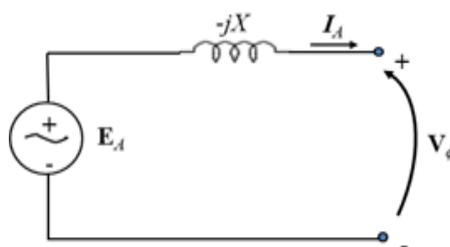


Figura 4.8 - Circuito representativo da equação $\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - jX\mathbf{I}_A$.

Se a autoindutância do estator for chamada de L_A (com sua respectiva reatância X_A) e a resistência do estator for chamada de R_A , a diferença total entre \mathbf{E}_A e \mathbf{V}_ϕ será dada por:

$$\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - jX\mathbf{I}_A - jX_A\mathbf{I}_A - R_A\mathbf{I}_A \quad (4.5)$$

A autoindutância e os efeitos de reação de armadura são ambos representados por reatâncias, sendo possível combiná-las em uma única reatância, síncrona da máquina.

Então, $X_S = X + X_A$

A equação final que descreve \mathbf{V}_ϕ é $\mathbf{V}_\phi = \mathbf{E}_A - jX_S\mathbf{I}_A - R_A\mathbf{I}_A \quad (4.6)$

Obs.: Esta última Eq. (4.6) é exatamente aquela (4.2) mostrada no item 4.2.2, para o gerador Síncrono (ESTEPHEN, 2013).

Na Figura 4.9 é possível visualizar a interação dos dois fluxos e este fato facilita o entendimento do desenvolvimento das equações para explicação do fenômeno da reação de armadura, fornecendo uma visão muito simples para a distorção do fluxo resultante no interior da máquina síncrona.

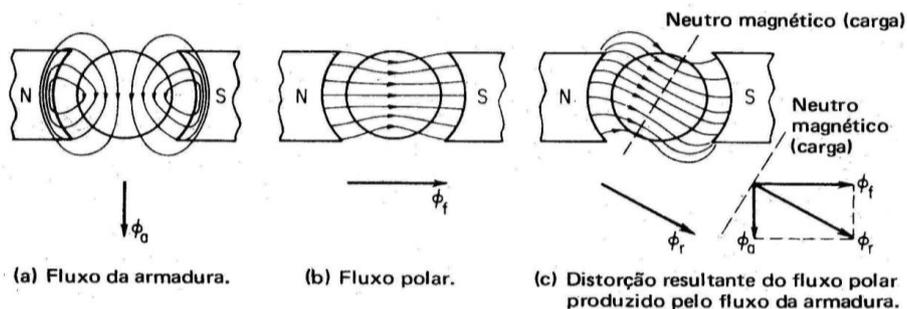


Figura 4.9 – Interação entre o fluxo polar e de armadura, deslocando o neutro magnético. Uma visão vetorial.

Fonte: IRVING (1979).

4.2.3.1 - Algumas medidas para redução do efeito da reação de armadura

A reação de armadura é um efeito interno que ocorre tanto em máquinas do tipo CA como CC, onde o efeito da interação entre os campos do rotor e do estator, desloca o neutro magnético.

Este deslocamento do neutro magnético, se torna um problema sério a ser resolvido, pois conforme muda a posição do neutro magnético, surge uma situação prejudicial, pois as escovas sendo fixas, acabam curto-circuitando espiras que estão sob

tensão. Assim, são várias as tentativas para anular a reação de armadura e dentre os modos utilizados, alguns são citados a seguir:

- O deslocamento da linha neutra;
- Extremidades de polos com alta relutância;
- Redução do fluxo de armadura;
- Enrolamentos de compensação.

As três medidas as acima têm a desvantagem de possuírem perfil mecânico, não sendo eficientes para as altas correntes. Nas grandes máquinas é empregado um método elétrico, no qual o fluxo elétrico da armadura é contrabalançado por um enrolamento no circuito da armadura. Este enrolamento é chamado de enrolamento de compensação.

4.2.4 - O motor síncrono visto da perspectiva do campo magnético

Na Figura 4.10 é possível visualizar que E_A está atrás de V_ϕ e na Figura 4.11 é possível visualizar que B_R está atrás de B_{liq} , pois em um motor o conjugado induzido ($\tau_{ind} = k B_R B_{liq} \sin \delta$) é no sentido do movimento. Observemos que a razão $jX_s I_A$ aponta de E_A para V_ϕ , que é o sentido de referência de I_A . Neste caso conforme pode-se verificar, o conjugado é no sentido anti horário.

Em um gerador (ao contrário), o torque induzido está ao contrário do movimento, pois este movimento é fornecido (STEPHEN, J. CHAPMAN, 2013).

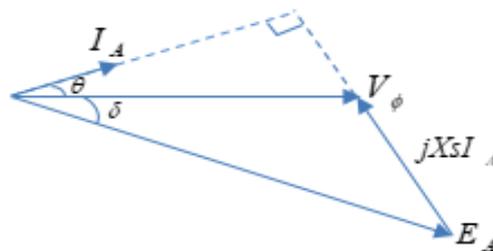


Figura 4.10 - Diagrama fasorial de um motor síncrono.

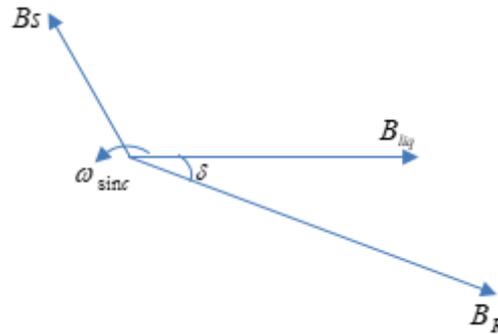


Figura 4.11 - O respectivo diagrama de campo magnético.

4.2.5 - O motor síncrono e a correção do fator de potência

Quanto menor o fator de potência de um sistema, maiores serão as perdas nas suas linhas de alimentação de potência. A carga da maioria dos sistemas típicos, constitui-se de motores de indução. Assim os fatores de potência destes sistemas, são quase sempre atrasados e, dispor de uma ou mais cargas adiantadas (motores síncronos sobre-excitados) no sistema, pode ser útil pelas seguintes razões:

- Uma carga adiantada, pode fornecer uma potência reativa Q para as cargas atrasadas vizinhas, em vez de vir do gerador. Como a potência reativa não precisa viajar pelas linhas de transmissão, longas e de resistência bastante elevada, a corrente das linhas de transmissão é reduzida e as perdas do sistema de potência são muito inferiores;
- Como as linhas de transmissão transportam menos corrente, elas poderão ser menores para um dado fluxo de potência nominal. Uma potência nominal inferior, reduz significativamente o custo de um sistema de potência;
- Além disso, a necessidade de operar um motor síncrono com um fator de potência adiantado, significa que o motor deverá funcionar sobre-excitado. Esse modo C de operação aumenta o conjugado máximo do motor, reduzindo assim a possibilidade do valor máximo ser acidentalmente excedido.

O uso de motores síncronos ou outros equipamentos, para aumentar o fator de potência geral de um sistema, é denominado correção do fator de potência. Como um motor síncrono pode propiciar correção do fator de potência e também custos menores para o sistema de potência, muitas cargas que aceitem um motor de velocidade constante (mesmo que elas não precisem necessariamente de velocidade constante) são acionadas por motores síncronos. Mesmo que um motor síncrono seja mais caro que um motor de

indução, ainda assim, a possibilidade de operar um motor síncrono com fator de potência adiantado, para realizar correção de fator de potência, representa uma economia de custos nas plantas industriais (ESTEPHEN, 2013).

4.2.6 - O capacitor síncrono ou condensador síncrono

Um condensador síncrono (às vezes chamado de capacitor síncrono), é um equipamento similar a um motor elétrico síncrono, sendo que o compensador não possui nem uma carga conectada ao seu eixo girando livremente. Sua utilidade não é fazer a conversão de potência elétrica para mecânica, mas ajustar condições do sistema elétrico de transmissão. Sua corrente de campo é controlada por um controlador de tensão (regulador de tensão), a fim de gerar ou absorver reativos, para ajustar a tensão da rede como para fazer a correção do fator de potência. A instalação do condensador síncrono, manutenção e operação são idênticas a aquelas executadas nos grandes motores elétricos e geradores.

Um motor síncrono adquirido para acionar uma carga, pode ser operado sobre-excitado, com a finalidade de fornecer potência reativa Q para um sistema de potência. Na Figura 4.12 é possível visualizar o diagrama fasorial de um motor funcionando a vazio, onde o ângulo de carga é praticamente zero.

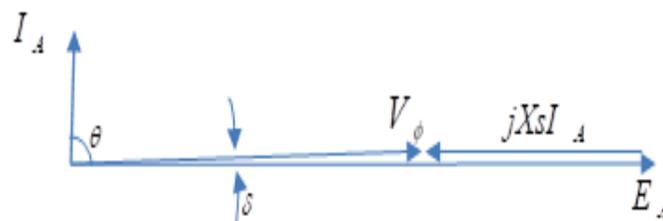


Figura 4.12 - Diagrama fasorial de um capacitor síncrono, ou compensador síncrono operando em vazio.

Portanto a corrente de armadura apontará para cima. Se V_ϕ e I_A forem examinados, a relação de tensão e corrente entre elas será como a de um capacitor. Do ponto de vista do sistema de potência, um motor síncrono a vazio sobre-excitado assemelha-se exatamente a um grande capacitor (ESTEPHEN, 2013).

4.2.7 - Comparação entre um condensador síncrono e um banco de capacitores

Uma das grandes vantagens dos compensadores síncronos é a facilidade com que a correção na potência pode ser ajustada sem perda de tempo. A energia cinética armazenada no rotor da máquina ajuda a estabilizar o sistema durante curtos circuitos, ou rápidas flutuações na carga, como as causadas por fornos de arco elétrico. A instalação de condensadores síncronos de alta potência, são às vezes utilizadas em associação com estações conversoras de CC, para fornecer potência reativa para à rede.

A potência de um banco de capacitores é fixa. Em compensador síncrono, a potência reativa pode ser continuamente ajustada, bastando atuar na sua excitação ajustando a corrente de campo, no nível desejado. A Potência reativa de um banco de capacitor decai quando a tensão da rede cai, enquanto em um condensador síncrono poderemos aumentar a corrente enquanto a tensão cai, ajustando a carga para o valor solicitado. Entretanto, máquinas síncronas possuem mais perdas do que um banco de capacitor e sua manutenção (em caso de danos na máquina, dependendo do caso) é muito mais demorada e mais onerosa, enquanto que para um banco de capacitores, mesmo em caso de danos, as manutenções levam menos tempo, reduzindo-se a substituição de células. A maioria dos condensadores síncronos conectados à rede elétrica são máquinas de potência elevada, estando entre 20 MVAR e 200MVAR e muitos são resfriados com hidrogênio, sendo o caso dos Compensadores síncronos de Vila do Conde e Marabá.

4.2.8 - O efeito das mudanças de corrente de campo sobre um motor síncrono

Na Figura 4.13 é possível visualizar o diagrama fasorial de um motor síncrono com fator de potência atrasado, aumentando a corrente de campo I_F , observa-se que aumenta também o módulo de E_A , mas não afeta a potência ativa fornecida pelo motor.



Figura 4.13 – Motor síncrono operando com fator de potência atrasado.

A potência fornecida pelo motor só muda quando o conjugado de carga varia no eixo. Como a mudança de I_F não afeta a velocidade no eixo n_m e, como a carga acoplada no eixo não se altera, a potência fornecida não muda. Naturalmente, V_ϕ também é constante, porque ela é mantida assim pela fonte de potência que alimenta o motor. Os comprimentos proporcionais à potência (ativa) no diagrama fasorial devem portanto, ser constantes. Na Figura 4.14 é possível visualizar que quando a corrente de campo é aumentada, a tensão E_A deve crescer, mas ela só pode fazer isso seguindo a linha de potência constante.

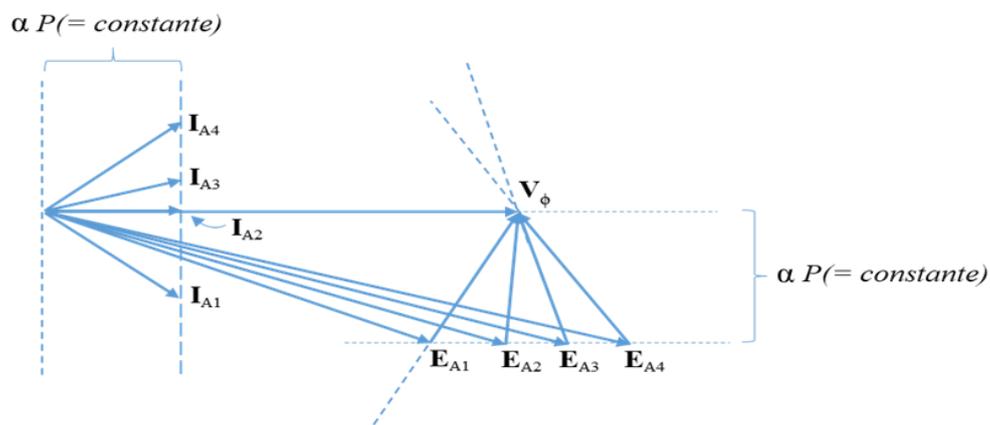


Figura 4.14 – O efeito do aumento da corrente de campo sobre o funcionamento do motor.

Fonte: ESTEPHEN (2013).

Verifica-se que quando o valor de E_A aumenta, o módulo da corrente da armadura.

Primeiro diminui e em seguida cresce novamente. Com valores baixos de E_A , a corrente de armadura está atrasada, o motor é uma carga indutiva e está funcionando como uma combinação de indutor e resistor, consumindo potência reativa Q .

Quando a corrente de campo é aumentada, a corrente de armadura acaba alinhando-se com V_ϕ e o motor aparecerá como uma resistência pura. Quando a corrente de campo for novamente aumentada, a corrente de armadura torna-se adiantada, o motor torna-se uma carga capacitiva e está funcionando como uma combinação de um capacitor e um resistor, consumindo potência negativa $-Q$, ou alternativamente, fornecendo potência reativa Q ao sistema.

4.2.9 – A Curva “V”

Na Figura 4.15 é possível visualizar um gráfico de I_A versus I_F para um motor síncrono. Esse gráfico é denominado *curva V de um motor síncrono*, pela razão óbvia de sua semelhança com a letra V.

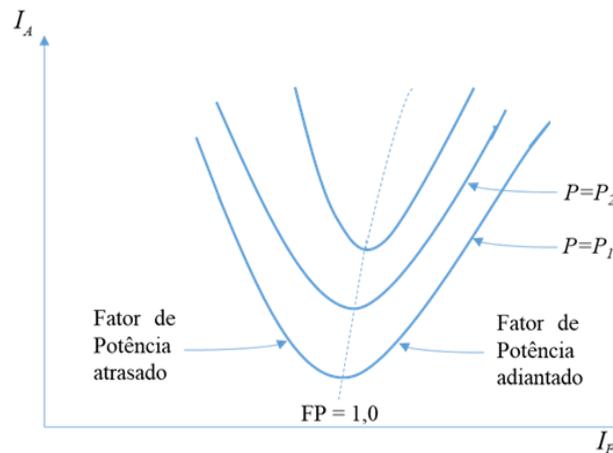


Figura 4.15 - Curvas V do motor síncrono.
Fonte: FITGERALD (1975).

Há diversas curvas “V” desenhadas, correspondendo a diferentes níveis de potência ativa. Para cada curva a corrente de armadura mínima ocorre com o fator de potência unitário, quando somente potência ativa está sendo fornecida ao motor. Em qualquer outro ponto da curva, alguma potência reativa está sendo fornecida para o motor, ou pelo motor.

Para correntes de campo *menores* do que o valor que corresponde a I_A mínima, a corrente de armadura está atrasada, consumindo Q. Para correntes de campo *maiores* do que o valor que corresponde a I_A mínima, a corrente de armadura está adiantada, fornecendo Q ao sistema de potência, como um capacitor faria. Portanto, controlando a corrente de campo de um motor síncrono, poderemos controlar a potência reativa fornecida ou consumida pelo sistema de potência.

Quando a projeção do fasor E_A sobre V_ϕ ($E_A \cos \delta$) é menor do que o próprio V_ϕ Na Figura 4.16 (b) é possível visualizar que o motor síncrono tem uma corrente atrasada e consome Q. Como a corrente de campo é pequena nesta situação, diz-se que o motor está *subexcitado*. Por outro lado, quando a projeção do fasor E_A sobre V_ϕ ($E_A \cos \delta$) é

maior do que o próprio V_ϕ . Na Figura 4.16 a) é possível visualizar que o motor tem uma corrente adiantada e fornece Q ao sistema de potência. Como a corrente de campo é grande nesta situação, diz-se que o motor está *sobre-excitado*.

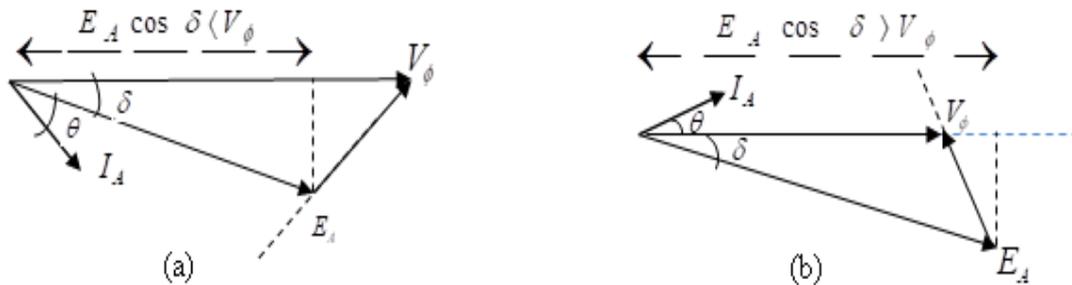


Figura 4.16 - Diagramas fasoriais: (a) motor síncrono absorvendo reativos e (b) motor síncrono cedendo reativos ao sistema.

Fonte: CHAPMAN (2013).

4.2.10 – Curvas compostas

A curva composta é uma das curvas características de operação em regime permanente. Consideremos uma máquina síncrona que está entregando potência com uma frequência e uma tensão nominal terminal constantes, para uma carga cujo fator de potência é constante. A curva que mostra a corrente de campo necessária para manter constante a tensão terminal nominal, quando a carga de fator de potência constante é variada, é conhecida como *curva composta*. Na Figura 4.17 é possível visualizar as formas características de três curvas compostas, para vários fatores de potência constantes.

Usualmente os valores nominais das máquinas síncronas, são fornecidos em termos de carga especificada ou pela potência aparente máxima (kVA ou MVA), a qual pode ser fornecida continuamente sem superaquecimento, para valores específicos de tensão e fator de potência. Devido ao seu *sistema regulador de tensão* (que controla a corrente de campo em resposta ao valor medido da tensão terminal) a máquina opera normalmente com uma tensão terminal constante, cujo valor está dentro de mais ou menos 5% em torno da tensão nominal.

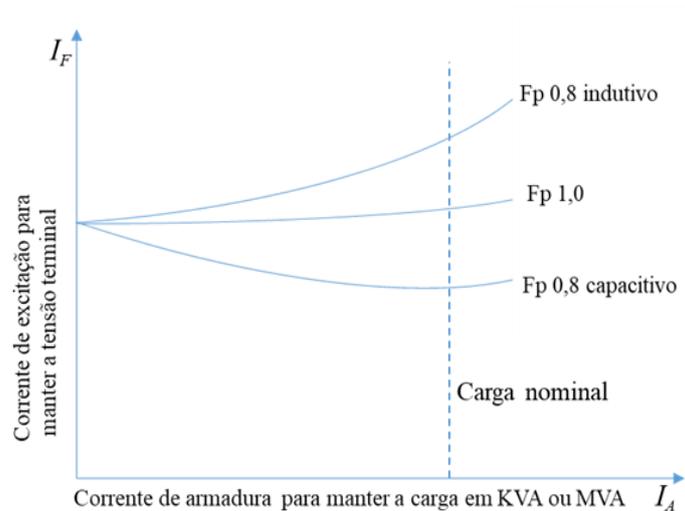


Figura 4.17 – Forma característica das curvas compostas.

4.3 - CONTROLE DAS TENSÕES TERMINAIS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Pode-se encontrar valores elevados de tensão, principalmente, em linhas longas, quando se abre um dos terminais destas linhas e o outro terminal permanece energizado. Este problema é consequência do “efeito Ferranti” e é provocado pelo reativo gerado ao longo das linhas, pela capacitância natural do circuito. Quando o circuito é levemente carregado ou aberto em uma das extremidades, tal reativo, se não absorvidos, poderá causar tensão alta a níveis não aceitáveis (pela operação) na extremidade que estiver aberta. A proporção entre a tensão no lado do receptor e a tensão no lado do transmissor varia em função do comprimento da linha.

Ao contrário, elevados carregamentos em uma de transmissão, podem causar subtensões em níveis não aceitáveis pela operação do sistema.

Existem vários meios de controle tanto para os casos de sobretensões como para os casos de subtensões, a saber:

- Inserção de bancos de reatores em paralelo;
- Inserção de bancos de capacitores em paralelo;
- Seleção de taps em transformadores;
- Combinação de bancos de reatores e capacitores;
- Geradores funcionando como compensadores nas usinas de geração;
- Emprego de Compensadores síncronos.

Como no caso desta dissertação, o foco está nos compensadores síncronos e também pelo motivo dos mesmos serem os melhores equipamentos no rastreamento das

variações de potência reativa de um sistema, tanto nas sobretensões absorvendo reativos, com nas subtensões cedendo reativos respectivamente, algumas empresas instalam compensadores síncronos como meio auxiliar de controle de tensão. Trata-se de grandes máquinas elétricas rotativas, construídas como gerador, porém operadas como motor (sem o acionamento através de turbinas).

Os compensadores síncronos não geram potência ativa, mas controlando-se a corrente de excitação pode-se fazer com que os mesmos gerem ou absorvam potência reativa. Em períodos de tensões elevadas no sistema, reduz-se a excitação do compensador síncrono, a fim de que a unidade passe a absorver os VAR necessários para reduzir a tensão a níveis compatíveis com os equipamentos ligados à rede elétrica. Em períodos de tensões baixas no sistema, aumenta-se a excitação do compensador síncrono, a fim de que a unidade passe a ceder o reativo necessário para elevar a tensão a níveis compatíveis com os equipamentos ligados à rede elétrica.

4.4 - ESPECIFICAÇÕES NOMINAIS DE UM MOTOR SÍNCRONO

Como fisicamente os motores síncronos são as mesmas máquinas que os geradores síncronos, as especificações nominais básicas são as mesmas. Uma diferença importante é que uma E_A elevada dá um fator de potência adiantado em vez de atrasado e, portanto, o efeito do limite máximo de corrente de campo é expresso como uma especificação nominal com um fator de potência adiantado. Como a saída de um motor síncrono é potência mecânica, a especificação nominal de potência de um motor é dada usualmente em Horse Power (HP) ou em quilowatts (kW) de saída, em vez de ser especificada por um valor nominal volts-ampéres e fator de potência como é feito para os geradores.

O tópico 4.5, versará sobre os tipos e a modelagem de Sistemas de Excitação, os quais constituídos dos reguladores de tensão e diversos tipos de excitatrizes, controlam a corrente de campo do motor síncrono, impondo que o motor síncrono absorva ou ceda energia reativa para o sistema elétrico de potência, executando assim, o controle do fator de potência e ajustando os níveis de tensão nas subestações de corrente alternada (ESTEPHEN, 2013).

4.5 - OS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

A função básica de um sistema de excitação é fornecer a corrente contínua para o enrolamento de campo da máquina síncrona. Em adição, o sistema de excitação melhora o controle e as funções de proteções essenciais para a performance satisfatória do sistema de potência, controlando a tensão de campo e desta maneira a corrente de campo.

Nas funções de controle, estão incluídas o controle da tensão e do fluxo de potência reativa e ainda o aprimoramento da estabilidade do sistema. As funções de proteção garantem que os limites de capacidade da máquina síncrona, do sistema de excitação e de outros equipamentos, não sejam excedidos.

Este capítulo descreverá as características e modelagem de diferentes tipos de sistemas de excitação de geradores síncronos. Em adição, ele descreve sobre os critérios da performance da dinâmica e fornece definições de termos muito usados na definição e especificação de requisitos de um sistema de excitação.

4.5.1 - Requisitos de sistemas de excitação

Os requisitos de performance de sistemas de excitação são determinados pelas considerações feitas aos **geradores síncronos**, tão bem quanto aos **sistemas de potência**.

O requisito básico, é que o sistema de excitação forneça e automaticamente ajuste a corrente de campo de geradores síncronos, para manter a tensão terminal variando dentro da contínua capacidade terminal do gerador. Em adição, o sistema de excitação deve estar habilitado para responder aos transientes e distúrbios, os quais forçam o campo em consistência instantânea com o gerador e suas capacidades. As capacidades do gerador nesta escrita, são limitadas por vários fatores: Falha no isolamento do rotor devido a alta tensão de campo, aquecimento do rotor devido a alta corrente de campo, aquecimento do estator devido a alta corrente de armadura, aquecimento do ferro do estator durante a operação em subexcitação e aquecimento devido ao excesso de fluxo (volts/Hz). Os limites térmicos possuem características dependentes do tempo e a capacidade de sobrecargas rápidas nos geradores, podem se estender de 15 a 60 s (KUNDUR, 1994).

Do ponto de vista do **sistema de potência**, o sistema de excitação pode contribuir para o controle efetivo da tensão, fortalecendo a estabilidade do sistema. Ele seria capaz de responder rapidamente a um distúrbio, para fortalecer a estabilidade, bem como de modular o campo do gerador, para fortalecer a estabilidade de pequenos sinais.

Historicamente, a função do sistema de excitação no fortalecimento da performance do sistema de potência, vem crescendo continuamente. Antigamente os sistemas de excitação eram controlados manualmente, para manter no gerador, a tensão terminal desejada e o carregamento de potência reativa. Quando o primeiro controlador de tensão foi automatizado, ele era muito lento, basicamente preenchendo a função de somente alertar o operador. No início dos anos de 1920, o potencial para o fortalecimento de pequenos sinais e estabilidade nos transitórios, através do uso contínuo e ação rápida dos reguladores foi reconhecido (KUNDUR, 1994).

4.5.2 - Elementos de um sistema de excitação

Na Figura 4.18 é possível visualizar o diagrama de bloco funcional de um típico sistema de controle de excitação, para grandes geradores síncronos. A seguir apresenta-se uma breve descrição dos vários subsistemas identificados na figura em referência.

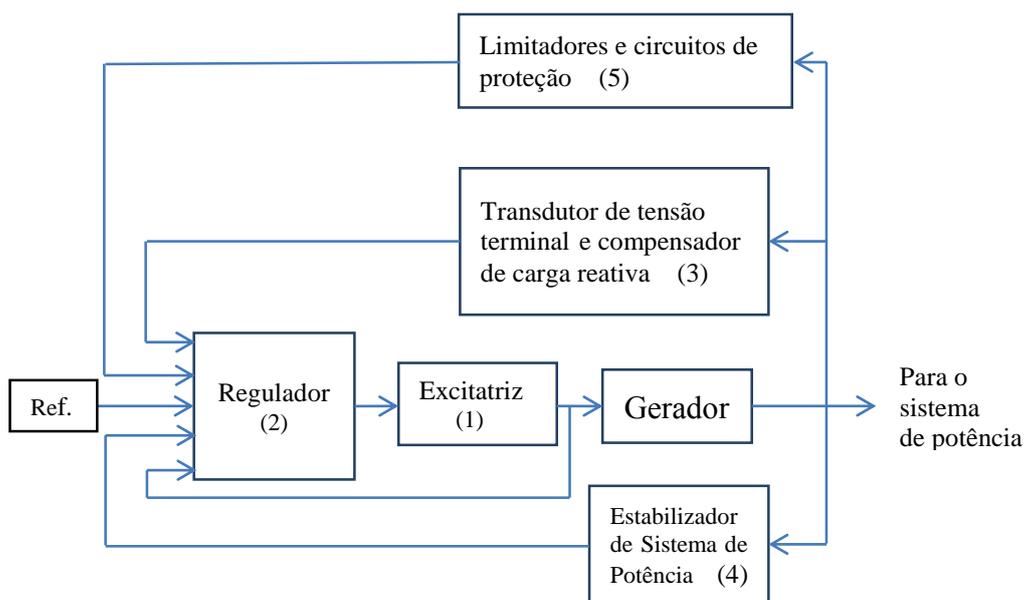


Figura 4.18 - Diagrama funcional de blocos, do sistema de controle de um gerador síncrono.

Fonte: KUNDUR (1994).

- 1) *Excitador (Excitatriz)*: Fornece a potência em corrente contínua, para o enrolamento de campo das máquinas síncronas, consistindo no estágio de potência do sistema de excitação;

- 2) *Regulador*: Processa e amplifica o sinal de entrada do controle, a um nível e forma apropriada, para o controle da excitatriz, incluindo as funções de regulação e estabilização do sistema de excitação;
- 3) *Transdutor de tensão terminal e compensador de carga reativa*: Sente a tensão terminal do gerador, retifica e filtra as quantidades contínuas (desta tensão terminal) e compara com a referência, a qual representa tensão terminal desejada, acrescentando a quantidade necessária de sinal a ser somado com a referência, de forma a compensar a queda tensão causada principalmente pelo transformador que conecta o gerador ao sistema;
- 4) *Estabilizador de sistema de potência*: fornece um sinal de entrada adicional para o regulador, a fim de amortecer oscilações no sistema de potência. Alguns sinais de entrada comumente usados, são: desvio de velocidade do rotor, potência acelerante e desvio de frequência;
- 5) *Circuitos limitadores e de proteção*: estes incluem um grande conjunto de funções de proteção e controle, os quais garantem que os limites de capacidade (capacidade) do excitador e do gerador síncrono, não serão excedidos. Algumas das funções comumente usadas, são: o limitador de corrente de campo, limitador de máxima excitação, limitador de tensão terminal, regulador volts-por-Hertz e proteção e limitador de subexcitação.

4.5.3 - Tipos de sistemas de excitação

Os sistemas de excitação têm tomado muitas formas na sua evolução ao longo dos anos. Eles podem ser classificados nas três grandes categorias seguintes, baseadas na fonte de potência usada na excitação, a saber:

- Sistemas de excitação de corrente contínua (CC);
- Sistemas de excitação de corrente alternada (CA);
- Sistemas de excitação estática acima, suas diferentes formas e a sua estrutura geral.

Os sistemas de excitação de corrente contínua (CC), utilizam geradores de corrente contínua, como fonte de potência de excitação e fornece a corrente do rotor da máquina síncrona, através de anéis girantes e deslizantes. A excitatriz pode ser movida por um motor, ou acoplado ao eixo do gerador. Estes sistemas representam sistemas antigos, no período de 1920 a 1960. Em meados da década de 1960, foram superados

pelos Sistemas de excitação de corrente alternada (CA). Os reguladores de tensão para tais sistemas, abrangem todos os modos desde os tipos de reostatos de ação não contínua, até os sistemas que utilizavam muitos de amplificadores magnéticos e amplificadores rotativos. Estes sistemas estão gradualmente desaparecendo, pois muitos antigos sistemas estão sendo substituídos por Sistemas de excitação de corrente alternada (CA) ou Sistemas de excitação estática. Em alguns casos, estão sendo substituídos por reguladores eletrônicos de estado sólido.

Sistemas de excitação de corrente alternada (CA), utilizam alternadores (máquinas de corrente alternada – CA) como fonte de potências de excitação do gerador principal. A saída CA da excitatriz é retificada por retificadores controlados ou não controlados, para produzir a corrente contínua necessária ao campo do gerador. Os retificadores, podem ser estacionários ou rotativos. Antigamente os sistemas de excitação CA eram uma combinação de amplificadores magnéticos e rotativos. Porém os novos sistemas utilizam reguladores com amplificadores eletrônicos. Estes sistemas podem possuir muitas formas dependendo do tipo de retificador, arranjo, método de saída de controle da excitatriz e fonte de excitação para a excitatriz. Desta forma, citamos os seguintes modelos:

- Sistemas de retificadores estacionários: para estes retificadores, a saída DC alimenta o enrolamento de campo do gerador principal, através de anéis deslizantes. Na Figura 4.19 é possível visualizar um diagrama simplificado de um sistema de excitação AC, com alternador com campo controlado por um retificador. A excitatriz é auto excitada, com a sua corrente de campo controlada através do tiristores retificadores.

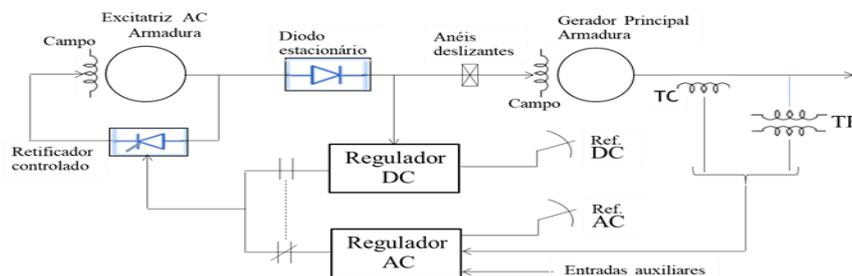


Figura 4.19 - Retificador de sistema de excitação, tipo alternador com campo controlado.

Fonte: KUNDUR (1994).

- Sistemas com retificadores rotativos: sobre estes retificadores, a necessidade de anéis deslizantes e escovas é eliminada a saída DC alimenta diretamente o campo do gerador principal. Na Figura 4.20 é possível visualizar um pequeno excitador

(excitatriz) piloto, com um rotor de ímã permanente, o qual gira com a armadura do excitador e diodos retificadores. A saída do estator do excitador (excitatriz) piloto, energiza o campo estacionário do excitador (excitatriz) AC. O regulador de tensão controla o campo do excitador (excitatriz) AC, o qual aos giros, controla o campo do gerador principal.

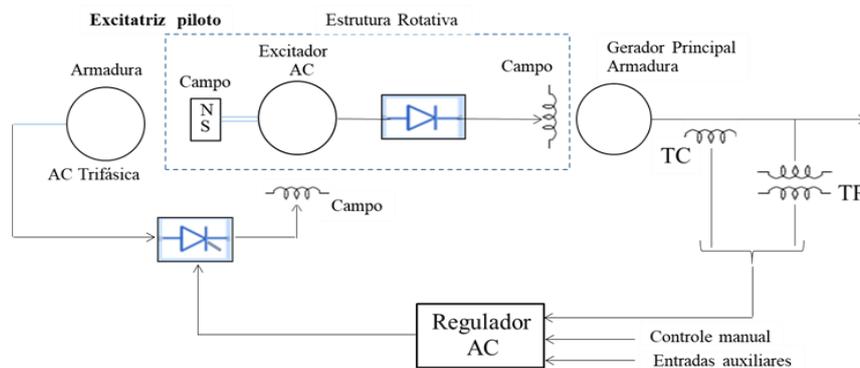


Figura 4.20 - Sistema de excitação tipo *brushless* (sem escovas).
Fonte: KUNDUR (1994).

- No sistema de excitação estática: todos os componentes deste sistema são estáticos ou estacionários. Retificadores estáticos controlados ou não controlados, suprem a corrente de excitação diretamente para o campo do gerador principal, através de anéis deslizantes. A potência para os retificadores é fornecida pelo gerador, através de um transformador, o qual baixa a tensão para o nível apropriado. Destaca-se os *Sistemas com a fonte de potencial controlado através de retificadores controlados*.

Na Figura 4.21 é possível visualizar estes sistemas, nos quais a potência de excitação é fornecida através de um transformador conectado aos terminais do gerador, sendo regulada por um retificador controlado.

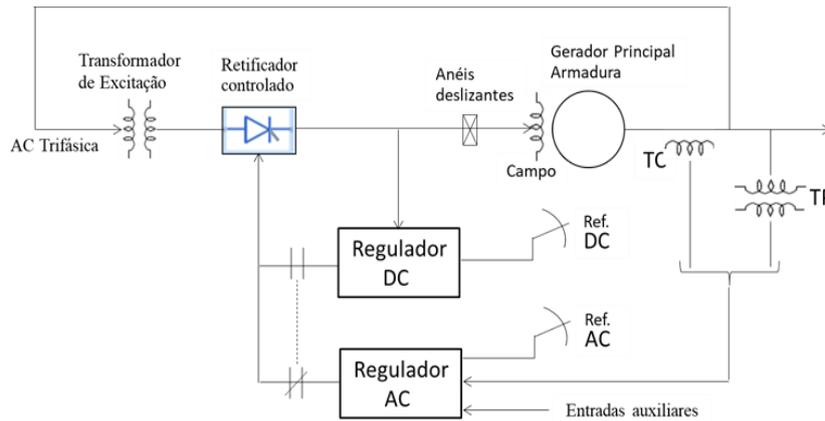


Figura 4.21 - Sistema de excitação estático.
 Fonte: KUNDUR (1994).

Este tipo de sistema de excitação possui uma constante de tempo inerente muito pequena. É barato e de fácil manutenção.

4.5.4 - Funções de controle e proteção

Um moderno sistema de controle de excitação, é muito mais que um simples regulador de tensão. Ele inclui um número de controle, limitação e funções de proteção, cumprindo com os requisitos de performance citados nos itens **4.5.1 e 4.5.4**. A filosofia é ter as funções de controle, quantidades específicas reguladas no nível desejado e as funções de limitação prevenindo quantidades que podem exceder o conjunto de limites. Se algum dos limitadores falhar, então as funções de proteção removerão componentes apropriados, ou tiram (desligam) a unidade de serviço.

A seguir serão feitas as descrições sobre vários controles e funções de proteção, sendo que na Figura 4.22 é possível visualizar os elementos associados a este tipo de sistema.

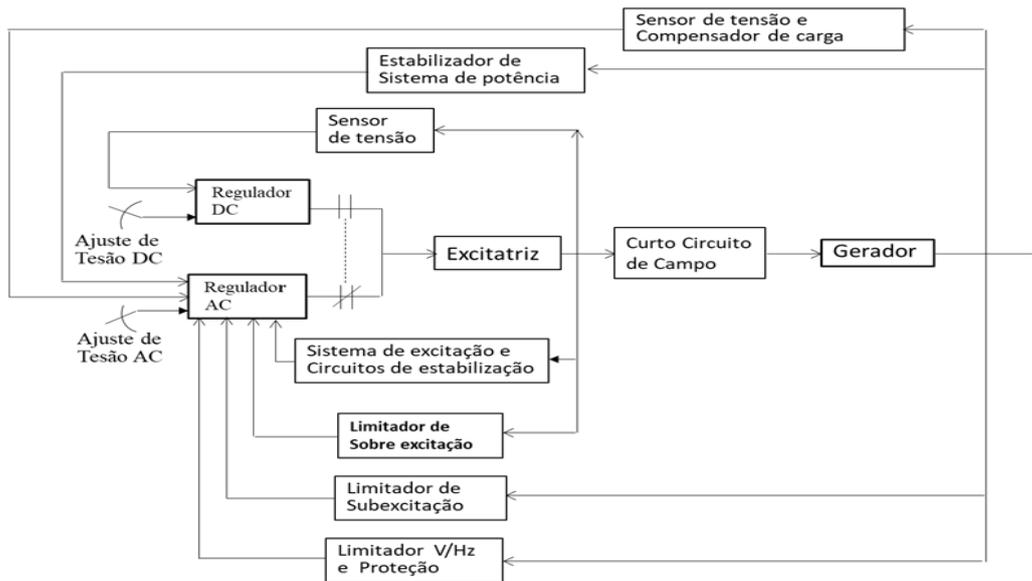


Figura 4.22 - Sistema de excitação, controle e circuitos de proteção.
 Fonte: KUNDUR (1994).

4.5.5 - Circuitos de estabilização e limitação do sistema de excitação

Os sistemas de excitação compreendem elementos com pobre performance dinâmica inerente. Isto é particularmente verdade nos sistemas de excitação CA e CC. Se um regulador com ganho integral muito baixo é usado, o controle da excitação não é estável quando o gerador está em circuito aberto. Por esta razão, a estabilização do sistema de controle da excitação, é composta de uma série de realimentações de compensação, utilizadas para fornecer a performance dinâmica do sistema de controle.

Na Figura 4.23 é possível visualizar a forma de compensação mais comumente usada, neste caso trata-se de uma realimentação derivativa. O efeito da compensação é minimizar a mudança de fase introduzida pelos atrasos no tempo, acima de uma taxa de frequência selecionada.

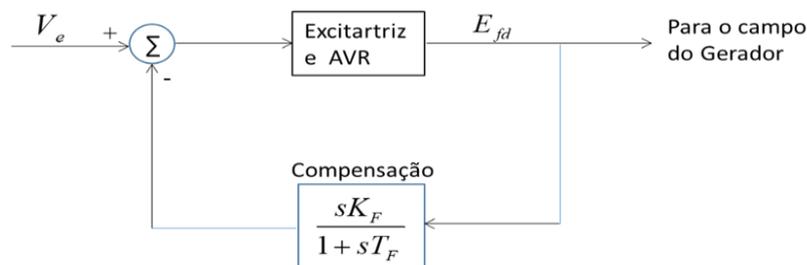


Figura 4.23 - Estabilização de sistema de controle de excitação, através de alimentação derivativa.
 Fonte: KUNDUR (1994).

- **O Estabilizador de sistema de potência (PSS):** utiliza sinais auxiliares de estabilização, para controlar o sistema de excitação, bem como para melhorar a performance do sistema de potência. Comumente os sinais de entrada utilizados para o estabilizador do sistema de potência, são os desvios de velocidade, frequência e potência. A performance dinâmica do sistema de potência, é melhorada pelo amortecimento de oscilações no sistema;
- **O limitador de Subexcitação (UEL - Under Excitation Limitation):** é pretendido, para prevenir a redução na excitação do gerador, a um nível onde o limite de pequeno sinal ou limite de aquecimento da região terminal do núcleo é excedida. Este limitador é também conhecido por outros nomes, tais como Limitador Ampere - reativo de subexcitação (URAL) e limitador de Mínima Excitação (MEL). O sinal de controle do (UEL) é derivado de uma combinação da tensão e corrente ou potência ativa e reativa do gerador;
- **O Limitador de sobre excitação (OXL):** O propósito do limite de sobre excitação, é proteger o gerador de sobreaquecimento, devido à prolongada sobrecorrente de campo. Este limitador é também chamado de **Limitador de Máxima Excitação (MXL)**. Os enrolamentos do campo do gerador, foram projetados para operar continuamente em um valor correspondente de condições de taxa de carga. Tipicamente a função limitadora de sobre excitação, detecta as condições de alta corrente de campo e após um tempo, age através do regulador AC em uma rampa, baixando a excitação para um valor pré-selecionado (tipicamente de 100 % a 110 % da taxa de corrente de campo). Se isto falhar, o regulador AC é desligado e o controle transferido para o regulador DC, sendo reposicionado o set point, para um valor correspondente ao valor taxado;
- **Limitador e proteção Volts por Hertz:** estes protegem o gerador e livram o transformador de danos devidos ao fluxo magnético excessivo, resultado de baixa frequência/ou sobretensão. Se mantido um fluxo magnético excessivo, este poderá causar sérios sobre aquecimentos danificando a unidade de transformador e o núcleo do gerador. O *limitdor V/Hz* (ou regulador, como às vezes é chamado), controla a tensão de campo, tal que limita a tensão do gerador quando o valor de *V/Hz*, excede um valor pré-selecionado;
- **Curto circuito no campo:** sob condições de deslizamento de polos e curto circuito no sistema, a corrente induzida no enrolamento de campo do gerador,

pode ser negativa. Se o caminho não é fornecido para este fluxo de corrente negativa, tensões muito altas podem resultar através dos enrolamentos de campo. Portanto, especial circuitaria é fornecida e conectada em paralelo com o campo do gerador, permitindo o fluxo de corrente negativa. Isto toma a forma de um curto circuitamento do campo, comumente chamado de *Crowbar* ou um Varistor (KUNDUR P., 1994).

Na Figura 4.24 é possível visualizar que um *Crowbar* consiste de um thyristor e um resistor de descarga de campo (FDR), conectado através do campo do gerador conforme mostra. É comum também utilizar-se varistores no lugar da Resistência de descarga de Campo.

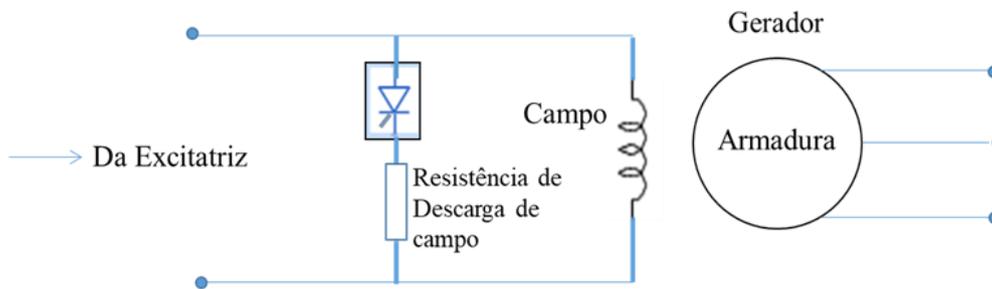


Figura 4.24 - Curto circuito de campo utilizando-se um Crowbar.

4.6 - MODELAGEM DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Modelos matemáticos de sistemas de excitação, são essenciais para avaliação dos requisitos da performance desejada, para o projeto e coordenação de proteção e circuitos suplementares e ainda para estudos de estabilidades, direcionados para o planejamento e operação de sistemas de potência. O detalhe do modelo concebido depende da proposta do estudo. Os aspectos de proteção e controle que impactam nos estudos e estabilidade de pequenos sinais, são a tensão do regulador, estabilizador de sistema de potência e estabilização e controle de excitação. O limitador e circuito de proteção identificado na referida figura, normalmente devem ser considerados somente para tempos médios, tempos longos e estudos de estabilidade de tensão. Alguns sistemas de excitação, possuem limitadores de ação rápida da tensão terminal, em conjunto com estabilizadores de sistemas de potência; estes devem ser modelados em simulações de estabilidade transiente.

A seguir a modelagem do sistema de excitação é descrita. Existe a técnica de começarmos com a consideração de um sistema de *por unidade* apropriado, descrevendo modelos de vários componentes e finalmente apresentando modelos completos, para tipos selecionados de sistemas de excitação.

Nesta dissertação, não foi utilizada a técnica de modelagem de partes por partes, pois o método utilizado foi cálculo da função de transferência através do alocamento dos polos, sendo que a máquina síncrona já é conhecida, bem como todos os seus parâmetros e a sua função de transferência. Desta forma, direciona-se para o **modelo completo do sistema de excitação** e, em seguida para a modelagem dos limitadores.

4.6.1 - Modelagem de um sistema de excitação completo

Na Figura 4.25 é possível visualizar a estrutura geral de um modelo de sistema de excitação detalhado, tendo uma correspondência de um para um com o equipamento. Apesar deste modelo representar uma boa relação direta entre os parâmetros do modelo e os parâmetros físicos, tal detalhe é considerado muito amplo para estudos de sistemas em geral. Portanto, técnicas de redução de modelo são utilizadas, para simplificar e obter um modelo prático, apropriado para o tipo de estudo pretendido.

A estrutura apropriada para o modelo reduzido, depende do tipo de sistema de excitação. O IEEE possui doze modelos de estruturas padronizadas na forma de diagrama de blocos, para representação da grande variedade de sistemas de excitação correntemente em uso.

Como exemplo e para a consolidação da teoria, apresentaremos o modelo nº 04, denominado **Modelo (de Excitador) tipo STAI** (KUNDUR, 1994).

Assim, o excitador tipo STAI, representa um sistema de fonte de potencial a retificador controlado. A potência da excitação é abastecida através de um transformador, vindo dos terminais do gerador; portanto a tensão de teto (ceiling) é diretamente proporcional à tensão terminal do gerador. O efeito da regulação do retificador na tensão de teto é representado por K_C . O modelo prover flexibilidade para representar as séries de avanço-atraso ou taxa de realimentação para a estabilização. Por causa das muito altas capacidades de forçamento do campo do sistema, um limitador de corrente é muitas vezes empregado; o limite é definido por I_{LR} e o ganho por K_{LR}

Na Figura 4.25 é possível visualizar a representação um modelo de sistema de excitação do tipo STAI/IEEE.

Observação: na figura abaixo, os pontos com asteriscos (*), são pontos alternativos para entradas de sinais elétricos.

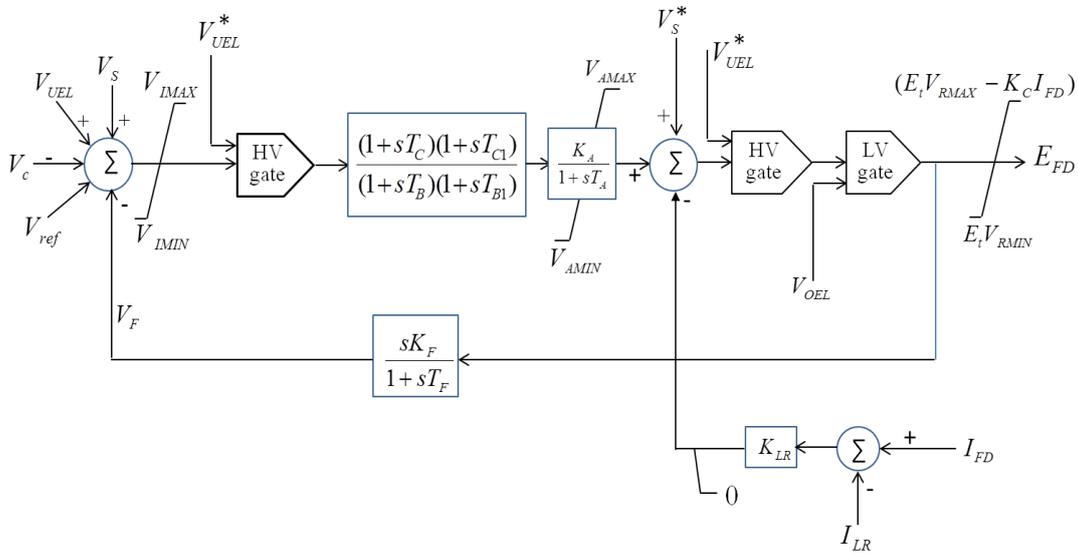


Figura 4.25 - Modelo de sistema de excitação, tipo ST1A – IEEE.
Fonte: KUNDUR (1994).

4.7 - DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS NO MODELO STA1- IEEE

V_{UEL} = *Under Excitation Limit* - sinal (de tensão) Limitador da Sub Excitação;

V_S = *Stator Voltage* - sinal (de tensão) de realimentação do estator para o RAT;

V_F = *Field Voltage* - sinal (de tensão) de realimentação do campo para o RAT;

V_{IMAX} = sinal (de tensão) de limitação da corrente máxima;

V_{IMIN} = sinal (de tensão) de limitação da corrente mínima;

HV gate = High Voltage gate - Porta lógica seletora de sinal alternativo normalmente de ação instantânea;

T_B, T_{BI}, T_C, T_{CI} = Constantes de tempo da função de transferência;

LV gate = Low Voltage gate - Porta lógica seletora de sinal alternativo, normalmente de ação instantânea;

V_{OEL} = *Over Excitation Limit* - sinal (de tensão) Limitador da Sobre Excitação;

E_t = Sinal (de tensão) proporcional à tensão terminal;

I_{FD} = Sinal (de tensão) proporcional à corrente de Excitatriz (no caso de excitatriz rotativa);

I_{LR} = sinal (de tensão) proporcional à corrente de Campo da máquina principal;

$K_C I_{FD}$ = sinal (de tensão) proporcional à reação de armadura;

E_{FD} = sinal (de tensão) proporcional à saída da excitatriz (no caso de excitatriz rotativa);

K_C = Constante (ganho) proporcional aos efeitos de regulação do retificador, na saída da excitatriz (KUNDUR, 1994).

4.8 - MODELAGEM DE LIMITADORES

Estes circuitos não atuam sob condições normais e não são usualmente modelados nos estudos de transitórios e estudos de estabilidade de pequenos sinais. Eles podem, no entanto, ser importantes para estudos de estabilidade de longa duração e estudos de estabilidade de tensão. As implementações atuais destas funções de limitação, variam muito, dependendo do fabricante, do estilo do equipamento e dos requisitos especificados pela utilidade.

Os demais limitadores, são igualmente implementados de modo parecido, observando-se as grandezas a serem limitadas e mantendo-se valores limites pré calculados, de modo que se existir qualquer tendência de ultrapassar os valores limites das grandezas, aparecerá um comando na excitação impedindo o aumento da referida grandeza, mantendo assim, a máquina dentro dos seus limites suportáveis, para manter o funcionamento contínuo.

A seguir, ilustra-se como os tais dispositivos são modelados e considerando-se exemplos específicos, são eles:

a) Limitador de Subexcitação:

- Na Figura 4.26 é possível visualizar o modelo de um limitador de subexcitação usado com o tipo ST1A excitador (estático). Os parâmetros K_C e K_R determinam as características do limitador no plano P-Q. A saída V_{UEL} é aplicada ao gate HV, do modelo de sistema de excitação tipo STA1 da Figura 4.26.

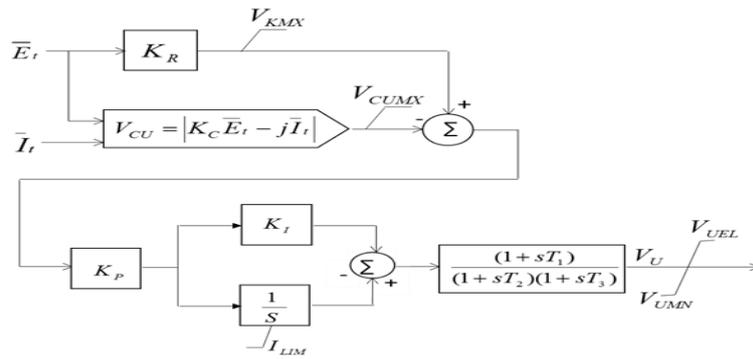


Figura 4.26 - Modelo de um limitador de subexcitação.
 Fonte: KUNDUR (1994).

Na Figura 4.27 é possível visualizar a área de atuação do Limitador de subexcitação, dentro da curva de capacidade da máquina síncrona. O ganho é o raio da Característica UEL (*Under Excitstion Limit*); o ganho é o centro da Característica UEL (*Under Excitstion Limit*) (KUNDUR, 1994).

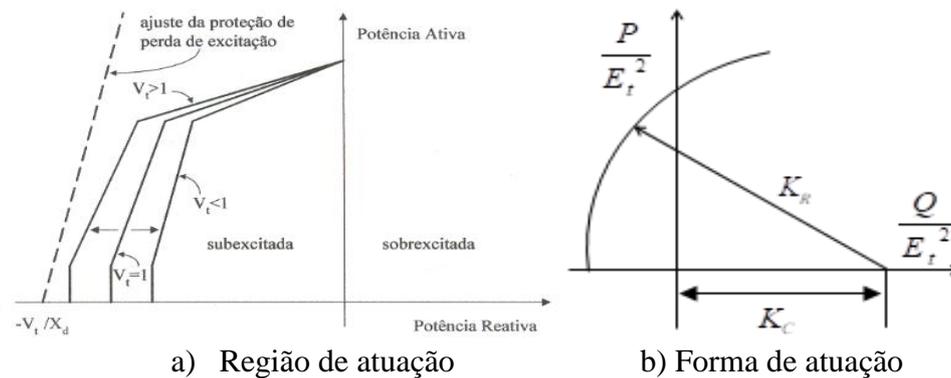


Figura 4.27 - a) e b); Região e forma de atuação do limitador de subexcitação respectivamente.

b) Limitador Volts/Hertz:

- Tem seu modelo mostrado na Figura 4.28. A operação deste limitador, é bastante direta, pois quando o valor V/Hz por unidade excede o valor de limitação estabelecido em V_{ZLM} , um forte sinal negativo comanda a excitação para baixo. O valor limite de V_{ZLM} , é tipicamente selecionado de 1.07 a 1.09 pu. Este limitador trabalha tendo como base a relação entre a tensão e a frequência (U/F), sendo esta relação diretamente proporcional ao fluxo no ferro da máquina em referência, bem como no ferro de outros equipamentos eletromagnéticos que estiverem conectados à rede, como por exemplo os motores e os transformadores.

Observação: Para o exemplo acima, os ganhos utilizados foram: $V_{ZLM} = 1.07$; $K_{Z1} = 1000$ e $K_{Z2} = 0.007$.

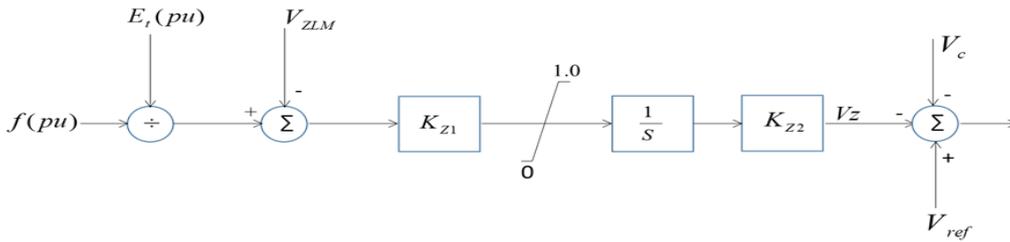


Figura 4.28 - Modelo de limitador Volts/-Hertz.
Fonte: KUNDUR (1994).

c) Limitador de corrente de campo ou de sobrecitação

- Na Figura 4.29 é possível visualizar o modelo de um circuito limitador de corrente de campo. Um ajuste alto fornece quase instantaneamente a limitação de 1.6 vezes a corrente de campo (FLC). Um baixo ajuste de 1.05 x FLC, em conjunto com uma rampa em função do tempo, fornece uma limitação com "Time delay" (atraso), dependente do nível da corrente de campo. Por exemplo, um nível de corrente de 1.325 x FLC, será permitido por 15 segundos, seguido por uma redução no nível de corrente para 1.05 x FLC, acima dos próximos 15 segundos.

Referindo-se ao diagrama de blocos da Figura 4.29, quando I_{fd} excede o ajuste alto I_{FLM1} , o sinal de controle V_{F1} da malha ^①, age para reduzir a excitação instantaneamente.

Quando a corrente de campo está abaixo de I_{FLM1} , a ação de limitação é feita através da malha de controle ^②. A magnitude do sinal de controle V_{F2} e o valor do ganho K_2 , determinam o tempo da ação da rampa. Uma vez que a corrente de campo alcança o baixo valor de I_{FLM2} ajustado, a seleção da chave é mudada para a posição BAIXO; isto garante que a corrente de campo no evento de uma segunda perturbação, não excederá o baixo ajuste por um período mínimo, permitindo o resfriamento da máquina. Quando a corrente de campo está abaixo de I_{FLM2} , o sinal V_{F4} ajuda a ressetar rapidamente a saída do integrador para zero.

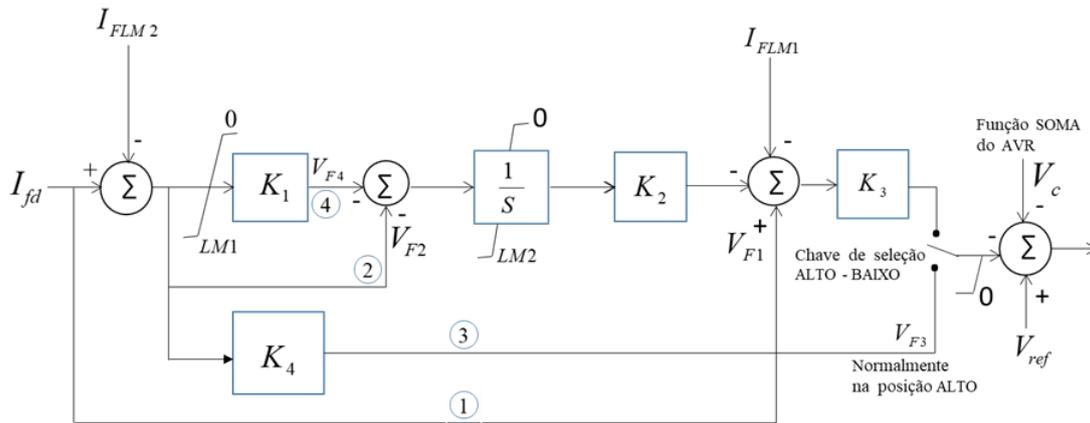


Figura 4.29 - Modelo de limitador da corrente de campo, ou de sobre excitação.
 Fonte: KUNDUR (1994).

4.9 – A CURVA DE CAPABILIDADE

Conforme citamos sobre as funções do regulador de tensão, para que o mesmo possa desenvolver as funções de proteção da máquina síncrona, estudos foram desenvolvidos sobre a máquina síncrona e, o traçado da curva de capacidade desenvolvido particularmente (um para cada gerador), fornece a região de funcionamento normal, contínuo e seguro, também para cada gerador. Na Figura 4.30 é possível visualizar vários detalhes construtivos curva de capacidade, com a definição da região de funcionamento normal, contínuo e seguro para o gerador.

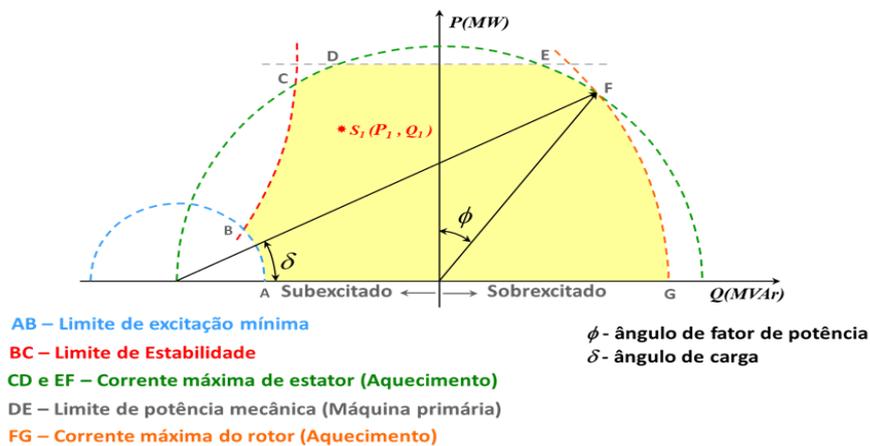


Figura 4.30 - Detalhes construtivos com região definida na curva de capacidade.
 Fonte: DUARTE (2005).

Na Figura 4.31 é possível visualizar a definição dos quadrantes onde funcionam os geradores e os motores. Estes quadrantes, estão situados na curva de capacidade,

definindo desta forma, que os geradores funcionam nos quadrantes 01 e 02 e os motores funcionam nos quadrantes 03 e 04.

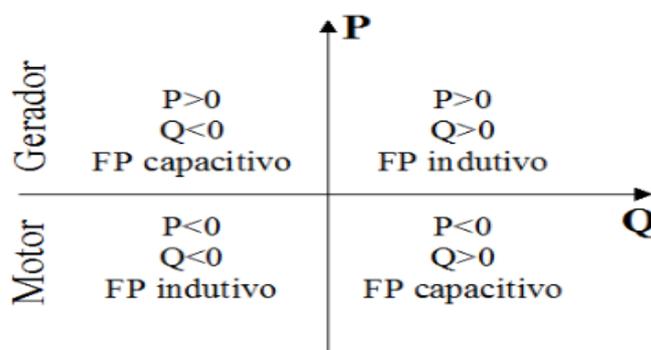


Figura 4.31 - Quadrantes de funcionamento os geradores e dos motores.

Pela representação da Figura 4.31, conclui-se que os compensadores síncronos funcionam na região abaixo do eixo da potência reativa (Q). Este fato se deve à sua potência ativa (P), que sendo absorvida da rede elétrica (para girar o rotor do compensador), tem o sentido contrário ao apresentado nesta figura, apontando para baixo.

4.10 – CONCLUSÕES

Neste capítulo, foram mostrados alguns aspectos técnicos sobre a funcionalidade dos compensadores síncronos, suas diferenças em relação aos geradores, sua utilização como corretores de fator de potência, bem como os comparamos em relação aos bancos estáticos de capacitores. Destacamos também as suas representações vetoriais, as quais são de extrema importância para o conhecimento mais aprofundado sobre estas máquinas, bem como para a evolução nas análises gráficas frente a determinadas ocorrências no sistema, mesmo porque na atualidade, os modernos relés de proteção e sistemas de oscilografia, estão sempre registrando de forma gráfica (os sinais de todos os principais equipamentos) e quando das faltas, é procedimento dos especialistas da Eletronorte recorrerem a estes sistemas, recorrerem aos gráficos armazenados no pré, durante e pós falta, para desmistificarem quaisquer dificuldades, dando celeridade às investigações, ganhando tempo e melhorando as ações corretivas através das análises gráficas.

Quanto aos sistemas de excitação é mostrado também alguns dos principais tipos de sistemas de excitação utilizados nas plantas de geração de energia, frisando também o aspecto técnico, principalmente quando são detalhados os elementos e/ou componentes

dos sistemas de excitação, o que facilita a compreensão deste sistema rico em detalhes técnicos.

Os tópicos descritos neste capítulo sobre os sistemas de excitação, inclusive aqueles que tratam da modelagem, servem de pré-requisitos e representam um certo embasamento para as demandas de implementação do novo RAT a ser simulado, cujas premissas, serão delineadas nos próximos capítulos.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÃO DOS COMPENSADORES SÍNCRONOS DE VILA DO CONDE E MARABÁ

5.1 - A MÁQUINA SÍNCRONA UTILIZADA EM VILA DO CONDE E MARABÁ

A máquina síncrona pode ser utilizada tanto quanto motor, quanto como gerador de energia, sendo mais comum este último caso.

Construtivamente, as principais partes são o estator (parte estacionária) e o rotor (parte móvel). Usualmente o enrolamento de campo se encontra no rotor, e os enrolamentos de armadura no estator.

No caso dos compensadores síncronos de Vila do Conde e Marabá, são máquinas de 8 polos e conectadas em uma rede de 60 Hz, giram em 900 rpm, para uma potência de 150 MVar.

5.1.1 – A partida dos compensadores síncronos

Por tratar-se de máquinas com tamanho e massa considerados, possuem também um grande momento de inércia; basta considerar que o seu rotor possui uma massa de 110 t.

Com um rotor nestas dimensões e rotação nominal de 900 rpm, deve-se considerar que um sistema especial de partida é utilizado para tirar este rotor da inércia e levá-lo lentamente até a rotação nominal. Só para termos uma ideia, o tempo desde o início da rotação, até a rotação nominal, é pouco mais de 03 minutos.

Neste caso em especial, utiliza-se um sistema de tensão reduzida e assim que é acionado o comando de partida, os disjuntores D2, D3 e D4 (ver Figuras 3.5 e 3.6) são fechados alimentando um autotransformador (AT2 01 de 41.8 MVA) de partida, o qual alimenta o estator do compensador com uma tensão de 03 kV, suficiente para tirar o rotor da inércia elevando lentamente a rotação, até que em torno de aproximadamente 03 minutos, o valor nominal da rotação é atingido.

Ao atingir as 900 rpm, os disjuntores D3 e D4 se abrem (ver Figuras 3.5 e 3.6) e o disjuntor D1 se fecha (ver Figuras 3.5 e 3.6) alimentando o estator com a tensão nominal

de 13.8 kV. Assim, o compensador é conectado permanentemente ao sistema, preparado para contribuir no ajuste da tensão da barra de 230 kV, conforme as conveniências operacionais. Na Tabela 5.1 é possível visualizar o sequencial de partida dos compensadores, o qual é completado em torno de 3 min e 1 s.

Tabela 5.1 - Listagem do sequencial de partida do compensador de Vila do Conde.

HORÁRIO/MÁQUINA	EQUIPAMENTO/EVENTO	ESTADO DO EQUIPAMENTO
16:09:11.640 VCCS2-02	4.0AX Liga Aux Partida Auto	Atuado o Comando de Partida
16:09:11.735 VCCS2-02	Bomba Água Refrig 1 Lig/Desl	Ligado
16:09:11.742 VCCS2-02	Bomba Lev Rotor CA Lig/Desl	Ligado
16:09:11.749 VCDJ2-11	VCDJ2-11 Posição Disjuntor	Fechado
16:09:12.150 VCCS2-02	Posição Contator 19D	Fechado
16:09:17.380 VCCS2-02	Pressão Óleo Levantam <50bar	Normal
16:09:18.030 VCCS2-02EXC	Ventilação Tiristores Ligada	Ligado
16:09:19.640 VCCS2-02	Partida de Fase Assíncrona	Atuado
16:09:19.640 VCCS2-02	Part Man Fase Assíncrona	Atuado
16:09:19.640 VCCS2-02	Partida Manual Sequencia	Atuado
16:09:19.746 VCDJ2-10	VCDJ2-10 Posição Disjuntor	Fechado - início da rotação
16:09:24.037 VCCS2-02EXC	Velocidade Nula	Normal
16:09:46.051 VCCS2-02EXC	Velocidade >10%	Alarme
16:09:46.140 VCCS2-02	Parada Aut Bomba Lev Rotor	Alarme
16:09:46.209 VCCS2-02	Bomba Lev Rotor CA Lig/Desl	Desligado
16:12:02.042 VCCS2-02EXC	VCCS2-02EXC Velocidade >90%	Alarme
16:12:02.240 VCCS2-02	88/CA Desliga Bomb Lub CA	Alarme
16:12:02.278 VCCS2-02	Bomba Óleo Lubr CA Lig/Desl	Desligado
16:12:07.037 VCCS2-02EXC	Escorregamento <3%	Alarme
16:12:07.140 VCCS2-02	Pré Condição Fase Assincrona	Atuado
16:12:07.718 VCCS2-02	Posição Contator 41	Fechado
16:12:08.491 VCCS2-02	Posição Contator 19D	Aberto
16:12:15.078 VCCS2-02	37 Mínima Corrente Estator	Atuado
16:12:16.140 VCCS2-02	Pré Cond Sincron Tensão Reduz	Atuado
16:12:16.240 VCCS2-02	Corrente Mín Estator V > 90%	Alarme
16:12:16.282 VCDJ211POS	VCDJ2-11 Posição Disjuntor	Aberto
16:12:20.391 VCCS2-02	25A Sincronismo Verificado	Atuado
16:12:20.392 VCCS2-02	25P Sincronismo Verificado	Atuado
16:12:20.440 VCCS2-02	Pré Condição de Sincron Tensão plena	Atuado
16:12:20.540 VCCS2-02	Autoriza Fecham DJ2-12	Atuado
16:12:20.627 VCDJ2-12	VCDJ2-12 Posição Disjuntor	Fechado - rotação de 900 rpm
16:12:31.086 CDJ210POS	VCDJ2-10 Posição Disjuntor	Aberto

5.1.2 - O fluxo de potência e o sistema de monitoramento

Estas máquinas acopladas ao sistema, são monitoradas à distância durante 24 horas, por um sistema de monitoramento chamado SIMME. Este sistema monitora à distância e na Tabela 5.2 é possível visualizar os pontos mostrados que neste caso, trata-se do monitoramento do compensador síncrono de Marabá - MBCS2-01.

Tabela 5.2 - Apresenta os 24 pontos monitorados pelo sistema SIMME.

PONTO	UNIDADE	MENOR VALOR MEDIDO	VALOR MÉDIO	MAIOR VALOR MEDIDO	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
Mancal Lado Anel Horizontal	µm	16,67	17,98	38,85	0	50
Mancal Lado Anel Axial	µm	7,55	13,48	27,71	0	50
Mancal Lado Anel Vertical	µm	7,02	9,38	17,23	0	50
Lado Direito Horizontal 1	µm	18,65	21,92	57,95	0	100
Lado Direito Horizontal 2	µm	22,99	25,63	43,41	0	100
Lado Esquerdo Horizontal 1	µm	24,65	28,27	47,25	0	100
Lado Esquerdo Horizontal 2	µm	21,45	26,53	66,28	0	100
Mancal Lado Bomba Horizontal	µm	15,73	17,77	31,37	0	50
Mancal Lado Bomba Axial	µm	4,74	8,88	17,66	0	50
Mancal Lado Bomba Vertical	µm	9,93	12,71	21,55	0	50
Temperatura de Água Entrada Resfriamento - Máquina	°C	42,26	45,06	49	0	65
Temperatura Mancal Lado Anel	°C	66,96	68,69	70,83	0	65

PONTO	UNIDADE	MENOR VALOR MEDIDO	VALOR MÉDIO	MAIOR VALOR MEDIDO	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
Temperatura Mancal Lado Bomba	°C	60,51	62,06	64,11	0	65
Temperatura Hidrogenio Saida Refrigeração	°C	52,53	54,72	57,64	0	65
Temperatura Barras Estator Lado Anel Ranhura 87	°C	58,38	60,54	63,7	0	70
Temperatura Barras Estator Lado Anel Ranhura 96	°C	56,91	59,11	62,19	0	70
Temperatura Barras Estator Lado Anel anhura 105	°C	55,86	58,06	60,94	0	70
Pressão do Hidrogênio	bar	2,09	2,09	2,09	1,8	2,1
Potencia Ativa	MW	-1,52	-0,51	4,44	-10	50
Potencia Reativa	MVAR	-42,27	-1,93	28,97	-80	80
Temperatura da Água de Resfriamento - Entrada Aéreo	°C	48,22	50,67	54,08	0	65
Velocidade	RPM	898,58	899,64	907,11	0	1000
Vazão da Água de Saída da Bomba de Refrigeração	m3/h	496,52	526,54	537,61	0	1000

Na Figura 5.1 é possível visualizar um oscilograma de acompanhamento do compensador síncrono de Marabá, apresentando o perfil da potência reativa desta máquina durante 24 horas (desde às 00:00 h às 24:00 h do dia 02.09.2017), mostrando-nos que neste intervalo de tempo, o compensador de Marabá cedeu e absorveu energia

reativa em relação ao sistema, traçando um perfil fácil de ser analisado, mostrando também que aconteceram mudanças significativas no sistema e conseqüentemente no fluxo de energia reativa.

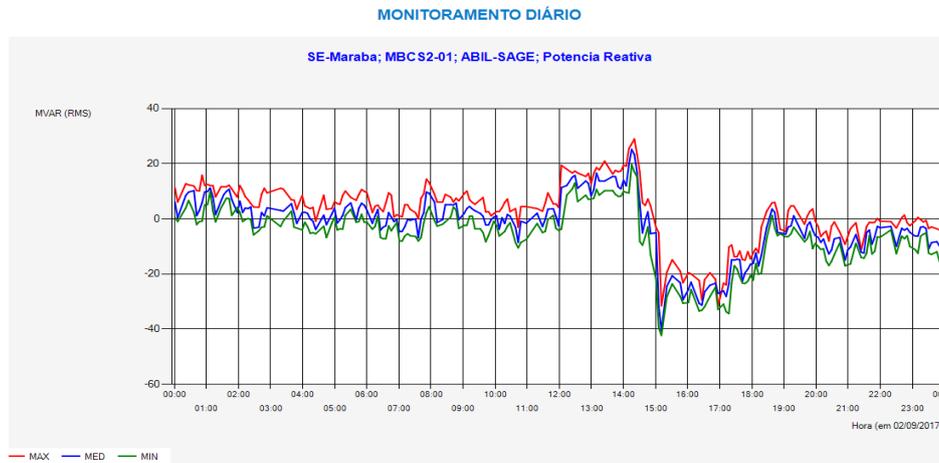


Figura 5.1 - Gráfico correspondente à potência reativa do compensador nº 01 de Marabá no dia 02.09.2017.

Analisando-se a Figura 5.1, comenta-se o seguinte:

- Os sinais verde azul e vermelho medem a mesma grandeza. O sistema de monitoramento apresenta "um máximo, a média e um mínimo";
- Das 00:00 h até às 12:00 h, este compensador estava cedendo reativos em uma faixa próxima de 5 MVAR, para o sistema. Isso comprova que cargas vizinhas estavam com fator de potência atrasado precisando de reativos, os quais estavam sendo cedidos pelo compensador síncrono de Marabá, principalmente nas barras de 230 kV;
- Das 12:00 às 14:00 h, passou a ceder aproximadamente 10 MVAR, para o sistema. Isso comprova que cargas vizinhas estavam com fator de potência atrasado precisando de mais reativos que no intervalo anterior, os quais estavam sendo cedidos pelo compensador síncrono de Marabá, principalmente nas barras de 230 kV;
- Das 14:00 às 15:00 h, o fluxo de energia reativa no Sistema Interligado foi se invertendo vagarosamente e, das 15:00 às 17:00 h, o compensador absorveu aproximadamente -25 MVAR, o que evidencia Tensão mais alta nas barras de geração, na usina de Tucuruí ou em outros estados;
- Partindo das 17:00 h, a potência reativa começou a aumentar, chegando a 0 MVAR, voltou a baixar a partir das 18:30 h e às 20:30 h estabilizou em

aproximadamente 10 MVAR, até às 24:00 h, ainda assim evidenciando geração com tensão mais alta na usina de Tucuruí ou em outros estados.

5.1.3 - Algumas características funcionais dos compensadores síncronos de Vila do Conde e Marabá

Os compensadores Síncronos de Vila do Conde, assim como o Compensador de Marabá, possuem o mesmo arranjo funcional. Sobre o que descreveremos a função de cada componente. Na Figura 3.5 é possível visualizar um compensador parado, no seu diagrama elétrico unifilar pode-se ver o seguinte:

- Disjuntor 52 F no estado desligado; cor verde;
- Disjuntor 41 no estado desligado; cor verde;
- Disjuntor 19 D no estado ligado; cor vermelha;
- Disjuntor D1 no estado desligado; cor verde;
- Disjuntor D5 no estado desligado; cor verde;
- Disjuntor D2 no estado desligado; cor verde;
- Disjuntor D3 no estado desligado; cor verde;
- Disjuntor D4 no estado desligado; cor verde.

Na Figura 3.6 é possível visualizar a representação unifilar dos compensadores síncronos de Vila do Conde e Marabá ligados ao sistema, para um compensador funcionando e conectado ao sistema, pode-se ver o seguinte:

- Disjuntor 52 F no estado desligado; cor verde;
- Disjuntor 41 no estado ligado; cor vermelha;
- Disjuntor 19 D no estado desligado; cor verde;
- Disjuntor D1 no estado ligado; cor vermelha;
- Disjuntor D5 no estado desligado; cor verde;
- Disjuntor D2 no estado ligado; cor vermelha;
- Disjuntor D3 no estado desligado; cor verde;
- Disjuntor D4 F no estado desligado; cor verde.

5.1.4 - O sistema de excitação

A função do sistema de excitação é estabelecer a tensão interna do gerador síncrono, sendo responsável também pela magnitude da corrente gerada e pelo fator de potência. Na Figura 5.2 é possível visualizar máquina síncrona com o sistema de excitação.

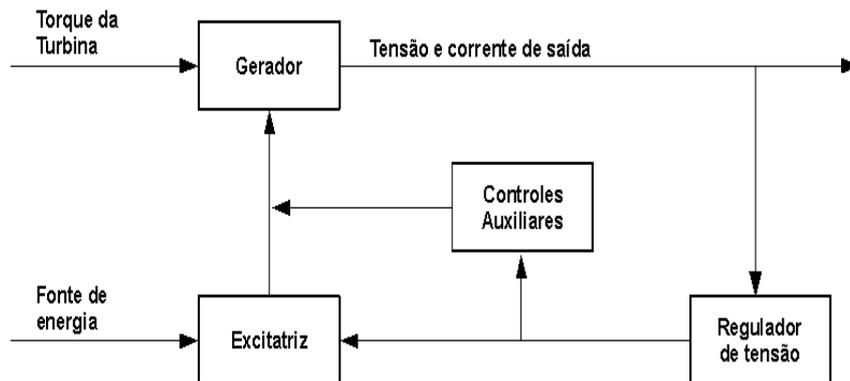


Figura 5.2 – Representação genérica de uma máquina síncrona com o sistema de excitação.

Fonte: FREITAG *et al.* (2014).

A velocidade de ação do regulador é fundamental do ponto de vista da estabilidade do sistema de potência, e tempos de resposta muito curtos são característicos de sistemas com excitação estática (a tiristores).

Na Figura 5.3 é possível visualizar o sistema de excitação dos compensadores síncronos de Vila do Conde e Marabá e suas pontes de tiristores totalmente controladas e do tipo (Ponte de Graetz).

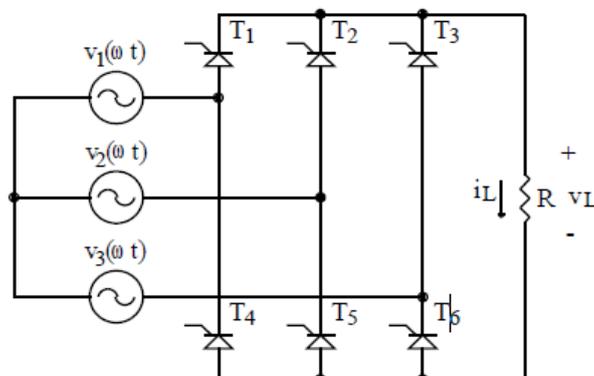


Figura 5.3 – Representação genérica de uma ponte retificadora controlada a thyristores.

Na Figura 5.4 é possível visualizar o ponto de disparo e a sequência dos tiristores disparados.

Na Figura 5.5, é possível visualizar os arranjos básicos dos circuitos para disparo dos tiristores.

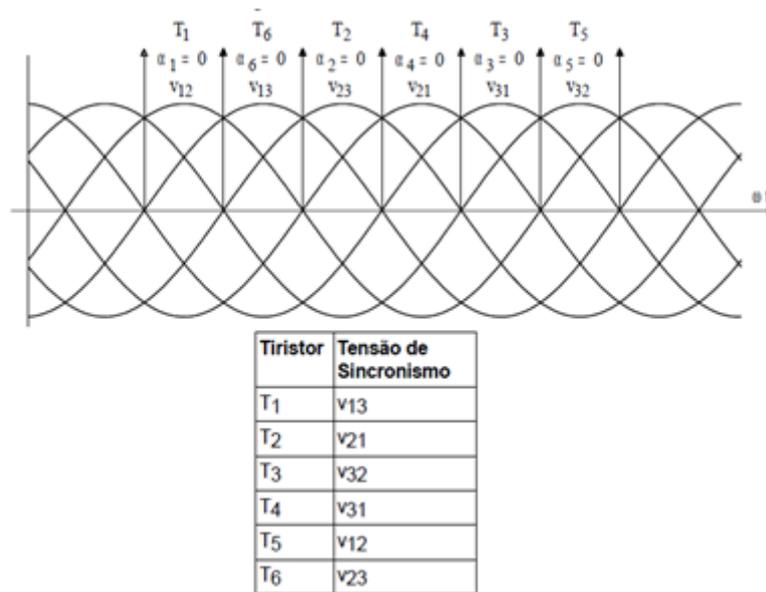


Figura 5.4 – Representação genérica do ângulo de disparo para tiristores.

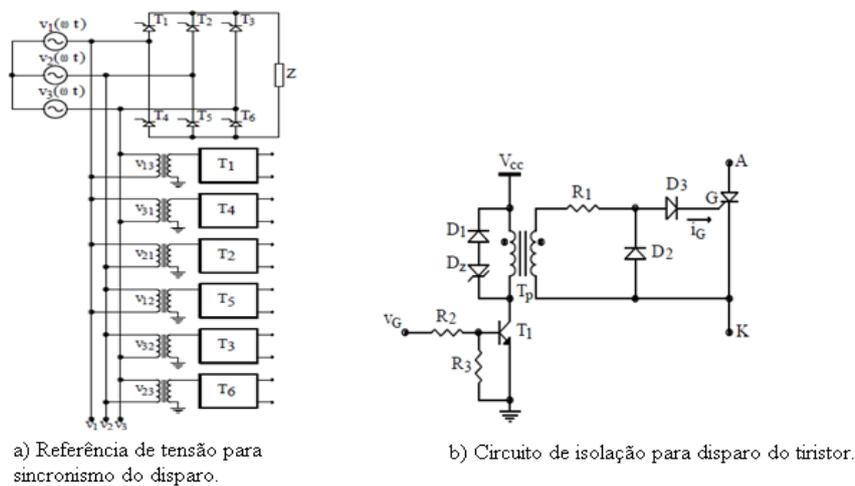


Figura 5.5 - a) e b) – Representação de circuitos para disparo dos tiristores.

Fonte: FREITAG *et al.* (2014).

5.1.5 - O controlador PID

Em um sistema de controle típico, a variável do processo é o parâmetro que precisa ser controlado. A referência é o valor desejado para a variável do processo, assim como

13,8 kV (que é representado por um baixo sinal, por exemplo 10 V CC) para um sistema de regulação de tensão.

A diferença entre a variável do processo e a referência gera o erro, que é utilizado pelo algoritmo do controlador, para atuar no atuador que corrige a planta, de modo que a variável de saída se torna proporcional à referência, eliminando esta diferença.

A ideia principal de um controlador PID é ler o valor de uma variável física a ser controlada (ex: tensão) e calcular a resposta do sistema para que a mesma seja mantida no valor desejado.

O algoritmo de um controle PID é composto pela ação de 3 parcelas e na Figura 5.6 é possível visualizá-las como sendo **Proporcional**, **Integral** e **Derivativa**.

- **Proporcional**: caracteriza-se pela aplicação de um sinal de controle diretamente proporcional ao valor da amplitude do sinal de erro.

Um aumento do ganho proporcional leva a uma diminuição do erro em regime permanente, mas um aumento excessivo pode ocasionar um comportamento oscilatório e até mesmo levar o sistema a instabilidade.

- **Integral**: caracteriza-se pela aplicação de um sinal de controle proporcional à integral do sinal de erro, ou seja, proporcional à soma acumulada do erro. O objetivo da ação integral é aumentar a precisão da resposta do processo e, dependendo do sistema, tornar o erro em regime permanente nulo;
- **Derivativa**: caracteriza-se pela aplicação de um sinal de controle proporcional a derivada do sinal de erro, ou seja, proporcional à taxa de variação do erro.

A ação derivativa pode ser considerada uma ação antecipatória, tendo como objetivo uma reação mais rápida do sistema, atuando durante o transitório na resposta.

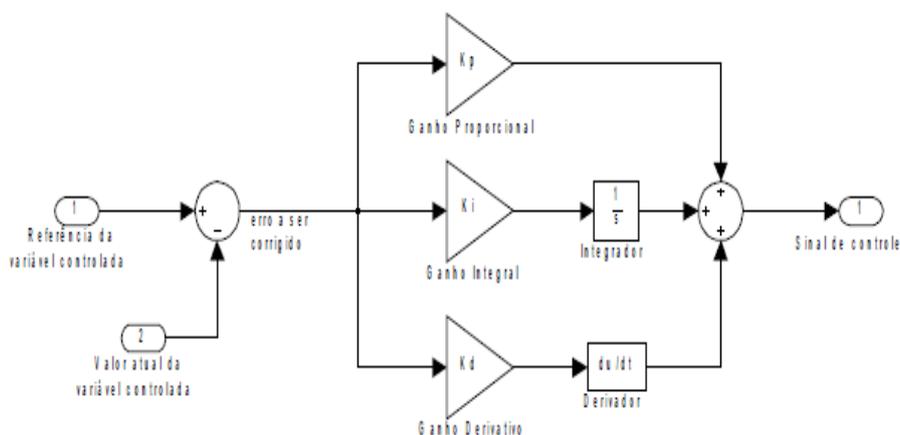


Figura 5.6 - Diagrama (básico) de blocos de um sistema de controle PID.
Fonte: FREITAG (2014).

5.1.6 - A utilização dos compensadores síncronos nos sistemas de potência de Vila do Conde e Marabá

São máquinas que participam continuamente da dinâmica do sistema cedendo ou absorvendo reativos estrategicamente, devido à grande carga indutiva nas suas vizinhanças. Em Vila do Conde estas cargas reativas estão nas plantas da Albras e Alunorte, enquanto que em Marabá, compensador síncrono auxilia no ajuste da tensão das barras de 230 kV, as quais alimentam o parque industrial na cidade de Marabá e também o grande complexo da empresa Vale mineradora. Na Figura 5.7 é possível visualizar o diagrama unifilar do compensador síncrono de Marabá, ligado ao barramento de 230 kV.

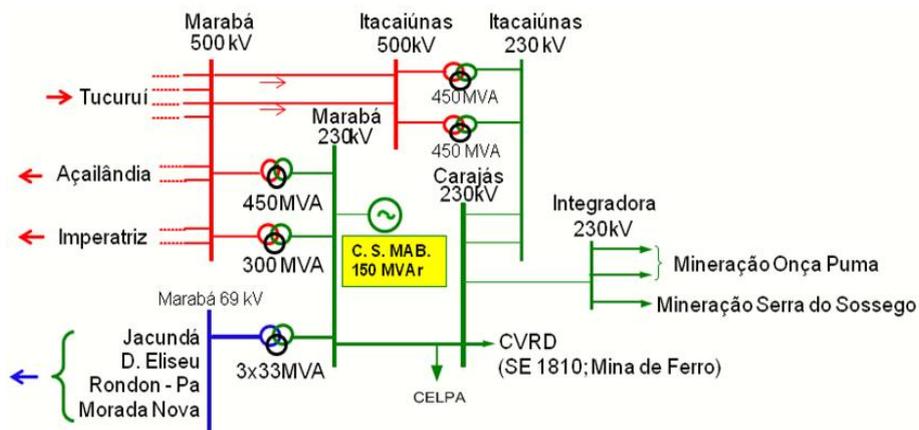


Figura 5.7 - Diagrama representativo do sistema de potência de Marabá.

5.2 - UM SIMULADOR BASEADO NOS DADOS DO FORNECEDOR

A fim de atendermos aos objetivos específicos, optou-se por implementar o simulador, iniciando com a simulação do Compensador Síncrono. Para a simulação do Compensador Síncrono, a primeira tarefa, é modelar e validar a referida máquina, pelo que iniciamos com as características principais do compensador, ver as Tabelas 2.1 e 5.3.

Tabela 5.3 - Alguns dados característicos do compensador síncrono de Vila do Conde.

GRANDEZA	SÍMBOLO	VALOR MEDIDO	VALOR INFORMATIVO
Reatância síncrona de eixo direto	Xd	1,300	1,28 ± 15 %
Reatância inversa	X ₂	0,193	≤0,28
Reatância direta subtransitória	X''d	0,174	0,185 ± 30 %
Reatância direta transitória	X'd	0,295	0,290 ± 20 %
Reatância homopolar	X ₀	0,147	0,10 pu
Resistência por fase do estator a 75 °C	-	0,002302 Ω	0,00241 Ω
Resistência do enrolamento do rotor a 75 °C	-	0,08494 Ω	0,08295 Ω
Resistência inversa	R ₂	0,17 pu	-
Constante de tempo indutiva	T _a	0,276 s	0,220 s
Constante de tempo do rotor (stator aberto)	T'do	5,5 s	4,12 s
Constante de tempo do rotor transitória e subtransitória (armadura em curto circuito)	T'd T''d	0,554 s 0,019 s	0,84 s 0,013 s
Corrente de excitação do entreferro	-	1000 A	1040 A

Fonte: ALSTHOM ATLANTIC *Nomenclature d'appareillage* (1980).

5.2.1 - Outros dados necessários para a implementação do simulador

Cálculo da impedância base:

$$Z_{base} = \frac{150e^6}{(13,8e^3)^2} = \frac{150}{13,8^2} = 0,78765$$

Cálculo da resistência do estator em pu:

$$R_{estator_{pu}} = \frac{0,002302}{0,787649653435153} = 0,00292_{pu}$$

5.2.2 - O primeiro modelo para simulação

Na Figura 5.8 é possível visualizar o modelo implementado utilizando-se a biblioteca MATLAB e os blocos a biblioteca *Powerlib* do *Simulink*, a fim de testar a máquina síncrona.

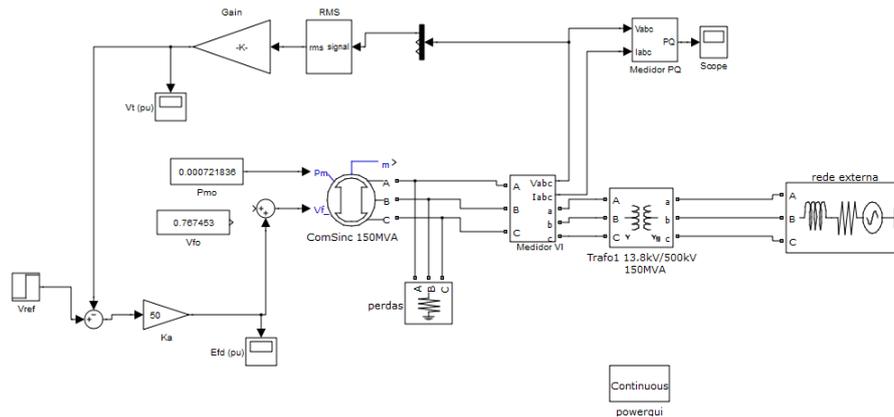


Figura 5.8 – Diagrama (básico) de blocos (em *Simulink* e *MATLAB*) de um sistema e controle com um RAT do tipo P (proporcional) de $K=50$.

No modelo acima, utilizou-se um RAT somente com ganho K (proporcional) igual a 50, para verificar e validar o funcionamento da máquina. Na Figura 5.9 é possível visualizar o bom funcionamento deste primeiro modelo implementado através do *MATLAB/Simulink* ao ser aplicado um degrau, obtendo os principais sinais.

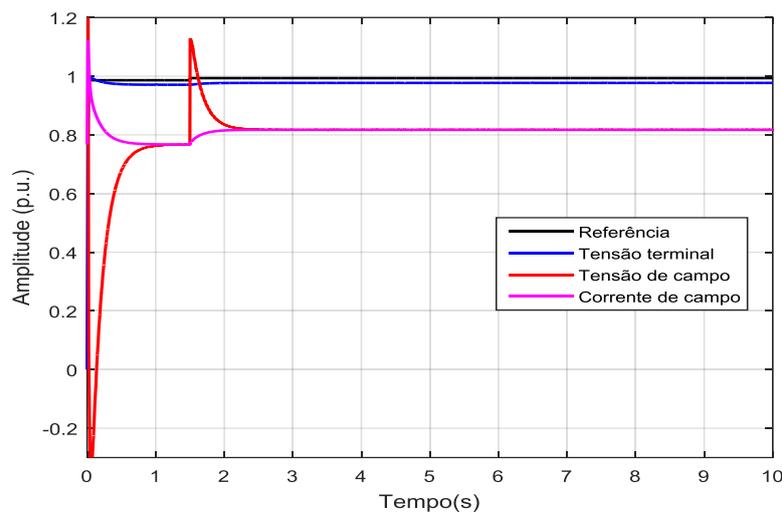


Figura 5.9 – Curvas de resposta ao degrau do modelo mostrado na Figura 5.8.

5.2.3 - Compensador funcionando absorvendo reativos da rede

Nos dados retirados da listagem do *Matlab*, observar-se a tensão de 13.4 kV e a potência de -2.6238 MVar, o que pode ser conferido na listagem de dados abaixo, mostrando alguns parâmetros da máquina síncrona e resultados da corrente de armadura, corrente de campo e tensão terminal, após o degrau aplicado.

5.2.3.1 - Resultados da simulação retirados do MATLAB, na absorção de reativos:

- Machine: ComSinc 150MVA;
- Nominal: 150 MVA 13.8 kV rms;
- Bus Type: P&V generator;
- Uan phase: 0.01° ;
- Uab: 13400 Vrms [0.971 pu] 30.01° ;
- Ubc: 13400 Vrms [0.971 pu] -89.99° ;
- Uca: 13400 Vrms [0.971 pu] 150.01° ;
- Ia: 1130.5 Arms [0.1801 pu] 89.79° ;
- Ib: 1130.5 Arms [0.1801 pu] -30.21° ;
- Ic: 1130.5 Arms [0.1801 pu] -150.21° ;
- P: $1.0002e+005$ W [0.0006668 pu];
- Q: $-2.6238e+007$ Vars [-0.1749 pu];
- Pmec: $1.1424e+005$ W [0.0007616 pu];
- Torque: 1212.2 N.m [0.0007616 pu];
- Vf: 0.76745 pu.

Observando-se os dados retirados da aplicação ao degrau unitário com tensão terminal (de 13.4 kV) menor que a tensão (de 13.8 kV) nas barras, nota-se:

- O equilíbrio dos valores das tensões e correntes, tanto em módulo como em relação ao ângulo de fase;
- Verifica-se a estabilidade das potências P e Q, sendo P muito próximo de zero e Q com aproximadamente -2,5 MVar, para uma tensão terminal de 13,4 kV, o que permite (em relação à tensão de 13,8 kV do sistema) que o compensador esteja funcionando absorvendo reativos da rede.

5.2.4 – Compensador funcionando cedendo reativos para a rede

Nota-se a listagem de dados registrados no Matlab, mostrando alguns parâmetros da máquina síncrona e resultados da corrente de armadura, corrente de campo e tensão terminal, após o degrau aplicado, onde são observados a tensão terminal de 14.2 kV e a potência reativa de 2.8182 MVar, positivos.

5.2.4.1 - Resultados da simulação retirados do MATLAB, quando cedendo reativos:

- Machine: ComSinc 150MVA;
- Nominal: 150 MVA 13.8 kV rms;
- Bus Type: P&V generator;
- Uan phase: -0.03° ;
- Uab: 14200 Vrms [1.029 pu] 29.97° ;
- Ubc: 14200 Vrms [1.029 pu] -90.03° ;
- Uca: 14200 Vrms [1.029 pu] 149.97° ;
- Ia: 1143.2 Arms [0.1822 pu] -89.83° ;
- Ib: 1143.2 Arms [0.1822 pu] 150.17° ;
- Ic: 1143.2 Arms [0.1822 pu] 30.17° ;
- P: $1e+005$ W [0.0006667 pu];
- Q: $2.8118e+007$ Vars [0.1875 pu];
- Pmec: $1.1455e+005$ W [0.0007637 pu];
- Torque: 1215.4 N.m [0.0007637 pu];
- Vf: 1.2348 pu.

Observando-se os dados retirados da aplicação ao degrau unitário com tensão terminal (de 14,2 kV) maior que a tensão (de 13.8 kV) nas barras, nota-se:

- O equilíbrio dos valores das tensões e correntes, tanto em módulo como em relação ao ângulo de fase;
- A estabilidade das potências P e Q, sendo P muito próximo de zero e Q com aproximadamente +2,8 MVar, para uma tensão terminal de 14,2 kV, o que permite (em relação à tensão de 13,8 kV do sistema) que o compensador esteja funcionando enviando reativos para a rede.

5.3 - O MODELO REPRESENTADOR DO RAT ATUAL

Com a evolução dos estudos e na sequência natural das investigações, torna-se necessária a construção de um modelo representativo do regulador automático de tensão atual, a fim de que seja possível desenvolver alguns testes de validação do sistema atual.

5.3.1 - A implementação de um modelo de RAT, o qual seja o mais próximo possível do RAT real

Com a experiência trabalhando com reguladores de tensão de diversos fabricantes, logo verificou-se ser difícil tarefa, construir-se modelos que representasse de modo organizado, os RAT's reais. Após muitas análises e tentativas, conseguiu-se com base em informações anteriores do fabricante, chegar-se ao modelo. Na Figura 5.10 é possível visualizar o referido modelo. Este é um modelo praticamente criado pelo fabricante do equipamento, a fim de testar a partida do compensador com uma resistência de partida diferente daquela projetada pelo fabricante da máquina.

Este modelo também não satisfaz às condições para que possamos estabelecer os objetivos deste trabalho, uma vez que não representa a função de transferência do conjunto e nem possui a disposição dos diversos limitadores que margeiam a curva de capacidade.

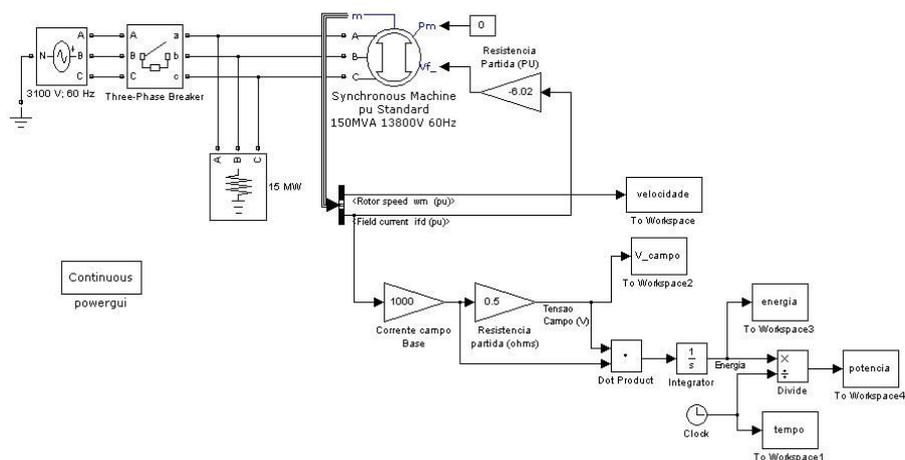


Figura 5.10 - Diagrama de blocos de um modelo (em *Simulink* e MATLAB), com vários pontos para medição de grandezas.
Fonte: FREITAG (2014).

5.3.2 - Descrição do conjunto em estudo

O conjunto a ser estudado é o constituído de uma máquina síncrona (Compensador Síncrono) e um Sistema automático de Excitação e Regulação de Tensão (Controlador PID Digital Automático), os quais serão descritos a seguir.

5.3.2.1 - O compensador síncrono

O Compensador é uma máquina síncrona (sobre a qual já falamos nos capítulos anteriores), trifásica de fabricação francesa (*Alsthom*), com tensão e corrente de campo (Rotor) controladas. Os detalhes destas máquinas em relação aos seus parâmetros e dados de placa, já foram descritos nos capítulos 2 e 5.

5.3.2.2 - Alguns comentários sobre a manutenção dos compensadores

Considerando-se que são máquinas de funcionamento contínuo e que sua parada por qualquer tipo de defeito, falha ou manutenção, gera pesadas multas impostas pelos órgãos fiscalizadores, a tarefa de manter a máxima disponibilidade chega a ser um desafio para a Eletronorte, pois exige das equipes de manutenção que essas sejam criativas e inovadoras, a fim de manterem o bom desempenho dos compensadores síncronos, com o menor número possível de paradas programadas de curtas durações.

Desta forma, os sistemas de monitoramento têm sido fundamentais na antecipação dos problemas, contribuindo para a redução das manutenções corretivas e incrementos cada vez maiores das manutenções preditivas. Este comentário se faz necessário, pois descarta qualquer possibilidade das empresas mantenedoras solicitarem o desligamento destas máquinas.

Os desligamentos sem penalidades, somente poderão acontecer conforme os poucos critérios da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

5.3.2.3 - Os modos de operação do regulador automático de tensão (RAT)

O Regulador Automático de Tensão é um Controlador PID, digital automático, possuindo dois núcleos de controle, onde um deles opera como principal, controlando a máquina síncrona, enquanto o outro (o secundário) permanece na reserva, sendo atualizado pelo principal e pronto a entrar em operação em caso de o principal falhar. A função primária do regulador de tensão é manter a tensão de saída do gerador igual ao valor de referência previamente programado.

O RAT contempla vários modos de funcionamento, dentre os quais podemos citar: o modo automático singelo; o modo automático com compensação de reativos – utilizado quando as máquinas são conectadas (ao barramento considerado infinito) diretamente

sem transformador. Utiliza-se a função *droop*, a qual atua diretamente com os limitadores; o modo automático com fator de potência constante, ou potência reativa constante. Neste modo, temos uma malha adicional de controle, chamada controle secundário, mantendo a potência ou o fator de potência dentro dos limites estipulados. O modo manual, por sua vez, é extremamente útil para se registrar curvas de respostas do regulador e ajustar as proteções da máquina. Atuando diretamente nas grandezas relacionadas ao campo da máquina, compara os valores medidos com o valor de referência ajustado pelo operador (FREITAG *et al*, 2014).

No caso da Eletronorte, consegue-se ajustar a tensão terminal das barras de 230 kV e ao tentar variar esta tensão, na realidade estaremos também variando a potência reativa sendo fornecida ou absorvida do sistema. O modo de operação utilizado pela Eletronorte é o **modo automático singelo** (modo em que a máquina está ligada ao sistema através de um transformador), onde qualquer variação entre a tensão do sistema e a tensão de referência do regulador, provocará uma variação na potência reativa e, de forma tão rápida quanto possível, a tensão retorna ao seu valor pré falta.

Para facilitar o entendimento sobre os modos descritos, na Figura 5.11 é possível visualizar a ilustração de um diagrama unifilar básico dos compensadores síncronos com as malhas de controle.

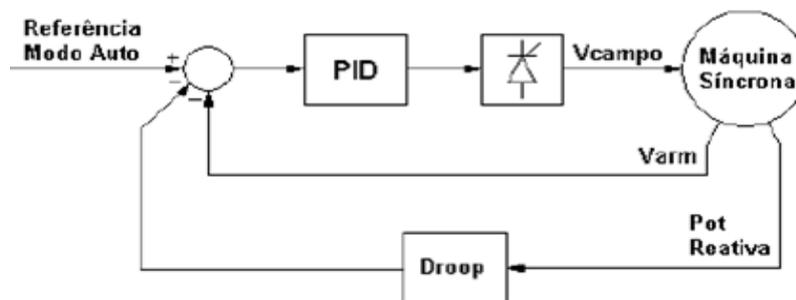


Figura 5.11 - Diagrama representativo do sistema automático de controle.
Fonte: FREITAG *et al*. (2014).

5.3.2.4 - Proteções do regulador de tensão

A seguir comentaremos sobre as principais proteções executadas pelo Regulador de Tensão. Como o Regulador de Tensão é o iniciador do processo elétrico nas máquinas rotativas (pois é quem envia a corrente de magnetização originadora do campo magnético, formador do fluxo o qual induz e cria a tensão terminal da máquina). O mesmo é o piloto do processo interno à máquina, o qual acontece com altíssima velocidade. Dessa forma,

o equipamento deve estar municiado de todos os recursos (os quais chamamos de proteções do regulador), a fim de não permitir que as grandezas por ele iniciadas, saiam das faixas normais suportáveis pela máquina pela máquina, podendo causar danos às vezes irreparáveis, a ponto de o gerador não ter mais condições de funcionamento e ser substituído. Dentre as principais proteções podemos listar abaixo as seguintes:

- a) **Proteções de Campo:** Nesta categoria está basicamente a sobrecorrente de campo, a qual se traduz na elevação da temperatura dos enrolamentos do campo da máquina, podendo trazer danos ao isolamento elétrico do rotor;
- b) **Proteções da Armadura:** Nesta categoria está basicamente a sobrecorrente de armadura, a qual poderá ocorrer tanto na sobre corrente do campo (sobre-excitação), quando na subcorrente do campo (subexcitação). Nos dois casos o fenômeno se traduz na elevação da temperatura dos enrolamentos do estator (armadura) da máquina, podendo trazer danos ao isolamento elétrico do estator:
 1. Limitadores Estabelecidos pelo Regulador de Tensão: as principais proteções estabelecidas pelo regulador de tensão, estão baseadas na área de operação nominal da máquina, a qual é delimitada pela curva de capacidade da máquina, a qual deve ser fornecida pelo fabricante, a fim de facilitar a visualização dos trechos limites de cada parte da máquina, bem como dos pontos de ajustes do regulador com a exatidão desejada. A seguir descrevemos cada limitador, dando ênfase a cada função desenvolvida por cada um deles;
 2. Limitador tensão-frequência (V/Hz): tem por finalidade manter a relação tensão/frequência constante = $(\Phi = \text{Fluxo no Ferro})$, garantindo que não haja a saturação dos núcleos de ferro e consequente sobreaquecimento da máquina;
 3. Limitador Sobrecorrente de Campo: Em casos de aumento na corrente de campo, este limitador quando atua, além de proteger a ponte retificadora contra sobrecarga, reduz a tensão de campo, até que a corrente de campo retorne para valores de limites suportáveis pelo rotor da máquina;
 4. Limitador de Subcorrente de Campo: Visa proteger a máquina contra a perda de excitação. Caso a corrente de campo caia abaixo de valores mínimos (provocando máximos valores de corrente suportáveis pelo estator devido ao fluxo inverso de potência do sistema para o interior da máquina), quando atua, provoca um aumento na tensão de campo, até que os valores de corrente do estator, estejam dentro de limites suportáveis;

5. Limitador de Sobrecorrente de Armadura: quando atua, provoca uma variação na referência da tensão de armadura, visando reduzir a potência reativa e conseqüentemente a diminuir a corrente de armadura, evitando o sobreaquecimento do estator;
6. Limitador de Subexcitação ($P \times Q$): visa proteger a máquina contra a perda de sincronismo provocada por subexcitação. Em casos onde a potência reativa da máquina subexcitada, cruze a linha dos ajustes deste limitador, este provocará um aumento na tensão de campo, até que o valor de potência reativa esteja dentro dos limites suportáveis pela máquina;
7. Limitador de Reativo Máximo: visa proteger a máquina contra a geração excessiva de potência reativa. Em casos onde a potência reativa da máquina cruze a linha dos ajustes deste limitador, este provocará redução na referência da tensão de armadura, até que o valor de potência reativa esteja dentro dos limites suportáveis pela máquina;
8. Limitador do Controle Paralelo: este limitador tem por restringir a variação na referência de tensão, provocada pelo controle paralelo e conseqüentemente as variações na tensão terminal, visando corrigir o fator de potência ou a potência reativa. Este limitador só tem efeito quando operando em fator de potência constante ou reativo constante;
9. Limitador de Entrada Digital: este limitador tem por finalidade restringir as variações na referência provocadas pela entrada digital, ou seja. Variações provocadas pelos comandos de aumentar/diminuir tensão (chaves na porta do painel, IHM da excitação, ou SPCS). Este limitador tem efeito em todos os modos onde a entrada digital atua.

5.3.2.5 - A descrição do simulador com as funções de controle e proteção

O simulador proposto neste trabalho, trata-se de uma representação baseada no modelo descrito e utilizado pelo fabricante. Na Figura 5.10 é possível visualizar o diagrama criado no ambiente de simulação MATLAB/Simulink, no qual estão incluídos: máquina síncrona, barramento da linha de transmissão de 230kV e o sistema de automação. Na Figura 5.12, existem duas opções para simular o regulador de tensão do compensador síncrono. Quando a chave (C) estiver na posição superior, o controlador selecionado será o PID digital completo (B), incluindo as suas proteções. A segunda

opção, usada apenas para testes simples, é selecionada com a chave (C) na posição inferior. Neste caso o RAT será um ganho puro (A). As simulações que serão vistas neste capítulo, foram realizadas com a chave na posição superior, utilizando a modalidade PID.

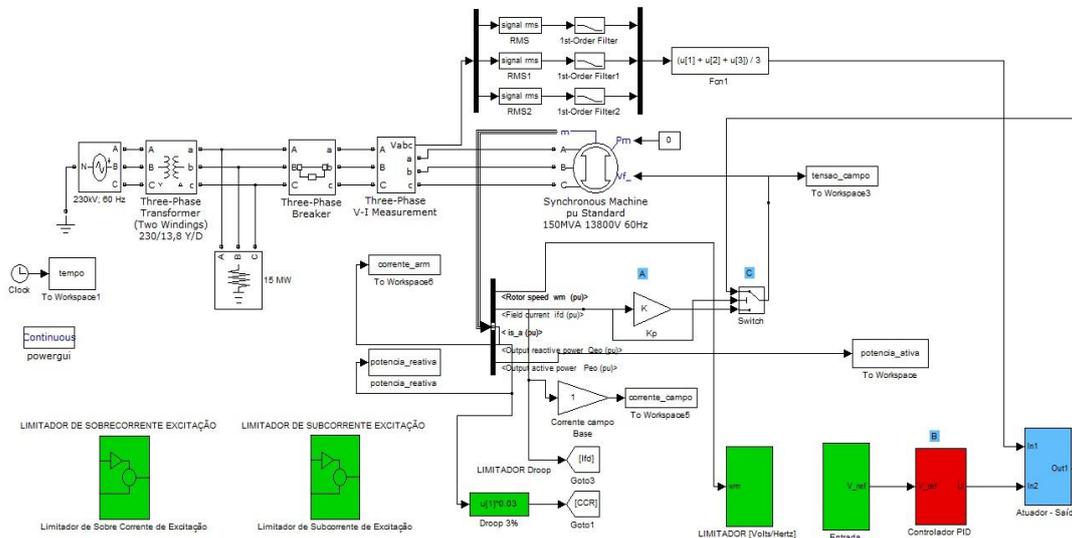


Figura 5.12 - Diagrama de blocos completo de um sistema de controle com RAT do tipo PID.

5.4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão mostrados os testes realizados na máquina síncrona e discutidos os resultados graficamente, com o objetivo de validar o simulador proposto. Foram realizados os seguintes testes:

- Partida do compensador síncrono;
- Degrau na referência de tensão;
- Teste do limitador de mínima excitação;
- Teste do limitador de máxima excitação.

5.4.1 - A partida do compensador síncrono

Na Figura 5.13 é possível visualizar a partida da máquina síncrona. Foi selecionado o valor de 1 p.u. para a referência de tensão, que equivale a 13,8 kV para a tensão de armadura conectada do lado de baixa no transformador da subestação. Nota-se uma rápida resposta do sistema sob a ação do controlador, atingindo um sobre sinal de 3,5% e tempo de acomodação em torno de 3 s.

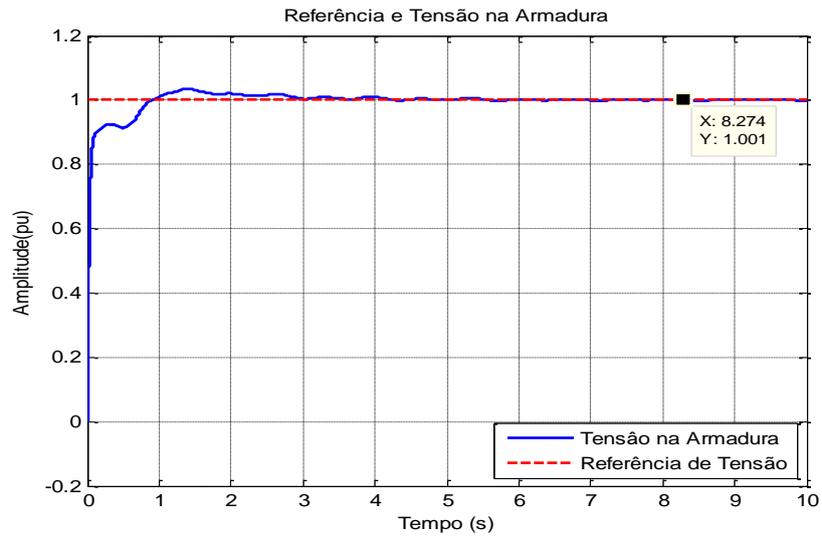


Figura 5.13 - Partida do compensador síncrono.

5.4.2 - Degrau na referência de tensão

Na Figura 5.14 é possível visualizar as curvas para o teste de inserção e posterior retirada de um degrau de 2% na referência de tensão. No tempo igual a 20 s aplicou-se um degrau negativo com amplitude de 2%, tendo a duração de 10 s com 0.98 p.u. na referência. Percebe-se que o sistema de controle automático possibilita que a máquina síncrona siga a referência de maneira satisfatória. Destaca-se que na figura 5.16 também é possível visualizar consumo de reativos do sistema por parte do compensador. O qual, neste teste, está operando, subexcitado conforme representado na curva de resposta da corrente de campo.

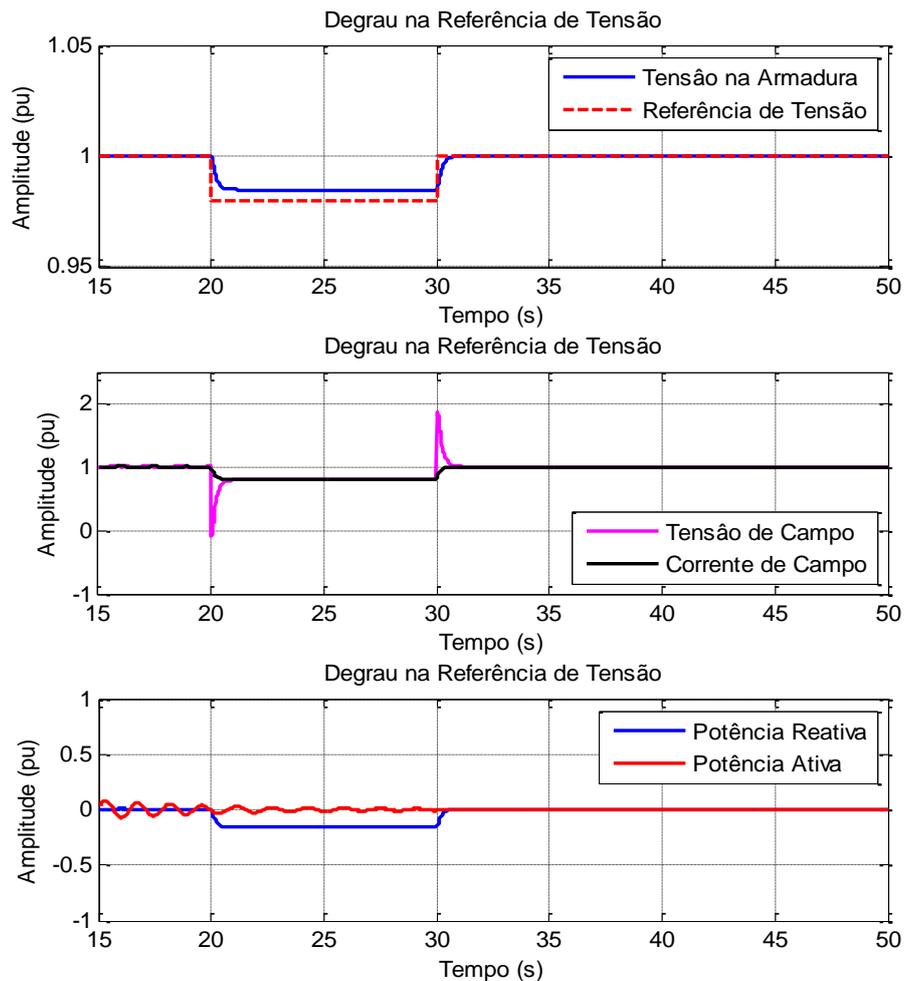


Figura 5.14 - Teste de aplicação e posterior retirada de um degrau de 2% na referência de tensão.

5.4.3 - Teste do limitador de mínima excitação

Estando o limitador de mínima excitação com o valor limite (de tensão) fixado próximo de 0,96 pu, foi dado um degrau negativo de 8 % na referência de tensão e na Figura 5.15 é possível visualizar a curva de Tensão na Armadura. Observa-se que por influência do limitador, a tensão de armadura, a corrente de campo e a potência reativa, foram limitadas em valores acima dos seus respectivos limites, inclusive a potência reativa limitou-se antes de -0,5 pu, o que denota o bom funcionamento do modelo neste ensaio.

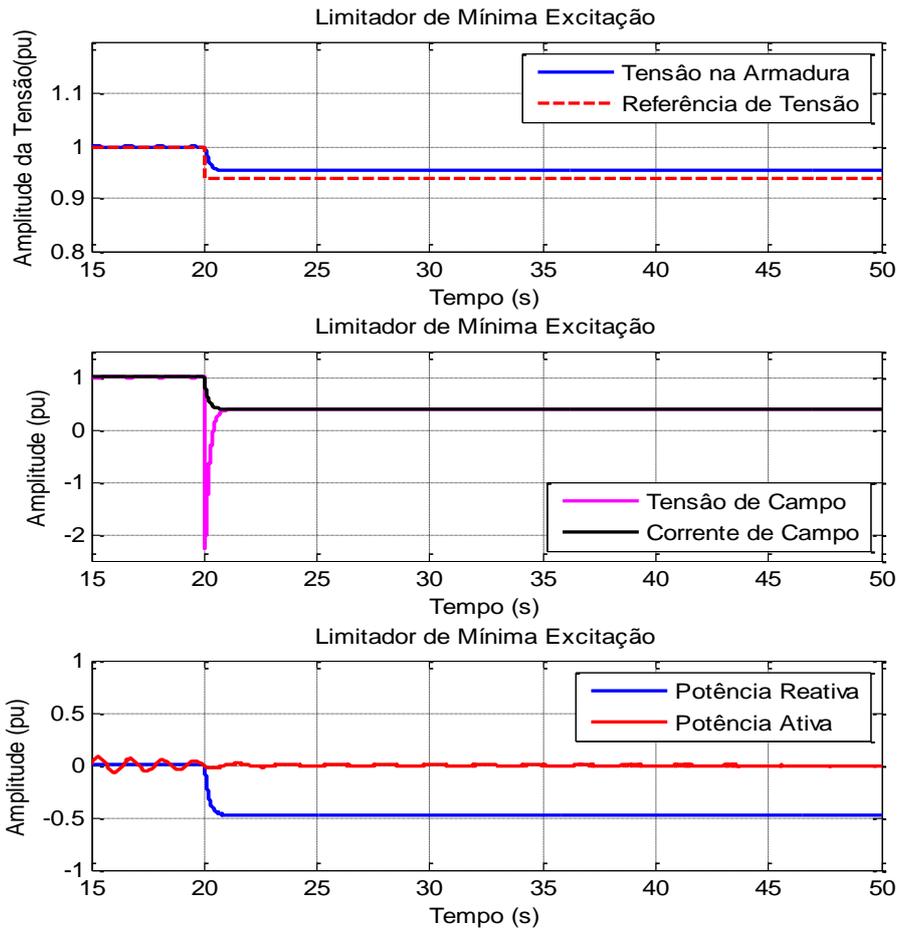


Figura 5.15 - Teste do limitador de mínima excitação.

Observando-se as curvas da Figura 5.15 (tensão na armadura, juntamente com o degrau na referência de tensão) acima obtidas com o segundo modelo (simulação), na Figura 5.16 é possível visualizar a grande similaridade com a curva de resposta ao degrau aplicado no equipamento real em funcionamento.

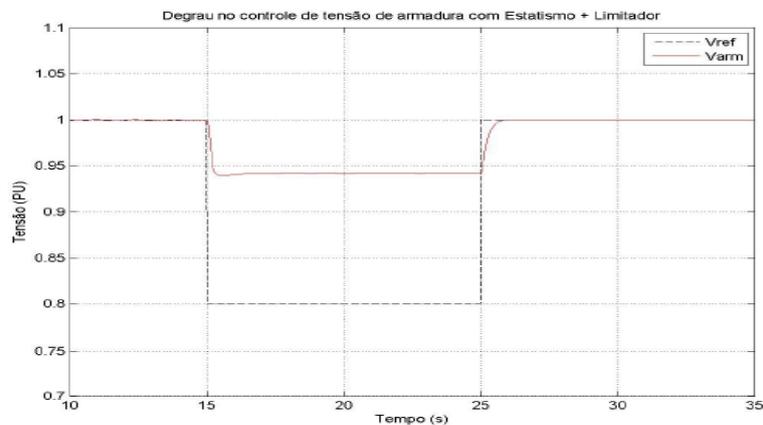


Figura 5.16 - Teste (em campo) do limitador de mínima excitação.
Fonte: FREITAG *et al.* (2014).

5.4.4 - Teste do limitador de máxima excitação

Estando o limitador de máxima excitação com o valor limite (de tensão) fixado próximo de 1,14 pu, foi dado um degrau de 20 % na referência de tensão, como está ilustrado na curva de Tensão na Armadura. Na Figura 5.17 é possível visualizar que por influência do limitador, a tensão de armadura, a corrente de campo e a potência reativa, foram limitadas em valores abaixo dos seus respectivos limites, o que denota o bom funcionamento do modelo neste ensaio.

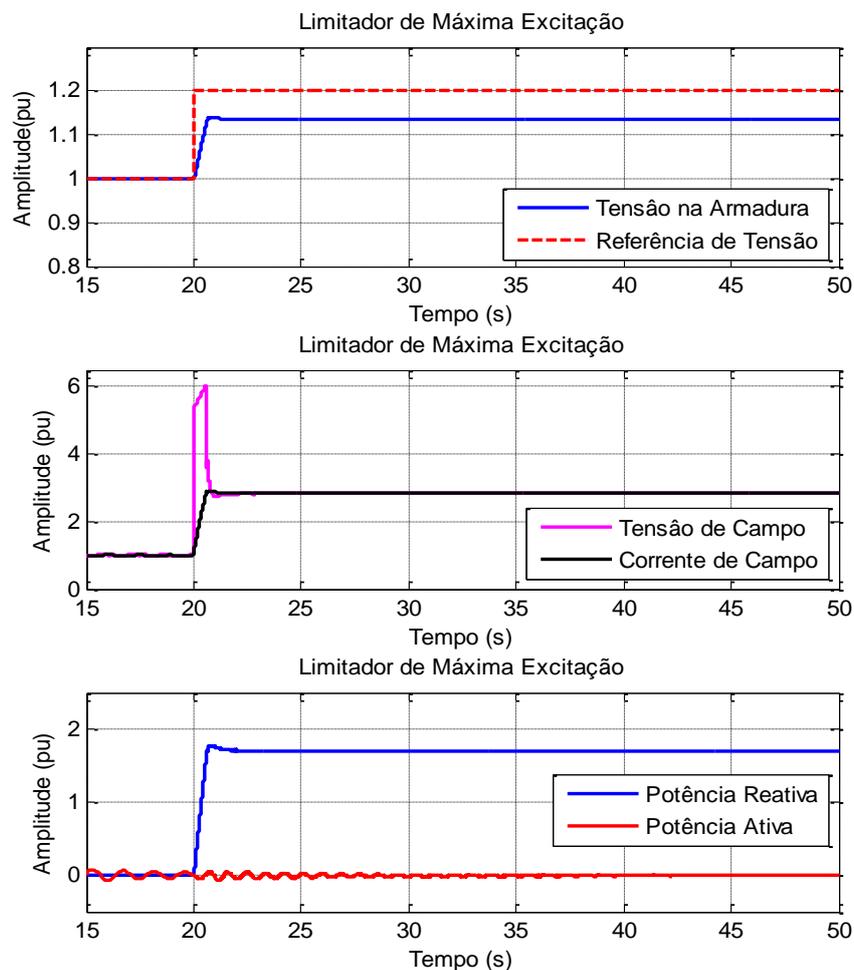


Figura 5.17 - Teste do limitador de máxima excitação.

Na Figura 5.17 é possível visualizar as curvas (Tensão na Armadura, juntamente com o degrau na referência de Tensão) acima, obtidas com o segundo modelo (simulação) e na Figura 5.18 é possível visualizar a grande similaridade com a curva (obtida em campo) de resposta ao degrau aplicado no equipamento real em funcionamento.

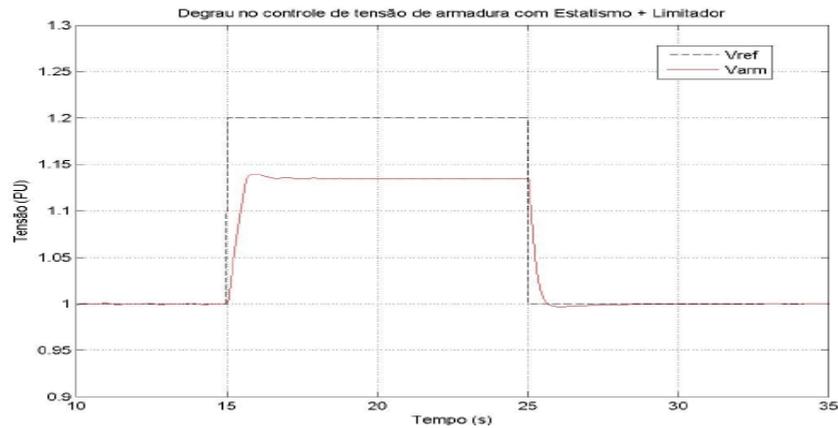


Figura 5.18 - Teste (em campo) do limitador de máxima excitação.
 Fonte: FREITAG *et al.* (2014).

5.5 - CONCLUSÕES

As curvas acima, obtidas com o modelo de simulação ilustram o comportamento estável do sistema, apresentando boa estabilidade e oscilações suportáveis para o conjunto completo de pontos de operação admissíveis.

Nos testes dos limitadores de mínima e máxima excitação, observa-se através das curvas, que os limitadores de mínima e máxima excitação, também funcionaram e, embora em estudos posteriores, possamos aprimorar a precisão dos seus ajustes para casos reais, nestes ensaios estamos otimistas com os resultados, uma vez que os referidos limitadores funcionaram adequadamente.

Tratando-se de um primeiro estudo, estes resultados são motivadores para estudos mais aprofundados na área de controle automático, a fim de serem obtidos melhores resultados. Os resultados obtidos permitirão aos engenheiros da Eletronorte investigar melhores ajustes para a operação com máxima eficiência do controle de potência reativa.

Partindo dos resultados obtidos propõem-se o avanço dos estudos e, utilizando-se técnicas como as de controle robusto, projetarmos um novo controlador com a finalidade de serem implementados estudos, os quais possam municiar a Eletronorte com a devida segurança técnica, frente às possíveis mudanças futuras no seu sistema elétrico.

Desta forma, no capítulo seguinte, iniciaremos o projeto de um novo controlador, projetado especialmente para os compensadores síncronos do Pará.

CAPÍTULO 6

PROJETO DE UM NOVO RAT E CONCLUSÃO

6.1 - A TÉCNICA PARA IMPLEMENTAÇÃO DO NOVO SIMULADOR

Conforme foi visto no capítulo anterior, foi possível alcançarmos resultados significativos, porém ainda com algumas deficiências, o que tratando-se de um primeiro estudo, estes resultados são motivadores para estudos mais aprofundados na área de controle automático, a fim de ser conseguida melhor performance do controlador a ser projetado. Os resultados neste novo projeto, permitirão aos engenheiros da Eletronorte investigar melhores ajustes para a operação com máxima eficiência do controle de potência reativa.

Partindo dos resultados obtidos propõem-se o avanço dos estudos e, utilizando-se técnicas como as de controle robusto, projetarmos um novo RAT, com a finalidade de serem implementados estudos, os quais possam municiar a Eletronorte com a devida segurança técnica, frente às possíveis mudanças futuras no seu sistema elétrico.

Desta forma, neste capítulo iniciaremos o projeto de um novo controlador, projetado especialmente para os compensadores síncronos do Pará.

A técnica utilizada será a de POSICIONAMENTO DOS POLOS, pois esta técnica permite a MISTURA da função de transferência do controlador com o equipamento a ser controlado, dando-nos a certeza de que o controlador será construído para controlar aquela planta específica.

6.2 - O TRATAMENTO DOS DADOS PARA O PROJETO

O cálculo da impedância base e resistência base do estator, necessário para iniciar o projeto, foi realizado conforme o item 5.2.1.

6.3 - O PROJETO DE UM RAT MUNICIADO DE RECURSOS, PARA PROMOVER A ESTABILIDADE FRENTE ÀS DIVERSAS MUDANÇAS NO SISTEMA

Pretende-se construir um simulador próprio para os compensadores síncronos do Pará e, para isso as etapas foram desenvolvidas na ordem abaixo:

- 1- Modelamento da Função de Transferência dos referidos compensadores;
- 2- Definir e modelar a Função de Transferência do Controlador;
- 3- Construir a Função de Transferência em malha fechada, tendo na malha direta o controlado (RAT) e a Planta (Compensador). A realimentação é 1;
- 4- Encontrar o polinômio desejado.

6.3.1 - O modelo (função de transferência) do compensador síncrono

A Função de Transferência do Compensador Síncrono, $G(s)$, é do tipo

$$G(s) = \frac{G_o}{(1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do})} = \frac{\Delta V_{t(pu)}}{\Delta V_{fd(pu)}} \quad (\text{em malha aberta}), \text{ sendo que os parâmetros}$$

utilizados na composição desta FT, serão encontrados conforme descrito abaixo:

T'_{do} e T''_{do} - Encontrados no manual do Compensador Síncrono, ou calculados;

$G_o = 1,0$ na condição de máquina em vazio (pu / pu);

V_{base} - Por definição é 13,8 kV;

$V_{fd \text{ base}}$ - É um valor de V_{fd} , o qual produz $V_t = 13,8 \text{ kV}$, para a máquina operando em vazio;

Para compor a FT do compensador síncrono, precisa-se do parâmetro T''_{do} , o qual não está disponível no manual do fabricante. Desta forma, recorreremos a um meio para calcular este parâmetro, utilizando a fórmula 4.26, $X''_d = X_d \left(\frac{T'_d \cdot T''_d}{T'_{do} \cdot T''_{do}} \right)$ (KUNDUR, 1994).

Utilizando-se a fórmula 4.26 e inserindo na mesma os parâmetros listados acima e aplicando-se a álgebra simples, encontra-se o valor de $T''_{do} = 0,01834 \text{ s}$. Como agora temos todos os valores dos parâmetros, podemos escrever a Função de Transferência do

compensador síncrono, $G(s) = \frac{G_o}{(1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do})}$, conforme a seguir:

$$G(s) = \frac{1}{(1 + 4,12s)(1 + 0,01834s)} = \frac{1}{1 + 0,01834s - 4,12s + 4,12 \cdot 0,01834s^2} = \frac{1}{1 + 4,138s + 0,07556s^2}$$

A FT $G(s)$, é a Função de Transferência (calculada) do compensador síncrono.

Para dar à Função de Transferência, a forma $G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$, basta dividir-se o numerador e o denominador por 0,07556e então obtém-se $G(s) = \frac{13.2345}{s^2 + 54.76s + 13.2345}$, que é Função de Transferência (mônica) do compensador síncrono.

6.3.2 – Teste através da aplicação de degrau

Na Figura 6.1 é possível visualiza a construção da Função de Transferência $G(s)$ através do MATLAB e, aplicando um degrau unitário, obtém-se a curva de resposta mostrada na Figura 6.1.

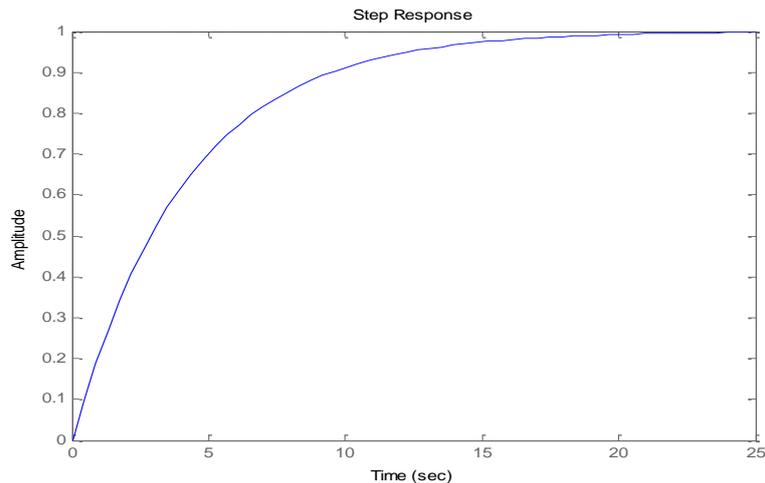


Figura 6.1 - Curva de resposta ao degrau, da função de transferência do compensador síncrono.

Comentando a respeito da resposta ao degrau visualizada na Figura 6.1, observa-se que a resposta ao degrau é bem estável e muito amortecida, levando aproximadamente 22 s para atingir o valor final, sem vestígios de oscilações, tratando-se de um sistema sobre amortecido com amortecimento $\xi = 7,5275$, muito maior que 1.

6.3.3 - Projeto por posicionamento dos polos

Iniciaremos por apresentar abaixo o modelo da Planta (Compensador Síncrono) em malha aberta.

$$G(s) = \frac{G_o}{(1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do})} = \frac{N_G(s)}{D_G(s)}$$

O Modelo do Controlador RAT PID, equivale à forma padrão $C(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{1 + T_d s}$, a qual é a Função de Transferência básica de controlador Proporcional + Integral + Derivativo, onde ajustando-se por meio da álgebra simples e conservando-se

os “s”, obtemos a seguinte equação: $C(s) = \frac{r_2 s^2 + r_1 s + r_0}{s(s + s_0)}$, que é do tipo $C(s) = \frac{N_C(s)}{D_C(s)}$

Na Figura 6.2 é possível visualizar que em malha fechada e utilizando-se as duas funções de transferências $C(s)$ e $G(s)$, podemos representar a nova função de transferência em malha fechada (JUNIOR, W. BARRA, 2001).

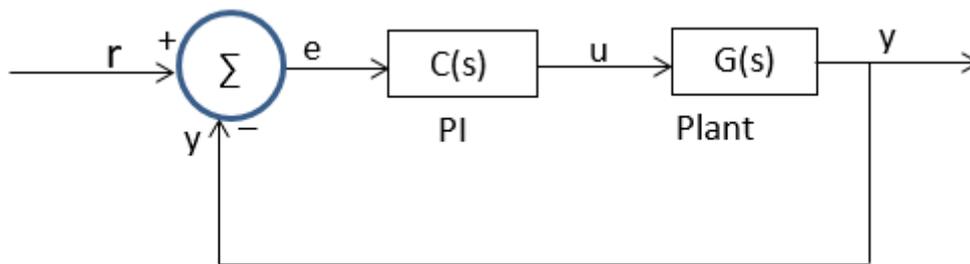


Figura 6.2 - Representação em malha fechada, das funções de transferências calculadas.

Para representação da função de transferência do sistema mostrado na Figura 6.2 em malha fechada, é descrita a Eq. (6.1), onde observa-se a mistura dos numeradores e denominadores das funções de transferências individuais do controlador e da planta.

$$H_{MF}(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} = \frac{N_G(s)N_C(s)}{D_G(s)D_C(s) + N_G(s)N_C(s)}, \quad (6.1)$$

Onde,

$$P(s) = D_G(s)D_C(s) + N_G(s)N_C(s) \quad (6.2)$$

$$\text{e o polinômio desejado é: } P_d(s) = (s^2 + 2\xi_d \omega_n^d s + \omega_n^{d^2})(s + a)^2 \quad (6.3)$$

consideremos $a \geq \omega_n$, onde uma boa estimativa seria $a = 5\omega_n$. Assim, um dos polos da FT é $-|a| = -|5\omega_n|$. (JUNIOR, 2001).

É padrão fazer-se o sobressinal máximo igual a 5% e para isto $\xi_d = 0,7$. No caso do tempo de acomodação, podemos encontrá-lo através da equação $t_{set} = \frac{4}{\xi_d \omega_n^d}$.

6.3.4 - O desenvolvimento dos polinômios

Chamando-se agora de $P'(s)$ ao polinômio desenvolvido pelo produto dos numeradores e denominadores de (2), chega-se ao seguinte equação:

$$P'(s) = (1 + sT'_{do})(s(1 + sT''_{do})(s + s_0) + G_0(r_2s^2 + r_1s + r_0)) \quad (6.4)$$

$$P'(s) = (1 + sT'''_{do} + sT'_{do} + s^2T''_{do}T'''_{do})(s^2 + ss_0)(s + s_0) + G_0(r_2s^2 + r_1s + r_0);$$

$$P'(s) = (s^2 + ss_0 + s^3T'''_{do} + T'_{do} + s^2T''_{do}s_0 + s^3T'_{do} + s^2T'_{do}s_0 + s^4T'_{do}T''_{do} + s^3T'_{do}T''_{do}s_0 + G_0r_2s^2 + G_0r_1s + G_0r_0);$$

$$P'(s) = s^4(T'_{do}T''_{do}) + s^3(T''_{do} + T'_{do} + T'_{do}T''_{do}s_0) + s^2(1 + T''_{do}s_0 + T'_{do}s_0 + G_0r_2) + s(s_0 + G_0r_1) + G_0r_0;$$

então, $P(s) = \frac{P'(s)}{(T'_{do}T''_{do})} = s^4 + p_3s^3 + p_2s^2 + p_1s + p_0$; dividindo-se $P'(s)$, por

$(T'_{do}T''_{do})$, ajustando-se algebricamente, tem-se:

$$\left(\frac{1}{T'_{do}} + \frac{1}{T''_{do}} \right) + s_0 = p_3; \quad (6.5)$$

$$\frac{1}{T'_{do}T''_{do}} + \frac{1}{T'_{do}}s_0 + \frac{1}{T''_{do}}s_0 + \frac{G_2r_2}{T'_{do}T''_{do}} = p_2; \quad (6.6)$$

$$\frac{1}{T'_{do}T''_{do}}s_0 + \frac{G_0}{T'_{do}T''_{do}}r_1 = p_1; \quad (6.7)$$

$$\frac{G_0r_0}{T'_{do}T''_{do}} = p_0; \quad (6.8)$$

É desejado que em malha fechada, $P(s) = P_d(s)$; portanto

$$P_d(s) = s^4 + p_3^d s^3 + p_2^d s^2 + p_1^d s + p_0^d; \quad (6.9)$$

Desta forma,

$$\begin{cases} p_3 = p_3^d \\ p_2 = p_2^d \\ p_1 = p_1^d \\ p_0 = p_0^d \end{cases}.$$

Tornou-se necessário criar o sistema matricial $MX = V$, sendo que para determinar X , deveremos fazer a operação $M^{-1}V = X$, onde M é a matriz dos parâmetros da máquina; X é a matriz dos parâmetros do controlador PID e V é a matriz dos parâmetros do polinômio desejado.

Assim:

$$MX = V \text{ é: } \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{G_0}{T'_{do}T''_{do}} & 0 & 0 & \left(\frac{1}{T'_{do}} + \frac{1}{T''_{do}} \right) \\ 0 & \frac{G_0}{T'_{do}T''_{do}} & 0 & \frac{1}{T'_{do}T''_{do}} \\ 0 & 0 & \frac{G_0}{T'_{do}T''_{do}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_2 \\ r_1 \\ r_0 \\ s_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_3^d - \left(\frac{1}{T'_{do}} + \frac{1}{T''_{do}} \right) \\ p_2^d \\ p_1^d \\ p_0^d \end{bmatrix}$$

6.4 - A CONSTRUÇÃO DO ALGORITMO

Para calcular os parâmetros definidos conforme as considerações e cálculos anteriores e ainda, possuindo as ferramentas e o programa computacional concebido para soluções de cálculos matriciais, foi descrito um Algoritmo em Matlab, que funcione do seguinte modo:

- i. Entrar com os dados do modelo da planta: G_0 , T'_{do} e T''_{do} ;
- ii. Especifica o desempenho desejado:
Sobresinal máximo de 5%; $\xi_d = 0,7$; G_0 , T'_{do} e T''_{do} :
 - a) Especifica o tempo de acomodação desejado: $t_{set} \approx 0,300$ s;
 - b) Calcula $\omega_n^d = \frac{4}{\xi_d t_{set}}$ a;
 - c) Calcula $a = 5 \cdot \omega_n^d$;
 - d) Calcula $\begin{matrix} p_3^d \\ p_2^d \\ p_1^d \\ p_0^d \end{matrix}$.
- iii. Monta a matriz M e o vetor V ;

- iv. Resolve o sistema $M^{-1}V = X$ para obter os parâmetros do PID, $X = \begin{bmatrix} r_2 \\ r_1 \\ r_0 \\ s_0 \end{bmatrix}$.

6.4.1 - Condições para funcionamento do algoritmo

Para o algoritmo funcionar, é preciso que tenhamos as equações que calculam os coeficientes p_3^d , p_2^d , p_1^d , p_0^d , em função dos parâmetros conhecidos. Isto é possível desenvolvendo a equação (2) e igualando-se o resultado à equação (4), pois ambas as expressões representam $P_d(s)$; ver abaixo:

$$\begin{aligned} P_d(s) &= (s^2 + 2\xi_d \omega_n^d s + \omega_n^{d^2})(s + a)^2 = (s^2 + 2\xi_d \omega_n^d s + \omega_n^{d^2})(s^2 + 2as + a^2) \\ &= s^4 + 2as^3 + a^2s^2 + 2\xi_d \omega_n^d s^3 + 4a\xi_d \omega_n^d s^2 + 2a^2\xi_d \omega_n^d s + \omega_n^{d^2}s^2 + 2a^2\omega_n^d s + a^2\omega_n^{d^2} \\ &= s^4 + (2a + 2\xi_d \omega_n^d)s^3 + (a^2 + 4a\xi_d \omega_n^d + \omega_n^{d^2})s^2 + (2a^2\xi_d \omega_n^d + 2a\omega_n^{d^2})s + a^2\omega_n^{d^2} \end{aligned}$$

Igualando os resultados, vem:

$$\begin{aligned} s^4 + (2a + 2\xi_d \omega_n^d)s^3 + (a^2 + 4a\xi_d \omega_n^d + \omega_n^{d^2})s^2 + (2a^2\xi_d \omega_n^d + 2a\omega_n^{d^2})s + a^2\omega_n^{d^2} \\ = s^4 + p_3^d s^3 + p_2^d s^2 + p_1^d s + p_0^d, \text{ de onde é tirado:} \end{aligned}$$

$$p_3^d = 2a + 2\xi_d \omega_n^d; \quad (6.10)$$

$$p_2^d = a^2 + 4a\xi_d \omega_n^d + \omega_n^{d^2}; \quad (6.11)$$

$$p_1^d = 2a^2\xi_d \omega_n^d + 2a\omega_n^{d^2}; \quad (6.12)$$

$$p_0^d = a^2\omega_n^{d^2}; \quad (6.13)$$

6.4.2 - O fluxograma representativo do algoritmo

Com a finalidade de melhorar a visualização do algoritmo e facilitar o entendimento das operações matemáticas desenvolvidas no processo de determinação dos parâmetros do novo Regulador Automático de Tensão (RAT), projetado especificamente para os compensadores de Marabá e Vila do conde, foi elaborado um fluxograma contendo os principais passos e elementos utilizados no algoritmo, mostrando as relações de dependência e interação dos parâmetros e equações. Na Figura 6.3 é possível visualizar o fluxograma em referência, o qual funcionou através do programa MATLAB. As linhas (escritas e calculadas) do programa computacional estão descritas no apêndice A.

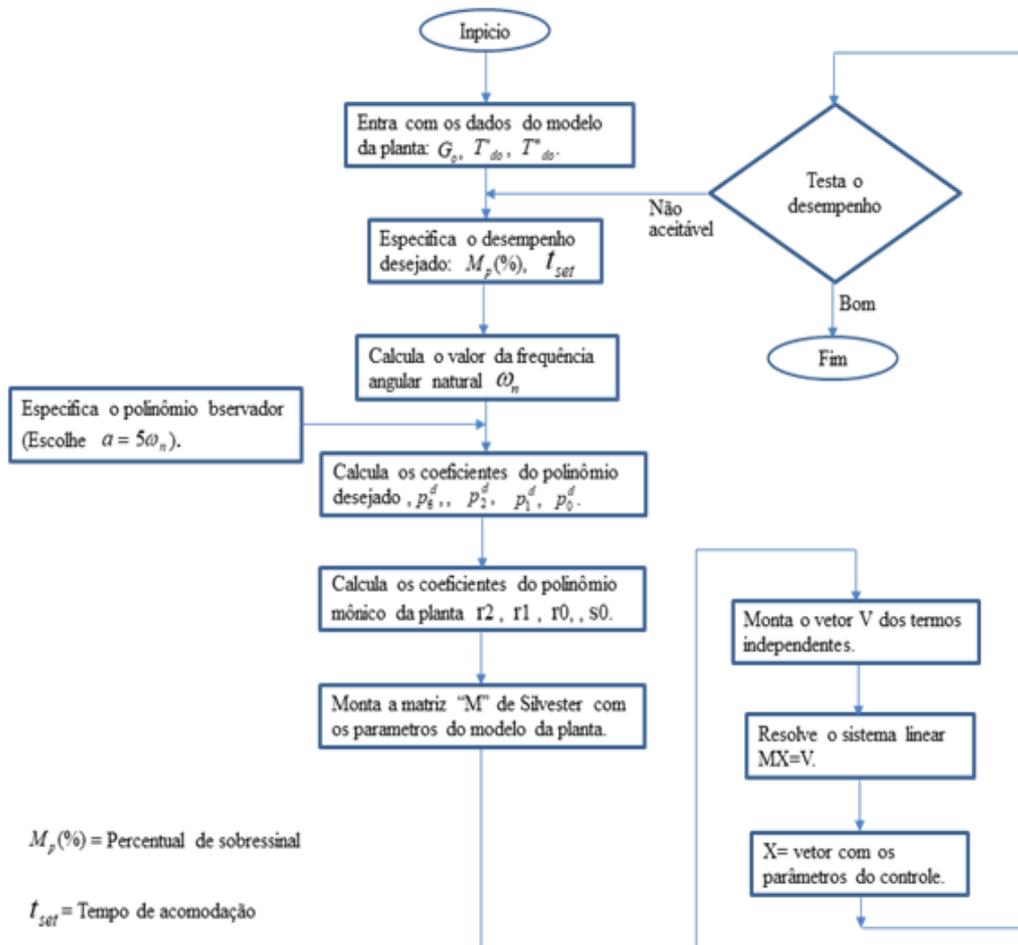


Figura 6.3 - Fluxograma contendo os principais passos e elementos do algoritmo.

6.5 - DISCRETIZAÇÃO DO MODELO PROJETADO PARA O RAT

Utilizando-se o modelo $C(s) = \frac{r_2 s^2 + r_1 s + r_0}{s(s + s_0)}$, onde $\rightarrow s = \frac{1 - z^{-1}}{T_s}$, substitui-se

”s” na equação C(s). Este procedimento é conhecido como discretização pela “aproximação da derivada pela diferença backward”. Veja abaixo:

$$\frac{dy}{dt} \approx \frac{y(k) - y(k-1)}{T_s}. \text{ Desta forma vem: } C(z^{-1}) = \frac{r_2 \left(\frac{1 - z^{-1}}{T_s}\right)^2 + r_1 \left(\frac{1 - z^{-1}}{T_s}\right) + r_0}{\left(\frac{1 - z^{-1}}{T_s}\right)^2 \left(\frac{1 - z^{-1}}{T_s} + s_0\right)}$$

$$C(z^{-1}) = \frac{r_2(1 - z^{-1})^2 + r_1 T_s(1 - z^{-1}) + r_0 T_s^2}{(1 - z^{-1})(1 - z^{-1} + s_0 T_s)} \therefore C(z^{-1}) = \frac{r_2(1 - 2z^{-1} + z^2) + r_1 T_s(1 - z^{-1}) + r_0 T_s^2}{(1 - z^{-1})(1 + s_0 T_s - z^{-1})}$$

$$C(z^{-1}) = C(z-1) = \frac{r_2 z^2 + (2r^2 - r_1 T_s) z^{-1} + (r_2 + r_1 T_s + r_0 T_s^2)}{(1 - z^{-1})(1 + s_0 T_s) - z^{-1}} \therefore C(z^{-1}), \text{ sendo igual a}$$

$$\frac{c_2 z^{-2} + c_1 z^{-1} + c_0}{(1 - z^{-1})(d_0 - z^{-1})}, \text{ pois } c_2 = r_2; c_1 = -(r_1 T_s + 2r_2);$$

$$c_0 = r_2 + r_1 T_s + r_0 T_s^2; \text{ e } d_0 = 1 + s_0 T_s.$$

$T_s = 20 \text{ ms} = 0,02 \text{ seg}$ (quinze vezes menor que o $t_s = 0,3 \text{ seg}$).

$$C(z) = \frac{c_2 + c_1 z + c_0 z^2}{(z-1)(d_0 z - 1)} \quad (6.14) \longrightarrow \text{Digital. (JUNIOR, 2001).}$$

6.6 - SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL, APÓS CALCULADOS OS PARÂMETROS ATRAVÉS DO ALGORITMO

Após a obtenção dos parâmetros através do algoritmo e discretizando conforme a Eq (14), precisa-se da função de transferência em um formato padronizado para a simulação.

6.7 - A CONSTRUÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

Foi construída a Função de Transferência do Controlador específico para o compensador síncrono, a qual foi utilizada para aplicação de degrau através do MATLAB.

6.8 - TESTE ATRAVÉS DE RESPOSTA AO DEGRAU

Na Figura 6.4 é possível visualizar a resposta ao degrau do sistema em malha fechada com o controlador proposto, onde observa-se que o sistema apresenta resposta rápida e sobressinal inferior a 5%, de acordo com a concepção teórica do projeto.

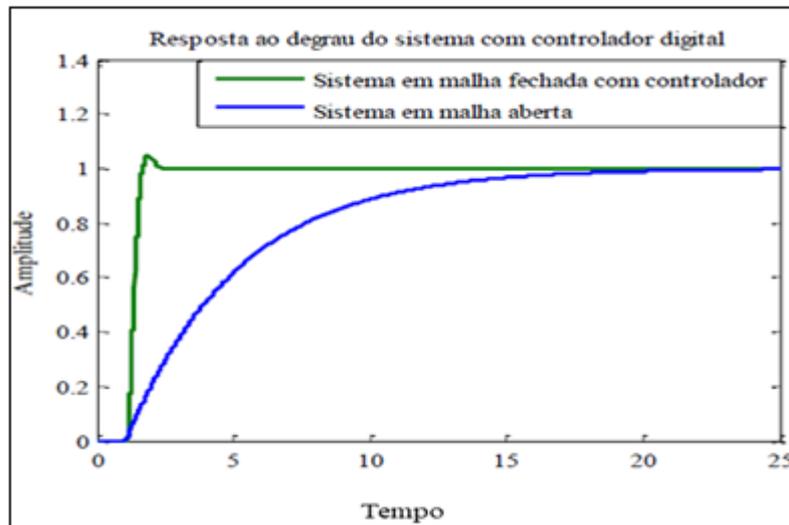


Figura 6.4 - Comparação da resposta do sistema em malha aberta e malha fechada, para uma entrada degrau.

6.9 - CONCLUSÕES

Conforme já ressaltado, os motivos que impulsionaram o desenvolvimento deste trabalho foram, predominantemente, os problemas advindos das frequentes falhas verificadas em diversos subsistemas dos compensadores síncronos, resultando em paradas não programadas.

Analisando-se as situações verificadas e tratando-se de um sistema de elevada complexidade tecnológica, como é o caso dos compensadores síncronos e periféricos, conclui-se ser grande a necessidade de se realizar estudos aprofundadas dos subsistemas de excitação, controle e proteção pois, conforme está descrito nos capítulos um e dois desta dissertação, as falhas e os defeitos verificadas são em subsistemas onde foi possível a constatação através de análise teórica de sistemas eletromecânicos e comprovação visual, como por exemplo o caso da substituição da resistência de descarga de campo, pela resistência de partida.

É razoável pensar-se em investigar o sistema de excitação, sendo este bem mais complexo por ser parametrizado, onde a investigação é municiada de teorias de sistemas de controle, ensaios, testes e análise criteriosa dos resultados, para visualização e comprovação de defeitos e falhas, sendo impossível a sua avaliação somente através da teoria e inspeções visuais.

Assim, desenvolveu-se este trabalho com a premissa de uma verificação preditiva e preventiva pois, apesar dos compensadores estarem funcionando satisfatoriamente, do

ponto de vista da estabilidade, e outros critérios inerentes ao bom desempenho dos sistemas de excitação, é prudente executar-se trabalhos de investigação, na busca para diagnosticar e corrigir defeitos e falhas que por acaso estejam ocultos e devem ser encontrados.

Os modelos utilizados para a execução dos testes, ver as Figuras 5.8 e 5.10, apresentaram resultados aceitáveis, embora com algumas correções a serem feitas, o que comprova a validade das considerações teóricas, disponibilizando modelos que servirão como suporte para prosseguir na procura de defeitos e/ou falhas no projeto original.

Nos resultados apresentados no Capítulo 5, ficou demonstrado que o controlador projetado atendeu às especificações de projeto, referentes ao sobressinal e ao tempo de acomodação. Este resultado valida o modelo matemático obtido com a utilização dos parâmetros da planta fornecidos pelo fabricante e fornece os suportes necessários para a implementação de um modelo digital onde desde a concepção do projeto e pela metodologia utilizada existe a certeza de ser criado um modelo específico para os compensadores síncronos em referência.

Em trabalhos futuros pretende-se comparar o controlador fornecido pelo fabricante com o controlador projetado e aplicar técnicas de controle moderno, para projeto de controladores robustos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALSTHOM ATLANTIC. **Nomenclature d'appareillage**. Documento de Construção, Volume VIII. "Esquema developp nº 54, item 100168, Eletronorte, Vila do Conde, Pará, 1980.

DESOER, CHARLES A., KUH ERNEST S., Teoria Básica de Circuitos. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.

DUARTE, P. W. B., at al. Desenvolvimento e Testes de um Simulador do Compensador Síncrono da Subestação de Vila do Conde para Estudos de Manutenção e de Estabilidade da Transmissão de Energia. Eletronorte - Vila do Conde, 2015.

DUARTE, PEDRO WENILTON BARBOSA. Relatório nº 001, **Substituição dos Reguladores de tensão dos Geradores Diesel Wärtsilä**. Eletronorte, Macapá, 2005.

DUARTE, PEDRO WENILTON BARBOSA. **Evitar Perdas por Parcela Variável (e outros motivos) devido a falhas no projeto do Sistema de Excitação do Compensador Síncrono da Subestação de Marabá**. Eletronorte - Marabá, 2012.

EDSON, BIM. Máquinas Elétricas e Acionamento. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2012.

FITGERALD, A. E., CHARLES KINGSLEY, JR., STEPHEN, D. UMANS. Máquinas Elétricas. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FREITAG, P. H. K. at al. Sistema Elétrico Pará Maranhão, Análise dos Testes Elétricos nos Compensadores Síncronos da SE Presidente Dutra. Eletronorte/Grameyer, Presidente Dutra - Maranhão, Março, 2014.

HOUPIIS, CONSTANTINE H., SHELDON STUART N., Linear Control System Analysis and Design with MATLAB. 6th. ed. New York: CRC, 2014.

JUNIOR, W. BARRA., Estratégias Neuro-Fuzzy Adaptativas aplicadas ao Controle de Sistemas de Potência. 2001. TD 01. Tese (Doutorado em Engenharia de sistemas de Controle) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2001.

KUNDUR, P., **Power System Stability and Control**. Palo Alto, California: McGraw Hill, 1994.

KOSOV, IRVING I., **Máquinas elétricas e Transformadores**. 3. ed. Porto Alegre: Globo, 1979.

KOSTENKO, M., **Máquinas Elétricas, Voume II**. Porto: Lopes da Silva, 1979.

LANDAU, IOAN D., ZITO GIANLUCA., **Digital Control systems Design, Identification and Implementation**. London: Springer, 2006.

OGATA, KATSUHIKO. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1982.

SEM, P. C., **Principles of Electric Machines and Power Eletronics**. 3rd. ed. Ontario, Canada: Wiley, 2012.

STEPHEN, J. CHAPMAN. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

XUE, DINGIÜ., CHEN, YANGQUAN. **Modelling, Analise and Design of Control Systems in MATLAB and Simulink**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltda., 2015.

APÊNDICE A

A CONSTRUÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO COMPENSADOR SÍNCRONO

Pelo método escolhido na concepção do projeto deste controlador digital e específico para os compensadores síncronos de Marabá e Vila do conde, iniciou-se pela definição da função de transferência do compensador síncrono, utilizando os dados fornecidos pelo fabricante dos compensadores. A seguir, descreve-se as linhas escritas e os cálculos executados pelo MATLAB (programa computadorizado) para a obtenção da função de transferência do compensador síncrono. Após substituição dos valores dos parâmetros do gerador síncrono, a seguinte função de transferência relacionando desvios incrementais na tensão terminal com desvios na tensão de campo, para o compensador operando em vazio, é obtida. Assim,

$$G(s) = \frac{13.2345}{s^2 + 54.76s + 13.2345}$$

É imperiosa a necessidade de testar o desempenho desta função de transferência, aplicando um degrau unitário e analisando o tipo de resposta produzida. Para isto utilizou-se o programa MATLAB. A seguir serão mostradas as linhas escritas e calculadas por este programa (HOUPIS e SHELDON, 2014).

```
num = [13.2345];  
den = [1 54.76 13.2345];  
>> Gs = tf(num,den) transfer function; 13.23  
>> Gs = s^2 + 54.76 s + 13.23
```

ANEXO I

ESPECIFICAÇÃO DO POLINÔMIO DESEJADO E CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO CONTROLADOR

Existem vários modos de cálculo para a determinação dos parâmetros de um controlador, inclusive pode ser feito manualmente. No entanto, com o avanço da tecnologia de programação em computadores, existem programas que forma geral. Para o caso da função de transferência por alocamento dos polos, utilizado, apresenta-se a seguir todas as linhas escritas pelo algoritmo e calculadas pelo programa. O algoritmo mostrado a seguir, possibilitou a confecção da função de transferência em malha fechada, cuja resposta ao degrau está apresentada na Figura 6.4.

% i) Entre com os dados do modelo da planta

$$G0 = 1;$$

$$Tldo = 4.12;$$

$$Tlido = 0.01834;$$

% ii) Especifica o desempenho desejado

$$Ed = 0.7;$$

$$ts = 0.3;$$

$$wnd = 4/(Ed*ts);$$

$$a = 5*wnd;$$

$$p3d = 2*a + 2*Ed*wnd;$$

$$p2d = a^2 + 4*a*Ed*wnd + wnd^2;$$

$$p1d = 2*a*a*Ed*wnd + 2*a*wnd^2;$$

$$p0d = a*a*wnd*wnd;$$

% iii) Monstar a matrzi M e o vetor v:

$$M = [0 \ 0 \ 0 \ 1; G0/(Tldo*Tlido) \ 0 \ 0 \ ((1/Tldo) + (1/Tlido)); 0 \ G0/(Tldo*Tlido) \ 0 \ 1/(Tldo*Tlido); 0 \ 0 \ G0/(Tldo*Tlido) \ 0];$$

$$v = [p3d - ((1/Tldo) + (1/Tlido)); p2d; p1d; p0d];$$

% iv) Resolve o sistema $X = M(-1)*v$; onde $x = [r2;r1;r0.s0]$

$$x = \text{inv}(M)*v$$

$$x = 1.0e+005 *$$

```

0.004246130317059 = r2
0.233356390937906 =r1
2.486562286290178=r0
0.001623745116515=s0
>> c2=r2;
?? Undefined function or variable 'r2'.
>> r2=x(1)
r2 = 4.246130317059167e+002
>> r1=x(2)
r1 = 2.333563909379063e+004
>> r0=x(3)
r0 = 2.486562286290177e+005
>> s0=x(4)
s0 = 1.623745116515442e+002
>> Ts=0.02
Ts = 0.02000000000000000
>> c2=r2
c2 = 4.246130317059167e+002
>> c1=-(r1*Ts+2*r2)
c1 = -1.315938845287646e+003
>> c0=r2+r1*Ts+r0*(Ts^2)
c0 = 9.907883050333364e+002
>> d0=1+s0*Ts
d0 = 4.247490233030884

```