

ANÁLISE DE AUTO-EXCITAÇÃO E CURTO-CIRCUITO CAPACITIVO EM
GERADORES SÍNCRONOS CONECTADOS A GRANDES SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO CCAT E CAAT

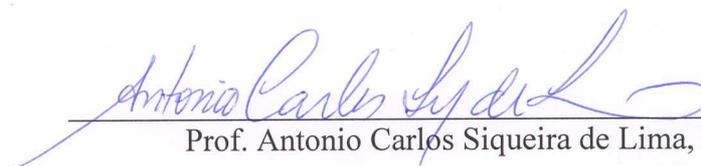
Paulo Max Maciel Portugal

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

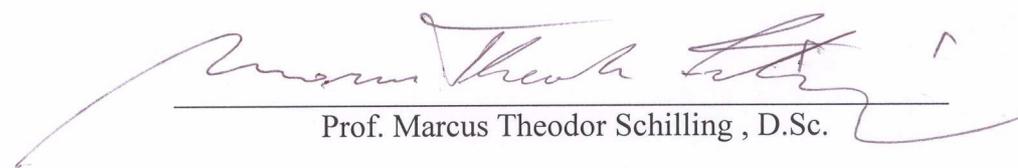
Aprovada por:



Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph.D.



Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.



Prof. Marcus Theodor Schilling , D.Sc.



Prof.^a. Maria Cristina Dias Tavares , D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2007

PORTUGAL, PAULO MAX MACIEL

Análise de Auto-Excitação e Curto-Circuito Capacitivo em Geradores Síncronos Conectados a Grandes Sistemas de Transmissão CCAT e CAAT. [Rio de Janeiro] 2007

XXVIII, 211 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1 – Rejeição de Carga

2 – Auto-Excitação à Frequência

Fundamental

3 – Curto-Circuito Capacitivo

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*DEDICO ESTA DISSERTAÇÃO À MINHA
FAMÍLIA E AOS MEUS GRANDES AMIGOS
QUE SEMPRE ME APOIARAM
NOS MOMENTOS DE LUTA.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, que diante da sua bondade, proporciona todos os dias, a todos os seres humanos, a chance da evolução moral, filosófica e científica.

A minha família, em especial meus pais e meus avós Cecílio Maciel (In Memoriam), Mercedes Maia Maciel e Maria de Lourdes Souza Portugal, pela compreensão e entendimento nos momentos de minha ausência do lar e nas reuniões de confraternização entre os mesmos.

Aos meus grandes e inesquecíveis amigos de trabalho da Eletrobrás e Furnas, em especial ao Engenheiro Nilo José Pereira de Macedo pela sua dedicação, encaminhamento e fundamental ajuda no desenvolvimento desta dissertação. Gostaria também de dar um agradecimento especial aos Engenheiros Carlos Eduardo Vieira de Mendonça Lopes pelos longos debates sobre os resultados obtidos e Clarissa Santos Ferreira na ajuda da formatação desta dissertação. Meus sinceros agradecimentos à Engenheira Elizabeth Almeida Franceschett pela compreensão nos momentos mais difíceis que passei durante este período e ao desenhista Melquisedek da Silva Neto pela paciência na elaboração dos desenhos.

Agradeço ao orientador e ao co-orientador desta dissertação, Professores Antônio Carlos Ferreira e Alquindar de Souza Pedroso, respectivamente, pelo empenho e dedicação demonstrados ao longo de todo trabalho do mestrado e de pesquisa. Gostaria também de ampliar minha profunda gratidão por todos os professores que também me ajudaram nesta caminhada.

Desejo que esta dissertação possa servir de algum modo para o desenvolvimento intelectual de profissionais de sistemas de potência e ser uma ampla base para outros trabalhos futuros que possam vir a contribuir para o enriquecimento das engenharias nacional e internacional na área de energia elétrica.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DE AUTO-EXCITAÇÃO E CURTO-CIRCUITO CAPACITIVO EM
GERADORES SÍNCRONOS CONECTADOS A GRANDES SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO CCAT E CAAT

Paulo Max Maciel Portugal

Junho/2007

Orientador: Antônio Carlos Ferreira

Programa: Engenharia Elétrica

Considerando que o sistema interligado brasileiro está sendo expandido através da conexão de grandes troncos de transmissão em corrente alternada ou contínua, o estudo dos fenômenos de auto-excitação e curto-circuito capacitivo nos geradores síncronos se torna cada vez mais importante na concepção destas alternativas de transmissão. Por este motivo, esta dissertação tem o intuito de rever os conceitos teóricos sobre auto-excitação e curto-circuito capacitivo, como também mostrar a influência da aplicação de algumas ações de controle nestes fenômenos.

A partir das teorias de máquinas síncronas e auto-excitação são desenvolvidas simulações digitais que englobam as ações de controle mais usadas para tratar estes fenômenos. Estas simulações são feitas considerando sistemas de transmissão típicos CA/CC usados na expansão do sistema interligado brasileiro. Ao final das simulações de cada ação de controle são feitas algumas análises específicas a respeito da sua influência em retardar o efeito da auto-excitação e do curto-circuito capacitivo após uma rejeição de carga nestes sistemas.

São mostradas as conclusões gerais da dissertação, baseando-se em todas as análises efetuadas, no sentido de servir como uma referência para os futuros estudos de rejeição de carga que serão feitos pelos diversos grupos do sistema brasileiro.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SELF-EXCITATION AND CAPACITIVE SHORT-CIRCUIT ANALYSIS ON
SYNCHRONOUS GENERATORS CONNECTED IN LARGE HVDC AND HVAC
TRANSMISSION SYSTEMS

Paulo Max Maciel Portugal

June/2007

Advisor: Antônio Carlos Ferreira

Department: Electrical Engineering

Considering that the Brazilian electric system is getting large trough connection of the big ac and dc transmission system, self-excitation and capacitive short-circuit researches on the synchronous generators is getting very important to chose about the transmission alternatives. Because this, this work has the intention to review the theories concepts about self-excitation and capacitive short-circuit, how too show the influence of the any control actions on these phenomena.

Starting on the synchronous machines, self-excitation and capacitive short-circuit theories, digital simulations are developed that get the control actions more used to care these resonance phenomena. These simulations have been developed considering HVAC and HVDC typical Brazilian systems used on the expansion of the Brazilian interconnected system. In the end of the each control action considered, any specific analyses are doing about the influence to delay the self-excitation and capacitive short-circuit effects after a load rejection.

General conclusions of this dissertation, that considering all the analyses of the chapter 4, are shown and can be a reference to the all work groups of the Brazilian transmission systems load rejection study.

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	1
1.1- HISTÓRICO	1
1.2- MOTIVAÇÃO	6
1.3- OBJETIVO	8
1.4- ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO	8
1.5- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2- MÁQUINAS SÍNCRONAS.....	18
2.1- CONCEITOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS	18
2.2- REPRESENTAÇÃO DAS MÁQUINAS	19
2.3- SISTEMAS DE EXCITAÇÃO	30
2.3.1- Teoria.....	30
2.3.2- Reguladores de Tensão.....	34
2.3.3- Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP).....	37
2.3.4- Representação nos estudos de estabilidade	39
2.4- SISTEMAS DINÂMICOS	40
2.5- CURVA OU DIAGRAMA DE CAPACIDADE	44
3- AUTO-EXCITAÇÃO E CURTO CAPACITIVO	49
3.1- INTRODUÇÃO	49
3.2- ORIGEM DA AUTO-EXCITAÇÃO E CURTO-CIRCUITO CAPACITIVO	53
3.2.1- Sistemas de Transmissão em Corrente Alternada.....	53
3.2.2- Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua	54
3.3- PROCESSO EVOLUTIVO DA AUTO-EXCITAÇÃO.....	56
3.3.1- Inserção da capacitância nas equações da máquina.....	57
3.3.2- Processo em relação ao eixo d da máquina.....	58
3.3.3- Processo em relação ao eixo q da máquina.....	60
3.3.4- Comportamento simultâneo da Auto-Excitação em ambos os eixos	62

3.4- INFLUÊNCIA DO REGULADOR DE TENSÃO NA RESPOSTA DA AUTO-EXCITAÇÃO	65
3.5- OUTRO MÉTODO DE ANÁLISE DA AUTO-EXCITAÇÃO E CURTO-CIRCUITO CAPACITIVO POR RÜNDENBERG.....	66
3.5.1- Auto-Excitação (AEX).....	70
3.5.2- Curto-Circuito Capacitivo (CCC).....	71
3.5.3- Análise geral.....	72
3.6- AEX E CCC ATRAVÉS DA REPRESENTAÇÃO COMPLETA DA MÁQUINA.....	73
3.7- REPRESENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NOS ESTUDOS DE AUTO-EXCITAÇÃO.....	81
3.7.1- Representação da rede elétrica.....	82
3.7.2- Representação dos geradores síncronos e seus controladores	83
3.8- EXECUÇÃO DOS ESTUDOS DE AUTO-EXCITAÇÃO NO SISTEMA INTERLIGADO BRASILEIRO	85
4- SIMULAÇÕES.....	89
4.1- OBJETIVO	89
4.2- BASE DE DADOS	89
4.2.1- Sistemas de Transmissão	89
4.2.1.1- <i>Sistemas de transmissão em corrente alternada</i>	89
4.2.1.2- <i>Sistemas de transmissão em corrente contínua</i>	91
4.2.2- Geradores.....	93
4.2.2.1- <i>Introdução</i>	93
4.2.2.2- <i>Modelagem das máquinas</i>	94
4.2.3- Modelagem dos Controladores da máquina.....	95
4.2.3.1- <i>Modelagem do sistema de excitação</i>	96
4.2.3.1.1- <i>Características básicas do sistema de excitação</i>	102
4.2.3.1.2- <i>Sistema de excitação sem capacidade de corrente negativa</i>	104
4.2.3.1.3- <i>Sistema de excitação com capacidade de corrente negativa</i>	105
4.2.3.2- <i>Modelagem do regulador de velocidade</i>	107
4.3- ANÁLISES OPERATIVAS DO SISTEMA.....	109
4.4- PREMISAS E CRITÉRIOS ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES	111
4.5- INFLUÊNCIA DO REGULADOR DE TENSÃO NA RESPOSTA DA AUTO-EXCITAÇÃO ..	111
4.6- ANÁLISE DA AUTO-EXCITAÇÃO COMPARANDO O SISTEMA FRENTE À CAPACIDADE	

OU NÃO DE CORRENTE NEGATIVA DA PONTE RETIFICADORA	114
4.6.1- Resposta da máquina frente a uma rejeição de carga, não considerando a capacidade de corrente negativa do sistema de excitação.....	114
4.6.1.1- Resposta da máquina a rejeição de carga desconsiderando a regulação primária da máquina.....	117
4.6.2- Resposta da máquina frente a uma rejeição de carga na barra 514, considerando a capacidade de corrente negativa do sistema de excitação	120
4.7- INFLUÊNCIA DA CORREÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO COM A FREQUÊNCIA DA ILHA ELÉTRICA.....	124
4.7.1- Rejeição de carga considerando a correção dos parâmetros com a frequência da ilha	124
4.7.2- Rejeição de carga desconsiderando a correção dos parâmetros com a frequência da ilha	124
4.8- REJEIÇÃO DE CARGA CONSIDERANDO UM REGULADOR DE TENSÃO SIMPLIFICADO (MODELO - DRGT02 BUILT-IN DO ANATEM)	126
4.8.1- Rejeição de carga não considerando capacidade de corrente negativa da ponte retificadora, através do valor da razão R_c/R_f	127
4.8.2- Estudo considerando o sistema de excitação com capacidade de corrente negativa.	130
4.9- REPRESENTAÇÃO DA SATURAÇÃO DO TRANSFORMADOR ELEVADOR.....	132
4.9.1- Análise da saturação numa rejeição de carga	135
4.10- ESTUDO DA AUTO-EXCITAÇÃO CONSIDERANDO ABERTURA DE CIRCUITOS A MONTANTE (TRANSFER-TRIP).....	139
4.10.1- Considerando um transfer-trip em 100 ms para a barra 513.....	139
4.10.2- Considerando um transfer-trip em 800 ms para a barra 513.....	140
4.10.3- Considerando um transfer-trip em 900 ms para a barra 513.....	141
4.11- INSERÇÃO DE REATORES CHAVEADOS NO SISTEMA	143
4.11.1- Inserção de 1800 Mvar de reatores chaveados, no momento da rejeição, sendo 900 na barra 512 e 900 na barra 513.....	146

4.11.2- Inserção de 1800 Mvar de reatores chaveados, 200 ms após a rejeição, sendo 900 na barra 512 e 900 na barra 513	148
4.11.3- Inserção de 1800 Mvar de reatores chaveados, 1 segundo após a rejeição, sendo 900 na barra 512 e 900 na barra 513.....	150
4.11.4- Inserção de 1800 Mvar, no momento da rejeição, sendo 900 na barra 512 e 900 na barra 513. Neste caso está sendo considerado o RSC (Reator Shunt Controlado por ponte tiristorizada).....	156
4.12- INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE MÁQUINAS DESPACHADAS	160
4.12.1- Considerando uma máquina equivalente a 88 máquinas despachadas na sua potência nominal.....	161
4.12.2- Considerando uma máquina equivalente a 44 máquinas despachadas na sua potência nominal.....	161
4.13- INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE COMPENSAÇÃO SÉRIE DAS LINHAS.....	164
4.13.1- Montante de 60% de compensação série nas linhas	165
4.13.2- Montante de 70% de compensação série nas linhas	166
4.13.3- Montante de 80% de compensação série nas linhas	168
4.13.4- Montante de 90% de compensação série nas linhas	169
4.13.5- Montante de 100% de compensação série nas linhas	170
4.14- INFLUÊNCIA DO MONTANTE DE FILTROS CAPACITIVOS NA PERDA DE UM ELO CC	174
4.14.1- Rejeição de carga no sistema equivalente CC, conforme Figura 51, com 3200 Mvar totais de filtros a 1 pu de tensão e fp de 0,998. O montante de carga está sendo considerado como P = 6450 MW e Q = 3160 Mvar.....	174
4.14.2- Rejeição de carga no mesmo sistema equivalente CC, conforme Figura 51, com os mesmos montantes de filtros e carga, agora considerando corte de geração;178	
4.14.2.1- <i>Considerando o corte de 32 máquinas no momento da rejeição e permanecendo um total de 56 máquinas conectadas ao sistema.....</i>	<i>178</i>
4.14.2.2- <i>Considerando o corte de 44 máquinas no momento da rejeição e permanecendo um total de 44 máquinas conectadas ao sistema.....</i>	<i>181</i>
4.14.2.3- <i>Considerando o corte de 72 máquinas no momento da rejeição e permanecendo um total de 16 máquinas conectadas ao sistema.....</i>	<i>185</i>

4.14.2.4- <i>Considerando o corte de 80 máquinas no momento da rejeição e permanecendo um total de 8 máquinas conectadas ao sistema.....</i>	<i>189</i>
5- CONCLUSÕES.....	193
5.1- CONCLUSÕES GERAIS.....	193
5.2- TRABALHOS FUTUROS	197
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
APÊNDICE A- REGIME PERMANENTE	204
APÊNDICE B- PARÂMETROS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	208
APÊNDICE C- SISTEMA DE EXCITAÇÃO	209

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AEX	Auto-Excitação;
ANAREDE [®]	Programa de Análise de Redes em Regime Permanente; desenvolvido pelo CEPEL;
ANATEM [®]	Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos; desenvolvido pelo CEPEL;
ATP	Programa de Análise Transitória;
C	Capacitância equivalente do sistema;
CA	Corrente alternada;
CAAT	Alta Tensão em Corrente alternada;
CC	Corrente contínua;
CCC	Curto-Circuito Capacitivo;
CCAT	Alta Tensão em Corrente Contínua;
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, grupo Eletrobrás;
d	Representação de direto;
$\frac{d}{dt}$	Variação temporal;
q	Representação de quadratura;
E	Tensão Interna da Máquina;
e_a	Tensão induzida no eixo a;
e_b	Tensão induzida no eixo b;
e_c	Tensão induzida no eixo c;
e_{fd} ou E_{fd}	Tensão de campo da máquina;
E'_q ou e'_q	Tensão atrás da reatância transitória de eixo direto proporcional ao enlace de fluxo λ_{fd} ;
ESP ou PSS	Estabilizador de sistema de potência (do Inglês Power System Stabilizer);
EAT	Extra Alta Tensão;
EMTP	Programa de transitórios eletromagnéticos;
$f_e = \omega$	Frequência elétrica;
HYGOV	Modelo de Regulador de Velocidade para máquinas hidráulicas;

Hz	Hertz, unidade de frequência;
i_c	Corrente capacitiva após a rejeição de carga;
i_d	Corrente de eixo direto;
i_{fd} ou i_f	Corrente de campo da máquina;
i_q	corrente de eixo em quadratura;
I_R	Corrente no terminal receptor;
I_S	Corrente no terminal emissor;
i_{1q}	corrente do enrolamento amortecedor 1 do eixo q;
j	Unidade imaginária dos números complexos;
J	Momento de inércia da massa girante de um gerador;
km	Quilômetro;
kV	Quilovolt;
L_{ad}	Indutância mútua de eixo d;
$L_{afd} = L_{fda}$	Indutância mútua entre os enrolamentos de eixo d do estator e do campo da máquina;
$L_{akd} = L_{kda}$	Indutância mútua entre os enrolamentos amortecedores do eixo d e o eixo d do estator da máquina;
$L_{akq} = L_{kqa}$	Indutância mútua entre os enrolamentos amortecedores do eixo q e o eixo q do estator da máquina;
L_{aq}	Indutância mútua de eixo q;
L_d	Auto-indutância de eixo direto do estator;
L'_d	Indutância transitória de eixo direto;
L''_d	Indutância subtransitória de eixo direto;
L_{fd}	Indutância de dispersão do enrolamento de campo;
L_{ffd}	Auto-indutância do enrolamento de campo;
$L_{fkd} = L_{kfd}$	Indutância mútua entre os enrolamentos amortecedores do eixo d e o campo da máquina;
$L_{fld} = L_{ldf}$	Indutância mútua entre os enrolamentos do campo e o amortecedor 1 de eixo d;
L_l	Indutância de dispersão considerada para ambos os eixos magnéticos d e q do estator;
L_q	Auto-indutância de eixo em quadratura do estator;
L'_q	Indutância transitória de eixo q;
L''_q	Indutância subtransitória de eixo q;

L_{1d}	Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor 1 do eixo d;
L_{1q}	Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor 1 do eixo q;
L_{2q}	Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor 2 do eixo q;
L_{11d}	Auto-indutância do enrolamento amortecedor 1 de eixo d;
L_{11q}	Auto-indutância do enrolamento amortecedor 1 de eixo q;
L_{22q}	Auto-indutância do enrolamento amortecedor 2 de eixo q;
M	Quantidade de movimento angular;
MW	Megawatts;
N	Pólo magnético norte da máquina;
η	Número de rotações do rotor por minuto;
OEL	Do Inglês, Over Excitation Limitation;
P	Número de pólos da máquina;
P_e	Potência Ativa de saída;
P_m	Potência mecânica fornecida pela turbina ao gerador;
PTI	Do Inglês, Power Technologies Inc.;
PU	Por Unidade;
R_a	Resistência da armadura;
RAT	Regulador automático de tensão;
R_{fd}	Resistência do enrolamento de campo;
RMS	Do Inglês, Root Mean Square;
R_p	Regime permanente;
rps	Rotações por segundo;
R_{1d}	Resistência do enrolamento amortecedor 1 do eixo d;
R_{1q}	Resistência do enrolamento amortecedor 1 do eixo q;
R_{2q}	Resistência do enrolamento amortecedor 2 do eixo q;
s	Operador da transformada de Laplace;
S	Pólo magnético sul da máquina;
SIN	Sistema Interligado Nacional;
S_n	Potência aparente nominal da máquina;
t	Tempo;
T_a	Torque de aceleração;

T_m	Torque mecânico;
T_e	Torque elétrico;
T_{kd}	Constante de tempo do circuito amortecedor do eixo d;
T'_{d0}	Constante de tempo transitória de circuito aberto no eixo d;
T''_{d0}	Constante de tempo subtransitória de circuito aberto no eixo d;
T'_{q0}	Constante de tempo transitória de circuito aberto no eixo q;
T''_{q0}	Constante de tempo subtransitória de circuito aberto no eixo q;
T'_d	Constante de tempo transitória de curto-circuito no eixo d;
T''_d	Constante de tempo subtransitória de curto-circuito no eixo d;
T'_q	Constante de tempo transitória de curto-circuito no eixo q;
UEL	Do Inglês, Under Excitation Limitation;
V	Unidade de tensão, volt;
v_d	Tensão terminal de eixo direto;
v_q	Tensão terminal de eixo em quadratura;
v_0	Tensão do eixo fictício zero;
v_{1d}	Tensão do enrolamento amortecedor 1 do eixo d;
v_{1q}	Tensão do enrolamento amortecedor 1 do eixo q;
v_{2q}	Tensão do enrolamento amortecedor 2 do eixo q;
V_{ref}	Sinal de referência de controle de tensão do gerador;
V_r	Tensão no terminal receptor da linha;
V_s	Tensão no terminal emissor da linha;
V_{sad}	Sinal adicional gerado pelo ESP;
W	Energia cinética armazenada a velocidade nominal;
ω	Velocidade angular da máquina em rad/s;
ω_s	velocidade síncrona;
ω_r	Velocidade angular relativa da máquina em rad/s;
X_c	Reatância capacitiva equivalente do sistema;
X_d	Reatância síncrona de eixo d;
X'_d	Reatância transitória de eixo d;
X''_d	Reatância subtransitória de eixo d;
X_q	Reatância síncrona de eixo q;

X'_q	Reatância transitória de eixo q;
X''_q	Reatância subtransitória de eixo q;
X_l	Reatância indutiva série;
Y	Susceptância equivalente da linha;
Z	Módulo de uma carga aparente;
λ	Fluxo de enlace;
λ_d	Fluxo de enlace do eixo d;
λ_q	Fluxo de enlace do eixo q;
λ_0	Fluxo de enlace do eixo fictício 0;
λ_{fd}	Fluxo de enlace de campo;
λ_{1d}	Fluxo de enlace do enrolamento amortecedor 1 no eixo d;
λ_{1q}	Fluxo de enlace do enrolamento amortecedor 1 no eixo q;
λ_{2q}	Fluxo de enlace do enrolamento amortecedor 2 no eixo q;
∞	Simbologia de infinito;
δ	ângulo de carga do gerador;
Δ	Simbologia para indicação de pequenos desvios na variável;
θ	Deslocamento angular em relação a um eixo fixo;
o	Subscrito indicativo de valor de regime permanente;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Figura esquemática de uma rejeição de carga num sistema de transmissão CAAT	7
Figura 2- Figura esquemática de uma rejeição de carga num sistema de transmissão CCAAT	7
Figura 3- Circuito magnético equivalente para o eixo d	21
Figura 4- Circuito magnético equivalente para o eixo q	21
Figura 5- Relações físicas entre os parâmetros operacionais da máquina	24
Figura 6- Resposta de frequência para a indutância de eixo d	27
Figura 7- Resposta de frequência para o parâmetro operacional $G(s)$	28
Figura 8- Resposta de frequência para $L_q(s)$ na máquina de pólos salientes	28
Figura 9- Resposta de frequência para $L_q(s)$ na máquina de pólos lisos	28
Figura 10- Diagrama de blocos para um sistema de excitação	31
Figura 11- Esquema simplificado de uma ponte retificadora unidirecional	33
Figura 12- Esquema simplificado de uma ponte retificadora bidirecional	34
Figura 13- Comportamento ideal para o ganho do regulador de tensão	35
Figura 14- Deslocamento angular de um gerador síncrono com e sem PSS	38
Figura 15- Resposta de VSAD para uma máquina com e sem PSS	38
Figura 16- Diagrama referente aos aspectos de medição do rotor	41
Figura 17- Diagrama de blocos referente à equação de oscilação	44
Figura 18- Curva de capacidade de um gerador síncrono de pólos lisos	44
Figura 19- Diagrama fasorial da máquina de pólos lisos operando em RP	45
Figura 20- Diagrama fasorial para construção da curva de capacidade	45
Figura 21- Curva de capacidade típica de um gerador síncrono de pólos salientes	46
Figura 22- Característica do limite de subexcitação de uma máquina síncrona ...	48
Figura 23- Gerador de indução eólico tipo auto-excitado	50
Figura 24- Representação das formas de carga capacitiva nos terminais do gerador síncrono	51
Figura 25- Comportamento da tensão terminal numa auto-excitação	52
Figura 26- Comportamento da tensão terminal num Curto-Circuito Capacitivo..	52
Figura 27- Representação do modelo π -equivalente para uma linha de transmissão	53

Figura 28- Figura representativa de uma rejeição de carga num sistema CC.....	55
Figura 29- Circuito equivalente de eixo d do gerador, considerando apenas 1 circuito no rotor.....	57
Figura 30- Circuito equivalente do eixo q do gerador, considerando 1 enrolamento amortecedor.....	57
Figura 31- Figura esquemática de uma capacitância nos terminais da máquina ..	57
Figura 32- Diagrama de blocos para o eixo d de uma máquina síncrona com carga capacitiva, desprezando o efeito dos enrolamentos amortecedores.....	64
Figura 33- Diagrama de blocos para o eixo q de uma máquina síncrona com carga capacitiva, considerando o efeito de um enrolamento amortecedor	64
Figura 34- Característica de saturação em vazio da máquina e reta de rudenberg	68
Figura 35- Características da AEX e CCC através da análise da curva de saturação em vazio	70
Figura 36- Relação entre os parâmetros internos da máquina e da rede após uma rejeição de carga.....	72
Figura 37- Diagrama de blocos da tensão de eixo q do gerador de pólos salientes com carga capacitiva.....	74
Figura 38- Diagrama de blocos da tensão de eixo d do gerador de pólos salientes com carga capacitiva.....	74
Figura 39- Diagrama do lugar das raízes considerando a variação da reatância capacitiva no eixo d.....	77
Figura 40- Representação da região de auto-excitação e curto-circuito capacitivo para o eixo d.....	77
Figura 41- Diagrama do lugar das raízes considerando a variação da reatância capacitiva no eixo q.....	79
Figura 42- Representação da região de auto-excitação e curto-circuito capacitivo para o eixo q.....	80
Figura 43- Representação simultânea das regiões de auto-excitação e curto-circuito capacitivo para os eixos d e q	80
Figura 44- Modelagem considerada nos estudos de rejeição de carga	82
Figura 45- Representação da linha de transmissão num estudo de rejeição de carga	82
Figura 46- Esquema de rejeição de carga num sistema em corrente alternada.....	86
Figura 47- Esquema de rejeição de carga num sistema em corrente contínua.....	86

Figura 48- Sistema CA de 765 kV usado nos testes práticos.....	90
Figura 49- Ponto de rejeição no sistema de 765 kV em CA	91
Figura 50- Sistema de Corrente Contínua em 600 kV com 3 bipólos	91
Figura 51- Sistema representativo ao CCAT de 3 bipólos de 600 kV.....	92
Figura 52- Fotografia referente a um gerador tipo bulbo.....	93
Figura 53- Diagramas referentes à modelagem das máquinas síncronas tipo bulbo	94
Figura 54- Diagrama de blocos completo do sistema de excitação	97
Figura 55- Diagrama de blocos referente ao Limitador de sobre-excitação	99
Figura 56- Diagrama de blocos referente ao Limitador de sub-excitação	99
Figura 57- Diagrama de blocos referente ao LDC.....	100
Figura 58- Diagrama de blocos do controle da ponte de corrente negativa.....	100
Figura 59- Comportamento da corrente de campo considerando o limitador positivo.....	105
Figura 60- Comportamento da corrente de campo considerando o limitador negativo.....	106
Figura 61- Modelagem completa do regulador de velocidade.....	108
Figura 62- Tensão transitória de eixo q com e sem regulador de tensão	112
Figura 63- Tensão terminal da máquina com e sem regulador de tensão	112
Figura 64- Tensão de campo da máquina com e sem regulador de tensão.....	113
Figura 65- Freqüência da máquina desconsiderando a capacidade de corrente negativa	114
Figura 66- Tensão terminal da máquina desconsiderando a capacidade de corrente negativa	114
Figura 67- Corrente de campo da máquina desconsiderando a capacidade de corrente negativa	115
Figura 68- Tensão de campo da máquina desconsiderando a capacidade de corrente negativa	115
Figura 69- Freqüência da máquina desconsiderando a regulação primária	117
Figura 70- Tensão terminal da máquina desconsiderando a regulação primária	117
Figura 71- Corrente de campo da máquina desconsiderando a regulação primária	117
Figura 72- Tensão de campo da máquina desconsiderando a regulação primária	118

Figura 73- Freqüência da máquina para ambas as considerações.....	118
Figura 74- Tensão terminal da máquina para ambas as considerações.....	118
Figura 75- Corrente de campo da máquina para ambas as considerações.....	119
Figura 76- Freqüência da máquina considerando a capacidade de corrente negativa.....	120
Figura 77- Tensão terminal da máquina considerando a capacidade de corrente negativa.....	120
Figura 78- Corrente de campo da máquina considerando a capacidade de corrente negativa.....	121
Figura 79- Tensão de campo da máquina considerando a capacidade de corrente negativa.....	121
Figura 80- Freqüência da máquina para ambos os casos.....	121
Figura 81- Tensão terminal da máquina para ambos os casos.....	122
Figura 82- Corrente de campo para ambos os casos.....	122
Figura 83- Tensão de campo para ambos os casos.....	122
Figura 84- Freqüência da máquina com e sem a correção dos parâmetros.....	124
Figura 85- Tensão terminal da máquina com e sem a correção dos parâmetros.	124
Figura 86- Corrente de campo da máquina com e sem a correção dos parâmetros.....	125
Figura 87- Tensão de campo da máquina com e sem a correção dos parâmetros	125
Figura 88- Diagrama de blocos referente à modelagem do regulador de tensão tipo SCRX.....	126
Figura 89- Tensão terminal da máquina considerando um R_c/R_f igual a 5.....	128
Figura 90- Tensão de campo da máquina considerando um R_c/R_f igual a 5.....	128
Figura 91- Corrente de campo da máquina considerando um R_c/R_f igual a 5..	128
Figura 92- Respostas de E_{fd} , I_{fd} e V_{term} da máquina para um R_c/R_f igual a 5	129
Figura 93- Tensão terminal da máquina considerando capacidade de ponte negativa.....	130
Figura 94- Tensão de campo da máquina considerando capacidade de ponte negativa.....	130
Figura 95- Corrente de campo da máquina considerando capacidade de ponte negativa.....	130
Figura 96- Respostas de E_{fd} , I_{fd} e V_{term} da máquina considerando ponte negativa.....	131

Figura 97- Curva característica representada no ANATEM, através da carga dinâmica	132
Figura 98- Diagrama de blocos referente a modelagem da saturação do transformador elevador	133
Figura 99- Diagrama de blocos referente a modelagem da saturação do transformador elevador	134
Figura 100- Frequência da máquina considerando a saturação do transformador	135
Figura 101- Tensão terminal da máquina considerando a saturação do transformador	135
Figura 102- Corrente de campo da máquina considerando a saturação do transformador	135
Figura 103- Tensão de campo da máquina considerando a saturação do transformador	136
Figura 104- Frequência da máquina com e sem a representação da saturação do transformador elevador	136
Figura 105- Tensão terminal da máquina com e sem a representação da saturação do transformador elevador	136
Figura 106- Corrente de campo da máquina com e sem a representação da saturação do transformador elevador	137
Figura 107- Tensão de campo da máquina com e sem a representação da saturação do transformador elevador	137
Figura 108- Frequência da máquina considerando um transfer-trip em 100 ms a montante	139
Figura 109- Tensão terminal da máquina considerando um transfer-trip em 100 ms a montante	139
Figura 110- Corrente de campo da máquina considerando um transfer-trip em 100 ms a montante	139
Figura 111- Tensão de campo da máquina considerando um transfer-trip em 100 ms a montante	140
Figura 112- Frequência da máquina considerando um transfer-trip em 800 ms a montante	140
Figura 113- Tensão terminal da máquina considerando um transfer-trip em 800 ms a montante	140

Figura 114- Corrente de campo da máquina considerando um transfer-trip em 800 ms a montante	141
Figura 115- Tensão de campo da máquina considerando um transfer-trip em 800 ms a montante	141
Figura 116- Frequência da máquina considerando um transfer-trip em 900 ms a montante.....	141
Figura 117- Tensão terminal da máquina considerando um transfer-trip em 900 ms a montante	142
Figura 118- Corrente de campo da máquina considerando um transfer-trip em 900 ms a montante	142
Figura 119- Tensão de campo da máquina considerando um transfer-trip em 900 ms a montante	142
Figura 120- Diagrama de blocos referente ao controle para a inserção dos reatores	144
Figura 121-Frequência da máquina considerando inserção de reatores no momento da rejeição	146
Figura 122- Tensão terminal da máquina considerando inserção de reatores no momento da rejeição	146
Figura 123- Corrente de campo da máquina considerando inserção de reatores no momento da rejeição	146
Figura 124- Tensão de campo da máquina considerando inserção de reatores no momento da rejeição	147
Figura 125- Reatância equivalente vista nos circuitos considerando inserção de reatores no momento da rejeição	147
Figura 126- Reatância equivalente detalhada, vista nos circuitos considerando inserção de reatores no momento da rejeição	147
Figura 127- Susceptância dos reatores chaveados no momento da rejeição.....	148
Figura 128- Frequência da máquina considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição.....	148
Figura 129- Tensão terminal da máquina considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição	148
Figura 130- Corrente de campo da máquina considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição	149
Figura 131- Tensão de campo da máquina considerando inserção de reatores 200	

ms após a rejeição	149
Figura 132- Reatância equivalente vista nos circuitos considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição.....	149
Figura 133- Reatância equivalente detalhada, vista nos circuitos considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição.....	150
Figura 134- Susceptância dos reatores chaveados 200 ms após a rejeição.....	150
Figura 135- Frequência da máquina considerando inserção de reatores 1 s após a rejeição	150
Figura 136- Tensão terminal da máquina considerando inserção de reatores 1 s após a rejeição	151
Figura 137- Corrente de campo da máquina considerando inserção de reatores 1 s após a rejeição	151
Figura 138- Tensão de campo da máquina considerando inserção de reatores 1 s após a rejeição	151
Figura 139- Reatância equivalente vista nos circuitos considerando inserção de reatores 1s após a rejeição.....	152
Figura 140- Susceptância dos reatores chaveados 1s após a rejeição.....	152
Figura 141- Comparação da frequência da máquina entre os tempos simulados	152
Figura 142- Comparação da tensão terminal da máquina entre os tempos simulados	153
Figura 143- Comparação da corrente de campo da máquina entre os tempos simulados	153
Figura 144- Comparação da tensão de campo da máquina entre os tempos simulados	153
Figura 145- Comparação entre as reatâncias vistas nos circuitos entre os tempos simulados	154
Figura 146- Comparação detalhada entre as susceptâncias dos reatores nos tempos simulados	154
Figura 147- Esquema de representação de um RSC	156
Figura 148- Frequência da máquina considerando a inserção de um RSC.....	156
Figura 149- Tensão terminal da máquina considerando a inserção de um RSC.	157
Figura 150- Corrente de campo da máquina considerando a inserção de um RSC	157
Figura 151- Tensão de campo da máquina considerando a inserção de um RSC	157

Figura 152- Susceptância equivalente dos RSCs.....	158
Figura 153- Comparação da frequência da máquina entre as respostas de reatores e RSC	158
Figura 154- Comparação da tensão terminal da máquina entre as respostas de reatores e RSC.....	158
Figura 155- Comparação da corrente de campo da máquina entre as respostas de reatores e RSC.....	159
Figura 156- Comparação da tensão de campo da máquina entre as respostas de reatores e RSC.....	159
Figura 157- Comparação das susceptâncias entre as respostas de reatores e RSC	159
Figura 158- Frequência da máquina equivalente	161
Figura 159- Tensão terminal da máquina equivalente.....	161
Figura 160- Corrente de campo da máquina equivalente.....	162
Figura 161- Tensão de campo da máquina equivalente.....	162
Figura 162- Frequência da máquina equivalente para 88 e 44 máquinas	162
Figura 163- Tensão terminal da máquina equivalente para 88 e 44 máquinas ...	163
Figura 164- Corrente de campo da máquina equivalente para 88 e 44 máquinas	163
Figura 165- Tensão de campo da máquina equivalente para 88 e 44 máquinas .	163
Figura 166- Frequência da máquina para um nível de 60% de compensação série	165
Figura 167- Tensão terminal da máquina para um nível de 60% de compensação série	165
Figura 168- Corrente de campo da máquina para um nível de 60% de compensação série.....	166
Figura 169- Tensão de campo da máquina para um nível de 60% de compensação série	166
Figura 170- Frequência da máquina para um nível de 70% de compensação série	166
Figura 171- Tensão terminal da máquina para um nível de 70% de compensação série.....	167
Figura 172- Corrente de campo da máquina para um nível de 70% de compensação série.....	167
Figura 173- Tensão de campo da máquina para um nível de 70% de compensação	

série	167
Figura 174- Frequência da máquina para um nível de 80% de compensação série	168
Figura 175- Tensão terminal da máquina para um nível de 80% de compensação série	168
Figura 176- Corrente de campo da máquina para um nível de 80% de compensação série.....	168
Figura 177- Tensão de campo da máquina para um nível de 80% de compensação série	169
Figura 178- Frequência da máquina para um nível de 90% de compensação série	169
Figura 179- Tensão terminal da máquina para um nível de 90% de compensação série	169
Figura 180- Corrente de campo da máquina para um nível de 90% de compensação série.....	170
Figura 181- Tensão de campo da máquina para um nível de 90% de compensação série	170
Figura 182- Frequência da máquina para um nível de 100% de compensação série	170
Figura 183- Tensão terminal da máquina para um nível de 100% de compensação série	171
Figura 184- Corrente de campo da máquina para um nível de 100% de compensação série.....	171
Figura 185- Tensão de campo da máquina para um nível de 100% de compensação série.....	171
Figura 186- Tensão terminal da máquina para todos os níveis de compensação série	172
Figura 187- Detalhamento da subida da tensão terminal da máquina no momento da rejeição para todos os níveis de compensação série.....	172
Figura 188- Detalhamento da subida da tensão terminal da máquina, após o surgimento da AEX, para todos os níveis de compensação série	172
Figura 189- Corrente de campo da máquina para todos os níveis de compensação série	173
Figura 190- Detalhamento inicial da corrente de campo da máquina para todos os	

níveis de compensação série	173
Figura 191- Tensão terminal da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC	174
Figura 192- Freqüência da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC	175
Figura 193- Corrente de campo da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC	175
Figura 194- Corrente de armadura da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC	175
Figura 195- Tensão de campo da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC	176
Figura 196- Potência elétrica da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC	176
Figura 197- Potência reativa da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC	176
Figura 198- Comparação entre PELE, QELE, IMQS e VOLT	177
Figura 199- Tensão terminal da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas	178
Figura 200- Freqüência da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas	178
Figura 201- Corrente de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas	179
Figura 202- Corrente de armadura da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas.....	179
Figura 203- Tensão de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas	179
Figura 204- Potência elétrica da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas	180
Figura 205- Potência reativa da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas	180
Figura 206- Comparação entre PELE, QELE, IMQS e VOLT	181
Figura 207- Tensão terminal da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas	181
Figura 208- Freqüência da máquina equivalente, numa rejeição de carga	

considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas	182
Figura 209- Corrente de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas	182
Figura 210- Corrente de armadura da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas.....	182
Figura 211- Tensão de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas	183
Figura 212- Potência elétrica da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas	183
Figura 213- Potência reativa da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas	183
Figura 214- Comparação entre PELE, QELE, IMQS e VOLT	185
Figura 215- Tensão terminal da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas	185
Figura 216- Frequência da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas	185
Figura 217- Corrente de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas	186
Figura 218- Corrente de armadura da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas.....	186
Figura 219- Tensão de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas	186
Figura 220- Potência elétrica da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas	187
Figura 221- Potência reativa da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas	187
Figura 222- Comparação entre QELE, PELE, IMQS e VOLT	188
Figura 223- Tensão terminal da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas	189
Figura 224- Frequência da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas	189
Figura 225- Corrente de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas	189
Figura 226- Corrente de armadura da máquina equivalente, numa rejeição de	

carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas.....	190
Figura 227- Tensão de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas	190
Figura 228- Potência elétrica da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas	190
Figura 229- Potência reativa da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas	191
Figura 230- Configuração do sistema em regime permanente para todos os casos com e sem ponte negativa e que consideram compensação série de 65%.....	204
Figura 231- Configuração do sistema em regime permanente para os casos sem ponte negativa e que consideram compensação série de 60%.....	205
Figura 232- Configuração do sistema em regime permanente para os casos sem ponte negativa e que consideram compensação série de 70%.....	205
Figura 233- Configuração do sistema em regime permanente para os casos sem ponte negativa e que consideram compensação série de 80%.....	206
Figura 234- Configuração do sistema em regime permanente para os casos sem ponte negativa e que consideram compensação série de 90%.....	206
Figura 235- Configuração do sistema em regime permanente para os casos sem ponte negativa e que consideram compensação série de 100%.....	207
Figura 236- Representação em regime permanente de um sistema CC equivalente de 3 bipólos	207

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Equacionamento completo dos parâmetros operacionais	26
Tabela 2- Expressões associadas ao equacionamento dos parâmetros operacionais	26
Tabela 3- Faixas para os valores dos parâmetros dos geradores.....	30
Tabela 4- Parâmetros dos geradores síncronos tipo bulbo.....	95
Tabela 5- Descrição dos parâmetros da lógica de limitação da corrente mínima de campo	102
Tabela 6- Tetos da tensão de campo de algumas máquinas do SIN	104
Tabela 7- Tabela referente aos valores dos parâmetros do limitador de corrente mínima de campo positivo	105
Tabela 8- Tabela referente aos valores dos parâmetros do limitador de corrente mínima de campo - negativo	106
Tabela 9- Valores dos parâmetros do regulador de velocidade	109
Tabela 10- Relação das análises com os respectivos circuitos	110
Tabela 11- Tabela descritiva dos parâmetros do regulador de tensão modelo SCRX	127
Tabela 12- Valores referentes à função “pontos” da carga dinâmica	133
Tabela 13- Descrição das constantes e parâmetros da lógica de atuação	145
Tabela 14- Tabela referente aos dados das linhas de transmissão em corrente alternada	208
Tabela 15- Tabela referente aos comprimentos dos trechos da linha de transmissão CA	208
Tabela 16- Tabela dos dados dos transformadores do sistema CA.....	208
Tabela 17- Tabela dos dados referentes aos reatores de linha	208
Tabela 18- Tabela dos parâmetros referentes ao sistema de excitação.....	209
Tabela 19- Tabela dos parâmetros referentes ao limitador de sobreexcitação....	210
Tabela 20- Tabela dos parâmetros referentes ao limitador de subexcitação.....	211

1- INTRODUÇÃO

1.1- Histórico

A finalidade de um sistema de energia elétrica completo é gerar esta energia em valores suficientes para o atendimento, transmiti-la e distribuí-la até os pontos de carga. Esta cadeia energética deve ser construída e operada com adequação às normas existentes, considerando os menores custos econômico e ambiental. Por este motivo, os empreendimentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica devem ser projetados de forma que possam atender a certos critérios técnicos, no que diz respeito à capacidade de transmissão, confiabilidade e economia.

Nos grandes sistemas de potência, as usinas hidráulicas ficam localizadas no curso de rios que oferecem grande potencial energético e no Brasil, na maioria dos casos, se encontram afastadas dos grandes centros de carga. Assim, se torna necessário transmitir esta energia do ponto de geração até os centros consumidores através de grandes troncos de transmissão em corrente alternada ou corrente contínua.

O grande impulso para o uso comercial da energia elétrica começou no final de 1870 quando a iluminação das residências e das ruas começou a ser feita por lâmpadas a arco. Teoricamente, o primeiro sistema de potência completo composto pelos principais equipamentos como gerador, cabos, elementos de proteção, medidores e cargas foi construído por Tomas Edison e entrou em operação em setembro de 1882. Conforme a história, este sistema era composto por um gerador CC movido a vapor alimentando uma carga com aproximadamente 59 clientes numa área de aproximadamente 1,5 km de raio. A tensão de alimentação desta carga, que era composta basicamente por lâmpadas incandescentes, era de 110 V e suprida através de um sistema de cabos aterrados. Este sistema inicial serviu de grande impulso aos outros e em poucos anos, outros sistemas similares começaram a entrar em operação em grandes cidades do mundo.

Em 1884, Frank Sprague começou a desenvolver o conceito de motores e isto acabou se tornando um impulso para que esses equipamentos fossem sendo adicionados

a tais sistemas como cargas. Este processo foi considerado o desenvolvimento das grandes indústrias do mundo.

Com a introdução dos sistemas CC por Tomas Edison criou-se uma expectativa em torno da expansão deste tipo de transmissão, mas o que se viu foi uma substituição quase que completa pelos sistemas em corrente alternada. Os sistemas CC apresentavam grandes fragilidades e por volta de 1886, as suas limitações foram se tornando cada vez mais visíveis. A potência fornecida pelos geradores só poderia ser entregue às cargas em pequenas distâncias, e para se manter as perdas por efeito Joule na transmissão (RI^2) e a queda tensão em níveis aceitáveis, era necessário que a transmissão de potência fosse feita em altos níveis de tensão para as longas distâncias. Esses níveis eram tão altos que foram considerados inadequados para geração e consumo de potência. Assim, tornou-se uma necessidade um meio conveniente de transformação da tensão para valores menores.

O equipamento de transformação de tensão, hoje conhecido como transformador, tornou-se uma necessidade inadiável. O desenvolvimento dos transformadores e da transmissão em CA, por L. Gaulard e J.D. Gibbs, impulsionou os sistemas elétricos de potência em CA. Em 1886 foi desenvolvido e testado, por William Stanley, sócio de Westinghouse, que tinha adquirido os direitos autorais desses desenvolvimentos nos Estados Unidos, um transformador que era comercialmente prático e um sistema de distribuição CA para 150 lâmpadas na grande Barrington, em Massachusetts.

Após a realização desses testes, a aplicação dos conceitos no campo prático era apenas uma questão de tempo. Em 1889, o primeiro sistema de transmissão em corrente alternada na América do Norte foi colocado em operação. Era composto por uma linha monofásica na tensão de 4000 V numa distância de 21 km no Oregon entre as cidades de Willamette e Portland. Desta maneira, os sistemas CA começaram a se tornar mais flexíveis e atraentes.

A tecnologia em corrente alternada não estacionou neste patamar, muito pelo contrário, cada vez mais foi sendo estudada. As transmissões monofásicas passaram a evoluir para outros tipos. Nikola Tesla desenvolveu o conceito de transmissão polifásica

e conseqüentemente, estes sistemas começaram a se tornar mais atrativos. Muitas inovações foram sendo adquiridas como os motores CA, geradores, transformadores e que foram se tornando as bases estruturais dos sistemas elétricos de potência atuais.

Com o desenvolvimento deste sistema, uma questão importante começou a ser debatida nos anos de 1890: os aparelhos elétricos industriais seriam padronizados em corrente contínua ou alternada? Ocorreram calorosas discussões entre Edison, que defendia os sistemas CC e Westinghouse, que era favorável aos sistemas CA. No final do século, três motivos técnicos, que serão citados abaixo, vieram a intervir a favor de Westinghouse e da expansão dos sistemas em CA quando comparados com os CC:

- Os níveis de tensão podem ser facilmente transformados nos sistemas CA, assim provendo flexibilidade para o uso de diferentes níveis de geração, transmissão e consumo;
- Os geradores CA são muito mais simples do que os geradores CC;
- Os motores CA são muito simples e baratos do que os CC.

O primeiro circuito trifásico adotado na América do Norte entrou em operação em 1893, sendo um sistema de 2300 V com 12 km de extensão no sul da Califórnia. Neste mesmo tempo, a corrente alternada tinha sido escolhida para compor o sistema das quedas de Niágara, pelo fato da corrente contínua não ser prática para a transmissão de potência para Buffalo, sendo essa distância em torno de 30 km. Esta decisão finalizou a controvérsia entre os sistemas CA e CC e estabeleceu a vitória da corrente alternada.

No início da transmissão em corrente alternada, o valor da frequência não era padronizado e vários valores foram colocados em uso, os quais podem ser citados: 25, 50, 60, 125 e 133 Hz. Conseqüentemente, isto causou um grande problema, pois as interligações não poderiam conectar sistemas assíncronos, ou seja, com diferença entre os valores das frequências nominais. Para solucionar este problema foi adotada a frequência de 60 Hz como padrão na América do Norte, embora muitos outros países usem 50 Hz como padrão dos seus sistemas de transmissão.

Com o crescimento dos sistemas de energia elétrica, ocorre a necessidade de interligação entre subsistemas, seja para balanço energético ou até mesmo como necessidade de importação de energia. Conseqüentemente, a transmissão de grandes blocos de potência, por longas distâncias, acaba sendo inevitável para tais sistemas. Este fator serviu como incentivo para se usar cada vez mais altos níveis de tensão. Os primeiros sistemas de potência CA desenvolvidos usaram tensões de 12, 44 e 60 kV (valor eficaz). Mais tarde, os valores foram sendo elevados para 165 kV em 1922, 220 kV em 1923, 287 kV em 1935, 330 kV em 1953 e 500 kV em 1965. O primeiro nível de tensão em 735 kV foi energizado em 1966 pela empresa canadense Hydro Quebec e o valor de 765 kV introduzido no sistema americano no ano de 1969.

Para evitar a proliferação de um número ilimitado de tensões foram padronizados os seguintes valores:

- Alta tensão (AT): 115, 138, 161 e 230 kV;
- Extra alta tensão (EAT): 345, 440, 500 e 765 kV;

O sistema interligado brasileiro, que começou a se desenvolver basicamente a partir da década de 60, baseia-se na geração das hidrelétricas que aproveitam a tropicalidade que se caracteriza por grande quantidade de chuvas no verão do sudeste e as chuvas no inverno do sul. Nos anos 60, no governo de Juscelino Kubitschek, Furnas Centrais Elétricas aparece como estatal somente para construir a usina hidrelétrica de Furnas, que entrou em operação em 1963. A companhia Furnas, ao longo dos anos 60, começou a construir outras hidrelétricas e durante os anos 70 construiu também, além de usinas geradoras, sistemas de transmissão.

O Brasil foi pioneiro no planejamento de geração tipo hidráulica e criou uma grande tecnologia na engenharia de sistemas de alta e extra-alta tensão. Nos anos 80, Furnas construiu os troncos de transmissão em corrente contínua de 600 kV e o alternada de 765 kV, ambos de Itaipú.

Atualmente, o sistema elétrico brasileiro apresenta vários níveis de tensão em sua estrutura, a saber: 138, 230, 345, 440, 500, 525, ±600 kV e 765 kV. O nível de tensão

em 500 kV é o mais usado para as interligações entre os subsistemas, as quais podem ser citadas a Norte-Nordeste, Sul-Sudeste e a interligação Norte-Sul. O sistema de transmissão na tensão de 765 kV é usado, atualmente, para escoamento da potência gerada pela usina hidrelétrica binacional Itaipu (setor de 60 Hz) para os subsistemas Sul e Sudeste.

Considerando os níveis de tensão maiores ou iguais a 230 kV, utilizados na transmissão, o sistema interligado brasileiro pode ser dividido, por predominância de tensão e regiões, da seguinte maneira:

- Região Norte – 500 kV;
- Região Nordeste – 230 e 500 kV;
- Região Sudeste + Centro - Oeste – Todos os níveis;
- Região Sul – 230, 500 e 765 kV.

No Brasil, a implantação das grandes interligações em corrente alternada tem a finalidade de intercâmbio energético entre os diversos subsistemas, podendo ser citada a interligação Norte-Sul, cuja finalidade é o intercâmbio energético entre os subsistemas Norte/Nordeste–Sul/Sudeste. Este intercâmbio permite a troca energética entre esses sistemas, ou seja, quando as usinas do Sudeste estão com os seus reservatórios cheios, elas podem mandar energia para os sistemas Norte/Nordeste.

A partir do desenvolvimento e do aperfeiçoamento das válvulas de mercúrio no começo dos anos 50, os sistemas CCAT tornaram-se mais econômicos em algumas situações especiais de transmissão. Segundo a literatura técnica, o CCAT se torna bastante atrativo para o escoamento de grandes blocos de potência através de longas distâncias de transmissão. Uma outra vantagem do CCAT é que ele permite ligação assíncrona entre os sistemas, nos quais a interligação CA seria impraticável do ponto de vista da estabilidade dinâmica ou pelo fato da diferença entre os valores nominais de frequência dos sistemas.

Com o advento das válvulas conversoras a tiristores, ou seja, com a evolução da eletrônica de potência, o CCAT tornou-se muito mais atrativo. A primeira aplicação de

um sistema CCAT, usando válvulas tiristorizadas, foi no ano de 1972 em Eel Rive, sendo ligado através de um esquema do tipo back-to-back provendo uma ligação assíncrona entre os sistemas de Quebec e New Brunswick. Com a redução do custo e do tamanho dos equipamentos, junto com o aumento da confiabilidade proposta, há um aumento considerável, atualmente, no uso dos sistemas em CCAT pelo mundo.

O único tronco de transmissão em corrente contínua existente no Brasil, atualmente, é o da usina hidrelétrica de Itaipu que conecta a geração da parte paraguaia da usina, em 50 Hz, ao sistema brasileiro na frequência de 60 Hz. Conforme descrito acima, os elos CC podem interligar dois sistemas assíncronos como é visto no caso brasileiro 50-60 Hz. Esta interligação se tornou necessária pelo fato do montante gerado pela parte paraguaia da usina ser muito maior que a carga consumida neste país. Assim, este montante excedente é vendido ao Brasil através desta transmissão.

1.2- Motivação

Os sistemas elétricos atuais apresentam grande complexidade de operação devido ao grande número de equipamentos e a interação entre eles. O Brasil, por exemplo, país com sistema de dimensões continentais, apresenta uma rede eletroenergética malhada, mas com alguns pontos ainda mostrando características radiais. A tendência de expansão se dá basicamente pelo crescimento da carga, para o qual o segmento de geração deve ser projetado para este atendimento.

O sistema de transmissão deve ser projetado de tal maneira que permita o escoamento dessa energia dos pontos de geração até os grandes centros consumidores, com qualidade e eficiência dentro dos critérios adotados. Este segmento, dependendo das suas características como distância, tensão e potência transmitida, pode ser especificado em CA, CC ou até mesmo configurações híbridas que usem em conjunto as duas formas citadas.

No sistema elétrico brasileiro, as usinas hidrelétricas, geralmente, estão localizadas longe dos centros de carga. Por este motivo, associado ao grande bloco de energia transportado, o uso da transmissão em EAT acaba se tornando inevitável.

Assim, os geradores conectados a estes grandes troncos de transmissão acabam se tornando vulneráveis ao problema da auto-excitação, que pode ser entendido como um processo dinâmico que evolui no tempo e que envolve máquinas elétricas e cargas de natureza predominantemente capacitiva.

Os geradores hidráulicos conectados a sistemas de transmissão CA longos, em EAT, podem auto-excitar após ocorrer uma rejeição de carga nestes sistemas. Este evento pode ser considerado como uma abertura de linha de transmissão nos terminais receptores, no qual estas máquinas ainda ficam conectadas nestas linhas. A Figura 1 mostra uma rejeição de carga num sistema CA.

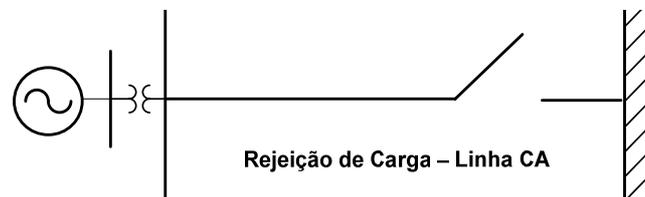


Figura 1- Figura esquemática de uma rejeição de carga num sistema de transmissão CAAT

Os geradores hidráulicos de uma determinada usina, que estão conectados a um centro de carga através de um sistema de transmissão CC, também podem auto-excitar quando ocorrer uma rejeição de carga neste sistema, ou seja, bloqueio dos pólos e que causam sérios problemas de sobretensão nas máquinas. A auto-excitação, neste caso, é causada pela capacitância presente nos filtros de harmônicos do lado CA dos conversores de um sistema de transmissão CCAT. A Figura 2 mostra uma rejeição de carga num sistema CC.

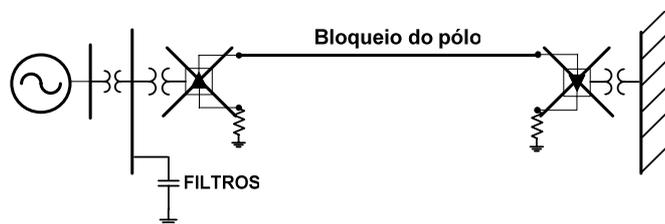


Figura 2- Figura esquemática de uma rejeição de carga num sistema de transmissão CCAT

Como os estudos de expansão do sistema elétrico brasileiro estão considerando cada vez mais alternativas de usinas hidrelétricas ligadas a grandes sistemas radiais de transmissão CCAT ou CAAT, a análise dos fenômenos de auto-excitação e curto-

circuito capacitivo dos geradores síncronos se torna muito importante, principalmente nos estágios iniciais de operação do empreendimento que apresentam poucas máquinas despachadas ligadas a um número discreto de linhas de transmissão, problemas de coordenação de proteção, inexperiência com operação entre outros pontos.

1.3- Objetivo

Analisando certas configurações dos sistemas de potência, onde ocorrem conexões CCAT ou linhas de transmissão CAAT, é verídico considerar que, em algumas situações de emergência em ambos os sistemas, possam ocorrer grandes cargas capacitivas ligadas aos terminais das máquinas síncronas. Estas grandes cargas, dependendo de vários fatores, como a frequência, podem levar ou não a ocorrência do fenômeno da auto-excitação (AEX) ou curto-circuito capacitivo (CCC).

Baseando-se no fato descrito acima, o objetivo principal deste trabalho é apresentar uma análise dos fenômenos de auto-excitação e curto-circuito capacitivo nas máquinas síncronas, quando estas estão sujeitas a certas configurações de transmissão que possam levar à ocorrência de uma grande carga capacitiva ligada aos seus terminais. Identificadas estas configurações nos sistemas em estudo, propôr e debater sobre a eficácia de alternativas operativas ou o uso de certas características de equipamentos que possam intervir de modo a retardar o crescimento da AEX ou CCC.

1.4- Estrutura desta dissertação

Esta dissertação de mestrado é composta pela seguinte estrutura:

O capítulo 1, que é a introdução geral desta dissertação, apresenta informações de caráter geral como histórico dos sistemas de potência, a motivação para o desenvolvimento desta dissertação, objetivo do trabalho, estrutura técnica e revisão bibliográfica. Inicialmente é mostrada a evolução dos sistemas de potência, tanto em corrente alternada como em contínua, desde os mais simples até os mais complexos existentes atualmente, chegando assim nas grandes interligações e usinas atuais existentes ou em fase de projeto no sistema interligado brasileiro. É analisada também

como a evolução destes sistemas, até as grandes interligações, pode ocasionar no surgimento dos fenômenos da auto-excitação e do curto-circuito capacitivo dos geradores síncronos.

O capítulo 2 apresenta um resumo da teoria e a modelagem matemática das máquinas síncronas considerando os parâmetros operacionais. Esta forma de modelagem é usada para representação da máquina síncrona no programa de estabilidade eletromecânica.

No capítulo 3 é desenvolvida toda teoria sobre o tema principal deste trabalho que é a auto-excitação (AEX) e curto-circuito capacitivo (CCC) que se aplicam nas máquinas síncronas e de indução. São desenvolvidas teorias sobre AEX, CCC e as modelagens matemáticas, nos eixos magnéticos d e q , quando se considera ou não limitações na representação da máquina síncrona para o estudo. Também são determinadas as condições operativas do sistema e da máquina que podem levar a ocorrência destes fenômenos num sistema de potência real. São analisadas também as formas de representação dos elementos da rede nestes tipos de estudo.

O capítulo 4 consta como a principal contribuição desta dissertação para a literatura técnica. Nele são feitas as análises operativas da AEX e do CCC na frequência fundamental (60 Hz), através de simulações digitais de rejeição de carga no programa convencional de estabilidade eletromecânica ANATEM[®] usado no sistema interligado brasileiro. Nos sistemas de transmissão típicos CA e CC, que foram usados como testes, são identificados os fenômenos e estudadas as influências de medidas operativas como inserção de equipamentos shunt, o uso de compensação série da linha, inserção de capacidade de corrente negativa no sistema de excitação, influência do número de máquinas despachadas na usina entre outras no sentido de controlar o crescimento da tensão após uma rejeição de carga. Neste capítulo, também são mostradas algumas conclusões específicas sobre cada análise desenvolvida.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais desta dissertação, tomando como base todas as simulações em conjunto desenvolvidas no capítulo 4 e toda teoria escrita anteriormente nos capítulos 2 e 3. Estas conclusões gerais podem servir como

referência para futuros estudos de rejeição de carga no sistema interligado brasileiro. Também são mostradas, em trabalhos futuros, algumas linhas de pesquisa sobre auto-excitação e curto-circuito capacitivo que podem se tornar outras dissertações de mestrado ou artigos para seminários.

No apêndice desta dissertação são mostradas as condições do sistema em regime permanente, no programa ANAREDE[®], para cada análise efetuada no capítulo 4. Também são mostrados os parâmetros das linhas de transmissão e dos reatores de linha usados no sistema de transmissão em corrente alternada. São colocadas também as características do sistema CC equivalente. Ao final são inseridas tabelas que relacionam os parâmetros do sistema de excitação, assim como dos limitadores de sobre e subexcitação deste controlador.

1.5- Revisão Bibliográfica

A introdução desta dissertação foi desenvolvida principalmente tomando como base os históricos da referência bibliográfica [1]. Também foram escritos alguns conhecimentos práticos do autor desta dissertação sobre o setor elétrico brasileiro.

A teoria desenvolvida sobre máquinas síncronas, aqui nesta dissertação, teve como fonte bibliográfica principal as referências [1, 2, 25, 27 e 31]. Vale ressaltar que outras referências contidas neste trabalho também foram usadas, em menor escala, neste capítulo. As referências [1] e [3] serviram de grande embasamento teórico para o estudo da modelagem de linhas de transmissão, no domínio da frequência fundamental, em corrente alternada e seus efeitos na auto-excitação.

O capítulo sobre auto-excitação e curto-circuito capacitivo foi escrito tomando como base os ensinamentos teóricos intrínsecos às referências [8], [12], [13], [16], [24], [30], [32], [33], [34], [35], [36], [37] e [38] que lidam diretamente com o efeito destes fenômenos nos geradores síncronos.

As simulações de auto-excitação e curto-circuito capacitivo foram feitas usando o programa ANATEM[®] e as referências [12], [26], [28], [30] e [31].

Com a finalidade de mostrar toda base teórica e prática desenvolvida nesta dissertação, o conteúdo das referências bibliográficas aqui usadas será resumido adiante.

MURDOCH e D'ANTONIO [4] tratam das características dos sistemas de excitação e as conseqüências dos ajustes nos parâmetros deste sistema nas respostas da máquina frente a um distúrbio na sua referência de tensão. Este artigo relaciona ajustes no ganho transitório, tetos positivo e negativo de tensão do sistema de excitação com algumas configurações de conexão de um determinado gerador a um sistema de transmissão fraco ou forte através da impedância de transferência dessa rede vista pela máquina. É mostrado também o benefício e o malefício que um ESP (Estabilizador de Sistemas de Potência, em inglês PSS) pode trazer para um sistema de excitação, dependendo do seu ajuste.

ERCEG e ERCEG [5] mostram a possibilidade de aplicação de transistores (IGBT) como conversores, desenvolvidos para aplicação em controles de motores elétricos, em sistemas de excitação estáticos de geradores síncronos. Neste artigo é feita uma comparação básica entre as características de um gerador síncrono, cujo sistema de excitação estático pode ser composto por tiristores ou transistores. Também são mostrados os esquemas de ligação de um sistema de excitação estático considerando tiristores e transistores (IGBT).

SUZUKI *et al.* [6] debatem sobre as relações existentes entre os recentes desenvolvimentos dos sistemas de excitação dos geradores síncronos e o aumento na estabilidade dos sistemas de potência. Com essa finalidade, eles mostram os efeitos dos ajustes de um sistema de excitação e as conseqüências na estabilidade dos sistemas de potência. Este artigo apresenta alguns gráficos que relacionam o comportamento de um gerador síncrono com o tipo de sistema de excitação, assim como a influência do ganho transitório e o ceiling de tensão usados.

SHAO e XU [7] escrevem sobre um método de ajuste dos parâmetros de um sistema de excitação. Esse método leva em consideração basicamente dois passos para o ajuste desses parâmetros. O primeiro passo seria a performance do sistema às grandes perturbações, sendo o padrão de resposta já definido e assim os parâmetros do sistema

de excitação são identificados. Após esse passo, os parâmetros são otimizados através da performance da resposta à pequenos sinais pelo critério do ITAE (a performance do sistema está otimizada quando a integral do produto do tempo com o valor absoluto da função de erro sistema for mínima).

MARQUES *et al.* [8] examinam o desempenho de um sistema em condições operativas extremas, que identificam e caracterizam os fenômenos de auto-excitação e curto-circuito capacitivo. É feita análise da auto-excitação e do curto-circuito capacitivo através do comportamento da reta de Rüdénberg com a linha do entreferro e a característica de saturação em vazio da máquina. São discutidas também medidas corretivas para tais processos apresentados. Ao final são mostradas algumas curvas referentes ao comportamento de um determinado gerador síncrono quando essa máquina é levada à condições operativas extremas.

GUIMARÃES e RANGEL [9] mostram as características relacionadas com a curva de capacidade da máquina síncrona de pólos salientes ou lisos. Neste artigo são descritos os limites operacionais que são considerados no desenvolvimento dessa curva, assim como as influências da tensão terminal da máquina e da característica de saturação intrínseca. Este trabalho também mostra as características das curvas V e de excitação para a máquina de Luiz Carlos Barreto do sistema interligado nacional (SIN).

SHOUZHEN *et al.* [10] relacionam os efeitos dos parâmetros do sistema de excitação nos estudos de estabilidade transitória dos sistemas de potência. É mostrado como a forma de modelagem e os parâmetros dos sistemas de excitação influenciam na estabilidade transitória. Para exemplificar esse trabalho são usadas partes do sistema elétrico da China considerando usinas do norte, leste e nordeste chinês.

No artigo de BÉRUBÉ e HAJAGOS [11] é citada a importância da modelagem e dos testes dos controladores das máquinas, assim como os ajustes dos parâmetros associados a estes. Este artigo associa essa conclusão com a variedade de diferentes geradores e controles que são encontrados num sistema de potência real, e a maneira na qual eles interagem durante condições normais e anormais de operação. Uma tabela especial relaciona a modelagem necessária para um específico estudo num sistema de

potência.

DE MELLO *et al.* [12] mostram como são feitos os estudos para identificação de sobretensões à frequência fundamental, quando da ocorrência de uma rejeição de carga no sistema. São analisadas as formas e a importância das representações de cada equipamento da rede elétrica como o gerador, transformador, linha de transmissão e reatores. É colocada também a diferença de representação do sistema de transmissão, quando a máquina é de pólos salientes ou lisos. Esta representação mais apurada para máquinas de pólos salientes se deve ao fato da maior excursão permitida para tal, o que ocasiona maiores problemas de sobretensão. Ao final são mostradas curvas referentes às repostas de sistema teste para uma rejeição de carga.

DE MELLO, LEUZINGER e MILLS [13] tratam dos efeitos de um sistema de excitação estático com e sem capacidade de corrente negativa, no contexto das rejeições de carga nos grandes sistemas de transmissão de alta voltagem dos geradores síncronos. A necessidade de se ter ou não capacidade de corrente negativa nesses sistemas é explorada junto com o problema de se proteger os equipamentos do sistema contra sobretensões ocasionadas por rejeições de carga. No final deste trabalho são colocadas conclusões a respeito de se ter ou não capacidade de corrente negativa nos sistemas de excitação dos geradores síncronos.

Em GABA, LEFEBVRE, MUKHEDKAR [14] é feita uma análise para estabilidade dinâmica do sistema de potência, considerando a transmissão em corrente contínua e equipamentos estático de controle de potência reativa. Para tal, um sistema composto por uma linha CC é usado para interligar dois grandes sistemas em corrente alternada. Também são usados equipamentos controladores de tensão na rede CA. Este trabalho mostra a interação entre as facilidades de um sistema CC e o uso de equipamentos controladores de potência reativa na transmissão CA.

CONCORDIA [15] relaciona os efeitos que um componente ou uma nova função pode introduzir num sistema de potência, quando inserido no mesmo. Alguns desses efeitos podem ser ruins e depois compensados ou bons que se tornam mais importantes e passam a ser objetivos principais. Dentre os elementos citados são os reguladores de

tensão, regulador de velocidade da máquina, capacitores, interligações e as proteções.

YOUFANG [16] mostra basicamente que o fenômeno de auto-excitação pode ser analisado diretamente através de 4 métodos diretos. Esses métodos são: método de estimação rápida, método de comparação de impedâncias, método do diagrama circular e o método de charging característico. Estes métodos são analisados através de exemplos práticos, que consideram a usina hidrelétrica de Fengman conectada num sistema de transmissão de 220 kV, com 369 km de comprimento e sem carga.

Os artigos escritos, com os seus respectivos autores, cujas referências estão numeradas por [17], [18], [19], [20], [21] e [22], descrevem várias formas de representação, modelagem ou novos métodos para cálculo da saturação das máquinas síncronas, tanto de pólos lisos ou salientes, em ambos os eixos magnéticos da máquina.

A referência [23] descreve como o controle da excitação de uma determinada máquina afeta diretamente o conceito de estabilidade de uma máquina síncrona. Neste artigo os autores analisam o fenômeno da estabilidade nas máquinas síncronas através de modelos linearizados que conectam uma máquina a uma barra infinita através de uma reatância externa, ou seja, são feitos estudos a pequenos sinais. A análise feita desenvolve critérios sobre sistemas de excitação tipo estático com tiristores e estabelece certas afirmações sobre necessidades específicas para se estabilizar tais sistemas. Estes processos englobam parâmetros como o ganho do regulador de tensão, assim como as características da função de transferência que pega o sinal da derivada de velocidade da máquina e o utiliza na referência do regulador de tensão com o intuito de amortecer oscilações da máquina. Várias análises são feitas de forma a mostrar o efeito do amortecimento das oscilações.

HU *et al.* [24] descrevem os limites operativos para um gerador síncrono conectado a um sistema de transmissão cc, considerando a ocorrência da auto-excitação pela conexão dos filtros quando da rejeição de carga neste elo CC. Essa análise é feita considerando um plano P-Q de operação do gerador. Esse plano de operação é delimitado pelos limites operativos de máxima corrente do estator e máxima corrente de excitação. Através desse lugar geométrico, os autores fazem um estudo das condições

nas quais a máquina estará sujeita aos diversos tipos de auto-excitação, assim como mostram o efeito da variação da frequência neste fenômeno. Neste trabalho também está sendo considerada a existência ou não de capacidade de corrente negativa do sistema de excitação. As conseqüências da auto-excitação num gerador síncrono também são debatidas neste artigo.

A referência [25] trata de métodos da análise da margem de estabilidade eletromecânica de um sistema elétrico frente à uma perturbação. Este trabalho propõe uma metodologia fundamentada no conceito de equivalência entre um sistema multimáquinas e um sistema máquina x barra infinita.

A referência [26] cita o Operador Nacional do Sistema Interligado. Na página eletrônica referente está a base de dados dos estudos de estabilidade eletromecânica, assim como informações técnicas sobre o Sistema Elétrico Brasileiro.

A referência [27] trata dos fatores e representações que devem ser levados em consideração num programa de simulação dinâmica de sistemas elétricos de potência, quando o foco principal do estudo são os fenômenos existentes de longa duração.

A referência [28] é um documento importante para a realização de estudos de estabilidade eletromecânica. Nele estão contidos modelos BUILT-IN de geradores e controladores que são amplamente usados nos estudos de estabilidade.

A referência [29] descreve a modelagem dos tipos de sistemas de excitação que são usados atualmente nos estudos de estabilidade eletromecânica. Este trabalho também detalha cada elemento de um diagrama de blocos de modo que o usuário tenha bastantes informações a respeito desta modelagem. São fornecidos alguns valores como exemplo para os parâmetros contidos nos diagramas modelados.

A referência [30] é um material do curso Siemens-PTI que faz uma abordagem avançada na teoria e na prática sobre aspectos de estabilidade eletromecânica dos sistemas elétricos de potência.

ERMIS *et al.* [33] fazem um estudo sobre o fenômeno da auto-excitação em motores de indução que estão conectados permanentemente a capacitores nos seus terminais. A análise deste fenômeno é feita considerando alguns circuitos equivalentes mais simplificados em conjunto com modelos matemáticos híbridos que consideram os eixos ABC/dq, respectivamente em regime permanente e transitório. Neste artigo, para a realização deste estudo, são consideradas condições anormais de operação, nas quais a água que flui dentro da tubulação aciona o motor na direção reversa em velocidades maiores que a síncrona, quando há interrupção do fornecimento em conjunto com a falha da válvula de verificação de tais condições. Tais condições em conjunto podem levar o motor de indução a operar em auto-excitação.

FILHO *et al.* [34] fazem uma análise de uma “isolação forçada”, que é traduzida como uma repentina desconexão do sistema de corrente alternada em relação a estação conversora de São Roque 345 kV, que resulta em configurações extremamente problemáticas considerando síncronos (máquina) x filtros (carga capacitiva) e ainda bloco de potência ativa (MW) x síncronos (máquina). Neste caso, a análise da primeira configuração (máquina x carga capacitiva) sugere de imediato a possível ocorrência do fenômeno de auto-excitação, sendo esta ocorrência uma função direta da capacidade de absorção dos síncronos e do valor da carga capacitiva remanescente. Foi objetivo deste estudo, também, constatar este fato e determinar a partir de qual configuração de rede ele se apresenta. Ainda nesta linha de atuação, uma segunda etapa do estudo foi a verificação das conseqüências práticas deste fenômeno, explicitando que o crescimento indefinido de tensões sugerido no programa de estabilidade não é realístico, uma vez que estas tensões seriam amortecidas pelo efeito das saturações magnéticas e contidas ao nível de proteção dos pára-raios de óxido de zinco.

Em MOHAMED, SWIFT [35] é introduzida uma nova forma de reconhecimento baseada num algoritmo que faz um prognóstico das sobretensões dos sistemas de potência associadas a rejeição de carga. Usando simulações digitais são criadas rotinas para várias condições de carga do sistema. Como forma de identificar condições inseguras de operação foi criado um plano discriminante que identifica essas condições adversas. Foi desenvolvido também um algoritmo, baseado na análise de sensibilidade, para que o operador de um determinado sistema de potência possa tomar ações

apropriadas em tempos hábeis.

LOUIE *et al.* [36] mostram que a análise harmônica num sistema de potência de CCAT é essencial na fase de planejamento, controle e operação. É colocado também que os dois meios matemáticos principais para o estudo deste fenômeno são as análises no domínio do tempo e da frequência. Assim, o artigo trabalha nestes dois métodos citados para a análise harmônica nos sistemas de potência com CCAT. Também são mostradas as vantagens e desvantagens associadas a cada método descrito e as aplicações em modelos computacionais para estudos de análise harmônica.

GILSIG [37] mostra que um simples tipo de filtro de conexão trifásica pode reduzir significativamente as perdas para aplicação em alta potência, desconsiderando ajustes automáticos. É mostrado também que as perdas de potência na frequência fundamental podem, em alguns casos, ser limitadas com filtros formados por associação de indutores e capacitores. São derivadas as equações de desempenho dos filtros na frequência fundamental e na operação de ressonância. Também são mostrados exemplos a respeito deste tratamento.

A referência [38] é um material do curso de mestrado do programa de engenharia elétrica da COPPE/UFRJ, em particular as matérias de modelagem matemática de máquinas elétricas e dinâmica de curto-prazo. São abordados temas referidos a modelagem de máquinas elétricas e todos os pontos que são importantes e que devem ser levados em consideração nos estudos referentes à estabilidade eletromecânica de um sistema de potência.

2-MÁQUINAS SÍNCRONAS

2.1- Conceitos de Máquinas Síncronas

Toda teoria e modelagem desenvolvidas aqui terão como foco os geradores síncronos, pois o intuito desta dissertação é fazer uma análise teórica e prática de auto-excitação e do curto-circuito capacitivo neste tipo de máquina. Apesar do foco principal desta dissertação ser os geradores síncronos, este fato não exclui os outros tipos de máquinas citados da ocorrência de auto-excitação e/ou curto-circuito capacitivo, muito pelo contrário, podendo ser objeto de análise de um outro curso de mestrado.

Os geradores síncronos, na grande maioria dos sistemas de potência, são a principal fonte de energia elétrica, sejam eles com características construtivas de pólos lisos ou salientes. Os compensadores síncronos, na verdade, são amplos motores usados como fonte de potência reativa para o sistema de transmissão. No segmento carga, esses motores manipulam ou participam de grandes linhas industriais para fabricação de bens ou até mesmo para correção do fator de potência de grandes instalações.

A operação apropriada de um sistema de potência CA depende basicamente da capacidade das máquinas síncronas manterem o sincronismo quando submetidas a condições transitórias criadas por pequenos ou grandes distúrbios na rede de transmissão. A análise transitória destas máquinas síncronas envolve fenômenos elétricos, que relacionam fluxos e correntes assim como mecânicos, que descrevem o comportamento das variações da velocidade do eixo e do ângulo do rotor. Essas variações podem ser descritas como função do desequilíbrio existente entre as potências elétrica e mecânica numa determinada máquina. O comportamento transitório apresentado é de vital importância para o estudo da auto-excitação, visto que a velocidade do rotor (frequência), e as grandezas de fluxo e corrente, influenciam drasticamente para este acontecimento.

Conforme citado acima, para um bom funcionamento do sistema, as máquinas síncronas devem permanecer em sincronismo, ou seja, manter a estabilidade quando submetidas a condições transitórias geradas por distúrbios na rede. A estabilidade é a

condição de equilíbrio entre forças de oposição. As máquinas de um sistema interligado conseguem se manter estáveis através de forças restauradoras que agem sempre que ocorre uma tendência de aceleração ou desaceleração em uma ou mais máquinas em relação às outras.

A característica da perda de sincronismo, que pode ocorrer entre uma máquina e o resto do sistema ou entre um grupo de máquinas, é a rotação do rotor que pode estar em baixa ou alta velocidade em relação a normal, para as tensões na frequência nominal do sistema. Esse desvio de velocidade entre o campo do rotor e o campo rotacionário do estator (frequência do sistema) é chamado de “slip” e pode resultar em grandes flutuações na potência elétrica, corrente e tensão da máquina.

2.2- Representação das máquinas

Os atuais estudos de estabilidade eletromecânica não levam mais em consideração apenas a análise num pequeno período de tempo, conforme era feito antigamente. Nos dias atuais, se analisa tanto a manutenção do sincronismo quanto o amortecimento que o sistema apresenta. Os reguladores de tensão passaram a ter respostas mais rápidas e, com o advento computacional, as máquinas começaram a ser representadas por modelos com parâmetros operacionais no domínio da frequência (s).

Esta maneira de representação das máquinas síncronas, através dos seus parâmetros operacionais no domínio da frequência, permite descrever o seu comportamento através de testes adequados a partir dos seus terminais.

Mesmo com todo avanço computacional nos dias atuais, algumas simplificações ainda são usadas de modo a acoplar as características de operação da máquina com facilidades de representação matemática que não introduzem significativos erros nos resultados finais. Nesta representação é usado o modelo de Park completo da máquina síncrona, no qual são considerados os respectivos enrolamentos para cada eixo magnético.

As simplificações usadas na modelagem das máquinas, para os estudos de

estabilidade eletromecânica, dizem respeito a:

- Os termos derivativos temporais, $\frac{d}{dt}(\lambda_d, \lambda_q)$, são desprezados pelo fato de serem bem menores que os termos de velocidade quando a falta acontece distante das máquinas. Quando as faltas são dadas no barramento da máquina acaba sendo introduzido um grande erro no cálculo;
- Há somente corrente de seqüência positiva no estator. As seqüências zero e negativa são representadas através do valor da impedância de defeito ($Z^{(2)}$ e $Z^{(0)}$) na seqüência positiva;
- O valor de ω_r é assumido como sendo igual a 1 p.u nas equações elétricas, significando que a velocidade não varia muito ao longo da simulação;
- A ação dos reguladores de tensão é considerada bem mais rápida.

A hipótese considerada, na qual ω_r é assumido como sendo igual a 1 pu nas equações, é utilizada para facilitar o desenvolvimento das equações operacionais da máquina. Em um estudo de estabilidade eletromecânica, que é a principal finalidade do programa ANATEM[®], a velocidade das máquinas não varia muito ao longo da simulação, portanto esta consideração não introduz grandes erros nos resultados obtidos. Nos estudos de rejeição de carga à frequência fundamental do sistema interligado brasileiro, que utiliza o mesmo programa, a variação da frequência pode ser grande, dependendo do sistema estudado. No programa utilizado, ANATEM[®], a correção dos parâmetros da máquina com a velocidade é feita internamente ao longo das simulações digitais com a opção **corrfreq (sim)** no modelo da máquina.

Como ponto inicial desta modelagem será considerado uma máquina síncrona cujo rotor é composto por um enrolamento de campo e um amortecedor no eixo d e dois enrolamentos amortecedores no eixo q. Será assumido também que todas as indutâncias de eixo d são iguais, ou seja, que $L_{fld} = L_{ad}$. O modelo estrutural dessa máquina, que é considerado nos estudos de estabilidade e amplamente usado nos programas mais conhecidos, será representado através dos circuitos mostrados na Figura 3 e na Figura 4.

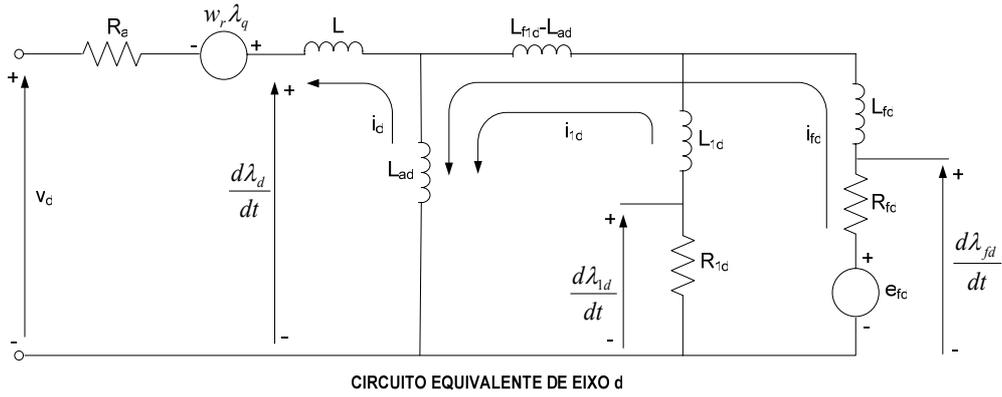


Figura 3- Circuito magnético equivalente para o eixo d

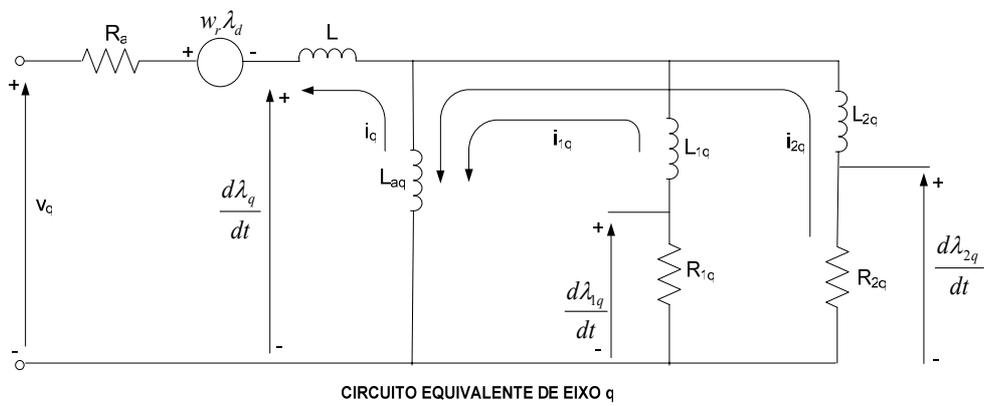


Figura 4- Circuito magnético equivalente para o eixo q

Nas formas operacionais, que serão analisadas deste ponto em diante, os fluxos serão representados através das equações (2.1), (2.2) e (2.3) que usam o operador s em pu normalizado com a velocidade em rad/s. Assim, as equações relacionadas para o eixo d são:

$$\lambda_d(s) = -L_d i_d(s) + L_{ad} i_{fd}(s) + L_{ad} i_{1d}(s) \quad (2.1)$$

$$\lambda_{fd} = -L_{ad} i_d(s) + L_{ffd} i_{fd}(s) + L_{ad} i_{1d}(s) \quad (2.2)$$

$$\lambda_{1d}(s) = -L_{ad} i_d(s) + L_{ad} i_{fd}(s) + L_{11d} i_{1d}(s) \quad (2.3)$$

As equações do rotor também podem ser representadas por:

$$e_{fd}(s) = s \lambda_{fd}(s) - \lambda_{fd}(0) + R_{fd} i_{fd}(s) \quad (2.4)$$

$$0 = s\lambda_{1d}(s) - \lambda_{1d}(0) + R_{1d}i_{1d}(s) \quad (2.5)$$

Para uma melhor compreensão do equacionamento, se torna viável a representação das equações em termos de pequenos desvios em relação aos valores iniciais. Esta consideração permite que os termos representativos dos valores iniciais possam ser eliminados do processo. Desta maneira, as equações rotóricas podem ser expressas através dos seguintes valores incrementais:

$$\Delta e_{fd}(s) = s\Delta\lambda_{fd}(s) + R_{fd}\Delta i_{fd}(s) \quad (2.6)$$

$$\Delta e_{fd} = -sL_{ad}\Delta i_d(s) + (R_{fd} + sL_{ffd})\Delta i_{fd}(s) + sL_{ad}\Delta i_{1d}(s) \quad (2.7)$$

$$0 = s\Delta\lambda_{1d}(s) + R_{1d}\Delta i_{fd}(s) \quad (2.8)$$

$$0 = -sL_{ad}\Delta i_d(s) + sL_{ad}\Delta i_{fd}(s) + (R_{1d} + sL_{11d})\Delta i_{1d}(s) \quad (2.9)$$

Através da aplicação de alguns procedimentos matemáticos, os termos de correntes do campo e do enrolamento amortecedor, para o eixo d, podem ser determinados de forma a serem acopladas nas variáveis de fluxo. Assim:

$$\Delta i_{fd}(s) = \frac{[(R_{1d} + sL_{11d})\Delta e_{fd}(s) + sL_{ad}(R_{1d} + sL_{1d})\Delta i_d(s)]}{s^2(L_{11d}L_{ffd} - L_{ad}^2) + s(L_{11d}R_{fd} + L_{ffd}R_{1d}) + R_{1d}R_{fd}} \quad (2.10)$$

$$\Delta i_{1d}(s) = \frac{[-sL_{ad}\Delta e_{fd}(s) + sL_{ad}(R_{fd} + sL_{fd})\Delta i_d(s)]}{s^2(L_{11d}L_{ffd} - L_{ad}^2) + s(L_{11d}R_{fd} + L_{ffd}R_{1d}) + R_{1d}R_{fd}} \quad (2.11)$$

Introduzindo o equacionamento de i_{fd} e i_{1d} nos termos do fluxo de enlace do eixo d (λ_d), chega-se a uma relação que engloba essa variável de saída com grandezas que podem ser mensuráveis na máquina. Dessa forma, o enlace de fluxo de eixo d passa a ser dado por:

$$\lambda_d(s) = G_1(s)\Delta e_{fd}(s) - G_2(s)\Delta i_d(s) \quad (2.12)$$

Onde

$$G_1(s) = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} \frac{(1 + sT_{kd})}{1 + s(T_1 + T_2) + s^2 T_1 T_3} \quad (2.13)$$

$$G_2(s) = L_d(s) = L_d \frac{1 + (T_4 + T_5)s + T_4 T_6 s^2}{1 + s(T_1 + T_2) + s^2 T_1 T_3} \quad (2.14)$$

Estas equações que descrevem completamente o desempenho dinâmico das máquinas síncronas são usadas para representação nos estudos atuais de estabilidade através de simulações digitais. A referência [1] mostra mais detalhadamente cada passo de todo processo desenvolvido.

O fluxo de enlace de eixo q, no domínio de Laplace, pode ser obtido através das equações (2.15) e (2.16). Desta maneira, este fluxo pode ser dado por:

$$\lambda_q(s) = -G_3(s)I_q(s) \quad (2.15)$$

$$G_3(s) = L_q(s) = L_q \frac{(1 + sT'_q)(1 + sT''_q)}{(1 + sT'_{q0})(1 + sT''_{q0})} \quad (2.16)$$

As equações (2.13) e (2.14) também podem ser escritas na forma fatorada, onde os seus termos são representados através das constantes de tempo transitórias e subtransitórias da máquina. Desta maneira, as expressões citadas podem ser dadas por:

$$G_1(s) = \frac{L_{ad}}{R_{fd}} \frac{(1 + sT_{kd})}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \quad (2.17)$$

$$G_2(s) = L_d(s) = L_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{d0})(1 + sT''_{d0})} \quad (2.18)$$

Os parâmetros operacionais apresentam algum significado físico no que diz respeito à máquina. O termo $G_1(s)$, por exemplo, representa uma função de transferência entre o estator e o campo da máquina. As indutâncias operacionais $L_d(s)$ e $L_q(s)$ representam uma conexão entre os fluxos dos eixos d e q com as suas respectivas correntes. A figura abaixo mostra esses parâmetros e suas devidas relações.

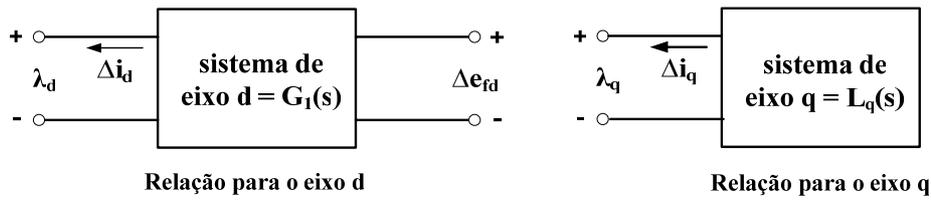


Figura 5- Relações físicas entre os parâmetros operacionais da máquina

As constantes de tempo T'_{do} , T''_{do} , T'_d e T''_d são as principais constantes de eixo d da máquina. Elas fornecem as características de resposta da máquina frente a um curto-circuito nos seus terminais. Os parâmetros subtransitórios representam as componentes que decaem rapidamente. Os transitórios apresentam características mais lentas. Os parâmetros que influenciam continuamente são chamados de síncronos. Essas constantes são obtidas através de ensaios de circuito aberto ou curto-circuito nos terminais da máquina.

Os valores de indutância transitória, sub-transitória e síncrona podem ser obtidos através da análise da equação (2.18). Como toda análise está sendo feita no domínio da frequência, logo após a aplicação de um distúrbio, a mesma tende para o infinito. Assim, o valor de L_d , nessas condições, é chamado de indutância subtransitória e é dado por:

$$L_{d(s \rightarrow \infty)} = L_d'' = L_d \left(\frac{T_d' T_d''}{T_{do}' T_{do}''} \right) \quad (2.19)$$

Onde esse termo representa a relação $\frac{\Delta \lambda_d}{\Delta i_d}$ logo após a aplicação do distúrbio.

Assumindo que no período transitório, $R_{1d} = R_{2q} = \infty$, não há atuação de enrolamentos amortecedores da máquina. Assim, o valor da indutância transitória de eixo direto pode ser dado por:

$$L_{d(s \rightarrow \infty)} = L_d' = L_d \left(\frac{T_d'}{T_{do}'} \right) \quad (2.20)$$

Nas condições de regime permanente, quando a frequência do sistema já não varia, essa simplificação pode ser levada em conta segundo o teorema do valor final. O valor da indutância síncrona pode ser dado por:

$$L_{d(s \rightarrow 0)} = L_d \quad (2.21)$$

As indutâncias sub-transitórias, transitórias e síncronas de eixo q podem ser determinadas pelo método de inspeção direta do eixo d e fazendo as devidas correspondências nos parâmetros de eixo q a partir da equação (2.16). Os respectivos valores das indutâncias são dados por:

- Indutância sub-transitória de eixo q;

$$L_{q(s \rightarrow \infty)} = L_q'' = L_q \left(\frac{T_q' T_q''}{T_{qo}' T_{qo}''} \right) \quad (2.22)$$

- Indutância transitória de eixo q;

$$L_{q(s \rightarrow \infty)} = L_q' = L_q \left(\frac{T_q'}{T_{qo}'} \right) \quad (2.23)$$

- Indutância síncrona de eixo q;

$$L_{q(s \rightarrow 0)} = L_q \quad (2.24)$$

Deduzidas as expressões sobre as indutâncias dos eixos, a Tabela 1 mostra as equações ligadas a cada parâmetro citado.

Tabela 1- Equacionamento completo dos parâmetros operacionais

<i>Parâmetro</i>	<i>Equação mais comum</i>	<i>Equação completa</i>
T'_{do}	T_1	$T_1 + T_2$
T'_d	T_4	$T_4 + T_5$
T''_{do}	T_3	$T_3 \left(\frac{T_1}{T_1 + T_2} \right)$
T''_d	T_6	$T_6 \left(\frac{T_4}{T_4 + T_5} \right)$
L'_d	$L_d \left(\frac{T_4}{T_1} \right)$	$L_d \frac{(T_4 + T_5)}{(T_1 + T_2)}$
L''_d	$L_d \frac{(T_4 \cdot T_6)}{(T_1 \cdot T_3)}$	$L_d \frac{(T_4 \cdot T_6)}{(T_1 \cdot T_3)}$

Tabela 2- Expressões associadas ao equacionamento dos parâmetros operacionais

EXPRESSÕES ASSOCIADAS	
$T_1 = \frac{L_{ad} + L_{fd}}{R_{fd}}$	$T_2 = \frac{L_{ad} + L_{ld}}{R_{ld}}$
$T_3 = \frac{1}{R_{ld}} \left(L_{ld} + \frac{L_{ad} \cdot L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}} \right)$	$T_4 = \frac{1}{R_{fd}} \left(L_{fd} + \frac{L_{ad} \cdot L_l}{L_{ad} + L_l} \right)$
$T_5 = \frac{1}{R_{ld}} \left(L_{ld} + \frac{L_{ad} \cdot L_l}{L_{ad} + L_l} \right)$	$T_6 = \frac{1}{R_{ld}} \left(L_{ld} + \frac{L_{ad} \cdot L_l \cdot L_{fd}}{L_{ad} \cdot L_l + L_{ad} \cdot L_{fd} + L_{fd} \cdot L_l} \right)$

Formas mais detalhadas dessas equações, em termos de indutâncias próprias, mútuas e de dispersão da máquina, podem ser vistas em [1].

Conforme descrito em [1] todo equacionamento citado até aqui foi feito considerando 2 circuitos de rotor em cada eixo, sendo 1 enrolamento amortecedor e campo para o eixo d e 2 enrolamentos amortecedores para o eixo q. Essa estrutura é aplicável somente nas máquinas de pólos lisos. Nas máquinas de pólos salientes, segundo a teoria, o eixo q é somente representado por um enrolamento amortecedor. Como característica desse tipo de máquina, os parâmetros relacionados a esse

enrolamento do rotor são tais que representam o decaimento rápido dos efeitos subtransitórios. O segundo enrolamento do rotor é desprezado e nenhuma distinção entre os regimes transitório e síncrono é feita. Dessa forma, os parâmetros transitórios de eixo q não são representados quando é considerada uma máquina de pólos salientes.

As expressões anteriormente desenvolvidas para o eixo d, como no caso das máquinas de pólos salientes, ainda são representadas por dois enrolamentos (campo e amortecedor) e podem ser perfeitamente usadas aqui.

Uma forma de visualizar o comportamento dos parâmetros da máquina síncrona, seja ela de pólos salientes ou lisos, é a sua resposta de frequência. Esta característica, que é analisada através do diagrama de bode, pode relacionar o comportamento de $L_d(s)$, $L_q(s)$ e de $G(s)$. Este diagrama pode fornecer informações sobre as características dinâmicas da máquina, e como já sabido pela teoria de controle pode ser estudado através de aproximações assintóticas.

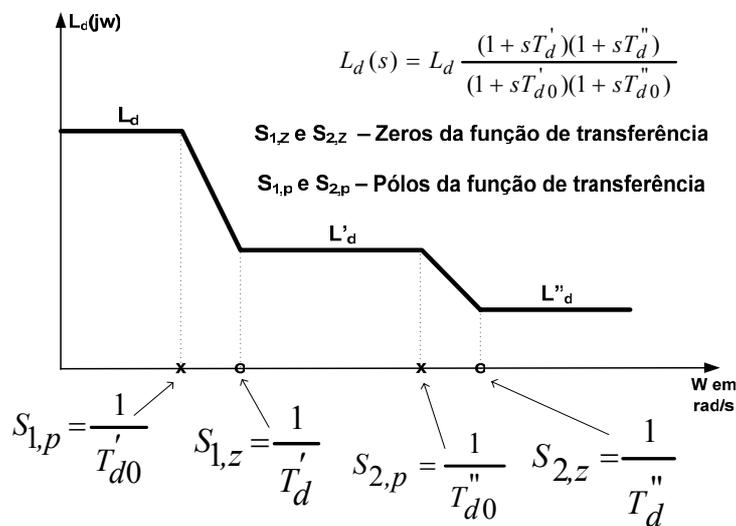


Figura 6- Resposta de frequência para a indutância de eixo d

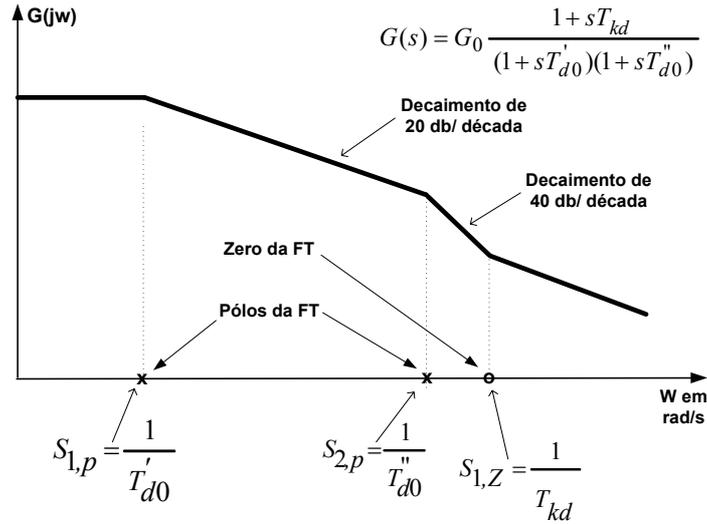


Figura 7- Resposta de freqüência para o parâmetro operacional G(s)

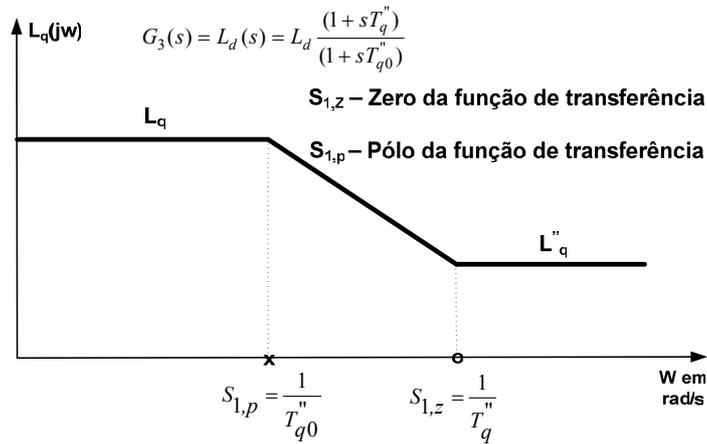


Figura 8- Resposta de freqüência para $L_q(s)$ na máquina de pólos salientes

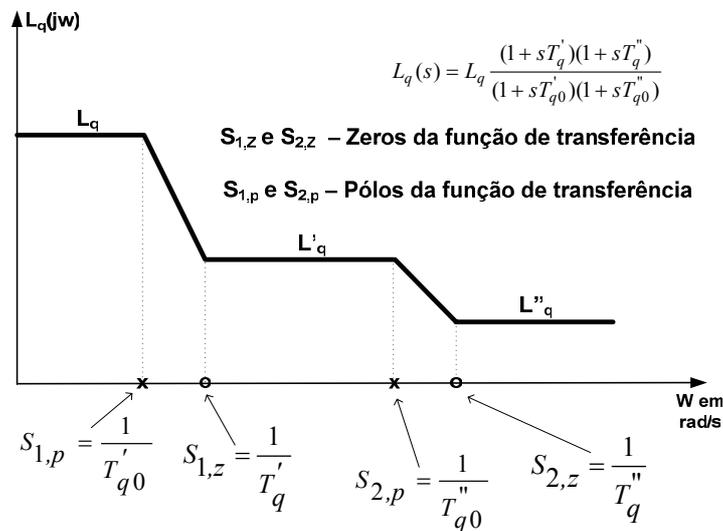


Figura 9- Resposta de freqüência para $L_q(s)$ na máquina de pólos lisos

As figuras acima mostram o comportamento destas indutâncias que servem tanto para as máquinas de pólos lisos ou salientes. Somente na Figura 8 e na Figura 9 que a resposta deve ser explicitada, pelo fato da existência de somente um enrolamento amortecedor de eixo q nas máquinas de pólos salientes. Por este motivo são mostrados dois gráficos que dizem respeito a $L_q(s)$.

Na base de dados de um determinado estudo é comum que os parâmetros da máquina sejam dados em reatâncias em vez de indutâncias. Essa forma torna mais fácil a representação da máquina em comparação com as indutâncias que são mais difíceis de serem determinadas. Em pu, as reatâncias transitórias, subtransitórias e de regime permanente são iguais às suas respectivas indutâncias. Isto se deve ao fato de que a velocidade da máquina, nas equações elétricas, é considerada como sendo igual a 1 pu nos estudos de estabilidade eletromecânica. As relações entre as reatâncias e as constantes de tempo de uma máquina síncrona podem ser descritas por:

$$\checkmark X_d \geq X_q > X'_q \geq X'_d > X''_q \geq X''_d;$$

$$\checkmark T'_{d0} > T'_d > T''_{d0} > T''_d > T_{kd};$$

$$\checkmark T'_{q0} > T'_q > T''_{q0} > T''_d > T''_q.$$

As máquinas de pólos lisos e salientes possuem algumas faixas de valores típicos nos quais os parâmetros citados acima geralmente se encaixam. Esses valores são extrapolados apenas quando uma determinada característica especial de projeto é requerida ao fabricante para adequação ao sistema. A Tabela 3 mostra alguns destes valores usados pelos projetistas.

Tabela 3- Faixas para os valores dos parâmetros dos geradores

Parâmetros		Geradores Hidráulicos	Geradores Térmicos
Reatância Subtransitória	X''_d	0,15 - 0,35	0,12 – 0,25
	X''_q	0,20 - 0,45	0,12 – 0,25
Reatância Transitória	X'_d	0,20 - 0,50	0,15 – 0,40
	X'_q	-	0,30 – 1,00
Reatância Síncrona	X_d	0,60 - 1,5	1,00 – 2,30
	X_q	0,4 - 1,0	1,00 – 2,30
Constante de Tempo Subtransitória de Circuito Aberto	T''_{d0}	0,01 - 0,05 s	0,02 – 0,05 s
	T''_{q0}	0,01 - 0,09 s	0,02– 0,05 s
Constante de Tempo Transitória de Circuito Aberto	T'_{d0}	1,5 - 9,0 s	3,00 – 10,00 s
	T'_{q0}	-	0,5 – 2,0 s
Indutância de Dispersão do Estator	X_l	0,1 - 0,2	0,1 – 0,2
Resistência do Estator	R_a	0,002 - 0,02	0,0015 – 0,005

Os parâmetros da máquina síncrona podem ser determinados através de vários métodos, sendo cada um com seu procedimento operativo e particularidade. Como não fazem parte do escopo desse trabalho, esses testes, assim como as suas limitações, podem ser vistos mais detalhadamente em [1].

2.3- Sistemas de excitação

2.3.1- Teoria

Uma máquina síncrona tem dois elementos essenciais: o campo e a armadura.

Normalmente, o campo faz parte do rotor (parte rotativa) e a armadura é um elemento que está inserido no estator (parte estática). Os enrolamentos de campo de uma máquina são alimentados por um sistema de excitação em corrente contínua.

A função básica do sistema de excitação é fornecer corrente contínua aos enrolamentos de campo da máquina e de regular a tensão terminal ou a potência reativa. O sistema de excitação deve manter a tensão terminal do gerador constante, ajustando a corrente de campo e mantendo a máquina na região interna dos seus limites de capacidade. Esse sistema é formado por estágios de amplificação e condicionamento do sinal de erro da tensão, através do regulador de tensão, e amplificação da potência através da excitatriz. Também fazem parte deste sistema os limitadores de excitação e os controles suplementares como estabilizadores de sistemas de potência (do inglês, PSS). O diagrama de blocos esquemático da Figura 10[1] apresenta os componentes de um sistema de excitação com seus elementos.

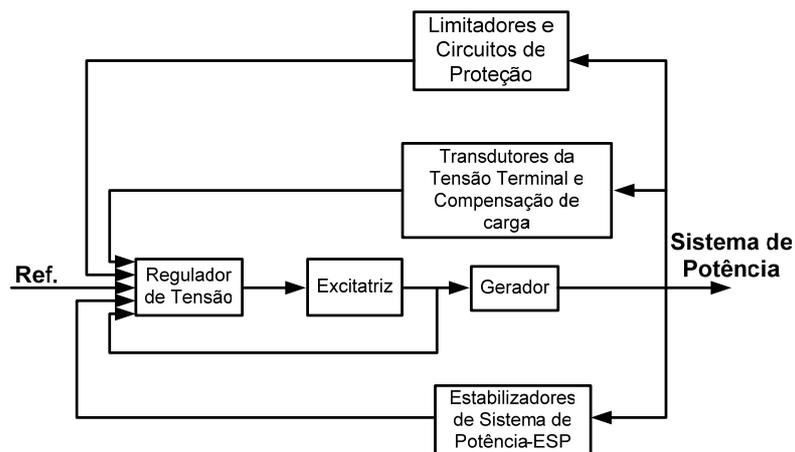


Figura 10- Diagrama de blocos para um sistema de excitação

A seguir será feita uma breve descrição sobre cada componente apresentado na Figura 10.

- ❖ Excitatriz – Fornece a potência CC para os enrolamentos de campo da máquina síncrona e constitui o estágio de potência do sistema de excitação;
- ❖ Regulador de Tensão – Processa e amplifica os sinais de entrada para

um nível e formato apropriado para o controle da excitatriz. Essa função inclui regular o sistema de excitação;

- ❖ Transdutores da Tensão Terminal e Compensação de Carga – Faz a leitura da tensão terminal, retifica e filtra para uma quantidade CC e compara esse valor com uma tensão terminal desejada (referência). O Compensador de Carga (Line Drop Compensator) é usado para controlar a tensão em um ponto eletricamente remoto da barra terminal do gerador, podendo ser um ponto interno do transformador elevador;
- ❖ Estabilizadores de Sistemas de Potência – Fornece sinal adicional ao regulador de tensão para amortecimento de oscilações eletromecânicas, introduzindo amortecimento adicional ao sistema;
- ❖ Limitadores e circuitos de proteção – Inclui ampla variedade de controle e funções de proteção que garantem a operação dentro dos limites de capacidade da excitatriz e do gerador síncrono. Esses limitadores têm como finalidade proteger a máquina contra pontos de operação que estejam fora de sua capacidade, ou seja, para condições de sobre-excitação ou sub-excitação.

O controle exercido por esse sistema atua na tensão de campo da máquina e conseqüentemente no ajuste da corrente de campo. Adicionalmente, através dessas características, o sistema de excitação deve contribuir para a melhoria da estabilidade transitória do sistema de potência através da modulação da tensão interna.

Uma característica de projeto, para um determinado sistema de excitação estático, é a capacidade ou não de se ter corrente negativa pela ponte retificadora. A diferença construtiva entre essas duas configurações pode ser visualizada na Figura 11 e na Figura 12. Na Figura 11 é mostrada uma ponte de retificação unidirecional, enquanto que na Figura 12 é visualizada o sistema com duas pontes retificadoras conectadas com polaridades reversas de modo a permitir corrente de campo em ambas as direções de condução.

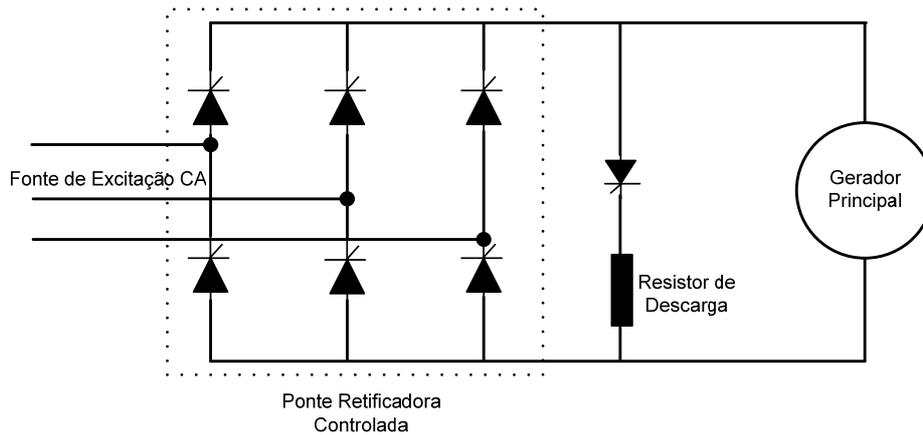


Figura 11- Esquema simplificado de uma ponte retificadora unidirecional

Considerando o tipo de ponte unidirecional, os tiristores são normalmente alimentados por pulsos de disparos que fazem este semicondutor conduzir uma tensão positiva de campo e também corrente positiva.

Durante condições transitórias do sistema, ou até mesmo no caso de uma auto-excitação, nas quais a tensão terminal tende a ter uma derivada muito positiva, os pulsos de disparo dos tiristores podem ser alterados para regime inverso de forma a inverter a tensão de campo, E_{fd} , mas mantendo a corrente com valores positivos. Esta tendência de tensão negativa pode reduzir a corrente de campo rapidamente, mas ainda não permite corrente de campo negativa. Neste caso, a ponte geralmente é protegida por um tiristor de by-pass reverso que é chaveado por um circuito (crowbar) sempre que a corrente de campo se anular, interrompendo o fluxo na ponte e no campo, produzindo assim uma sobretensão nos terminais da ponte, que é atenuada pela inserção de um resistor em série que controla essa corrente.

Um valor típico para esse resistor é de cinco vezes a resistência do campo, r_{fd} , que muda o valor da constante de tempo de descarga dos enrolamentos de campo para um quinto da constante de tempo natural, T_{d0} de circuito aberto desses enrolamentos. Vale ressaltar que a inserção desse circuito de crowbar para segurar essa corrente representa um impacto muito grande no sistema de excitação da máquina.

A Figura 12 mostra o esquema de um sistema de excitação no qual duas pontes retificadoras são conectadas com polaridades reversas para assim, permitirem corrente de campo nas direções direta e reversa. Somente uma das pontes permanece em serviço,

recebendo pulsos de disparo por vez, e o tempo desses pulsos é que permite a tensão de campo ser positiva ou negativa, não importando o sentido da corrente de campo.

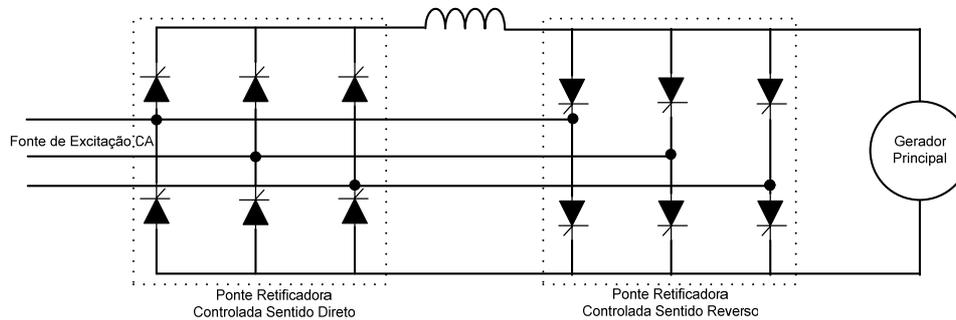


Figura 12- Esquema simplificado de uma ponte retificadora bidirecional

Na Figura 12, que representa uma ponte bidirecional, é mostrado um reator entre as duas pontes, cuja finalidade é somente limitar a corrente de curto quando as duas pontes, direta e reversa, estão momentaneamente em operação quando a corrente tende a ficar negativa.

Este arranjo, que apresenta um custo mais alto e é menos comum em comparação com a ponte unidirecional, é normalmente usado em hidrogeradores que estão conectados a um sistema através de grandes troncos radiais de transmissão e que estão sujeitos à ocorrência do fenômeno da auto-excitação quando esse sistema de transmissão é aberto no terminal receptor.

2.3.2- Reguladores de Tensão

O regulador de tensão, nos sistemas de excitação, forma a realimentação de controle entre o gerador principal e os elementos que controlam a excitação do gerador. Esse equipamento normalmente é formado por componentes que requerem baixos níveis de potência. Em sistemas mais antigos eles são eletromecânicos ou amplificadores magnéticos, enquanto que nos mais modernos são totalmente eletrônicos.

O princípio básico do regulador de tensão é manter a tensão terminal do gerador síncrono num nível operativo aceitável e essa função é exercida respondendo ao erro que é apresentado na entrada do equipamento em relação a uma referência.

O ganho de regime do regulador de tensão deve ter valor alto para que o erro de tensão em regime permanente possa ser o menor possível. Em compensação, altos valores não podem ser utilizados em condições transitórias, pois poderia levar o sistema à instabilidade. Assim, uma prática comum é projetar os reguladores de tensão com altos ganhos de regime permanente e relativos ganhos baixos durante condições transitórias. O ajuste desses ganhos deve ser feito analisando essas duas situações operativas, através da análise a pequenos sinais e simulações no tempo. O comportamento ideal, para o ganho do regulador de tensão, seria conforme mostrado na plotagem do diagrama de Bode da Figura 13.

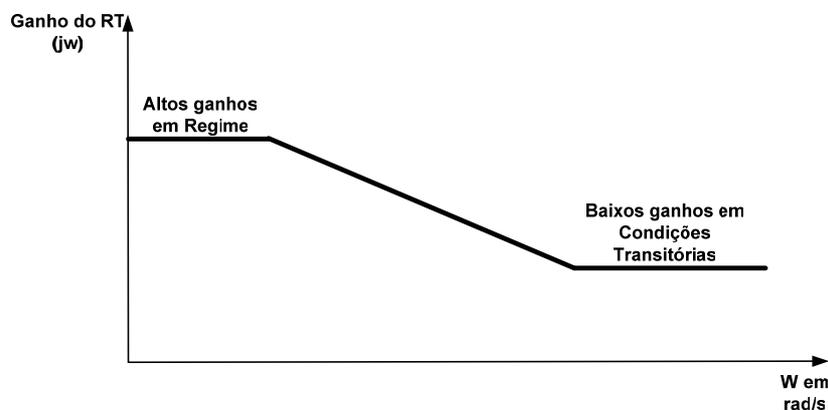


Figura 13- Comportamento ideal para o ganho do regulador de tensão

A redução desse ganho pode ser obtida através de diferentes formas ou caminhos que podem depender da importância do sistema de excitação. Muitos dos modernos sistemas de retificadores controlados ajustam o formato das suas funções de transferência por completo dentro do regulador de tensão através da seguinte forma.

$$G(s) = A \cdot \frac{(1 + sT_1)}{(1 + sT_2)} \quad (2.25)$$

A função de transferência representada em (2.25) fornece o ganho de regime permanente como sendo A e o ganho de regime transitório como sendo $A \frac{T_1}{T_2}$. Em sistemas antigos ou reguladores com elementos magnéticos, muito mais que eletrônicos, usualmente reduzem o seu ganho transitório através de arranjo de realimentação, usando mudanças na tensão de campo.

O ganho transitório do sistema de excitação tem impacto direto na estabilidade a pequenos sinais e na estabilidade dinâmica. Com o desenvolvimento dos modelos computacionais foi permitido aos projetistas refletirem sobre o valor do ganho transitório a ser adequado na especificação do projeto. Modelos ajustados com baixo ganho podem apresentar respostas não adequadas. Por outro lado, ganhos altos podem levar a instabilidades dinâmicas se o sistema se tornar fraco, tais como durante contingências.

Assim, o benefício dos estabilizadores de sistemas de potência (PSS) é contribuir para o amortecimento das oscilações eletromecânicas que apareçam no sistema. Esse equipamento deve amortecer essas oscilações geradas pelo regulador de tensão, quando este atua no sentido de manter a estabilidade transitória do sistema.

O teto máximo do campo que é utilizado durante uma condição faltosa e num nível de carga determina se a unidade geradora tem a capacidade de se manter em sincronismo. A escolha do teto de tensão para o sistema de excitação apresenta impacto no tamanho dos transformadores, chaves seccionadoras, barras e no isolamento do campo. Mesmo se o teto de tensão for limitado pela ação de controle, o projeto dos equipamentos deve levar em conta a sua capacidade máxima.

A determinação do teto de tensão geralmente é feita através de simulações digitais que consideram o evento mais drástico no sistema em questão. O tempo crítico que é considerado para retirada de uma falta trifásica numa barra de alta-tensão é o critério geralmente usado para quantificar a margem de estabilidade da máquina. A margem de estabilidade transitória também sofre impacto pelo projeto do gerador e o sistema de conexão que está associado ao projeto.

Na especificação do comportamento dos sistemas de excitação geralmente são considerados dois fatores: o **ganho transitório** e o **teto deste sistema**. O ganho transitório é provavelmente o mais fácil de administrar, pelo fato de ser uma função dos ajustes do sistema de controle. É importante notar que a escolha desse ganho pode determinar a necessidade de um controle suplementar, como o PSS, numa determinada máquina do sistema. O projeto do teto está diretamente ligado na seleção da fonte de potência do campo, e por este fato apresenta impacto econômico direto no equipamento

requerido.

Primeiro será necessário, para o efeito do ganho transitório, a definição de uma terminologia. Se for considerado um sistema de excitação regulando a tensão de uma barra, a entrada do regulador de tensão (AVR) será um sinal de erro, cuja tensão terminal é ajustada com sinal negativo. Variações no sinal de erro resultam em mudanças na tensão de campo do gerador. Em geral, as oscilações na resposta do gerador relativo ao sistema estão na faixa de poucos décimos de Hz para poucos Hz. O ganho do controlador nesta região é chamado de ganho transitório. Para frequências muito baixas (RP), o ganho é tipicamente muito alto para garantir pequeno erro de regime permanente. Nos controles digitais atuais essa lógica é desenvolvida através de controladores PI ou PID. Nos projetos mais antigos era usado um alto ganho de regime permanente junto com um controlador Lead-Lag para fornecer redução desse ganho transitório.

2.3.3- Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP)

O Estabilizador de Sistema de Potência é um controle suplementar, que na grande maioria dos casos faz parte do controle do sistema de excitação. A função básica do PSS é aplicar um sinal ao sistema de excitação, que cria torques elétricos que amortecem as oscilações de potência. Partindo do princípio que a principal função do PSS é amortecer oscilações eletromecânicas, a teoria de controle básico indicaria que um determinado sinal de entrada, no qual as oscilações são bem observadas, seria uma boa candidata como sinal de entrada. Alguns sinais como velocidade do rotor, frequência e potência elétrica podem ser usados, dependendo de cada projeto. Essas medidas têm sido historicamente usadas simples ou em conjunto com a derivada da potência acelerante. Muitos controles atuais são baseados na potência acelerante, provendo assim um robusto amortecimento para uma ampla faixa operativa com mínimos esforços torsionais. A Figura 14 mostra um exemplo da atuação de um PSS numa usina do sistema interligado brasileiro.

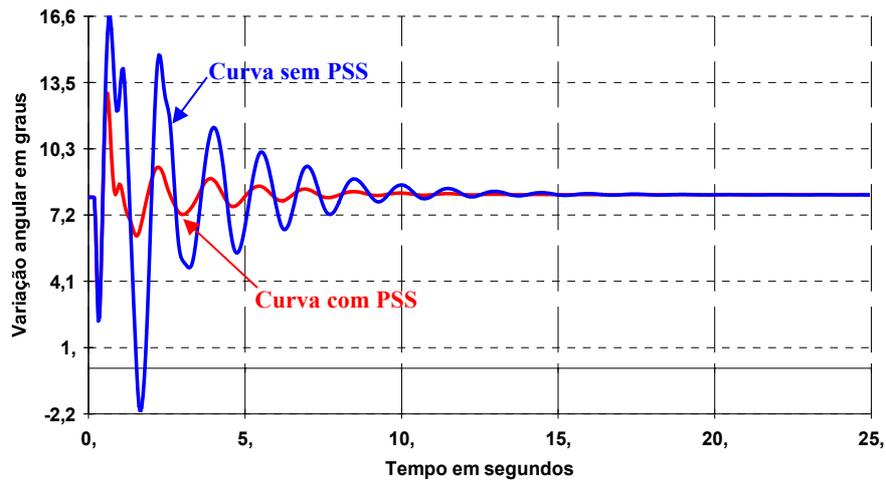


Figura 14- Deslocamento angular de um gerador síncrono com e sem PSS

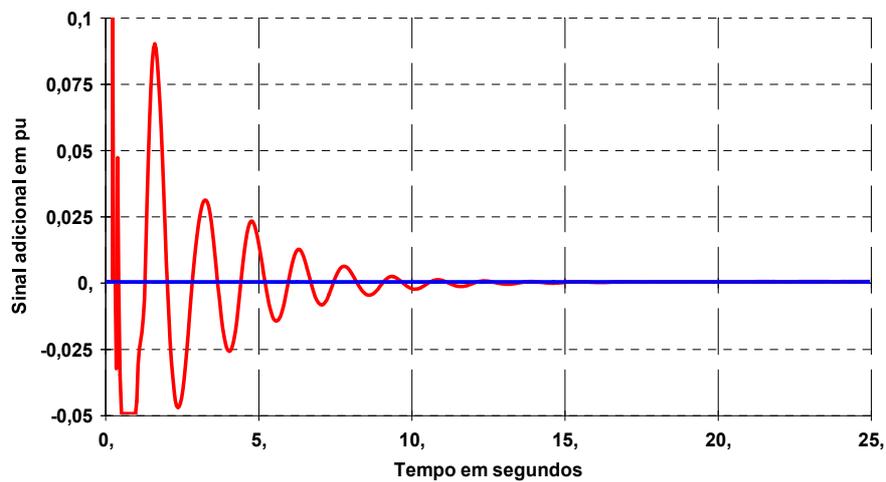


Figura 15- Resposta de VSAD para uma máquina com e sem PSS

Analisando as curvas apresentadas na Figura 14 e na Figura 15 é verificado que o PSS atua no sentido amortecer as oscilações eletromecânicas geradas. Todas as respostas amortecem em torno de 12,5 segundos, mas no caso quando o PSS é excluído aparecem algumas oscilações até o ponto de regime. A atuação do PSS, no amortecimento das oscilações eletromecânicas, também ocasiona grandes esforços torsionais no eixo do gerador, pois quando atua ele age no sentido de aumentar a tensão interna da máquina e a potência frenante. Assim, conseqüentemente, estão sendo ocasionados esforços torsionais no eixo do gerador.

Resumidamente, as principais características de um sistema de excitação dos geradores síncronos são dadas por:

- O ganho transitório é simplesmente um problema de ajuste de controle e isso, geralmente, tem um impacto mínimo em todo projeto do ponto de vista econômico. Os modelos computacionais permitem aos projetistas a facilidade de serem feitos testes para adequação desse ganho no projeto. Ajustes com ganhos baixos podem não ser adequados para a performance desejada. Altos ganhos, porém, podem levar o sistema à instabilidade dinâmica se o sistema for ou estiver fraco durante uma contingência;
- O ajuste do teto de tensão para um sistema de excitação tem um grande impacto no tamanho dos equipamentos como transformadores, barramentos ou chaves seccionadoras. Mesmo se a tensão de teto for limitada por ações de controle, o projetista deve levar em conta a máxima capacidade até mesmo para isolamento do campo. A determinação deste teto é usualmente feita por simulações digitais considerando o pior evento do sistema de potência. O tempo crítico de eliminação da falta é geralmente usado para se especificar a margem de estabilidade. Quando uma determinada resposta é buscada na simulação, a impedância da rede do sistema interligado deve ser fornecida ao projetista para que o teto de tensão e o ganho transitório possam ser determinados;
- Para todos os casos onde o ganho transitório do sistema de excitação deve ser alto é recomendado um estudo dos benefícios que o PSS pode trazer ao sistema. O estudo inicial pode ser feito por modelos computacionais usando ajustes genéricos para se estabelecer os pontos bases. Se for tomada a decisão de se adicionar um controle via PSS, um estudo particular de ajuste e teto de campo é recomendado na ocasião do comissionamento da máquina.

2.3.4- Representação nos estudos de estabilidade

Hoje em dia, na literatura dos sistemas elétricos de potência, existe um grande

número de modelos de sistemas de excitação para representação nos estudos de estabilidade. Essa representação é desenvolvida tanto na base do programa ANATEM[®] quanto do PSS/E[®]. Esses modelos computacionais, representados na sua maioria por diagramas de blocos, englobam todos os tipos de excitatrizes que representam todas as tecnologias já desenvolvidas. O IEEE, através de seus encontros periódicos, desenvolve trabalhos que sempre procuram aperfeiçoar cada vez mais essa modelagem, em virtude da necessidade cada vez maior de representações mais apuradas e também pela facilidade computacional para as simulações.

2.4- Sistemas Dinâmicos

O comportamento relativo da velocidade de uma máquina síncrona influencia diretamente no fenômeno da auto-excitação. Esta afirmação pode ser feita considerando o princípio no qual os parâmetros reativos da rede e da máquina são amplamente ligados a frequência do sistema. Por este motivo se torna válido fazer uma pequena análise sobre o comportamento dinâmico de uma máquina síncrona.

Considerando um gerador, o torque líquido, ou de aceleração, aplicado sobre o rotor (T_a), conforme equação (2.26), é dado como sendo o momento de inércia da massa girante (J) e a variação temporal da velocidade angular do rotor $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)$.

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T_a \quad (2.26)$$

Outra forma de se calcular este torque líquido pode ser pela diferença entre os torques mecânico e o eletromagnético. O torque mecânico de entrada é dado pela ação da turbina, enquanto o eletromagnético é dado pela interação entre os fluxos magnéticos do rotor e do estator da máquina. Neste somatório também é considerado o torque devido às perdas rotacionais (atrito, ventilação e perdas magnéticas no núcleo).

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.27)$$

Onde:

T_m = torque mecânico de entrada gerado pela turbina;

T_e = torque eletromagnético da máquina.

Quando uma máquina está operando em condições de regime permanente, o resultado da equação (2.27) será zero. Numa rejeição de carga, que está sendo considerada neste estudo, o torque eletromagnético deverá diminuir rapidamente, e como o torque mecânico permanece aproximadamente constante até a atuação do regulador de velocidade, o torque de aceleração deverá crescer muito. Por este motivo, quando há uma rejeição de carga no sistema, a frequência da máquina cresce muito rapidamente.

De modo a facilitar o entendimento do processo, se torna conveniente, numa máquina síncrona, medir a posição angular do rotor em relação a um eixo de referência qualquer que gira à velocidade síncrona ω_s em relação à linha de eixo fixo, que na Figura 16 [25] é representada pela linha horizontal. Assim, o ângulo θ é o valor medido em relação ao eixo fixo e δ é medido considerando o eixo que gira com velocidade síncrona ω_s , conforme Figura 16. Através dessas considerações:

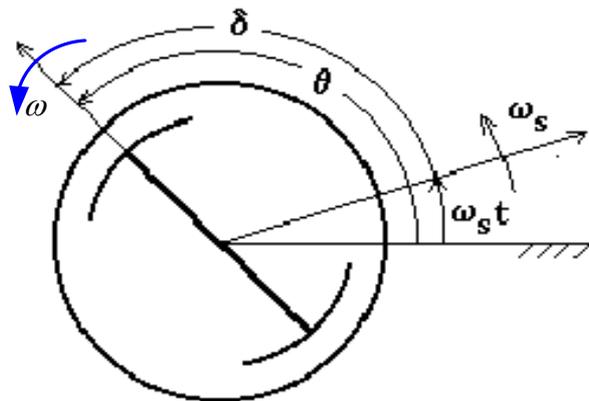


Figura 16- Diagrama referente aos aspectos de medição do rotor

$$\delta = \theta - \omega_s t \quad (2.28)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_s \quad (2.29)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} \quad (2.30)$$

Substituindo (2.26) e (2.27) em (2.30):

$$J \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.31)$$

Multiplicando a equação (2.31) pela velocidade ω são obtidos os termos em potências mecânica e elétrica:

$$M \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.32)$$

Onde:

$M = J \cdot \omega$ - quantidade de movimento angular;

$P_e = T_e \cdot \omega$ - potência elétrica de saída;

$P_m = T_m \cdot \omega$ - potência mecânica de entrada.

A equação (2.32), que envolve as potências mecânica e elétrica, ao invés de usar torques, usa as potências. Assim, esta equação é chamada de **equação de oscilação da máquina**.

Considerando a constante de inércia H como:

$$H = \frac{W}{S_n} \quad (2.33)$$

Sendo:

$W \rightarrow$ Energia cinética armazenada a velocidade nominal;

$S_n \rightarrow$ Potência aparente nominal da máquina.

Onde W é dado por:

$$W = \frac{1}{2} J \omega_s^2 = \frac{1}{2} M \omega_s \quad (2.34)$$

Portanto:

$$M = \frac{2W}{\omega_s} \quad (2.35)$$

Das equações (2.34) e (2.35):

$$M = \frac{2.S_n.H}{\omega_s} \quad (2.36)$$

A constante de inércia H , ao contrário do valor do momento de inércia M , não apresenta grandes variações com a potência e a velocidade da máquina.

Reescrevendo a equação (2.36), e considerando a variação temporal da velocidade, tem-se:

$$M \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (2.37)$$

Após algumas condições matemáticas aplicadas na equação (2.38), que envolvem a potência aparente nominal (S_N) e velocidade síncrona (ω_s), esta equação pode ser reescrita considerando as relações por unidade (pu) da potência trifásica nominal e da velocidade nominal. Assim:

$$2H \cdot \frac{d\omega_{pu}}{dt} = P_{m_{pu}} - P_{e_{pu}} \quad (2.38)$$

Algumas vezes é desejável que seja incluída uma componente de conjugado de

amortecimento separadamente, que não é contabilizada no cálculo da potência elétrica, quando esta variável é afetada pela variação da frequência elétrica da rede. Esta componente é adicionada através de um termo proporcional à variação da velocidade da máquina, conforme apresentado na equação (2.39):

$$2H \cdot \frac{d\omega_{pu}}{dt} = P_{m_{pu}} - P_{e_{pu}} - K_D \Delta\omega_{pu} \quad (2.39)$$

A equação (2.39) pode ser representada através do diagrama de blocos mostrado na Figura 17.

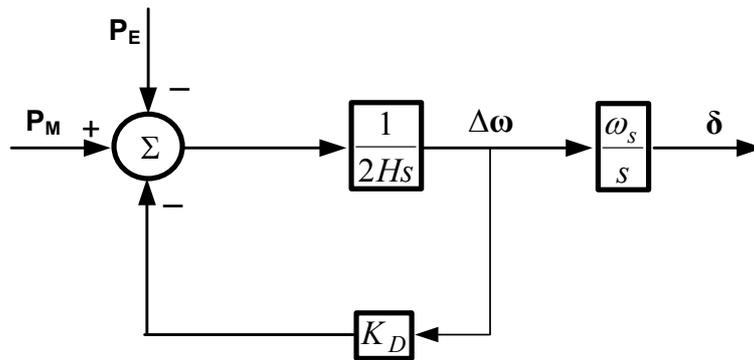


Figura 17- Diagrama de blocos referente à equação de oscilação

2.5- Curva ou diagrama de capacidade

O funcionamento de um gerador síncrono pode ser descrito através dos seus pontos de operação em termos de potência ativa ou reativa. O conjunto desses pontos forma a **curva ou diagrama de capacidade de um gerador síncrono** e que pode ser visualizada numa forma simplificada na Figura 18.

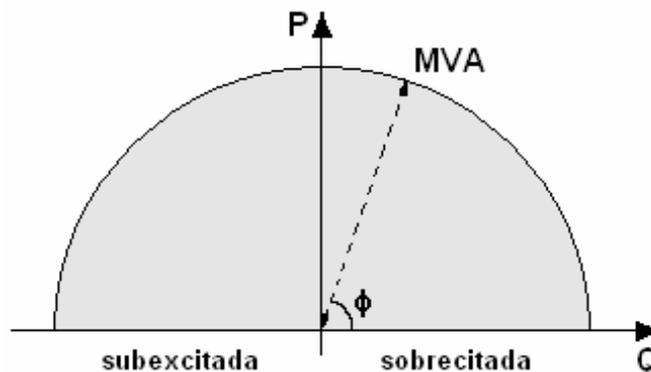


Figura 18- Curva de capacidade de um gerador síncrono de pólos lisos

Esta curva de capacidade pode ser traçada a partir das características do diagrama fasorial da máquina em regime permanente, conforme a Figura 19. A Figura 20 relaciona basicamente este diagrama fasorial com a construção da curva.

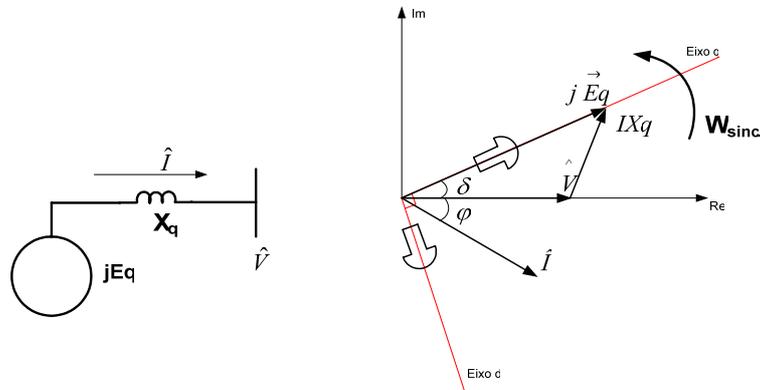


Figura 19- Diagrama fasorial da máquina de pólos lisos operando em RP

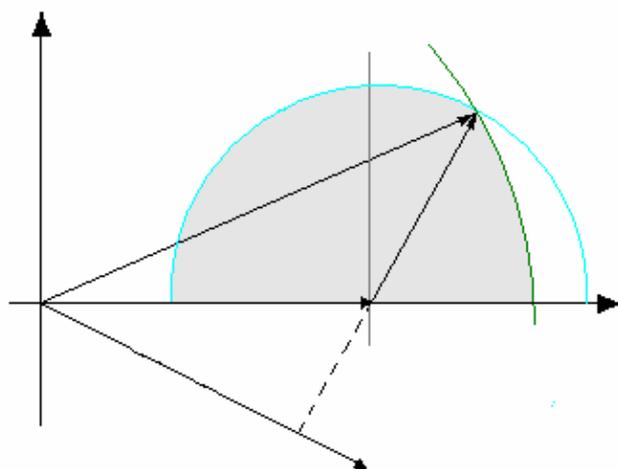


Figura 20- Diagrama fasorial para construção da curva de capacidade

Atualmente, existem programas que utilizam os mais diversos métodos para traçar a curva de capacidade de um dado gerador síncrono. Geralmente esses programas se utilizam de parâmetros construtivos da máquina, como reatâncias de eixo direto ou quadratura, como também das capacidades máximas e mínimas de geração de potência ativa ou reativa.

Um método que atualmente está sendo usado por pesquisadores brasileiros, e que está sendo inserido no programa de análise de redes elétricas ANAREDE[®] e no programa de análise de transitórios eletromecânicos ANATEM[®], ambos do CEPEL, é

descrito na referência [9].

A curva de capacidade típica, idealizada para um gerador de pólos salientes, pode ser vista integralmente na Figura 21[27].

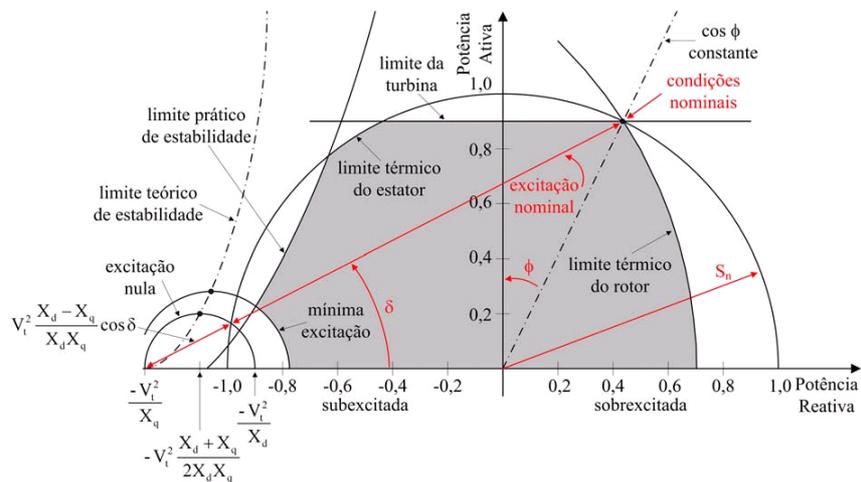


Figura 21- Curva de capacidade típica de um gerador síncrono de pólos salientes

As grandezas existentes para construção deste diagrama são:

V_t – Tensão terminal da máquina em pu;

$\cos \phi$ – Fator de potência nominal;

X_d – Reatância síncrona de eixo direto em pu;

X_q – Reatância síncrona de eixo indireto em pu;

δ – ângulo do eixo em quadratura da máquina em radianos;

S_n – Potência aparente nominal em pu.

Os geradores síncronos, assim como todas as máquinas, apresentam limitações operativas que têm como objetivo evitar danos materiais ao equipamento, como também ao sistema ao qual essa máquina está interligada. Neste caso, as limitações operativas impostas na máquina formam um lugar geométrico que garante sua operação estável e segura. No caso do diagrama mostrado na Figura 21, esta região segura de operação está sombreada na cor cinza. Assim, esta região está interna aos seguintes limites:

- Limite térmico do estator;

- Limite térmico do rotor;
- Limite da turbina;
- Limite de mínima excitação.

A descrição detalhada de cada limite operativo da máquina síncrona pode ser vista em [1, 9 e 27]. Como a proposta deste trabalho é estudar a auto-excitação, o limite de mínima excitação será analisado aqui. Toda teoria descrita a seguir terá como base a referência [27].

Algumas condições de emergência no sistema podem levar os geradores síncronos a ficarem conectados a longas linhas de transmissão em EAT operando em vazio. Ao detectar esta condição anormal de operação, o regulador de tensão atua no sentido de reduzir a excitação da máquina, com conseqüente absorção de potência reativa tentando assim, manter a tensão terminal no valor de referência. Se a corrente de campo for reduzida a valores muito baixos, a manutenção da estabilidade da máquina pode estar comprometida, pois há uma redução do seu torque de sincronismo que é proporcional a corrente de campo. Assim, com o intuito de manter o ponto de operação dentro dos limites operativos mostrados na região em cinza da Figura 21, o limitador de subexcitação atua elevando a corrente de campo até as condições operativas citadas.

A Figura 22[27] mostra as características de atuação para este limitador. A medida que a tensão terminal da máquina varia, o segmento de reta representativo deste limite também sofre variação proporcional na sua atuação. Nesta figura também é mostrado o ajuste que diz respeito à proteção de perda de excitação da máquina.

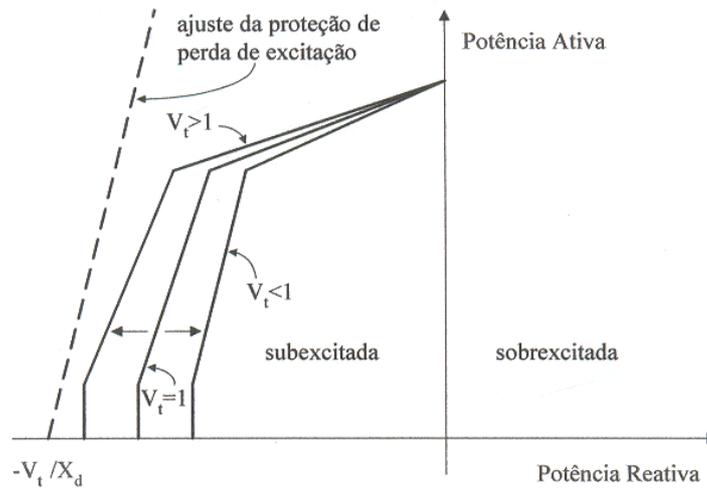


Figura 22- Característica do limite de subexcitação de uma máquina síncrona

Analisando a Figura 22, podemos perceber que o limitador de subexcitação engloba o limite de mínima excitação como também o limite prático de estabilidade. Outra característica demonstrada nesta figura é a coordenação que deve existir entre a proteção de perda de excitação da máquina com este limite de subexcitação, devidamente corrigido com a tensão. Esta preocupação é pertinente para evitar que a proteção de perda de excitação não atue antes de ser atingida a lógica de limitação de subexcitação. Caso haja esta atuação, a coordenação entre as proteções estaria totalmente errada.

3-AUTO-EXCITAÇÃO E CURTO CAPACITIVO

3.1- Introdução

O exame dos processos que evoluem no tempo leva à identificação de duas classes de desempenho dinâmico: os comportamentos estáveis e instáveis. Tratando-se de sistemas físicos descritos por modelos matemáticos lineares (sistemas físicos linearizados), os comportamentos classificados de estáveis correspondem aos casos de sistemas que apresentam uma resposta natural amortecida. Os sistemas instáveis, por sua vez, apresentam modos naturais não amortecidos e ou monotonicamente crescentes. Estes casos correspondem à presença de pólos (zeros da equação característica) no semi-plano direito. Assim, as equações que descrevem o comportamento das tensões de uma máquina podem ser analisadas de modo a se obter os pontos operativos que levem a tais condições de instabilidade.

Nos grandes sistemas de potência, como o sistema interligado brasileiro, as centrais hidrelétricas ficam muito distantes do centro de carga. Assim, uma transmissão longa em extra-alta tensão (EAT) em corrente alternada ou contínua se torna inevitável para o transporte desta energia gerada com qualidade e confiabilidade. Por este motivo, os geradores conectados nestes sistemas estão sujeitos aos fenômenos da auto-excitação ou curto-circuito capacitivo devido à grande carga capacitiva dessas linhas sob condições de rejeição de carga.

Os motores de indução também estão sujeitos à ocorrência destes fenômenos, pois em algumas indústrias são colocados montantes de capacitores shunt com o intuito de fazer a correção do fator de potência da linha de produção, visto que hoje em dia ocorrem muitas se o fator de potência estipulado não for respeitado. Desta maneira, se ocorrer uma parada repentina na produção e estes capacitores ficarem conectados somente nestes motores, poderá ocorrer auto-excitação ou curto-circuito capacitivo pelo fato de que a carga capacitiva ficará ligada aos terminais destes equipamentos. Apesar da possibilidade de acontecimento, a auto-excitação em motores de indução não será analisada neste trabalho e poderá ser vista com maiores detalhes em [33].

O processo de auto-excitação não fornece somente conseqüências desastrosas a uma determinada máquina. No caso dos geradores de indução auto-excitados, podendo ser alguns tipos de geradores eólicos, são usados bancos de capacitores nos terminais dessas máquinas como fonte externa de potência reativa necessária para excitá-las inicialmente. Como a proposta deste trabalho é fazer somente um sobre máquinas síncronas, este processo não será detalhado aqui. A Figura 23 mostra um esquema de um gerador de indução eólico com bancos de capacitores nos seus terminais.

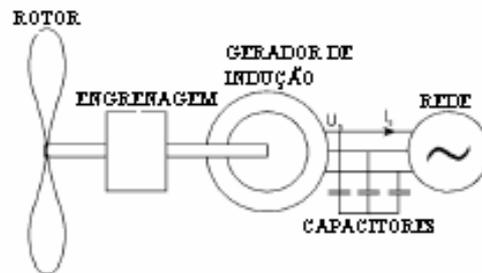


Figura 23- Gerador de indução eólico tipo auto-excitado

A auto-excitação nas máquinas síncronas é uma instabilidade elétrica que está associada ao aumento dos enlaces de fluxo, sendo caracterizada principalmente pelo aumento rápido da tensão terminal da máquina, decorrente da carga capacitiva ligada aos seus terminais. Esta fonte capacitiva pode ser proveniente de certas configurações particulares dos sistemas de potência, nas quais podem ser citadas conexões com bancos de filtros capacitivos em ligações CCAT e severas rejeições de carga em longos troncos de transmissão CAAT. A Figura 24 mostra a representação de uma carga capacitiva nos terminais do gerador, proveniente de uma rejeição de carga em sistemas de transmissão CA ou filtros em sistemas CC.

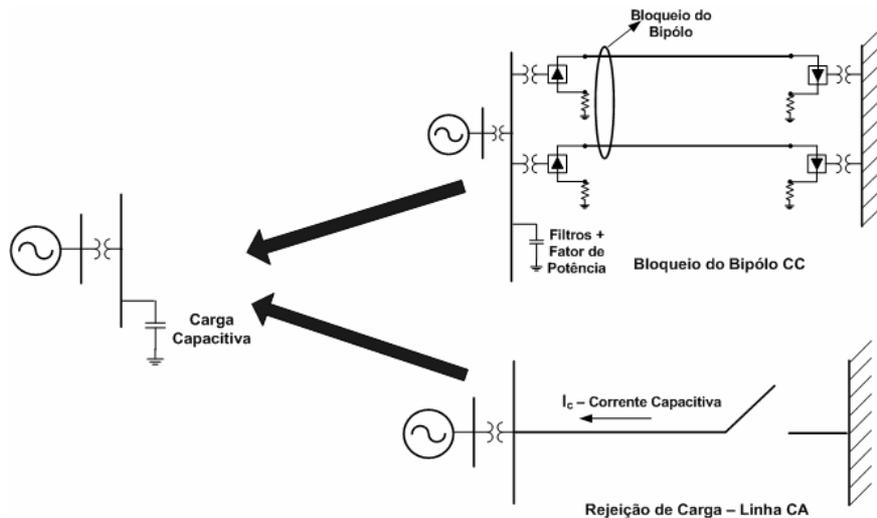


Figura 24- Representação das formas de carga capacitiva nos terminais do gerador síncrono

Conforme já citado anteriormente, na motivação deste trabalho, a auto-excitação pode ser dada como um processo dinâmico que evolui no tempo e que envolve máquinas elétricas e cargas de natureza predominante capacitiva. Vale ressaltar que as condições que proporcionam este fenômeno ao sistema são englobadas dentro de uma pequena faixa de condições de emergências e que em regime normal, não existe a probabilidade de ocorrência da AEX.

Uma outra condição que também pode ser visualizada quando se tem uma carga capacitiva ligada aos terminais de uma máquina é o **Curto-Circuito Capacitivo (CCC)**. Basicamente, este fenômeno tem as características de um curto-circuito nos terminais da máquina que é gerado por esta carga capacitiva e que se caracteriza por um grande aumento da corrente de armadura da máquina, juntamente com a queda da tensão terminal para valores muito baixos, chegando próximo a zero. Assim, o comportamento típico da tensão terminal de um gerador síncrono, quando ocorre auto-excitação ou curto-circuito capacitivo nos seus terminais, poderá ser visto na Figura 25 e na Figura 26.

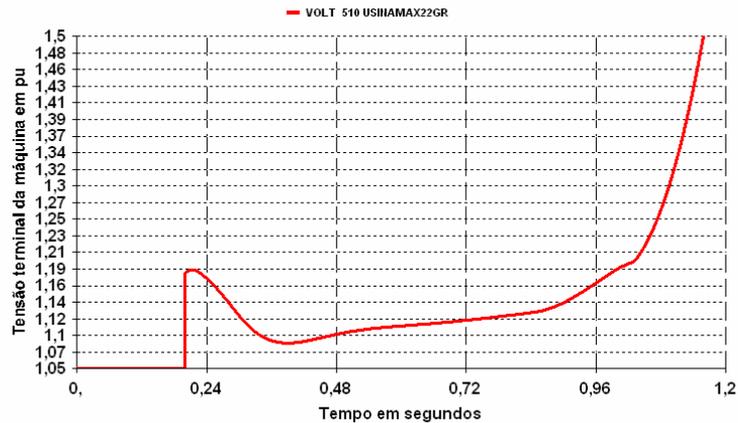


Figura 25- Comportamento da tensão terminal numa auto-excitação

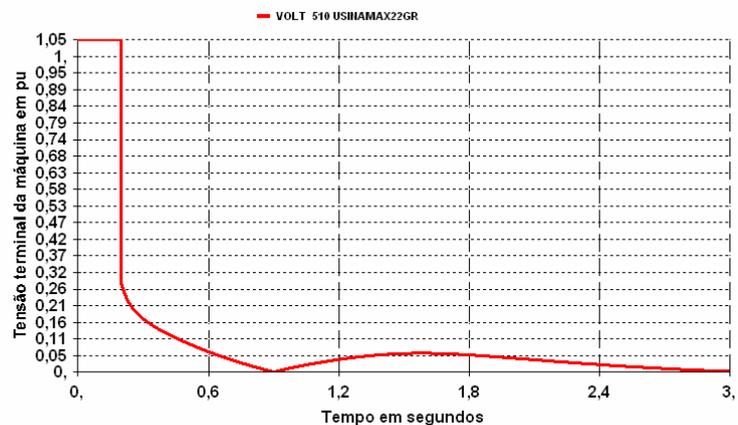


Figura 26- Comportamento da tensão terminal num Curto-Circuito Capacitivo

As curvas mostradas na Figura 25 e na Figura 26 têm a finalidade de mostrar as respostas típicas da tensão terminal de uma máquina síncrona numa auto-excitação e num curto-circuito capacitivo. Num estudo prático de rejeição de carga podem ocorrer mudanças nas características dessas curvas em virtude de atuação das respectivas proteções do sistema de transmissão.

Conforme já citado anteriormente, o fenômeno da auto-excitação está associado a condições operativas de emergência no sistema, nas quais a máquina síncrona fica conectada a grandes cargas capacitivas em seus terminais. O processo de crescimento das tensões na máquina é limitado, na prática, pelas saturações dos transformadores e da máquina e também pela ação de absorção de energia pelos pára-raios. A duração das sobretensões, assim como a sua velocidade de crescimento e os seus valores atingidos, depende da ação dos sistemas de excitação dos geradores, da capacidade de absorção da

potência reativa gerada pela transmissão em condições de rejeição de carga e atuação da regulação primária.

3.2- Origem da Auto-Excitação e Curto-Circuito Capacitivo

3.2.1- Sistemas de Transmissão em Corrente Alternada

A modelagem das linhas de transmissão é feita através de parâmetros longitudinais e transversais, cujos valores estão diretamente ligados ao comprimento total da linha que são classificadas como curta, média e longa. A teoria completa para cada classificação através do comprimento, assim como cada representação, pode ser vista em [1,3]. Nos programas usados para as simulações, a representação da linha de transmissão é feita através do seu modelo π – equivalente cujos parâmetros já estão corrigidos pelos seus termos hiperbólicos através do comprimento total da linha. A representação total da linha é feita através de seccionamentos entre as diversas subestações ao longo da linha. A Figura 27 mostra a representação π – equivalente da linha, na frequência fundamental, no programa ANAREDE[®].

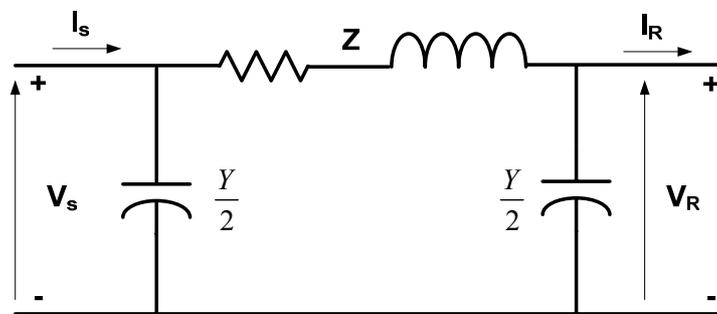


Figura 27- Representação do modelo π -equivalente para uma linha de transmissão

Neste tipo de modelagem, a capacitância total da linha é incluída nos cálculos através da sua divisão em duas partes iguais, em cada terminal da linha, sendo uma parte inserida no terminal emissor e a outra no receptor.

A auto-excitação ou o curto-circuito capacitivo nos geradores síncronos resulta basicamente de duas condições operativas de emergência: abertura de linha de transmissão CAAT no terminal receptor e bloqueio de pólos num sistema de

transmissão **CCAT**, cujos filtros ainda permaneçam conectados ao gerador. Como este item apenas aborda sistemas em corrente alternada será estudada somente a abertura de linha **CAAT**.

Neste sistema em corrente alternada, conforme mostrado anteriormente na Figura 27, considere um gerador síncrono conectado ao terminal emissor. Quando o terminal receptor (R) for aberto, a máquina irá sofrer uma aceleração angular e a sua frequência irá aumentar até a ação da regulação primária reduzir a potência mecânica. Com o aumento da frequência da rede, as reatâncias internas da máquina vão aumentar, enquanto a reatância capacitiva vista pela máquina vai diminuir. Em determinados pontos de operação, que ocorrem o cruzamento desta reatância capacitiva com as reatâncias internas da máquina, teoricamente, vão acontecer os fenômenos de auto-excitação ou curto-circuito capacitivo.

3.2.2- Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua

Um gerador, operando num sistema em corrente alternada, está sujeito a três principais limites operativos: máxima corrente estatórica, máxima corrente de excitação e o limite de estabilidade em regime permanente (corrente mínima de campo). Este último tipo de operação não existe para sistemas conectados através de linhas em corrente contínua, devido ao fato de que não há uma relação potência x ângulo entre os geradores e o sistema principal de carga. Em outras palavras, pode-se dizer que ocorre uma ligação assíncrona entre os geradores da usina e este sistema principal. Entretanto, outros limites operativos devem ser considerados nestes geradores com o propósito de se evitar sobretensões, que são causadas pelo fenômeno da auto-excitação resultante do bloqueio dos pólos de um sistema de transmissão **CCAT**. A auto-excitação, nestes casos, é causada pelo montante de potência reativa capacitiva dos filtros que ainda permanecem conectados ao barramento após este bloqueio. A Figura 28 mostra graficamente este processo.

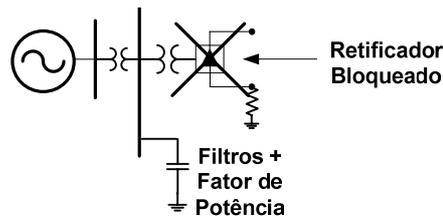


Figura 28- Figura representativa de uma rejeição de carga num sistema CC

Pelo processo natural de conversão CA-CC, os retificadores de uma linha de transmissão CC consomem um grande montante de potência reativa indutiva enquanto convertem potência ativa CA em CC. O montante de potência reativa que é necessário para este processo de conversão está na faixa de 40 a 50% da potência ativa total a ser convertida. O processo de conversão da potência ativa, que pode ser visto na literatura técnica, também gera uma quantidade de componentes de corrente harmônica [36]. Por este motivo, nestes sistemas, ocorre a necessidade de se ter um montante adequado de filtros capacitivos que atuam no sentido de reduzir o efeito dessas correntes harmônicas no sistema.

Conforme já citado, os elementos retificadores e inversores, no processo de conversão da potência ativa, geram correntes harmônicas de ordens características, as quais dependem da configuração do conversor. Para uma ponte trifásica de onda completa, que é comumente usada em sistemas de transmissão CCAT, estas ordens características podem ser dadas pela expressão $6K \pm 1$, onde a constante K é um número inteiro. As formas de conexão desses filtros no sistema, assim como a modelagem matemática desses elementos, podem ser vistas com maiores detalhamentos em [37]. A tecnologia empregada para o desenvolvimento dos filtros harmônicos no processo de conversão CA/CC pode ser vista com maiores detalhes em trabalhos que se encontram na literatura do IEEE.

No desenvolvimento dos sistemas de transmissão CC é uma prática comum projetar e instalar filtros na barra conversora CA para que estes harmônicos sejam reduzidos e ao mesmo tempo, para que forneçam parte da potência reativa necessária para o processo de conversão CA-CC. Assim, quando ocorre um bloqueio nos pólos deste sistema, os geradores ficam conectados somente nesses filtros capacitivos e acabam sofrendo uma repentina mudança nas gerações de potências ativa e reativa.

Quanto à potência reativa, o montante capacitivo dos filtros CA, que era originalmente consumido pelos retificadores vai, a partir da rejeição de carga, ser absorvido pelas máquinas. Esta condição operativa condiciona as máquinas ao perigo da auto-excitação ou curto-circuito capacitivo e conseqüentes sobretensões que podem danificar os equipamentos se nenhuma medida corretiva for tomada.

3.3- Processo Evolutivo da Auto-Excitação

Na literatura técnica dos sistemas elétricos de potência existem várias formas de analisar o efeito da auto-excitação na máquina síncrona.

Conforme já descrito anteriormente, o principal requisito para o surgimento da auto-excitação é a conexão de uma grande capacitância aos terminais de um gerador síncrono. Por exemplo, na ocorrência de uma rejeição de carga, o gerador síncrono fica conectado a uma linha de transmissão com o terminal receptor aberto. Este tipo de ocorrência é melhor visualizada através da Figura 24.

A modelagem do gerador síncrono pode ser feita em termos de fluxos, correntes e tensões através dos seus circuitos equivalentes nos eixos magnéticos d e q. Considerando um estudo analítico da auto-excitação, com o intuito da modelagem deste fenômeno em ambos os eixos magnéticos, limitou-se a representação de uma máquina síncrona de pólos salientes pelos seus efeitos transitórios, isto é, a um par de circuitos em cada eixo, conforme mostrado na Figura 29 e na Figura 30. Como o fenômeno da auto-excitação está diretamente ligado a condições de sobrefrequência, as considerações que $\omega = 1,0$ e que $X = L$, em pu, nem sempre podem ser feitas.

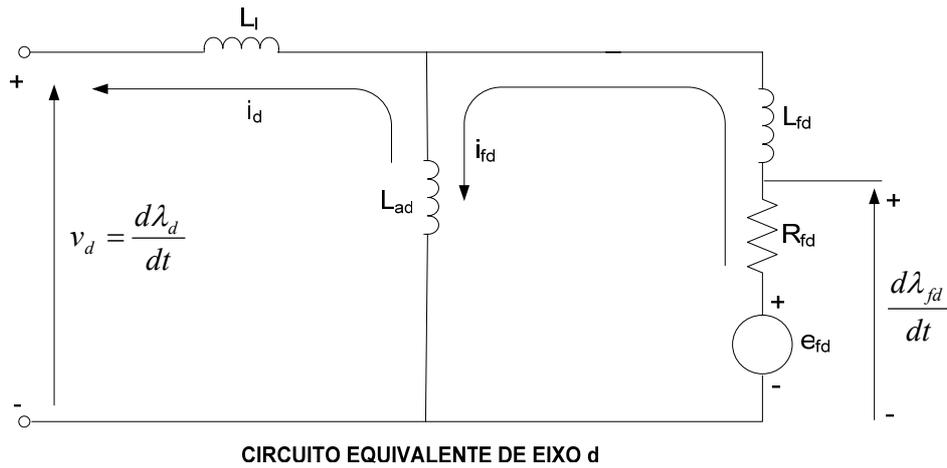


Figura 29- Circuito equivalente de eixo d do gerador, considerando apenas 1 circuito no rotor

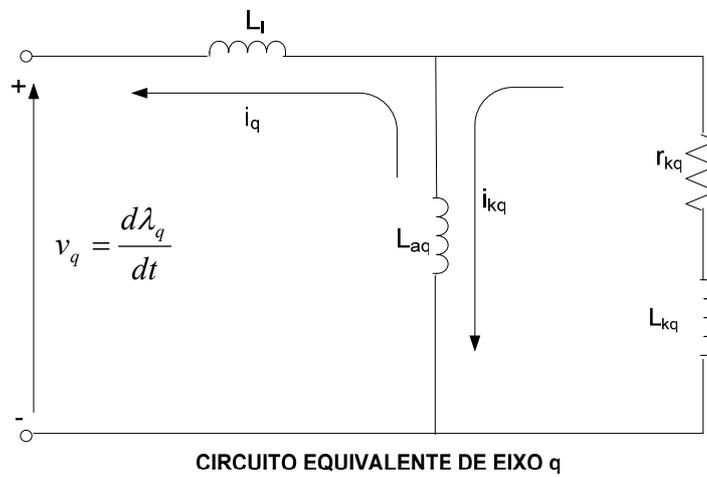


Figura 30- Circuito equivalente do eixo q do gerador, considerando 1 enrolamento amortecedor

3.3.1- Inserção da capacitância nas equações da máquina

De modo a inserir matematicamente a capacitância equivalente numa rejeição de carga nas equações desenvolvidas para as máquinas, temos:

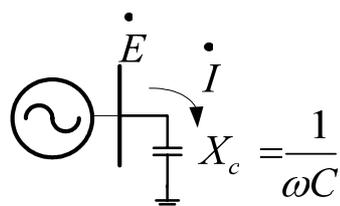


Figura 31- Figura esquemática de uma capacitância nos terminais da máquina

Onde

$$\dot{E} = e_r + je_i = -jX_c \dot{I} \quad (3.1)$$

Assim, a condição anterior pode ser satisfeita por:

$$\begin{pmatrix} e_r \\ e_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_c \\ -X_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Através da transformada de park das máquinas síncronas e as suas condições terminais, temos:

$$e_d = X_c \cdot i_q \quad (3.3)$$

$$e_q = -X_c \cdot i_d \quad (3.4)$$

3.3.2- Processo em relação ao eixo d da máquina

Toda modelagem descrita aqui tem como base o desenvolvimento matemático mostrado em [30]. Este desenvolvimento tem a finalidade de mostrar uma análise matemática dos fenômenos para o eixo d da máquina, considerando apenas o enrolamento de campo. Vale ressaltar que todos os termos estão em pu, nas respectivas bases e já normalizados.

$$\frac{e'_q}{\omega} = \frac{L_{ad}}{L_{ffd}} \lambda_{fd} = \frac{1}{T'_{do}} \int [E_{fd} - L_{ad} i_{fd}] dt \quad (3.5)$$

Onde

$$E_{fd} = \frac{e_{fd} \cdot r_{fd}}{L_{ad}} \quad (3.6)$$

$$T'_{do} = \frac{L_{ffd}}{r_{fd}} \quad (3.7)$$

$$L_{ad} \cdot i_{fd} = \frac{e'_q}{\omega} + i_d (L_d - L'_d) + f \left[\frac{e'_q}{\omega} \right] \quad (3.8)$$

$$L'_d = L_l + \frac{L_{fd} L_{ad}}{L_{ffd}} \quad (3.9)$$

Sendo o termo $f \left[\frac{e'_q}{\omega} \right]$ a correção da corrente de campo devido à saturação, a qual é uma função do nível do fluxo $\left[\frac{e'_q}{\omega} \right]$. O enlace de fluxo de eixo d, desprezando o termo da saturação para facilitar a análise do fenômeno, é dado por:

$$\lambda_d = \frac{e'_q}{\omega} - L'_d \cdot i_d \quad (3.10)$$

As equações referentes às correntes e às tensões do estator, nas quais os termos derivativos de fluxo e respectivas resistências são desprezados, podem ser dados por:

$$e_q = \omega \lambda_d = e'_q - i_d \omega L'_d \quad (3.11)$$

$$i_d = -\omega^2 \lambda_d C = -\omega C e'_q + i_d \omega^2 L'_d C \quad (3.12)$$

Assim, após um rearranjo na equação (3.12), a corrente pode ser dada mais explicitamente por:

$$i_d = \frac{-e'_q \omega C}{1 - \omega^2 L'_d C} \quad (3.13)$$

Agora, como a corrente do eixo d já foi calculada e usando a transformada de Laplace nas equações (3.11) e (3.13), temos o valor de e'_q considerando a reposta de freqüência. Neste caso é desconsiderado o termo da saturação anteriormente estudado.

$$\frac{e'_q(s)}{\omega} = \frac{1}{sT'_{do}} [E_{fd}(s) - L_{ad}i'_{fd}(s)] \quad (3.14)$$

$$\frac{e'_q(s)}{\omega} = \frac{1}{sT'_{do}} \left[E_{fd}(s) - \frac{e'_q(s)}{\omega} - i'_d(s)(L_d - L'_d) \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{e'_q(s)}{\omega} = \frac{1}{sT'_{do}} \left[E_{fd}(s) - \frac{e'_q(s)}{\omega} + e'_q(s) \frac{\omega C(L_d - L'_d)}{1 - \omega^2 L'_d C} \right] \quad (3.16)$$

$$\frac{E_{fd}(s)}{sT'_{do}} = \left[\frac{1}{\omega} + \frac{1}{sT'_{do}} - \frac{\omega C(L_d - L'_d)}{sT'_{do}(1 - \omega^2 L'_d C)} \right] e'_q(s) \quad (3.17)$$

$$e'_q(s) = \left[\frac{E_{fd}(s)\omega}{T'_{do}} + e'_q(0) \right] \left[\frac{1}{s + \frac{(1 - \omega^2 L'_d C)}{T'_{do}(1 - \omega^2 L'_d C)}} \right] \quad (3.18)$$

3.3.3- Processo em relação ao eixo q da máquina

Toda modelagem aqui descrita tem como base o desenvolvimento matemático mostrado em [30]. Esta parte da dissertação tem a finalidade de mostrar uma análise matemática dos fenômenos para o eixo q da máquina, considerando apenas um enrolamento amortecedor neste eixo. Os termos relacionados ao enrolamento amortecedor estão indicados com o subscrito **kq**. Vale ressaltar que todos os termos estão em pu, nas respectivas bases e já normalizados.

$$\lambda_{Kq} = i_{Kq}(L_{aq} + L_{Kq}) - i_q L_{aq} \quad (3.19)$$

Ou

$$i_{Kq} = \frac{(\lambda_{Kq} + i_q L_{aq})}{L_{aq} + L_{Kq}} \quad (3.20)$$

Sendo

$$\lambda_{Kq} = - \int R_{Kq} i_{Kq} dt \quad (3.21)$$

Também

$$\lambda_q = L_{aq}i_{Kq} - L_q i_q \quad (3.22)$$

Ou

$$\lambda_q = -\frac{e'_d}{\omega} - L'_q i_q \quad (3.23)$$

Onde

$$\frac{e'_d}{\omega} = -\frac{L_{aq}}{L_{aq} + L_{Kq}} \lambda_{Kq} \quad (3.24)$$

$$L'_q = L_l + \frac{L_{aq}L_{Kq}}{L_{aq} + L_{Kq}} \quad (3.25)$$

As equações referentes às correntes e às tensão do estator, nas quais os termos derivativos de fluxo e respectivas resistências são desprezados, podem ser dados por:

$$e_d = -\omega\lambda_q = e'_d + i_q\omega L'_q \quad (3.26)$$

$$i_q = -\omega^2\lambda_q C = \omega C e'_d + i_q\omega^2 L'_d C \quad (3.27)$$

Assim, após um rearranjo na equação (3.27), a corrente pode ser dada mais explicitamente por:

$$i_q = \frac{e'_d\omega C}{1 - \omega^2 L'_d C} \quad (3.28)$$

Agora, como a corrente do eixo q já foi calculada, e usando a transformada de Laplace nas equações (3.26) e (3.28), temos o valor de e'_d considerando a reposta de frequência. Neste caso é desconsiderado o termo da saturação anteriormente estudado.

$$\frac{e'_d}{\omega} = \frac{R_{Kq}}{L_{aq} + L_{Kq}} \int L_{aq} i_{Kq} dt \quad (3.29)$$

$$e'_d(s) = \frac{1}{T'_{qo} s} L_{aq} i'_{Kq} \quad (3.30)$$

$$T'_{qo} = \frac{L_{aq} + L_{Kq}}{R_{Kq}} \quad (3.31)$$

$$e'_d(s) = \frac{1}{T'_{qo} s} \left[-\frac{e'_d(s)}{\omega} + e'_d(s) \omega C (L_q - L'_q) \right] \quad (3.32)$$

$$e'_d(s) = \frac{e'_{do}}{s + \left[\frac{(1 - \omega^2 L_q C)}{(1 - \omega^2 L'_q C) T'_{qo}} \right]} \quad (3.33)$$

3.3.4- Comportamento simultâneo da Auto-Excitação em ambos os eixos

Obtidas as equações de e'_q para o eixo d e e'_d para o eixo q, ambas no domínio da frequência, podem ser feitas análises de modo a determinar o efeito da auto-excitação para ambos os eixos magnéticos.

Analisando a equação (3.18) e sabendo que a auto-excitação pode ser vista como uma instabilidade elétrica, visualiza-se que este fenômeno ocorrerá no eixo d (e'_q) quando:

$$\frac{(1 - \omega^2 L_d C)}{T'_{do} (1 - \omega^2 L'_d C)} < 0$$

A condição operativa do sistema, que levará o gerador síncrono ao fenômeno da auto-excitação no seu eixo magnético d, será dada pela relação abaixo. Este processo se deve ao fato de que, no gerador, $L_d > L'_d$:

$$\omega L_d = \frac{1}{\omega C} \text{ ou na faixa operativa de } \omega L'_d < \omega C < \omega L_d$$

Analisando a equação (3.33) e sabendo que a auto-excitação pode ser vista como uma instabilidade elétrica, visualiza-se que este fenômeno ocorrerá no eixo q (e'_d) quando:

$$\frac{(1 - \omega^2 L_q C)}{T'_{qo} (1 - \omega^2 L'_q C)} < 0$$

A condição operativa do sistema, que levará o gerador síncrono ao fenômeno da auto-excitação no seu eixo magnético q, será dada pela relação abaixo. Este processo se deve ao fato de que, no gerador, $L_q > L'_q$:

$$\omega L_q = \frac{1}{\omega C} \text{ ou } X_c = X_q \text{ ou na faixa operativa de } \omega L'_q < \omega C < \omega L_q$$

Toda análise desenvolvida até aqui tem apenas o propósito de descrever, analiticamente, como o fenômeno da auto-excitação se comporta numa máquina síncrona. Por isso, a limitação de representação até os efeitos transitórios da máquina. No caso de um estudo real de auto-excitação, não há preocupação quanto a esta limitação de representação, pois na simulação digital são considerados todos os efeitos da máquina até os subtransitórios. Este tipo de análise no tempo, que também considera a saturação magnética da máquina, será amplamente debatido no capítulo 4 desta dissertação.

A representação da condição operativa, na qual uma máquina síncrona está conectada à uma reatância capacitiva nos seus terminais, pode ser feita através da modelagem do diagrama de blocos correspondente para ambos os eixos magnéticos d e q, considerando apenas um enrolamento amortecedor no eixo q. Neste tipo de representação são considerados os efeitos subtransitórios para o eixo q, que estão diretamente ligados a consideração do enrolamento amortecedor no eixo q através da indutância subtransitória L''_q . A Figura 32 e a Figura 33[30] mostram que a realimentação positiva, ou seja, que a auto-excitação irá ocorrer no eixo q quando $\omega^2 L_q C > 1.0$ e no eixo d quando $\omega^2 L_d C > 1.0$. Para uma fiel representação dos fenômenos subtransitórios do eixo q, algumas mudanças nos termos considerados na Figura 33 deveriam ser feitas Assim, temos:

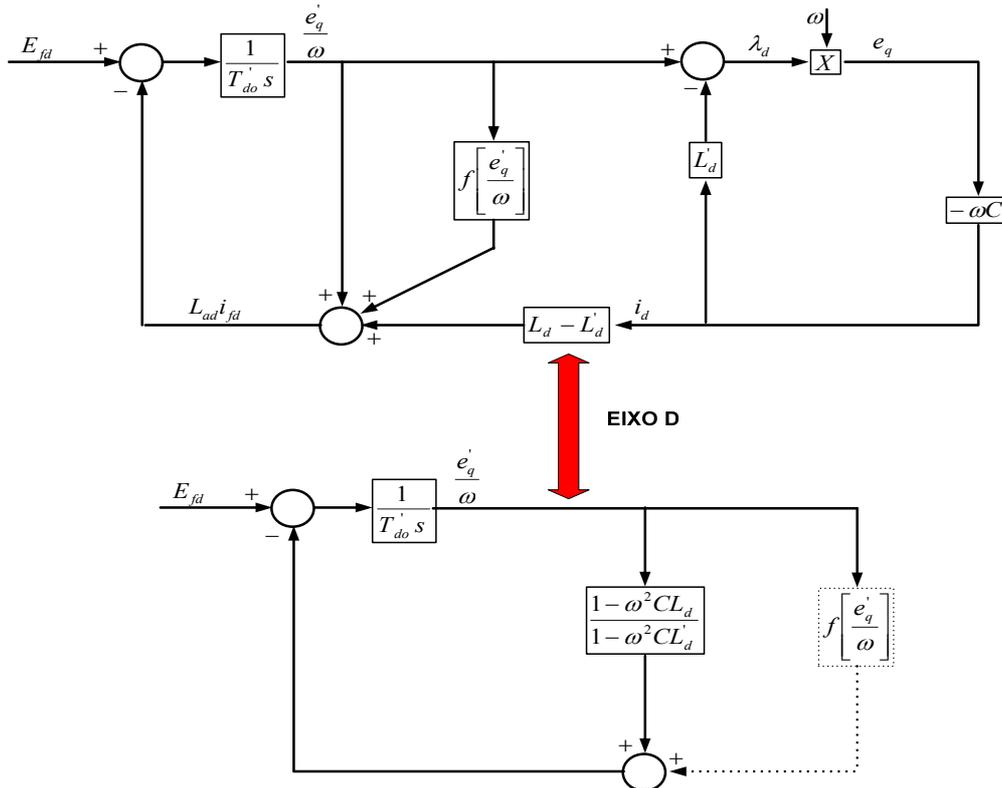


Figura 32- Diagrama de blocos para o eixo d de uma máquina síncrona com carga capacitiva, desprezando o efeito dos enrolamentos amortecedores

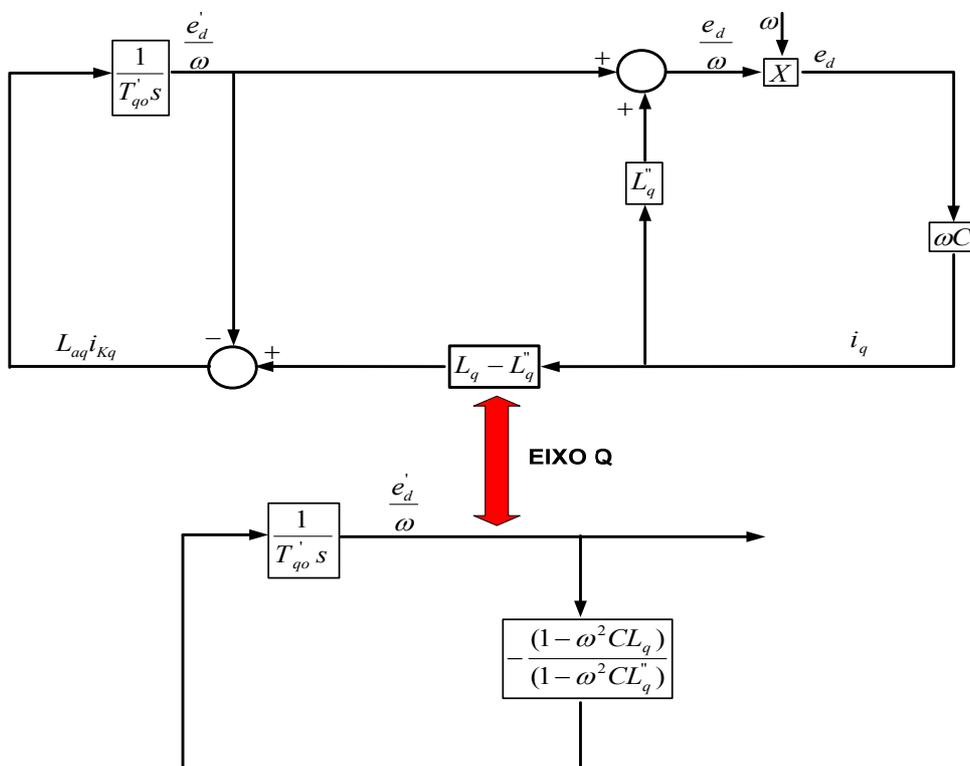


Figura 33- Diagrama de blocos para o eixo q de uma máquina síncrona com carga capacitiva, considerando o efeito de um enrolamento amortecedor

Conforme já citado, o fenômeno da auto-excitação está diretamente ligado ao aumento exponencial de fluxos e tensões como função do tempo. Como este problema está relacionado às não-linearidades devido à saturação, portanto, deve ser resolvido através de simulações digitais.

3.4- Influência do regulador de tensão na resposta da auto-excitação

O regulador de tensão atua no sentido de controlar a tensão terminal da máquina, através do ajuste da tensão de campo no eixo d. Desta maneira, este tipo de controle permite que, numa rejeição de carga, a variação temporal do fluxo de eixo d, $\frac{d\lambda_d}{dt}$, seja controlada durante um período. Como a tensão terminal da máquina é a soma das tensões dos eixos d e q, auto-excitação acaba sendo controlada durante este período.

No caso de uma máquina síncrona sem regulador de tensão, a auto-excitação ocorrerá sempre que a admitância $\frac{1}{\omega C}$ apresentar valores maiores que a reatância síncrona ωL_d para o eixo d. Assim, atingida esta condição, pode ser visto que o valor da capacitância, para a auto-excitação, varia inversamente com o quadrado da frequência da ilha elétrica.

Considerando uma máquina com regulador de tensão, a condição acima é modificada para uma outra onde a auto-excitação ocorra primeiro no eixo em quadratura e não no eixo direto da máquina conforme citado. Assim, num gerador com este controlador, a auto-excitação passa a ocorrer quando $\omega C = 1/\omega L_q$ ou $X_c = X_q$. Desta maneira, o fluxo do eixo em quadratura vai aumentar tão logo a expressão (3.34) seja negativa.

$$\left[\frac{(1 - \omega^2 L_q C)}{(1 - \omega^2 L'_q C) T'_{qo}} \right] \quad (3.34)$$

A presença do regulador de tensão nas máquinas síncronas exerce alguma influência na resposta da auto-excitação. Num determinado período de tempo, após a

rejeição de carga, enquanto os limites não são atingidos, este controlador atua no sentido de manter a tensão terminal da máquina em patamares aceitáveis. Quando o limite mínimo da corrente de campo for atingido, ocorrerá a perda de controle do sistema e a tensão terminal será limitada apenas pela saturação da máquina e do transformador elevador e irá subir até que nenhuma outra ação seja tomada. Esse tempo de controle irá depender se a ponte conversora apresenta capacidade ou não de corrente negativa. Se o sistema de excitação for dotado com esta capacidade especial, o tempo de controle da tensão terminal será maior, pois a corrente de campo poderá excursionar até o seu valor máximo negativo.

3.5- Outro método de análise da Auto-Excitação e Curto-Circuito Capacitivo por Ründenber

Este método de análise dos fenômenos de auto-excitação e curto-circuito capacitivo, por Ründenber, inicia seu estudo a partir da curva característica da saturação em vazio da máquina.

Algumas condições operativas podem levar um gerador síncrono a operar em vazio com uma grande carga capacitiva ligada aos seus terminais. Admitindo que esta carga seja representada por uma reatância capacitiva X_c e o gerador pelo seu modelo clássico de uma tensão E'_q atrás de uma reatância transitória, o sistema pode ser representado por:

$$E'_q = (X'_d + X_c)j_d \quad (3.35)$$

Onde por definição:

$$E'_q = \frac{\omega L_{ad}}{L_{fd}} \lambda_{fd} \quad (3.36)$$

Portanto

$$E'_q \stackrel{\Delta}{=} X_{ad} \left(i_{fd} - \frac{X_{ad}}{X_{ffd}} i_d \right) \quad (3.37)$$

Onde

X_{ad} = Reatância mútua entre o estator e o rotor;

X_{ffd} = Reatância própria do campo da máquina;

I_{fd} = Corrente de campo da máquina.

Analisando a equação (3.37), o termo $\frac{X_{ad}}{X_{ffd}} i_d$ pode ser mencionado como o efeito da reação da armadura expresso em termos da corrente de campo. Este termo, basicamente, representa a componente da corrente do estator transferida para o rotor e dado pela letra $i_{d,f}$. Assim:

$$i_{d,f} = \frac{X_{ad}}{X_{ffd}} i_d \quad (3.38)$$

Desta maneira, a equação (3.37) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$E'_q = X_{ad} (i_{fd} - i_{d,f}) \quad (3.39)$$

$$i_{d,f} = \frac{E_q - E'_q}{X_{ad}} \quad (3.40)$$

Onde a tensão E_q , que é uma tensão associada com a corrente de campo, e dada pela equação (3.41).

$$E_q = X_{ad} i_{fd} \quad (3.41)$$

As tensões E_q e E'_q podem ser relacionadas através da expressão:

$$E_q - E'_q = i_d (X_d - X'_d) \quad (3.42)$$

Logo

$$i_{d,f} = \frac{(X_d - X'_d)}{X_{ad}} i_d \quad (3.43)$$

$$E'_q = \frac{X'_d + X_c}{X_d - X'_d} X_{ad} i_{d,f} \quad (3.44)$$

A partir da característica de saturação da máquina em vazio, várias informações podem ser obtidas sobre o comportamento da auto-excitação e o curto-circuito capacitivo.

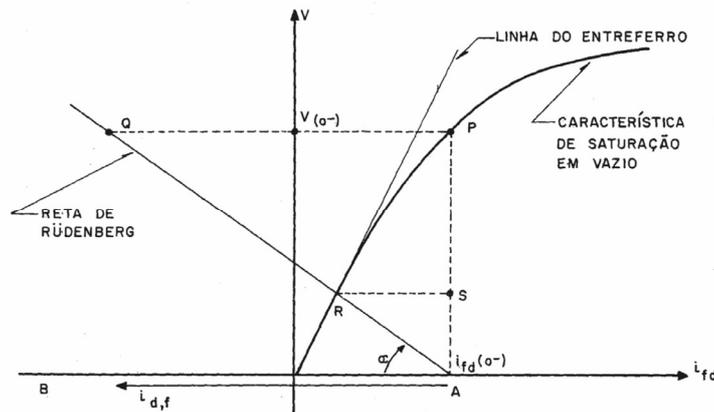


Figura 34- Característica de saturação em vazio da máquina e reta de rudenberg

Analisando a Figura 34, o ponto **P** mostra a condição de operação em vazio inicial da máquina. A partir da projeção deste ponto no eixo da corrente de campo é traçada uma reta, chamada de Rüdénberg, que apresenta inclinação α e a partir da qual, podem ser obtidas características de operação do sistema. O ponto **A** é correspondente à corrente de campo inicial $i_{fd}(0)$ para operação em vazio, enquanto o **Q** representa a interseção da reta de Rüdénberg com a projeção do ponto **p** no eixo da tensão. Assim, a inclinação da reta é dada por:

$$tg\alpha = \frac{X_c + X'_d}{X_d - X'_d} X_{ad} \quad (3.45)$$

Desta maneira, o segmento \overline{QP} mostrado na Figura 34 pode ser dado por:

$$\overline{QP} = V(0^-) \cot g \alpha \quad (3.46)$$

Ou

$$\overline{QP} = E'_q(0^-) \frac{X_d - X'_d}{X_c + X'_d} \cdot \frac{1}{X_{ad}} \quad (3.47)$$

Analisando o conjunto de equações finais para E'_q e \overline{QP} , pode-se dizer que há uma igualdade dada pela expressão:

$$\overline{QP} = i_{d,f}(0) \quad (3.48)$$

A expressão (3.48) mostra que o segmento \overline{QP} é proporcional à corrente de armadura de uma máquina síncrona no instante imediatamente após a rejeição de carga num sistema. Por este motivo, o ponto Q, no sistema de eixos PAB, mostra a solução para o sistema imediatamente após a rejeição de carga.

Todas as equações desenvolvidas anteriormente para a auto-excitação e curto-circuito capacitivo estão direcionadas para o estudo do fenômeno em $t = 0$, ou seja, no momento imediatamente após a rejeição de carga.

A solução final, neste caso, pode ser identificada pela interseção da reta AQ, já conhecida como reta de Rudenberg, com a curva de saturação da máquina em vazio e que é identificada pelo ponto R na Figura 34. Assim, pode-se dizer que:

$$\overline{RS} = i_{d,f}(\infty) \quad (3.49)$$

Esta reta mostra que o comportamento deste fenômeno é regido basicamente pelas posições dos pontos Q, R e A no plano, como pode ser visualizado pela Figura 35 abaixo.

corrente de campo nula para este elemento. Assim, a condição é satisfeita quando:

$$X_d \geq X_c \geq X'_d \quad (3.50)$$

Como característica principal para auto-excitação, o gerador síncrono apresenta sobretensões.

Uma forma de se retardar o surgimento da auto-excitação é dotando o sistema de excitação do gerador síncrono com capacidade de corrente negativa para o campo. Vale ressaltar que esta capacidade extra, reduz temporariamente os valores de tensão e corrente, como também o conjugado sincronizante sem preocupações. Neste caso, quando $X_c = X_q$, a máquina apresenta o seu limite teórico de excitação negativa considerando a potência ativa nula.

Outra condição operativa é quando $X_c = X'_d$, que ocasiona a coincidência da reta de Rudenberg com o eixo da corrente de campo (i_{fd}) sem interseção com a curva de saturação. Esta operação gera uma condição de ressonância onde a corrente fica limitada apenas pela resistência do circuito.

3.5.2- Curto-Circuito Capacitivo (CCC)

A condição operativa na qual uma grande carga capacitiva está conectada aos terminais de um gerador síncrono pode levar a um valor de reatância capacitiva X_c que seja menor que X'_d da máquina. Com essas características, a corrente inicial será bem superior à corrente de curto-circuito trifásico nos terminais, embora os valores finais dessa corrente e da tensão na armadura sejam menores. Esses valores elevados para a corrente de armadura, na fase inicial do processo, ocasionam elevados conjugados transitórios na máquina.

A Figura 35 mostra que a corrente de armadura pode ter um efeito desmagnetizante semelhante ao caso da carga indutiva, e os pontos Q e R se situarem no lado esquerdo do eixo AP. A esse fenômeno é dado o nome de curto-circuito capacitivo (CCC). A região ligada a este fenômeno é mostrada nesta mesma figura.

3.5.3- Análise geral

De uma maneira geral, a auto-excitação e o curto-circuito capacitivo podem ser analisados em conjunto diretamente através das relações entre os valores de X_c , X_d e X_q , sendo todos corrigidos pela frequência da ilha elétrica após a rejeição de carga. A partir deste instante, a reatância capacitiva diminui com o aumento da frequência e as reatâncias internas da máquina começam a aumentar com esta correção. Este comportamento visualizado entre estas reatâncias equivalentes do sistema pode levar ao surgimento da auto-excitação e até mesmo, em condições mais severas, ao curto-circuito capacitivo. Assim, esta relação pode ser mostrada através do gráfico da Figura 36 que considera ainda a existência do regulador de tensão na máquina.

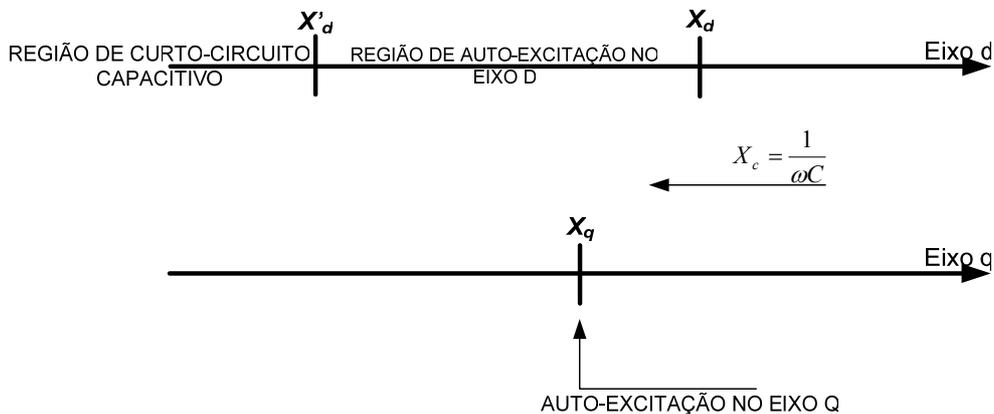


Figura 36- Relação entre os parâmetros internos da máquina e da rede após uma rejeição de carga

Analisando o gráfico da Figura 36, podemos perceber a influência de se representar ou não um regulador de tensão na auto-excitação e no curto-circuito capacitivo. Desta maneira, a análise deste gráfico será feita nos parágrafos a seguir.

A partir de um ponto inicial de X_c em regime permanente, no instante t_0^- ao da rejeição de carga, é feita toda análise. No momento em que ocorre a rejeição de carga, as reatâncias internas da máquina e a reatância capacitiva do sistema começam a ser modificadas pela variação da frequência. As reatâncias internas da máquina começam a aumentar com esta correção, enquanto a reatância capacitiva do sistema começa a diminuir. Desta maneira, nesses pontos de cruzamento, há o surgimento da AEX e CCC. A auto-excitação ocorrerá sempre que o valor da reatância capacitiva (X_c) for menor que o valor da reatância de eixo direto (X_d), quando não houver regulador de

tensão na máquina. Com a presença deste controlador, o eixo d vai sendo regulado e a auto-excitação acaba ocorrendo primeiro no eixo q. O tempo no qual este controlador irá atuar no sentido de manter a tensão de eixo q ainda normal será dado pela capacidade ou não de corrente negativa do sistema de excitação. Se houver esta capacidade extra, a tensão terminal da máquina será controlada e limitada por um tempo maior, em comparação ao sistema sem esta capacidade. Outra característica bem marcante neste gráfico é a região abaixo de X'_d . Quando a reatância capacitiva, corrigida pela frequência, for menor que X'_d , a máquina entrará na região de curto-circuito capacitivo.

3.6- AEX e CCC através da representação completa da máquina

Todas as análises de auto-excitação (AEX) e curto-circuito capacitivo (CCC) desenvolvidas anteriormente apresentaram apenas um caráter analítico de modo a facilitar o entendimento teórico desses processos. Considerando estes propósitos, os desenvolvimentos anteriores limitaram a representação da máquina somente até os seus efeitos transitórios, descartando assim os subtransitórios. Este item tem a finalidade de apresentar mais uma forma de representação matemática desses fenômenos, considerando agora até os efeitos subtransitórios e todo desenvolvimento das equações de máquinas síncronas tratado no capítulo 2.

A partir das equações de Park para a máquina, e desprezando as variações de enlace de fluxo no estator e na resistência do enrolamento, são apresentadas as equações de tensão dos eixos d e q.

$$v_d = -\omega\lambda_q \quad (3.51)$$

$$v_q = \omega\lambda_d \quad (3.52)$$

Considerando uma velocidade ω diferente de 1, e uma carga capacitiva, conforme item 3.3.1, aplicada aos terminais da máquina síncrona numa rejeição de carga, a aplicação da transformada de Laplace será dada por:

$$v_d = -\omega\lambda_q(s) = \frac{1}{\omega C} I_q \quad (3.53)$$

$$v_q = \omega\lambda_d(s) = -\frac{1}{\omega C} I_d \quad (3.54)$$

Para quantificar os enlaces de fluxo do estator, nos eixos d e q, será aplicado o conceito da impedância operacional, que levará até as seguintes expressões:

$$\lambda_d(s) = -L_d(s)I_d + G_1(s)V_{fd} \quad (3.55)$$

$$\lambda_q(s) = -L_q(s)I_q \quad (3.56)$$

Os circuitos característicos para as condições de $v_d(s)$ e $v_q(s)$ podem ser analisados na Figura 37 e na Figura 38.

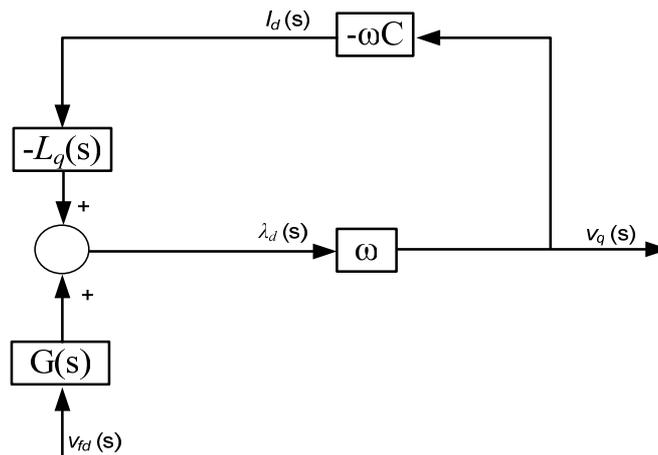


Figura 37- Diagrama de blocos da tensão de eixo q do gerador de pólos salientes com carga capacitiva

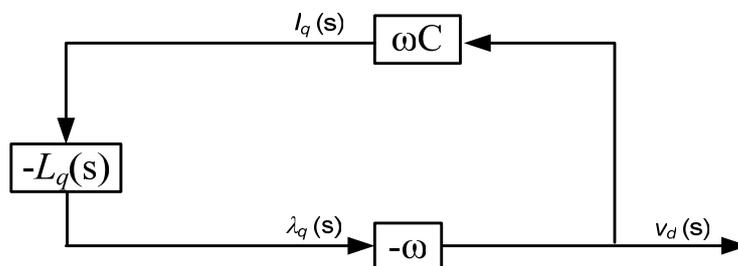


Figura 38- Diagrama de blocos da tensão de eixo d do gerador de pólos salientes com carga capacitiva

Considerando um gerador síncrono tipo hidráulico, onde fenômeno de auto-

excitação é mais visualizado, as indutâncias operacionais $L_d(s)$ e $L_q(s)$ assumem as seguintes expressões:

$$L_d(s) = L_d \frac{(1 + sT'_d)(1 + sT''_d)}{(1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do})} \quad (3.57)$$

$$L_q(s) = L_q \frac{(1 + sT''_q)}{(1 + sT''_{qo})} \quad (3.58)$$

Assim, podem ser estabelecidas as equações que estão associadas aos processos dinâmicos em cada um dos eixos magnéticos d e q, como também para uma frequência ω do rotor.

❖ Equação característica para o eixo d

Partindo do princípio que

$$\omega \lambda_d(s) = -\frac{1}{\omega C} I_d \quad (3.59)$$

Podemos chegar a equação que rege esses processos para o eixo d

$$1 - \frac{X_d}{X_C} \left(\frac{1 + sT'_d}{1 + sT'_{do}} \frac{1 + sT''_d}{1 + sT''_{do}} \right) = 0 \quad (3.60)$$

A equação (3.60) pode ser reescrita isolando os termos das constantes de tempo do eixo d.

$$1 - \frac{X_d}{X_C} \frac{T'_d T''_d}{T'_{do} T''_{do}} \left(\frac{s + \frac{1}{T'_d}}{s + \frac{1}{T'_{do}}} \frac{s + \frac{1}{T''_d}}{s + \frac{1}{T''_{do}}} \right) = 0 \quad (3.61)$$

A partir de agora será feita uma análise no sentido de determinar os pontos de

saída e chegada de X_c na variação da freqüência no plano complexo s . Quando $s \rightarrow 0$, a equação (3.61) se torna:

$$1 - \frac{X_d}{X_c} \frac{T_d' T_d''}{T_{do}' T_{do}''} \left(\frac{T_{do}' T_{do}''}{T_d' T_d''} \right) = 0 \quad (3.62)$$

Simplificando através dos termos semelhantes, temos:

$$1 - \frac{X_d}{X_c} = 0 \quad (3.63)$$

$$X_d = X_c \quad (3.64)$$

Nesta condição, quando $s \rightarrow 0$, $X_c = X_d$.

Quando $s \rightarrow \infty$, a equação (3.61) se torna:

$$1 - \frac{X_d}{X_c} \frac{T_d' T_d''}{T_{do}' T_{do}''} = 0 \quad (3.65)$$

Considerando que $X_d'' = X_d \frac{T_d'' T_d'}{T_{do}'' T_{do}'}$ e que $K = \frac{X_d''}{X_c}$, temos:

$$1 - \frac{X_d''}{X_c} = 0 \quad (3.66)$$

$$X_c = X_d'' \quad (3.67)$$

Nesta condição, quando $s \rightarrow \infty$, $K = 1$ e $X_c = X_d''$.

Através das análises acima, pode ser traçado o diagrama do lugar das raízes para o comportamento de X_c no eixo magnético d . A Figura 39 mostra esse diagrama.

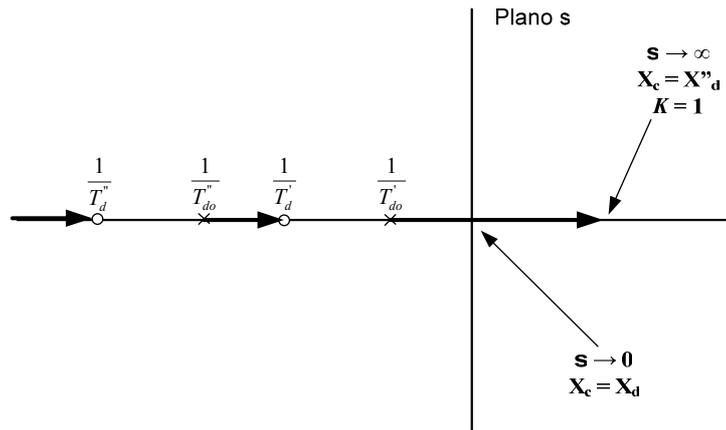


Figura 39- Diagrama do lugar das raízes considerando a variação da reatância capacitiva no eixo d

Analisando a Figura 39 pode-se perceber que a região de instabilidade, ou seja, a região de auto-excitação para o eixo d é satisfeita quando:

$$X''_d < X_c < X_d \tag{3.68}$$

A região estável, através da Figura 39, a partir do ponto $X_c = X''_d$ que anda para o lado esquerdo do plano s, é a região de curto-circuito capacitivo do eixo d. A partir deste ponto, como é a região onde $s \rightarrow \infty$, a reatância capacitiva será muito pequena, pois $X_c = \frac{1}{\omega C}$. Assim, a região de curto-circuito capacitivo pode ser dada pela relação:

$$X_c < X''_d \tag{3.69}$$

As relações mostradas podem ser vistas completamente, para o eixo d, na Figura 40.

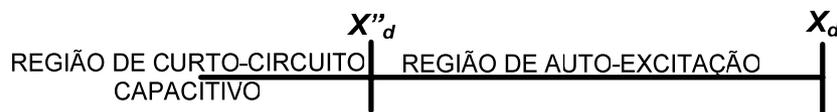


Figura 40- Representação da região de auto-excitação e curto-circuito capacitivo para o eixo d

❖ **Equação característica para o eixo q**

Partindo do princípio que

$$-\omega\lambda_q(s) = \frac{1}{\omega C} I_q \quad (3.70)$$

Podemos chegar a equação que rege esses processos para o eixo q

$$1 - \frac{X_q}{X_c} \left(\frac{1 + sT_q''}{1 + sT_{qo}''} \right) = 0 \quad (3.71)$$

A equação (3.71) pode ser reescrita isolando os termos das constantes de tempo do eixo q.

$$1 - \frac{X_q}{X_c} \frac{T_q''}{T_{qo}''} \left(\frac{s + \frac{1}{T_q''}}{s + \frac{1}{T_{qo}''}} \right) = 0 \quad (3.72)$$

A partir de agora será feita uma análise no sentido de determinar os pontos de saída e chegada de X_c na variação da frequência no plano complexo s . Quando $s \rightarrow 0$, a equação (3.72) se torna:

$$1 - \frac{X_q}{X_c} \frac{T_q''}{T_{qo}''} \left(\frac{T_{qo}''}{T_q''} \right) = 0 \quad (3.73)$$

Simplificando através dos termos semelhantes, temos:

$$1 - \frac{X_q}{X_c} = 0 \quad (3.74)$$

$$X_q = X_c \quad (3.75)$$

Nesta condição, quando $s \rightarrow 0$, $X_c = X_q$.

Quando $s \rightarrow \infty$, a equação (3.72) se torna:

$$1 - \frac{X_q}{X_c} \frac{T_q''}{T_{qo}''} = 0 \quad (3.76)$$

Considerando que $X_q'' = X_q \frac{T_q''}{T_{qo}''}$ e que $K = \frac{X_q''}{X_c}$, temos:

$$1 - \frac{X_q''}{X_c} = 0 \quad (3.77)$$

$$X_c = X_q'' \quad (3.78)$$

Nesta condição, quando $s \rightarrow \infty$, $K = 1$ e $X_c = X_q''$.

Através das análises acima, pode ser traçado o diagrama do lugar das raízes para o comportamento de X_c no eixo magnético q . A Figura 41 mostra esse diagrama.

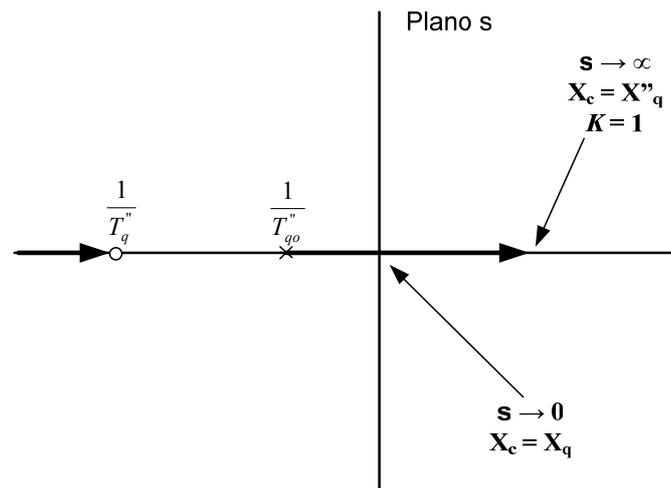


Figura 41- Diagrama do lugar das raízes considerando a variação da reatância capacitiva no eixo q

Analisando a Figura 41 pode-se perceber que a região de instabilidade, ou seja, a região de auto-excitação para o eixo d é satisfeita quando:

$$X''_q < X_c < X_q \quad (3.79)$$

A região estável, através da Figura 41, a partir do ponto $X_c = X''_q$, que anda para o lado esquerdo do plano s , é a região de curto-circuito capacitivo do eixo q . A partir deste ponto, como é a região onde $s \rightarrow \infty$, a reatância capacitiva será muito pequena, pois $X_c = \frac{1}{\omega C}$. Assim, a região de curto-circuito capacitivo pode ser dada pela relação:

$$X_c < X''_q \quad (3.80)$$

As relações mostradas acima podem ser vistas completamente, para o eixo q , na Figura 42:



Figura 42- Representação da região de auto-excitação e curto-circuito capacitivo para o eixo q

As representações gráficas das regiões de auto-excitação e curto-circuito capacitivo para os eixos d e q podem ser construídas em conjunto, no caso que considera a representação completa da máquina e que está mais próxima da representação das máquinas usada nas simulações digitais. Essa representação em conjunto pode ser vista na Figura 43.

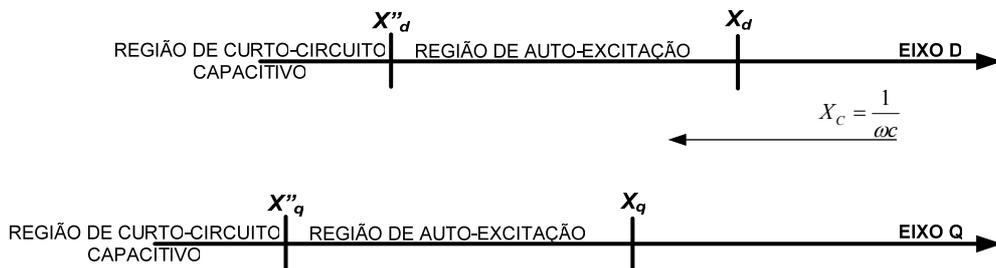


Figura 43- Representação simultânea das regiões de auto-excitação e curto-circuito capacitivo para os eixos d e q

Desta maneira, os fenômenos de auto-excitação e curto-circuito capacitivo podem ser analisados considerando a representação completa da máquina até os seus efeitos subtransitórios. Este método de representação até as condições subtransitórias é mais

completo em relação aos outros apresentados anteriormente, pois eles consideram a representação da máquina limitada nos efeitos transitórios, o que acaba desconsiderando certas características deste fenômeno quando o X_c é muito pequeno.

Uma conclusão visualizada na Figura 39 e na Figura 41 é que a região de auto-excitação está associada a uma região de instabilidade, pois esta característica se encontra no semi-plano direito do plano complexo s , tanto para o eixo magnético d quanto para o q . Este ponto de instabilidade acontece quando $X_c = X_d$, para o eixo d e $X_c = X_q$, para o eixo q .

Outra conclusão importante, visualizada na Figura 39 e na Figura 41, é que a região de curto-circuito capacitivo não é uma região de instabilidade, pois a região associada a esta característica está no lado esquerdo do plano complexo s , tanto para o eixo magnético d quanto para o q .

3.7- Representação dos equipamentos nos estudos de auto-excitação

Historicamente, pelo fato de estarem distantes dos centros de carga e conectados a esses centros através da transmissão em longa distância, os geradores hidráulicos sempre foram grandes candidatos à ocorrência de sobretensões e problemas de auto-excitação devido às grandes cargas capacitivas geradas por essas linhas quando rejeitadas ou em condições de cargas muito baixas.

Com o aperfeiçoamento dos computadores, se tornou possível obter sobretensões nos estudos à frequência fundamental e vários documentos técnicos que mostram algumas medidas cabíveis para solução desses comportamentos adversos. Hoje em dia, existe um grande número de trabalhos técnicos de todas as partes do mundo que falam sobre o fenômeno da auto-excitação, curto-circuito capacitivo e medidas que devem ser tomadas para evitá-los. Uma fonte mundial de pesquisa com amplos trabalhos a este respeito é o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos.

A modelagem do sistema de potência que deve ser considerada para se ter uma solução das sobretensões à frequência fundamental, quando ocorre uma rejeição de

carga num sistema de transmissão longo, é mostrada na Figura 44 [30]. Tanto os geradores hidráulicos quanto os térmicos podem ser representados por um sistema turbina-regulador de velocidade, pelas equações da máquina síncrona e pelo sistema de excitação. Para a modelagem da rede, o maior número de elementos possível deve ser considerado. Com estes elementos é feita a solução simultânea das respectivas equações diferenciais e algébricas do sistema.

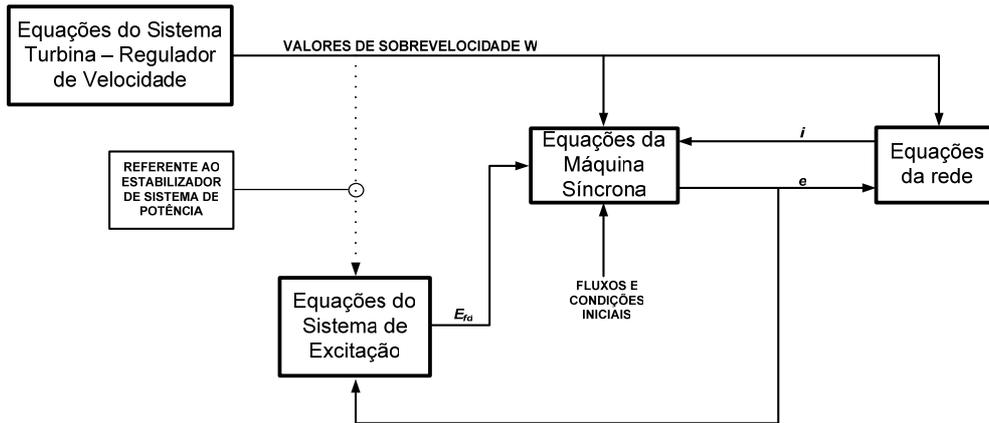


Figura 44- Modelagem considerada nos estudos de rejeição de carga

3.7.1- Representação da rede elétrica

A Figura 45 mostra uma representação para um estudo de auto-excitação, considerando uma usina distante do seu centro de carga e conectada a este centro através de uma longa linha de transmissão. Para a condição operativa em que ocorre a abertura do sistema de transmissão no terminal receptor, este sistema equivalente é visto pela máquina conforme a configuração mostrada na Figura 24 , que permite obter os valores de tensão nos terminais emissor e receptor do sistema.



Figura 45- Representação da linha de transmissão num estudo de rejeição de carga

O sistema de transmissão associado às usinas termelétricas geralmente apresenta

pequeno comprimento, ao contrário dos sistemas conectados às usinas hidrelétricas que apresentam longo comprimento. Outro fator importante é a faixa de sobrevelocidade, que na hidráulica é muito grande, enquanto que na térmica essa faixa geralmente é menor que 10%. É notório que essas características apresentadas por cada tipo de geração têm grande influência num estudo de auto-excitação.

Hoje em dia, com o advento computacional, a representação da rede elétrica pode ser feita com fidelidade de modo a reproduzir todos os efeitos de cada componente existente num estudo de auto-excitação à frequência fundamental. Assim, sendo hidrelétricas ou termelétricas, a representação da rede é considerada adequada para estudos de rejeição de carga.

Nos estudos de auto-excitação à frequência fundamental, do sistema interligado brasileiro, alguns equipamentos como os pára-raios e as características de saturação dos transformadores elevadores, reatores de linha e barra não são representados. A não representação destes equipamentos e das saturações, nestes estudos de rejeição de carga, leva à condições piores de sobretensão nas respostas das simulações. As linhas de transmissão são representadas pelo seu modelo π -equivalente já corrigido pelos termos hiperbólicos com o comprimento. As reatâncias, nas simulações, são corrigidas pela frequência da rede elétrica.

3.7.2- Representação dos geradores síncronos e seus controladores

As máquinas síncronas são representadas pelas suas equações características, na forma operacional, conforme estudado no capítulo 2 deste trabalho. Para este tipo de estudo, se torna importante trabalhar com as grandezas referidas aos eixos magnéticos d e q. Outro fator importantíssimo é a representação da saturação da máquina, que está diretamente ligada a grandezas como o fluxo e a corrente. Os limites máximo e mínimo da tensão do campo devem levar em consideração às características do sistema de transmissão e devem ser definidos, aproximadamente, através de algumas características como tensão e comprimento deste sistema de transmissão conectado à máquina. Os efeitos do ferro no rotor devem ser incluídos nos circuitos equivalentes de ambos os eixos d e q para as máquinas térmicas. No gerador hidráulico, os enrolamentos amortecedores devem ser representados em vez dos efeitos do ferro como nas máquinas

térmicas.

A representação dos sistemas de excitação é basicamente a mesma para as máquinas térmicas e hidráulicas. Hoje em dia, a maioria dos sistemas de excitação é de natureza estática e composta por ponte de tiristores. Estes sistemas de excitação podem ter ou não capacidade de corrente negativa, dependendo dos resultados apresentados pelos estudos de rejeição de carga. Se um sistema for dotado com essa capacidade é permitida a inversão de corrente de campo da máquina, que acaba ajudando a retardar o crescimento de $\frac{dv}{dt}$ logo após essa rejeição.

As duas pontes retificadoras, quando considerada a capacidade de corrente negativa, são conectadas em polaridade reversa para que seja permitida corrente de campo em ambas as direções. Nesta configuração, vale ressaltar que somente uma das pontes é disparada por vez e que o tempo desses disparos permite que a tensão de campo seja positiva ou negativa independentemente da direção da corrente de campo. Este tipo de arranjo implica num sistema de excitação mais caro e que depende de características especiais de projeto da máquina para sua adoção, o que o torna menos comum. Esse tipo de arranjo para o sistema de excitação é geralmente usado em hidrogeradores que estão conectados a sistemas de transmissão radiais e que estão susceptíveis a ocorrência de auto-excitação quando o terminal receptor é aberto, ou seja, ocorre uma rejeição de carga no sistema.

O modelo de regulador de tensão usado nesta dissertação é um tipo controle definido pelo usuário que apresenta todos os limitadores existentes num modelo completo. Para limitação positiva da corrente de campo neste modelo foi introduzida uma lógica de limitação de corrente mínima que permite apenas que essa corrente chegue a valores bem próximos de zero e que não inverta. Este artifício de se usar lógicas para limitação da corrente de campo, segundo alguns engenheiros de sistemas de potência, é amplamente usado na modelagem de reguladores de tensão, pois permite um controle maior do sistema.

O regulador de velocidade é um elemento que deve ser bem representado, pois as características de sobrevelocidade de um gerador síncrono atuam diretamente nos

parâmetros do sistema de transmissão. Por este motivo, se torna importante, nos estudos de rejeição de carga, ter reguladores bem ajustados de forma que possam atuar o mais rápido possível no sentido de reduzir as sobrefrequências da rede elétrica. Nesta dissertação está sendo usado o modelo típico **HYGOV** com os parâmetros ajustados numa etapa inicial de um estudo de planejamento. A modelagem completa, assim como os ajustes dos parâmetros, pode ser vista no capítulo 4 desta dissertação.

Os estabilizadores de sistemas de potência, quando ocorre uma rejeição de carga seguida de sobrevelocidade, são desligados da sua função de amortecimento de oscilações eletromecânicas. Geralmente, este processo é feito através de lógicas que enxergam o valor da potência ativa e atuam no sentido de desligar esse controlador. Neste trabalho, as máquinas estão inicialmente sem este controlador, pois o intuito aqui é somente visualizar os efeitos da rejeição de carga e não problemas de estabilidade eletromecânica.

3.8- Execução dos estudos de auto-excitação no Sistema Interligado Brasileiro

Esta parte do trabalho tem o intuito de descrever como é procedido um estudo de auto-excitação/curto-circuito capacitivo no sistema interligado brasileiro. Pelo fato de apresentar dimensões continentais, e por sua característica de grandes troncos de transmissão CA ou CC, se torna de grande importância a execução dos estudos de auto-excitação nos geradores síncronos destes troncos.

Nas alternativas selecionadas para um determinado estudo da expansão do sistema elétrico brasileiro, podendo ser a conexão de uma grande usina ou até mesmo uma longa interligação entre subsistemas, devem ser feitos estudos de rejeição de carga de modo a verificar o comportamento do sistema quanto as sobretensões que podem vir a aparecer.

Os estudos de rejeição de carga, basicamente, são feitos através da abertura dos “n” circuitos paralelos de um trecho de um determinado sistema de transmissão em corrente alternada ou bloqueio dos pólos de um sistema em corrente contínua. A Figura 46 e a Figura 47 mostram os esquemas de uma rejeição de carga num sistema de

transmissão em corrente alternada e contínua respectivamente.

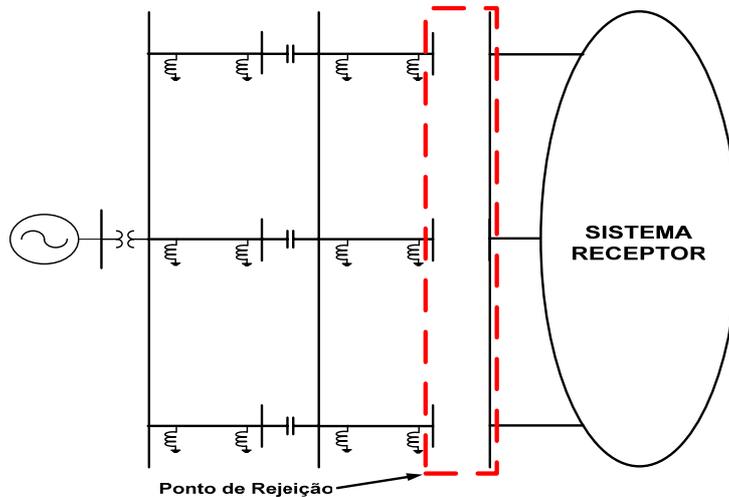


Figura 46- Esquema de rejeição de carga num sistema em corrente alternada

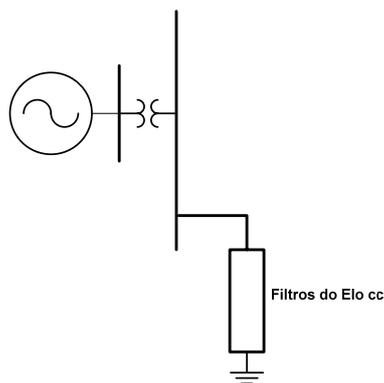


Figura 47- Esquema de rejeição de carga num sistema em corrente contínua

Em alguns sistemas de transmissão, a configuração para a rejeição de carga pode mudar em virtude das características do sistema. Podem ser feitas análises que contemplam a abertura de somente um circuito, ou uma configuração que se deseja ainda manter uma carga conectada à usina. O grupo responsável deve obter a melhor forma de realização do estudo da alternativa.

Inicialmente, nas alternativas de transmissão em estudo, é feito o desenvolvimento da rejeição de carga à frequência fundamental usando o programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM)[®] do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Nesta representação, as melhores grandezas a serem observadas para análise dos resultados obtidos durante a simulação são:

- Frequência da máquina em Hertz – **FMAQ** na plotagem do ANATEM[®];
- Tensão terminal da máquina em pu – **VOLT** na plotagem do ANATEM[®];
- Corrente de campo da máquina em pu – **IFD** na plotagem do ANATEM[®];
- Tensão de campo da máquina em pu – **EFD** na plotagem do ANATEM[®];
- Corrente de armadura da máquina em pu – **IMQS** na plotagem do ANATEM[®].

Apesar de terem sido indicadas para plotagem as grandezas acima, nada impede que outras também sejam usadas num estudo no qual se deseja visualizar outras saídas. Assim, podem ser indicadas grandezas como reatâncias equivalentes vistas nos circuitos, susceptâncias geradas por elementos controladores de tensão ou até mesmo saídas de blocos de algum controlador.

Nesta etapa do estudo são feitas as seguintes considerações para representação de alguns equipamentos e características:

- São representadas as máquinas e seus controladores, menos o PSS;
- São representados os reatores de barra e linha sem as suas respectivas características de saturação;
- Linhas de transmissão no modelo π - equivalente corrigido;
- Não é considerado o efeito da característica da curva de saturação do transformador elevador;
- Os pára-raios existentes no sistema de transmissão não são modelados;
- Não é feita uma representação detalhada dos filtros harmônicos e suas componentes.

As considerações citadas acima podem ser atribuídas à capacidade e a finalidade do programa em uso. Como o ANATEM[®] é um programa desenvolvido para estudos de estabilidade eletromecânica, não há necessidade de se representar saturações e pára-raios aqui. Por este motivo, conseqüentemente, não são representados os elementos citados nos estudos de rejeição de carga à frequência fundamental (60 Hz).

Após processadas as simulações à frequência fundamental são determinados os piores casos que apresentaram severas sobretensões. Estes casos são estudados em programas que apresentam maiores detalhamentos de representação do sistema, os quais podem ser citados ATP, EMTDC entre outros, com o intuito de verificar a conseqüência dessas sobretensões nos equipamentos como os pára-raios e disjuntores. Esta análise, nestes programas de transitórios, não foi considerada nesta dissertação.

Uma rejeição de carga num sistema em corrente alternada, quando feita à frequência fundamental, apresenta as piores condições para tais estudos, pois não se tem a representação de equipamentos e características, como saturações e pára-raios, que podem vir ajudar a controlar o crescimento da tensão na rejeição de carga. Em programas mais detalhados, a representação destes garante melhores condições para se evitar auto-excitação. Assim, quando um caso em corrente alternada, salvo algumas condições particulares, apresenta condições não favoráveis à frequência fundamental, ele está na pior situação operativa quando comparado com representações mais detalhadas.

Em um sistema em corrente contínua, tal fato não pode ser afirmado. Algumas configurações podem apresentar comportamentos piores num programa mais detalhado em comparação com programas à frequência fundamental. Um exemplo que pode ser citado é a condição de componente harmônica que não é estudada num programa de análise mais simplificada e somente num mais detalhista. Estas condições de ressonância podem gerar sobretensões piores quando comparadas com tensões analisadas à frequência fundamental.

4- SIMULAÇÕES

4.1- Objetivo

O objetivo principal das simulações é mostrar a influência de cada modo operativo ou configuração sistêmica no fenômeno da auto-excitação/curto-circuito capacitivo, à frequência fundamental (60 Hz), de uma máquina síncrona, que neste caso em especial foi usado um gerador tipo bulbo. Todas as análises efetuadas não têm o intuito de evitar esses fenômenos ou balizar valores, mas sim mostrar as respectivas influências e servir como base para medidas que possam ser adotadas em estudos específicos de rejeição de carga da expansão ou da operação à frequência fundamental ou considerando análises mais detalhadas.

4.2- Base de dados

A base de dados utilizada em todas as simulações desta dissertação tem procedência nos estudos atuais de planejamento da expansão ou da operação [26]. Assim, os sistemas de transmissão CCAT e CAAT, bem como os geradores e seus controladores, foram utilizados anteriormente em estudos do sistema interligado.

4.2.1- Sistemas de Transmissão

4.2.1.1- Sistemas de transmissão em corrente alternada

Nesta dissertação será considerada a transmissão em corrente alternada na tensão de 765 kV, com 3 circuitos em paralelo, com comprimento total de aproximadamente 650 km. A geração conectada neste circuito, que é de 6450 MW totais, é hidráulica com máquinas tipo Kaplan – bulbo. A Figura 48 mostra o esquema deste circuito;

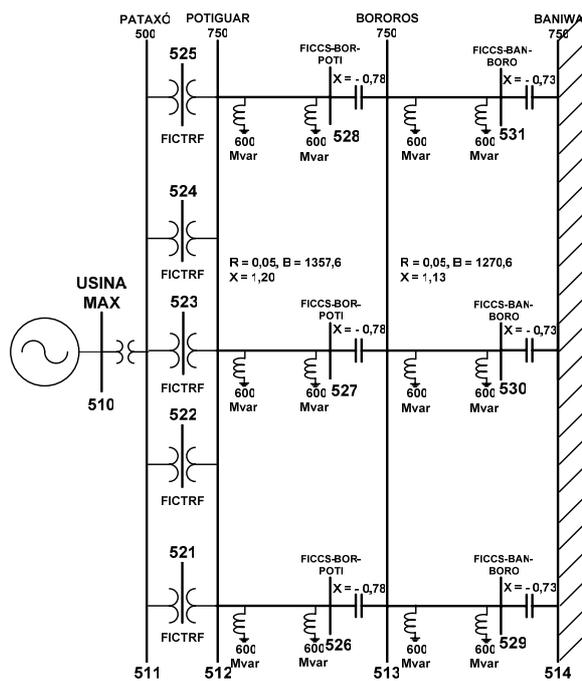


Figura 48- Sistema CA de 765 kV usado nos testes práticos

O arranjo mostrado na Figura 48, como sistema de transmissão, foi escolhido para a realização dos testes em corrente alternada pelo fato de representar um sistema típico para escoamento da usina com essa potência total. As características elétricas e construtivas deste sistema de transmissão podem ser vistas com maiores detalhes ao longo do Apêndice B desta dissertação. Além dessas características mostradas, este sistema, quando rejeitado no terminal mais extremo, submete o gerador síncrono ao fenômeno da auto-excitação. Vale ressaltar que o sistema aqui proposto, na Figura 48, não está otimizado e que o montante de reatores de linha apresentado inicialmente é um valor pré-definido e sem estudos especiais de energização. Este circuito faz parte de um trecho de um sistema de transmissão usado em um estudo de expansão do sistema interligado brasileiro. Foram dados nomes de tribos indígenas brasileiras às barras existentes neste circuito, como uma forma de homenagem a esses grupos que às vezes são atingidos quando da construção de linhas de transmissão ou usinas hidrelétricas. Um sistema existente, com características parecidas, é o sistema de transmissão da usina de Itaipú com aproximadamente 800 km na tensão de 765 kV.

A rejeição de carga, neste caso, está sendo feita considerando abertura simultânea dos três circuitos entre as barras **513-514**, no terminal receptor da barra 514. Este tipo de ocorrência, como a abertura dos três circuitos simultâneos, embora seja de baixa

probabilidade de ocorrência, deve ser estudada devido a magnitude das tensões envolvidas e ao fato de que o sistema deve estar preparado para suportar tal fenômeno. Vale ressaltar que esta dissertação não tem o intuito de fazer um estudo específico para AEX e CCC, e sim rever alguns conceitos sobre tais e mostrar a influência de algumas ações de controle que possam retardar o surgimento desses fenômenos nos geradores síncronos. Assim, a linha em vermelho na Figura 49 mostra o ponto de rejeição deste sistema.

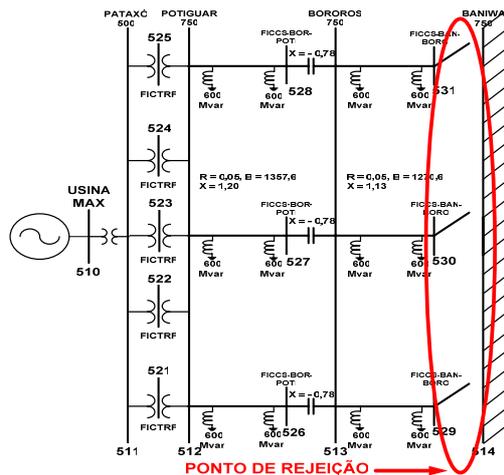


Figura 49- Ponto de rejeição no sistema de 765 kV em CA

4.2.1.2- Sistemas de transmissão em corrente contínua

Considerando a transmissão em corrente contínua, na tensão de 600 kV, são usados 3 bipólos para escoamento dessa potência.

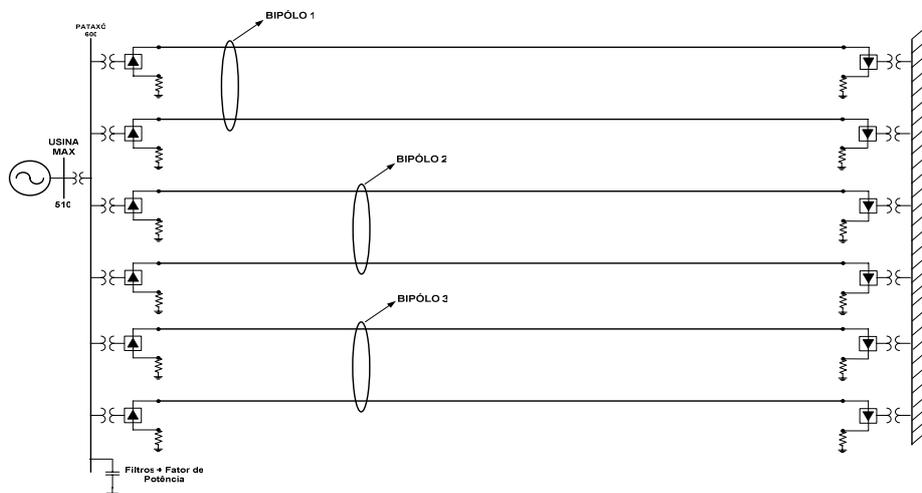


Figura 50- Sistema de Corrente Contínua em 600 kV com 3 bipólos

O estudo da rejeição de carga, em sistemas de transmissão em corrente contínua (CCAT), é muito importante pelo fato da existência de filtros capacitivos para redução dos harmônicos gerados pelo chaveamento das válvulas de tiristores. Nestes sistemas, quando ocorre a perda da transmissão CC, os filtros ainda ficam conectados durante o tempo necessário para o comando de sua abertura. Assim, enquanto estes capacitores ainda permanecem ligados, eles representam uma grande carga capacitiva sobre a máquina, que dependendo das condições de despacho e do número de máquinas, podem levar a ocorrência da auto-excitação ou até mesmo uma condição mais severa de curto-circuito capacitivo (CCC).

Como a finalidade desta parte do trabalho é verificar a ocorrência da auto-excitação, ou até mesmo CCC, quando esses filtros capacitivos ainda permanecem no sistema na abertura desses pólos, a transmissão CCAT mostrada na Figura 50 será substituída por um equivalente mais simples que reproduzirá com fidelidade todas as características de potência e tensão deste sistema de transmissão na barra conversora. Esta representação será feita através da conexão da usina numa barra com os respectivos montante de filtros capacitivos originais e valores de P e Q transmitidos anteriormente. Será mantido também o fator de potência original e estabelecido em 0,999 indutivo. Esta nova representação pode ser visualizada na Figura 51.

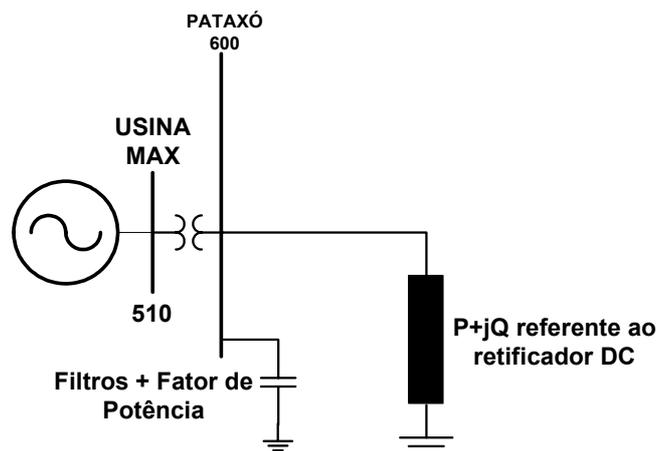


Figura 51- Sistema representativo ao CCAT de 3 bipólos de 600 kV

A representação do bloqueio deste sistema de transmissão será feita considerando os valores de potências ativa e reativa iguais a zero no momento da rejeição, com a permanência dos filtros capacitivos nos terminais da máquina.

4.2.2- Geradores

4.2.2.1- Introdução

Os geradores usados no desenvolvimento desta dissertação pertencem a uma tecnologia de máquinas síncronas que usam a vazão de um determinado rio, em vez da energia potencial da altura das grandes barragens, como é feito nas usinas convencionais, para gerar energia elétrica. Praticamente, essas máquinas parecem pequenos submarinos ancorados em túneis, nos quais passam grande volume de água e que, através do princípio do arrasto, movem as pás dos geradores. Este tipo de turbina é chamada de bulbo ou até mesmo considerada uma derivação da turbina kaplan, podendo também ser chamada de kaplan - bulbo para pequenas quedas. Uma fotografia referente a este tipo de máquina pode ser vista na Figura 52, que mostra apenas um dos geradores de um determinado empreendimento.

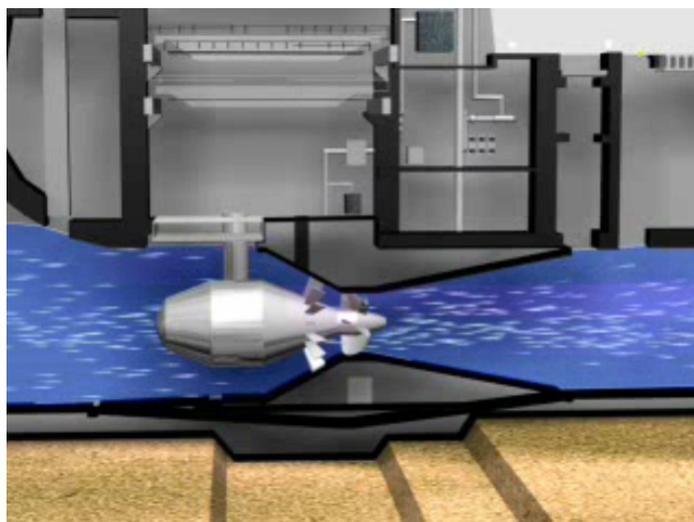


Figura 52- Fotografia referente a um gerador tipo bulbo

A título de curiosidade, este tipo de máquina não causa grande impacto ambiental no local onde é instalada devido às suas características construtivas. Pelo fato da altura da sua barragem ser muito menor, quando comparada com as usinas tradicionais, a área alagada também é menor.

4.2.2.2- Modelagem das máquinas

A modelagem usada nesta dissertação, para representação destes geradores, foi os modelos internos para máquinas síncronas que são intrínsecos à base de dados do programa usado nas simulações, a saber, ANATEM[®], do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. A Figura 53 [28] mostra os diagramas de blocos referentes à modelagem dos geradores nos eixos d e q, como também o diagrama de blocos para representação da equação de oscilação eletromecânica.

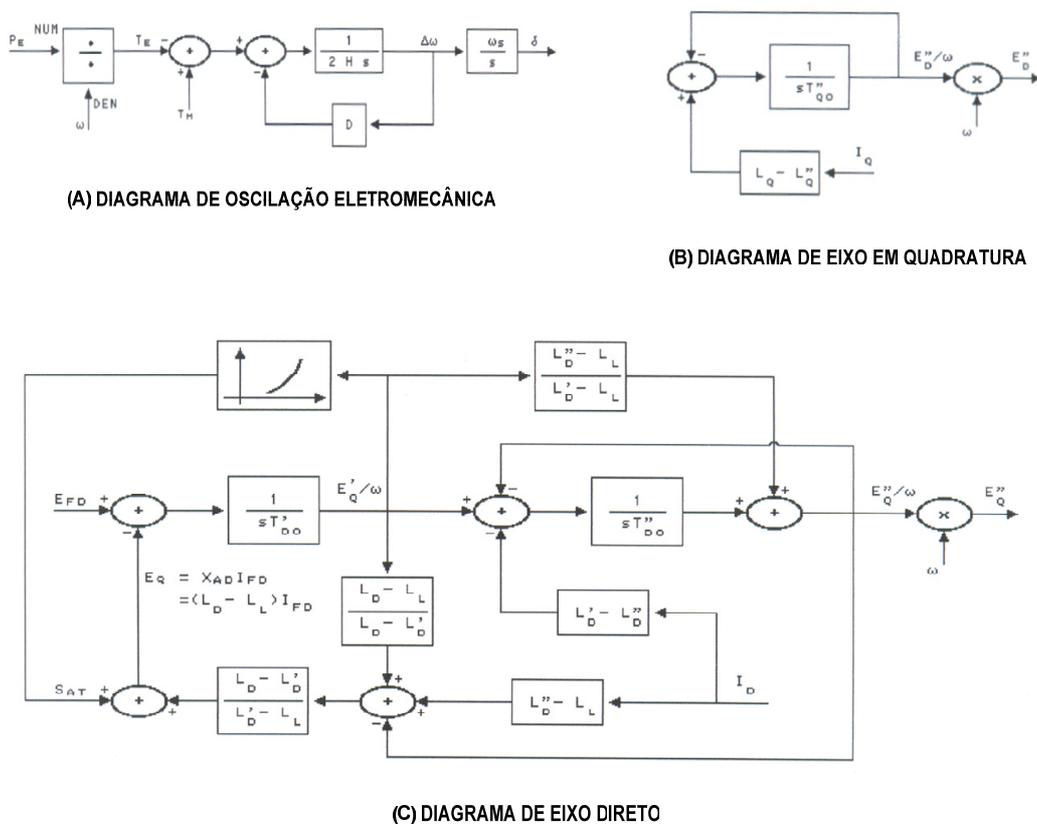


Figura 53- Diagramas referentes à modelagem das máquinas síncronas tipo bulbo

Os valores ajustados para os parâmetros desta máquina podem ser analisados na tabela abaixo.

Tabela 4- Parâmetros dos geradores síncronos tipo bulbo

Parâmetro	Valor Definido
Xd (pu)	1,10
Xq (pu)	0,70
X'd (pu)	0,40
X''d (pu)	0,32
Xl (pu)	0,20
T'do (s)	5,00
T''do (s)	0,05
T''qo (s)	0,09
H (s)	1,40
MVA	316
Ra (pu)	0,0052

A principal característica visualizada na Tabela 4, referente aos parâmetros internos deste tipo de máquina, e que a diferencia dos outros tipos de máquinas síncronas, é a sua constante de inércia **H**, que neste caso é um valor muito pequeno quando comparado com os respectivos valores de **H** das máquinas síncronas convencionais. Fisicamente, este parâmetro indica que a máquina pode sofrer grandes acelerações e variações de frequência num distúrbio como faltas no seu sistema de transmissão ou até mesmo em rejeições de carga.

4.2.3- Modelagem dos Controladores da máquina

A modelagem dos controladores usados foi validada através de alguns ensaios realizados na fase de montagem da base de dados para os estudos de estabilidade eletromecânica de planejamento. Estes modelos são atualmente usados nos diversos estudos no planejamento do sistema interligado brasileiro.

4.2.3.1- Modelagem do sistema de excitação

O regulador de tensão é um equipamento fundamental de controle para uma máquina. Esse controlador atua no sentido de regular a tensão terminal e também de manter o sincronismo da máquina quando o sistema ao qual ela está conectada sofrer contingências ou distúrbios. As excitatrizes estáticas podem ser ou não dotadas de capacidade de corrente negativa. Geralmente, nos estudos de concepção de um determinado projeto, estas excitatrizes são inicialmente especificadas sem essa capacidade e numa determinada etapa do estudo, pode ser solicitada como um requisito especial para auxiliar o controle da tensão. Conforme já mostrado nos fundamentos teóricos deste trabalho, a presença dessa capacidade ajuda a retardar o surgimento de tensões elevadas nos circuitos das máquinas síncronas. A exclusão desta capacidade impede a reversão de corrente da ponte retificadora, limitando assim a absorção da potência reativa. Neste trabalho, esta limitação foi representada através de um controle da corrente mínima de campo, chamado de limitador de IFD, inserido na malha do regulador de tensão da máquina e que limita o valor da corrente de campo (IFD) em função de uma referência. Se não existir a ponte negativa no sistema de excitação estático, a referência de corrente de campo mínima deve ser superior ou igual ao menor valor de corrente da ponte positiva para que esta continue em operação, impedindo assim que essa variável se torne negativa. A modelagem de todo sistema de excitação, assim como os vários controles internos, serão mostrados nas figuras abaixo.

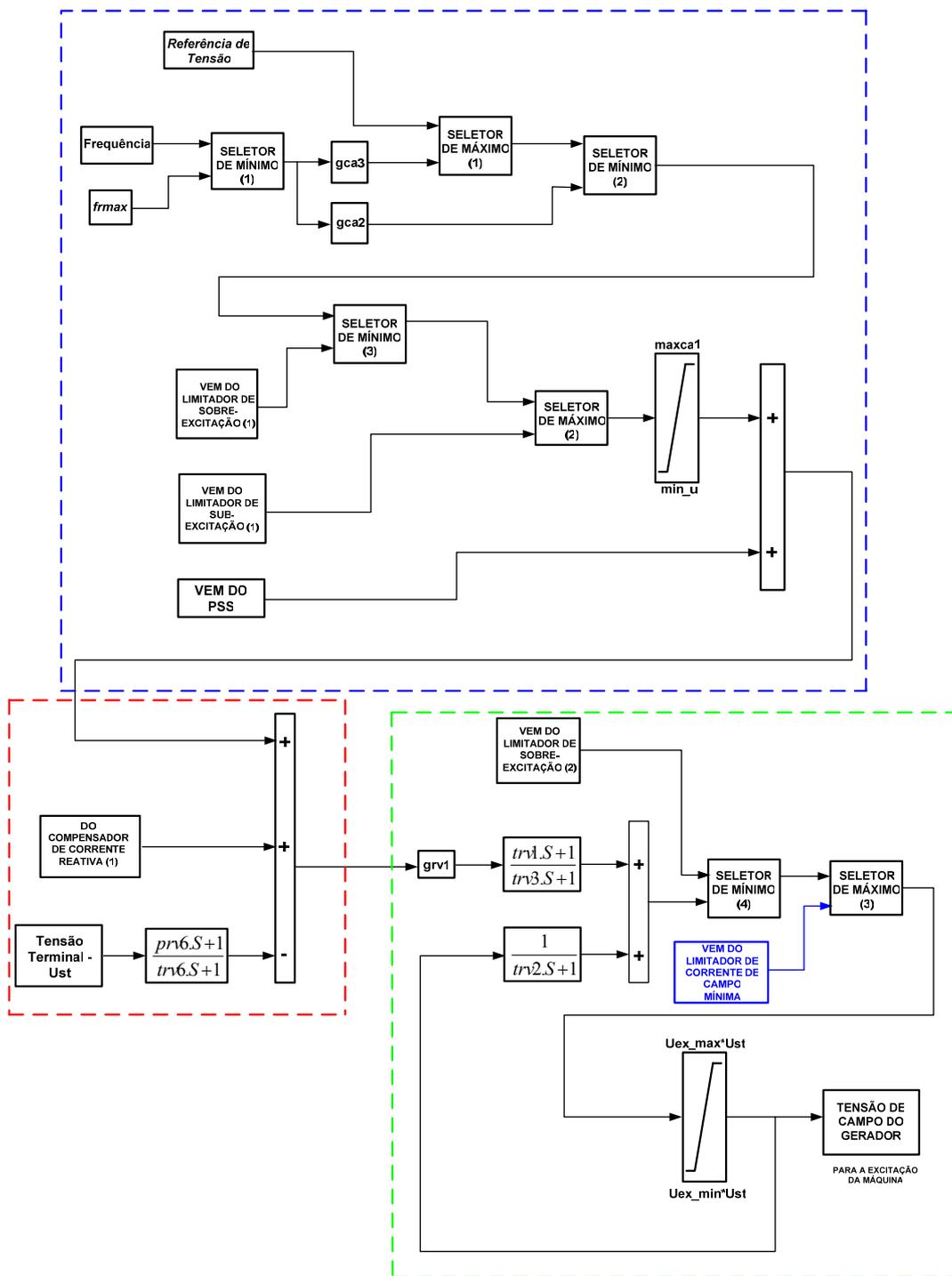


Figura 54- Diagrama de blocos completo do sistema de excitação

A modelagem apresentada na Figura 54, que está destacada em verde, mostra que o regulador de tensão é composto basicamente, na sua malha principal, por:

- um ganho de regime permanente ($grv1$);
- um bloco lead-lag para ajuste do ganho transitório;

- um seletor de mínimo (4) para atuação do limitador de sobreexcitação;
- um seletor de máximo (3) para atuação do limitador de corrente mínima de campo;
- e a saída do sinal da tensão de campo do gerador.

Um componente importante neste diagrama de blocos é o seletor de máximo (3) que faz o chaveamento para quais condições operativas o controle do limitador de corrente mínima de campo deve atuar. O caso de uma rejeição de carga é típico para atuação deste tipo de controle.

A parte do regulador de tensão destacada em azul mostra o processo de cálculo e obtenção da tensão de referência para o operador soma da malha principal. Esta malha tem como variáveis principais a referência de tensão e a frequência da barra. São comparadas também, nesta mesma malha, entradas vindas dos limitadores de sobre e sub-excitação no intuito de se limitar o valor calculado desta referência de tensão.

A parte em vermelho é simplesmente um operador soma que fornece um erro, em relação à tensão de referência calculada, para atuação da malha principal do regulador de tensão.

Na modelagem completa do regulador de tensão são mostrados alguns blocos que formam os limitadores internos deste controlador. Neste modelo são considerados o limitador de sobre-excitação (OEL), o limitador de sub-excitação (UEL), o compensador de corrente reativa (LDC) e o limitador de corrente mínima (Lif_{mn}). A representação completa para cada um desses limitadores pode ser vista nas figuras que seguem. Nesta dissertação, somente será explicado o funcionamento do controle que diz respeito ao limitador de corrente mínima de campo, pois os outros, além de não estarem ligados diretamente aos fenômenos aqui estudados (**AEX** e **CCC**), são amplamente conhecidos. Por este motivo, os outros controles serão apenas mostrados e descritos nas respectivas tabelas colocadas no apêndice C deste trabalho.

➤ **Limitador de sobre-excitação (OEL - Lim_{sob});**

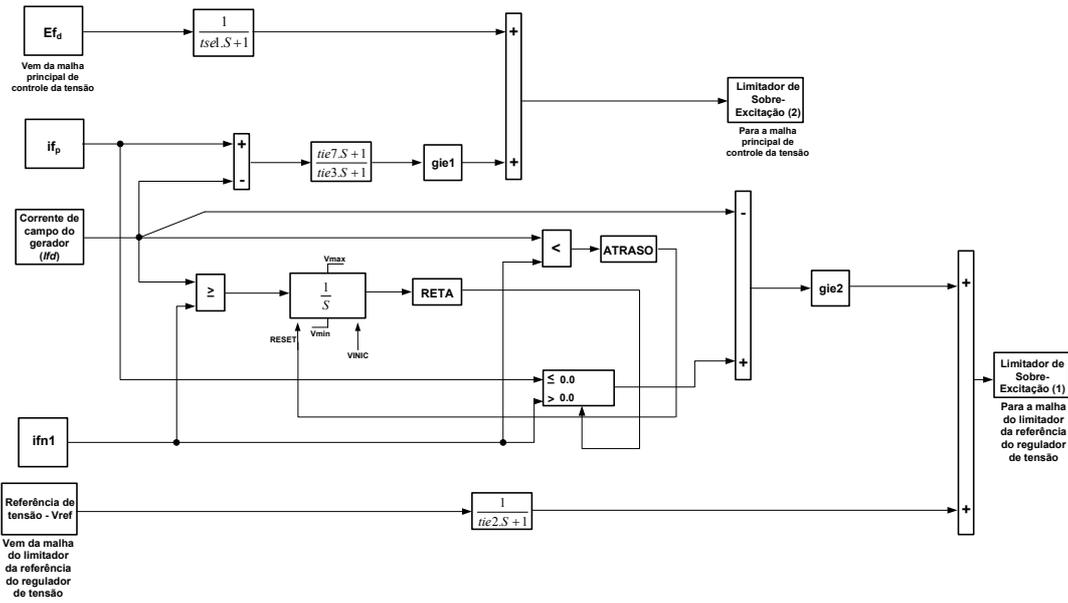


Figura 55- Diagrama de blocos referente ao Limitador de sobre-excitação

➤ **Limitador de sub-excitação (UEL - Lim_{sub});**

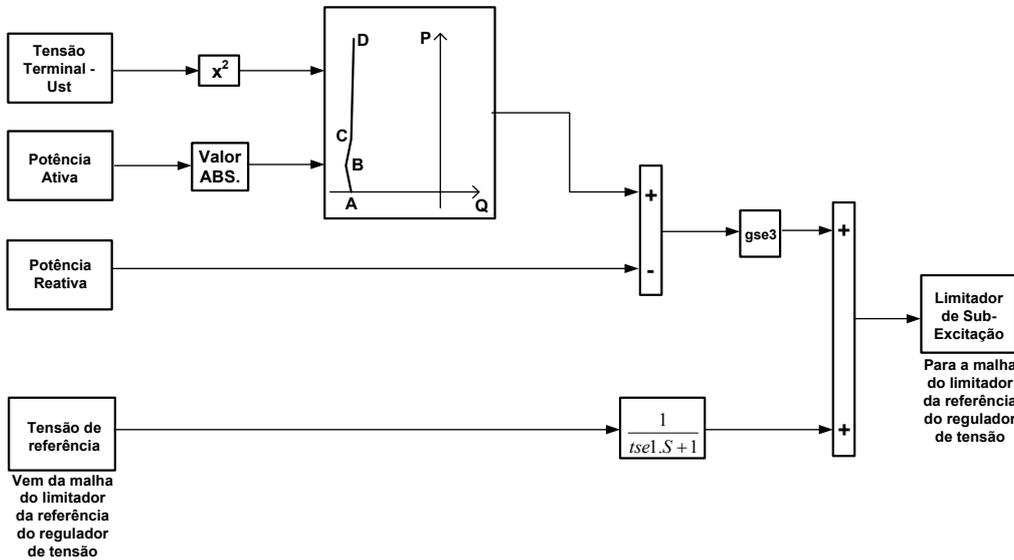


Figura 56- Diagrama de blocos referente ao Limitador de sub-excitação

➤ **Compensador de Corrente Reativa (LDC);**

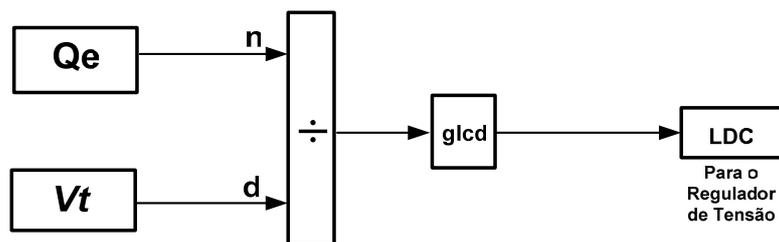


Figura 57- Diagrama de blocos referente ao LDC

➤ **Limitador de Corrente Mínima de Campo ($I_{f\min}$);**

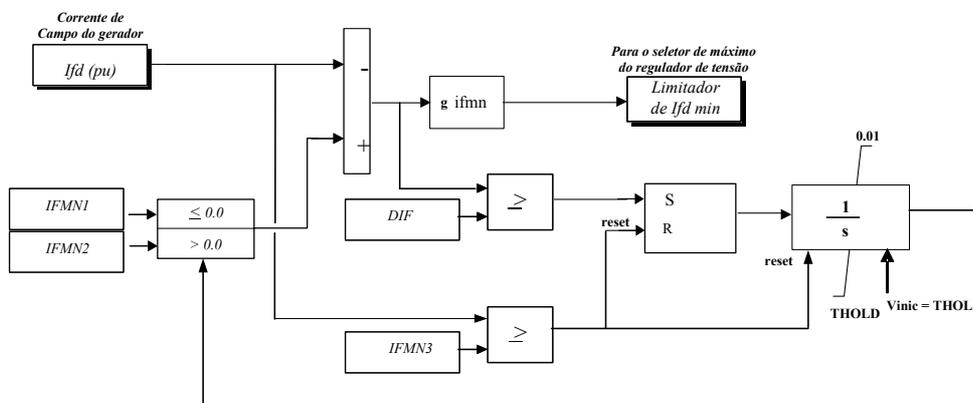


Figura 58- Diagrama de blocos do controle da ponte de corrente negativa

A principal função do limitador de corrente mínima de campo da ponte é evitar a interrupção da corrente de campo. Este limitador é geralmente utilizado nos hidrogeradores, que podem operar na faixa de sub-excitação do diagrama de potência, isto é, com corrente próxima de zero. Nesta faixa, o limitador mantém a corrente de campo num valor mínimo necessário para a comutação da corrente.

O princípio de funcionamento deste controlador está baseado na comparação da corrente de campo medida (IFD) com a referência de corrente mínima, sendo o erro de controle entre essas duas medidas multiplicado por um ganho proporcional. O sinal de saída deste limitador é comparado com o sinal de erro proveniente do regulador de tensão através de um bloco seletor de máximo, para que o sistema de excitação comute do modo de controle de tensão para modo de controle de corrente de campo. Assim, a variação da tensão de campo passa a ser feita através do ajuste da corrente de campo.

Em uma versão mais simples, este limitador possui somente uma referência que corresponde à corrente mínima de campo da ponte permissível e tem ação imediata. No caso do modelo apresentado na Figura 58, o valor de referência da corrente mínima pode ser dado por dois parâmetros, IFMN1 e IFMN2, que correspondem aos limites da corrente da ponte positiva e da ponte negativa, respectivamente.

Este modelo mais elaborado de controle, que possui dois valores de referência, foi desenvolvido para possibilitar a representação de retardos no processo de comutação entre a ponte positiva e a negativa, que é adotada na prática por alguns fabricantes. A comutação da referência positiva da corrente para a referência negativa pode ser instantânea ou temporizada, dependendo dos parâmetros adotados.

➤ **Controle para o limite positivo da corrente de campo**

Se apenas existir a ponte positiva, a corrente de campo (IFD) é comparada com uma referência positiva, que é o limite de corrente mínima da ponte, dada pelo parâmetro **IFMN1**. Neste modelo mais completo, se os valores dos parâmetros **IFMN1** e **IFMN2** forem iguais e positivos, a referência para o controle da corrente sempre ficará neste valor positivo. Assim, a malha referente à temporização do chaveamento entre os valores de referência não apresenta nenhuma influência na resposta final.

➤ **Controle para o limite negativo da corrente de campo**

Neste modo de controle, a corrente de campo (IFD) é inicialmente comparada com a referência da corrente mínima da ponte positiva dada por **IFMN1**. Quando o valor da corrente positiva cai abaixo da sua referência, e o erro de controle for maior ou igual a um valor mínimo dado pelo parâmetro **DIF**, será enviado um sinal de set para o integrador que começará a contar tempo para chaveamento do valor de referência **IFMN2**, que representa o valor de regime da máxima corrente de campo da ponte negativa. Este tempo de chaveamento para o valor ajustado em **IFMN2** é dado pela variável **T_{HOLD}** do integrador. O retorno da referência negativa **IFMN2** para a referência positiva **IFMN1** só será efetuada quando a corrente de campo for superior ao valor dado pelo parâmetro **IFMN3** (valor de reset). Caso se queira uma outra filosofia de controle, na qual ocorre uma comutação instantânea da ponte positiva para a ponte

negativa, basta fazer os valores de **IFMN1** e **IFMN2** iguais aos valores de corrente máxima da ponte negativa.

A descrição de todos os parâmetros usados no diagrama de bloco da Figura 58, referente ao limitador de corrente de campo, pode ser visualizada na tabela abaixo.

Tabela 5- Descrição dos parâmetros da lógica de limitação da corrente mínima de campo

Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição	Faixa
gifmn	-	pu	Ganho do controlador	(0,010,0)
IFMN1	-	pu	Referência da corrente mínima positiva da ponte	(0,0 ... 0,2)
IFMN2	-	pu	Referência da corrente máxima negativa da ponte	(-0,4 0,0)
IFMN3	-	pu	Valor de Reset	(0,0 0,1)
DIF	-	pu	Banda morta para o chaveamento	(0,0 ... 0,05)
THOLD	-	s	Tempo de espera para chaveamento	(-0,2 ... 0,0)
V _{inic}	-	s	Tempo inicial para contagem do chaveamento	

Para atuação da lógica de limitação foram feitos ajustes nos valores de **IFMN1**, **IFMN2** e também no ganho gifmn, de modo a reduzir o sobrevalor apresentado pela corrente de campo e que poderia ser traduzido como uma capacidade de absorção negativa temporária que seria inexistente.

4.2.3.1.1- Características básicas do sistema de excitação

As características básicas do sistema de excitação da máquina são:

Corrente de campo nominal da máquina em relação à corrente base = **2,464 pu**;

Teto máximo da tensão de campo da máquina em vazio= **7,00 pu**.

Teto mínimo da tensão de campo da máquina em vazio = **-5,29 pu**.

Limite para a mínima corrente de campo positiva = $0,05 * 2,464 = 0,1232$ **pu**.

Limite para a máxima corrente de campo negativa = $-0,25 * 2,464 = - 0,6200 \text{ pu}$;

A corrente de campo nominal da máquina é especificada através do seu projeto básico e que atenda as características nominais de operação.

O valor de 5% de I_{fd_n} , para limite mínimo positivo da corrente de campo, é geralmente adotado nos projetos de sistemas de excitação que não possuem capacidade de corrente negativa. Este limite mínimo positivo é mantido para que o sistema de excitação não desligue numa situação que ocasione baixa excitação e a máquina ainda possa manter alguma tensão. Numa rejeição de carga total do sistema, que é a proposta desta dissertação, este valor ajustado tem o intuito de evitar que a ponte conversora seja apagada e assim, reduzir os riscos para o gerador e facilitar a re-inserção da máquina ao sistema quando for normalizada a sua condição de operação.

O valor de 25% de I_{fd_n} , para limite máximo da corrente de campo negativa, é considerado, segundo especialistas, um bom ajuste entre o custo de um sistema de excitação com capacidade de corrente negativa e os benefícios que essa característica pode trazer à máquina numa rejeição total de carga. Este valor é definido para um tipo de projeto particular de uma máquina num determinado sistema de transmissão, no qual uma maior capacidade para a corrente negativa se torna um meio mais atrativo de se controlar sobretensões devido à rejeição de carga. Vale ressaltar que uma maior capacidade de corrente negativa, numa ponte retificadora, significa aumento nos custos e conseqüentemente no projeto da máquina. Outra forma de análise seria dotar o sistema de excitação com uma pequena sobrecarga temporária de corrente negativa, quando se tornar necessário. Em um projeto que engloba características de excitação x sistemas de transmissão devem ser analisadas todas as melhores formas possíveis de se ter menor custo aliado à requisição técnica.

Os tetos máximo e mínimo, para a tensão de campo, devem obedecer as características técnicas da máquina e do sistema de transmissão no qual vão ser conectadas. De forma a validar os valores aqui apresentados para os tetos desta máquina serão mostrados, na Tabela 6, os tetos de alguns geradores do sistema interligado brasileiro que estão conectados a longos troncos de transmissão. Os geradores do sistema interligado brasileiro, utilizados nesta pesquisa, foram:

Tabela 6- Tetos da tensão de campo de algumas máquinas do SIN

Tetos da tensão de campo dos geradores do SIN		
Geradores	Valores (pu)	
	Máximo	Mínimo
Serra da Mesa	8	-6
Tucuruí	4,463	-2,988
Itaipú	8,523	-8,523

Desta forma, os tetos máximo e mínimo de **7,00** e **-5,29** pu, respectivamente, são bastante realistas, levando em consideração o montante de potência a ser transmitido, assim como o nível de tensão e o comprimento do sistema de transmissão.

4.2.3.1.2- Sistema de excitação sem capacidade de corrente negativa

Conforme citado anteriormente, para este caso, foi ajustado um limite mínimo positivo de corrente no valor 5% de I_{fd_n} , que representa 0,123 pu em relação ao valor nominal de 2,464 pu. Esse valor de 5% geralmente é adotado nos projetos de sistema de excitação de geradores. Pelas características desse regulador, o sobrevalor da resposta de ifd deve ter obrigatoriamente valor de pico positivo, evitando assim que a ponte se apague.

Inicialmente foram estudados os limites para os tetos máximo e mínimo do sistema de excitação de modo a adequar as respostas da máquina, características do sistema de transmissão e controle. Assim, foram considerados os tetos para a tensão de campo nos valores de **7** e **-5,29** pu com um ganho máximo adotado de **400** pu/pu. Vale ressaltar que este valor já representa um alto ganho para este controlador.

Os valores usados nos parâmetros do controlador de corrente mínima, considerando apenas o limite positivo, podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7- Tabela referente aos valores dos parâmetros do limitador de corrente mínima de campo positivo

Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição
gifmn	400	pu	Ganho
IFMN1	0,123	pu	Referência da corrente mínima positiva
IFMN2	0,123	pu	Referência da corrente máxima negativa
IFMN3	0,123	pu	Valor de Reset

Neste caso, quando a condição $IFMN1=IFMN2$ é satisfeita, toda parte deste controlador que diz respeito ao chaveamento para corrente de campo negativa não influencia na resposta final qualquer que seja o valor adotado. Por isso, os valores para T_{HOLD} e V_{inic} não foram mostrados na tabela acima.

De forma a mostrar o comportamento do sistema de excitação, frente a uma rejeição de carga considerando apenas o limite positivo, é plotada, na Figura 59, a resposta da corrente de campo do gerador quando da ocorrência deste evento.

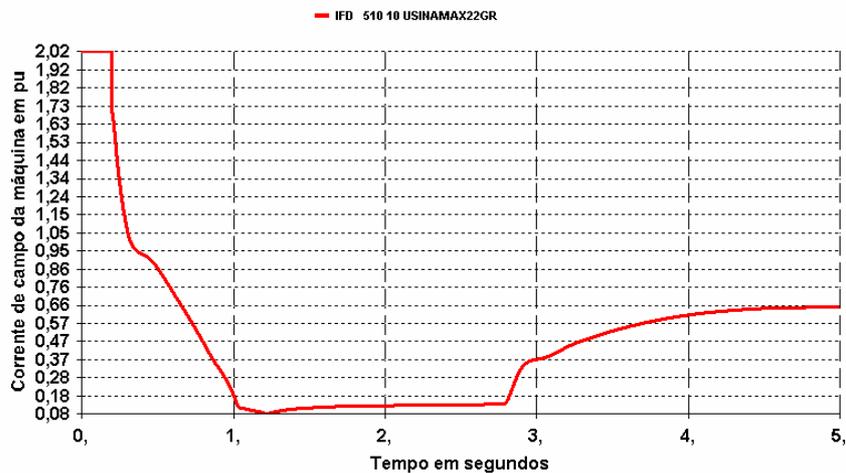


Figura 59- Comportamento da corrente de campo considerando o limitador positivo

4.2.3.1.3- Sistema de excitação com capacidade de corrente negativa

Nesta análise foi ajustado o valor de corrente de campo negativa correspondente a 25% de I_{fdn} , igual a 0,62 pu e o valor mínimo positivo para chaveamento também em

0,62 pu em relação ao valor nominal de 2,464 pu. Estes valores foram obtidos de forma a ajustar a resposta da corrente de campo da máquina, considerando a capacidade de corrente negativa e que esta característica especial do sistema de excitação pudesse apresentar alguma vantagem quanto ao retardo do crescimento da tensão numa rejeição de carga em relação ao sistema convencional. A tabela abaixo mostra todos os ajustes adotados na lógica do controlador.

Tabela 8- Tabela referente aos valores dos parâmetros do limitador de corrente mínima de campo - negativo

Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição
gifmn	350	pu	Ganho do controlador
IFMN1	-0,62	pu	Referência da corrente mínima positiva
IFMN2	-0,62	pu	Referência da corrente máxima negativa
IFMN3	0,100	pu	Valor de Reset
DIF	0,001	pu	Banda morta para o chaveamento
THOLD	0	s	Tempo de espera para chaveamento
V _{inic}	0	s	Tempo inicial para contagem do chaveamento

Neste caso, como a condição **IFMN1 = IFMN2** é satisfeita, toda parte deste controlador que diz respeito ao retardo para comutação entre a ponte positiva e a ponte negativa será desativada e não apresentará influência na resposta final. A Figura 60 mostra o comportamento da corrente de campo da máquina para uma rejeição total nos terminais receptores do sistema em corrente alternada.

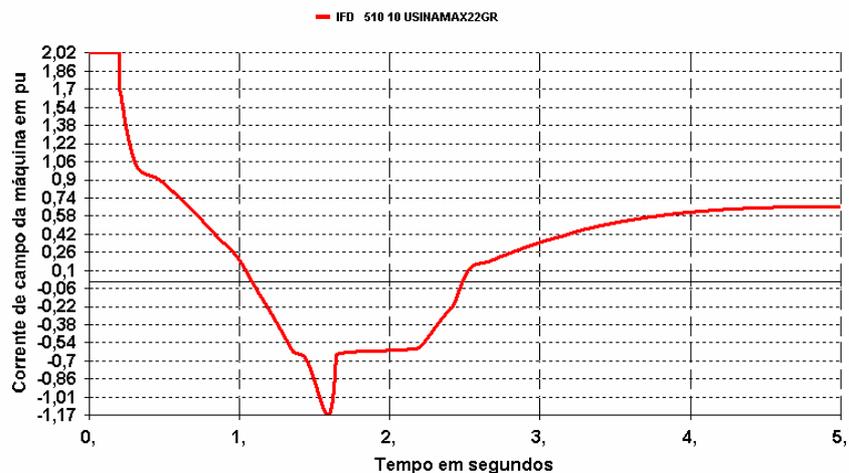


Figura 60- Comportamento da corrente de campo considerando o limitador negativo

O pico negativo apresentado nesta resposta, no valor de -1,17 pu, está muito abaixo do limite de corrente de campo negativa ajustado para este controle. Apesar deste valor apresentado, não há preocupação quanto a este resultado, pois até este ponto alguma outra providência já terá sido tomada. Assim, este pico não é um valor real prático.

Considerando a ponte com capacidade de corrente negativa, a filosofia de ajuste para este caso depende de cada fabricante. Alguns colocam um valor positivo bem pequeno e o negativo no limite, para se ter um pouco de retardo no chaveamento entre a parte positiva e a negativa. Outros colocam os valores de referência negativos direto para o ajuste da ponte. Assim, cada fabricante adota o processo que acha mais seguro para o controle. Neste caso será adotada a filosofia de comutação instantânea das pontes, utilizando valores de referência negativos para os parâmetros **IFMN1** e **IFMN2**, conforme visualizada na Tabela 8.

4.2.3.2- Modelagem do regulador de velocidade

Conforme a teoria de linhas de transmissão, estando estas energizadas ou abertas, a frequência é um fator que apresenta grande influência no comportamento dos parâmetros transversais ou longitudinais destes elementos. Assim, a correta representação da variação da frequência do sistema elétrico é de grande importância nos estudos que envolvem rejeição de carga e auto-excitação. Frente a esta constatação, se torna fundamental a correta representação do regulador de velocidade para que as respostas de rejeição de carga sejam mais próximas possíveis da realidade, de modo a projetar as devidas soluções para este fenômeno. Por este motivo, num estudo que envolva rejeição de carga, a escolha do modelo do regulador de velocidade deve ser cautelosa para que se tenha o maior controle possível sobre a excursão da frequência.

Atualmente, não se encontra disponível no banco de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico um modelo específico para o regulador de velocidade das máquinas síncronas tipo Kaplan – Bulbo. Foi feita uma vasta pesquisa na literatura técnica sobre um modelo específico do regulador de velocidade para este tipo de máquina, não sendo obtido nenhum trabalho a respeito. O desenvolvimento de um modelo específico de

regulador de velocidade para este tipo de máquina demandaria muito tempo. Por estes motivos apresentados foi escolhida uma modelagem típica para o regulador de velocidade destas máquinas que é uma derivação do padrão **PTI HYGOV**, cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 61.

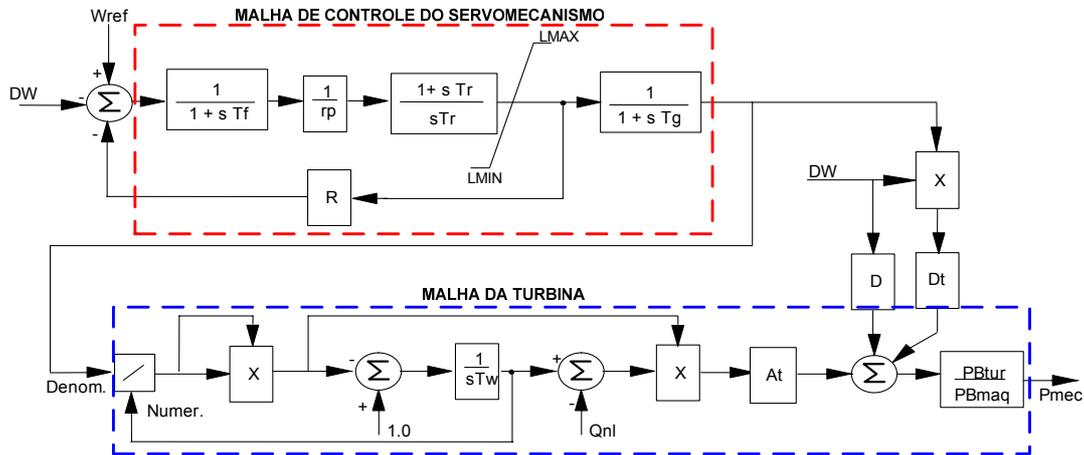


Figura 61- Modelagem completa do regulador de velocidade

O modelo HYGOV é uma representação típica para o regulador de velocidade de máquinas hidráulicas. Uma outra característica deste modelo modificado é a representação de uma parcela de amortecimento da turbina que não é dependente da posição de abertura e fechamento do gate. Esta parcela adicional de amortecimento é dependente apenas da variação da velocidade e contribui para que a frequência seja reduzida depois de ter atingido o seu valor máximo. Quando o gate está totalmente fechado, a parcela de amortecimento que depende da sua posição não poderá mais exercer influência no comportamento da frequência. No caso da não representação desta parcela adicional de amortecimento, ajustada pelo parâmetro D , a frequência pode ficar indefinidamente no seu valor máximo atingido. O modelo de turbina-conduto forçado usado nesta representação é válido para toda faixa de operação de uma turbina tipo hidráulica, desde a condição de sem carga até a máxima abertura do gate. Ele também é válido para grandes desvios de velocidade e pode ser usado para simular condições de sobrevelocidades devido a rejeições de carga.

Os valores associados aos parâmetros do regulador de velocidade, assim como as suas respectivas definições, serão descritos na Tabela 9. Os valores aqui apresentados foram definidos considerando alguns testes e características de outras máquinas de

mesmo tipo. As fórmulas referentes a alguns parâmetros descritos na tabela acima e os procedimentos comumente adotados para os respectivos cálculos podem ser vistos em [1].

Tabela 9- Valores dos parâmetros do regulador de velocidade

Variável	Valor	Unidade	Descrição
At	1,2	pu	GANHO DA TURBINA
D	1,0	pu	AMORTECIMENTO NÃO DEPENDENTE COM O GATE
Dt	0,5	pu	AMORTECIMENTO DA TURBINA DEPENDENTE COM O GATE
LMAX	0,984	pu	MÁXIMA ABERTURA
LMIN	0,0	pu	MÍNIMA ABERTURA
PBmaq	316	Mva	POTÊNCIA BASE DA MÁQUINA
PBtur	316	Mva	POTÊNCIA BASE DA TURBINA
Qnl	0,15	pu	FLUXO A VAZIO
R	0,05	pu	ESTATISMO PERMANENTE
rp	0,38	pu	ESTATISMO TRANSITÓRIO
Tf	0,05	s	CONSTANTE DE TEMPO DO FILTRO
Tg	0,5	s	CONSTANTE DE TEMPO DO SERVOMECANISMO
Tr	7,0	s	CONSTANTE DE TEMPO DO REGULADOR
Tw	1,5	s	CONSTANTE DE TEMPO DA ÁGUA

Em todas as análises desenvolvidas nesta dissertação foi usado o modelo de regulador de velocidade HYGOV com algumas modificações no amortecimento da turbina. Os parâmetros mostrados na Tabela 9 foram ajustados tomando como base as respostas obtidas na usina hidráulica de Igarapava, que também usa máquinas tipo bulbo. Após o ajuste desses parâmetros, as respostas deste controlador foram comparadas com a modelagem enviada pelo fabricante da máquina com os respectivos ajustes. A comparação entre esses dois modelos mostrou que as respostas foram as mesmas para o rampeamento da frequência e apenas foi obtida uma diferença de aproximadamente 1 Hz entre os valores máximos obtidos. As características mais importantes quanto à frequência são o rampeamento e o valor máximo obtido.

4.3- Análises operativas do sistema

O comportamento do sistema, frente a uma rejeição de carga, será estudado mediante a realização de algumas ações de controle que serão aplicadas em cada circuito descrito no item 4.2.1. Os tipos de ações, assim como os respectivos sistemas

analisados, podem ser vistos completamente na Tabela 10.

Tabela 10- Relação das análises com os respectivos circuitos

Ações de Controle	Sistema Analisado	
	Transmissão CA em 765 kV	Interligação em 3 Bipólos de CC
Capacidade ou não de corrente negativa	X	-
Variação da frequência	X	-
Regulador de tensão	X	-
Saturação do transformador elevador (característica do equipamento)	X	-
Reatores manobráveis	X	-
Transferência de disparo	X	-
Número de máquinas despachadas	X	-
Compensação Série	X	-
Rejeição com filtros	-	X

Conforme visualizado, a maioria das análises foi feita considerando o sistema de transmissão CA, ficando apenas a rejeição de filtros para o sistema CC. Apesar desta relação, isto não impede que a ponte negativa, por exemplo, seja analisada numa rejeição do sistema CC. Apenas não foram feitas aqui outras simulações por causa do grande volume que este trabalho iria apresentar, podendo ser este tema de uma outra dissertação.

Apesar de ser um item da tabela de ações de controle consideradas nesta dissertação, a saturação do transformador elevador é uma característica interna a este equipamento.

4.4- Premissas e critérios adotados nas simulações

As simulações aqui apresentadas não têm o propósito de fazer um estudo completo de auto-excitação, o que necessariamente demanda uma melhor análise do sistema de transmissão, assim como das várias alternativas que podem ser aplicadas em conjunto ou separadamente no intuito de se ter melhores condições operativas quando de uma rejeição de carga total. Conforme já citado, o objetivo destas simulações é mostrar a influência de cada ação de controle mostrada na Tabela 10, ou configuração sistêmica no fenômeno da auto-excitação de uma máquina síncrona. Em todas as simulações executadas nesta dissertação devem ser considerados os seguintes critérios e premissas:

- ✓ O valor máximo para a tensão terminal da máquina será de 1,4 pu. As simulações apresentadas devem ser analisadas **quantitativamente** e **qualitativamente** somente até o tempo equivalente a este valor, **1,4 pu**, em cada resposta;
- ✓ Em todas as simulações, menos o item 4.7.2 que mostra o comportamento do sistema sem a influência da frequência, foi considerada a correção dos parâmetros da rede (X_l e X_c) com a variação da frequência da ilha elétrica. Para tal, nos arquivos referentes ao ANATEM[®], foi colocada a opção **FREQ** nos dados de simulação;
- ✓ Para a condição inicial de regime permanente do sistema, no programa ANAREDE[®], foram considerados os limites de **1,046 pu** para a tensão base de **765 kV** e **1,100 pu** para a base de **500 kV**. Para a tensão terminal da máquina foi considerado o limite de **1,050 pu**.

4.5- Influência do Regulador de Tensão na resposta da auto-excitação

Conforme descrito no capítulo sobre auto-excitação e curto-circuito capacitivo, o regulador de tensão atua no eixo d de modo a controlar a tensão terminal da máquina. A

auto-excitação, numa máquina desregulada, ocorre sempre que a reatância capacitiva equivalente do sistema X_c for menor que a reatância de eixo direto X_d . Este controlador, quando colocado no sistema de excitação de uma máquina síncrona, atua no sentido retardar o crescimento do fluxo no eixo d, fazendo com que a auto-excitação ocorra primeiro no eixo q, ou seja, quando X_c for menor que X_q . Dessa maneira, como a tensão terminal é dada pela soma das tensões nos dois eixos, o crescimento da tensão é anulado por um período de tempo após a rejeição de carga. Essas características podem ser analisadas através das curvas abaixo, que relacionam a tensão transitória de eixo q para os casos em que há ou não a presença do regulador de tensão no gerador síncrono. As respostas mostradas neste item, referentes às curvas considerando o regulador de tensão, se equivalem ao item 4.6.1.

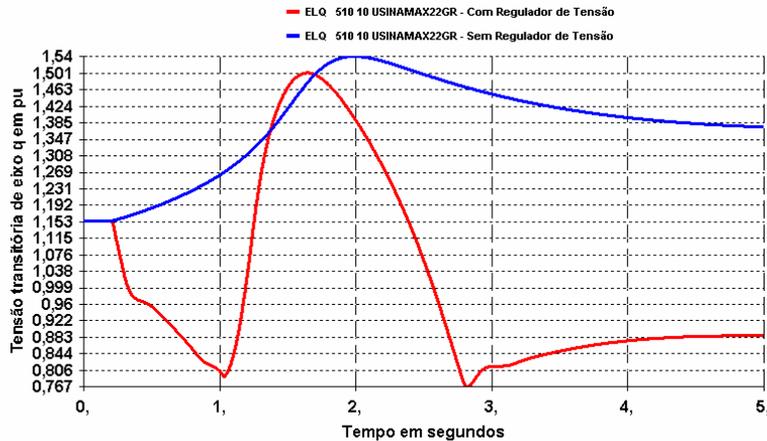


Figura 62-Tensão transitória de eixo q com e sem regulador de tensão

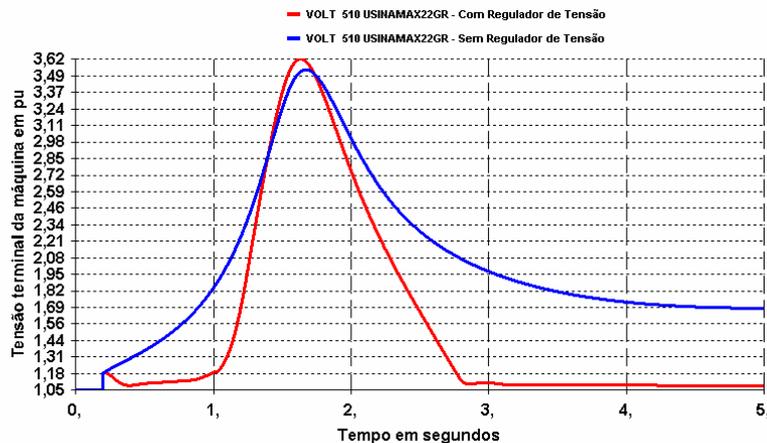


Figura 63-Tensão terminal da máquina com e sem regulador de tensão

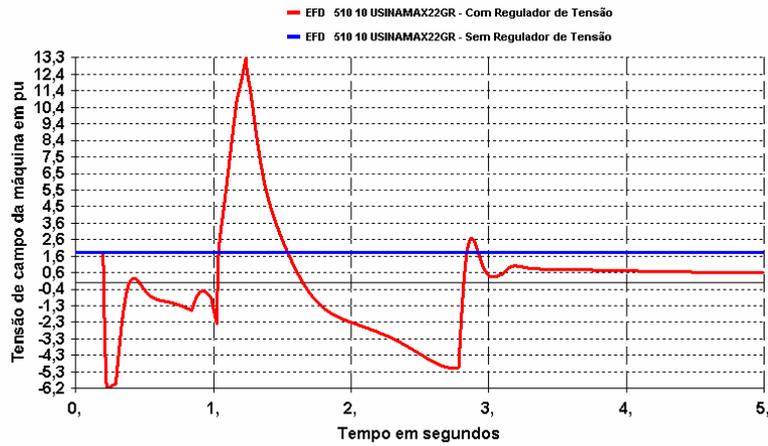


Figura 64-Tensão de campo da máquina com e sem regulador de tensão

➤ **Conclusões das comparações entre as respostas obtidas no item anterior.**

- As curvas mostradas na Figura 62, referentes à tensão transitória de eixo q, mostram a atuação do regulador de tensão retardando o crescimento dos enlaces de fluxo de eixo d e conseqüentemente a tensão terminal da máquina que é dada como a soma das tensões nos dois eixos magnéticos;
- A Figura 63, referente à tensão terminal, mostra que o regulador de tensão conseguiu retardar, por um bom período de tempo, o surgimento da auto-excitação. Essas curvas que comparam a resposta da tensão terminal para ambos os casos mostram bem a influência do regulador de tensão no fenômeno de auto-excitação. Este tempo de controle seria maior se o sistema de excitação apresentasse capacidade de corrente negativa, conforme item a seguir;
- A resposta da tensão de campo (E_{fd}), para o caso da máquina sem regulador de tensão, ficou constante no valor de inicialização pelo fato de não se ter o controlador na máquina (RT).

4.6- Análise da auto-excitação comparando o sistema frente à capacidade ou não de corrente negativa da ponte retificadora

Neste item será realizada a comparação da resposta da máquina numa rejeição de carga, considerando ou não a existência da capacidade de corrente negativa da ponte retificadora. Com o intuito de apresentar a atuação da capacidade de corrente negativa, será utilizado, como sistema teste, a configuração proposta para o sistema em corrente alternada. Os ajustes adotados no sistema de excitação, para as duas condições, podem ser vistas na Tabela 7 e na Tabela 8, respectivamente.

4.6.1- Resposta da máquina frente a uma rejeição de carga, não considerando a capacidade de corrente negativa do sistema de excitação

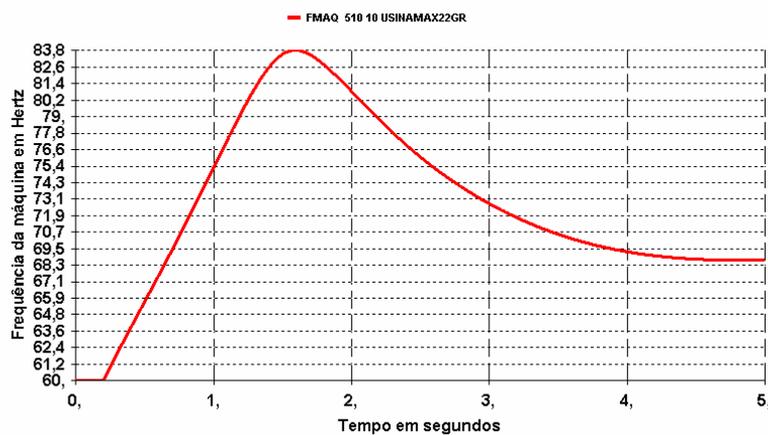


Figura 65- Frequência da máquina desconsiderando a capacidade de corrente negativa

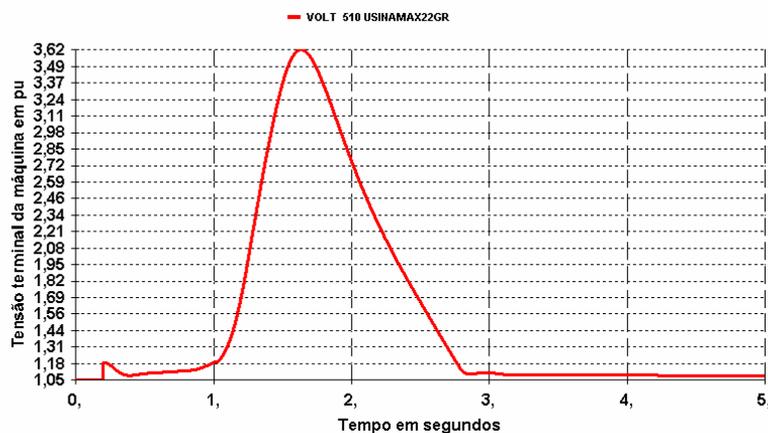


Figura 66- Tensão terminal da máquina desconsiderando a capacidade de corrente negativa

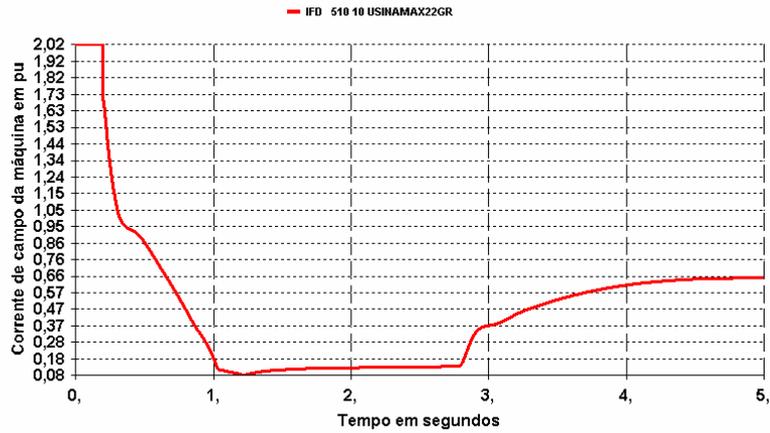


Figura 67- Corrente de campo da máquina desconsiderando a capacidade de corrente negativa

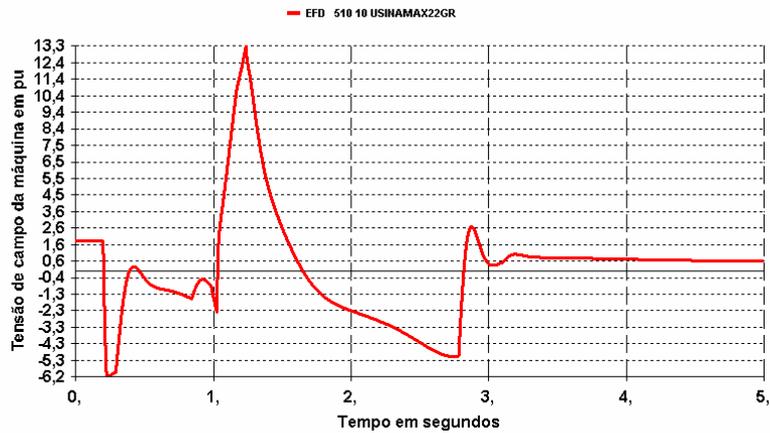


Figura 68- Tensão de campo da máquina desconsiderando a capacidade de corrente negativa

➤ **Conclusões a respeito das respostas obtidas no item 4.6.1.**

- ✓ Analisando as respostas obtidas para frequência e tensão terminal da máquina é notório que o regulador de velocidade, ao regular a frequência da máquina para o equilíbrio carga x geração, acaba trazendo a tensão terminal a valores normais após a auto-excitação. De modo a comprovar **qualitativamente e não quantitativamente** o efeito do regulador de velocidade será feita análise, no item 4.6.1.1, das repostas obtidas para a mesma rejeição de carga desconsiderando o efeito da regulação primária da máquina. A resposta da tensão, após o valor máximo, não voltará aos valores iniciais em virtude da ausência do efeito da regulação;

- ✓ Os ajustes adotados no limitador de corrente mínima de campo, conforme apresentado na Tabela 7, foram considerados aptos em virtude da resposta da corrente de campo apresentar valores mínimos positivos (limitador positivo de I_{fd}), que é o propósito deste sistema de excitação;
- ✓ Outra conclusão importante, observada nas respostas obtidas, é que o sistema de excitação consegue manter sob controle os efeitos de sobretensão gerados pelo aumento da frequência e do processo de AEX durante um período de tempo. É notório também que este controle se perde com o tempo, pois a sua capacidade se esgota com o efeito do $i_{fd_{min}}$ positivo;
- ✓ A resposta de E_{fd} atinge o valor de pico de 13,3 pu pelo fato da característica do sistema de excitação ser estático tipo bus-fed, que corrige os limites da tensão de campo pela tensão terminal. Num sistema real esta curva não seria visualizada, pois alguma proteção já teria atuado no sistema para evitar tais situações;
- ✓ A curva de tensão não atinge os valores de pico apresentados, pois alguma proteção já teria atuado mudando o perfil desta curva. Um valor de tensão que permite a leitura qualitativa seria de aproximadamente 1,4 pu e respectivos tempos para as outras grandezas plotadas.

4.6.1.1- Resposta da máquina a rejeição de carga desconsiderando a regulação primária da máquina

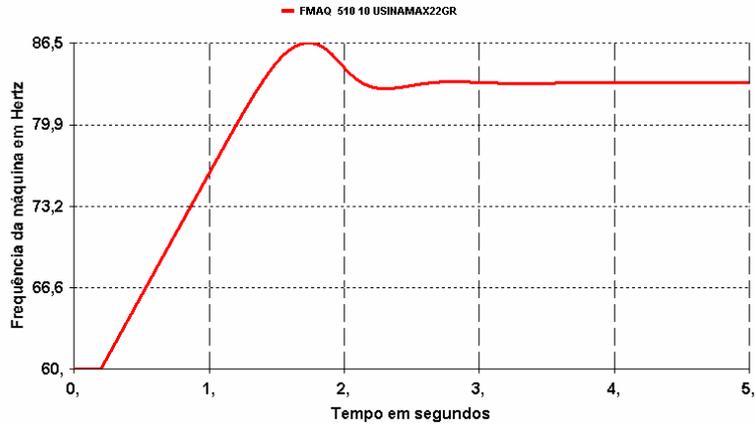


Figura 69- Frequência da máquina desconsiderando a regulação primária

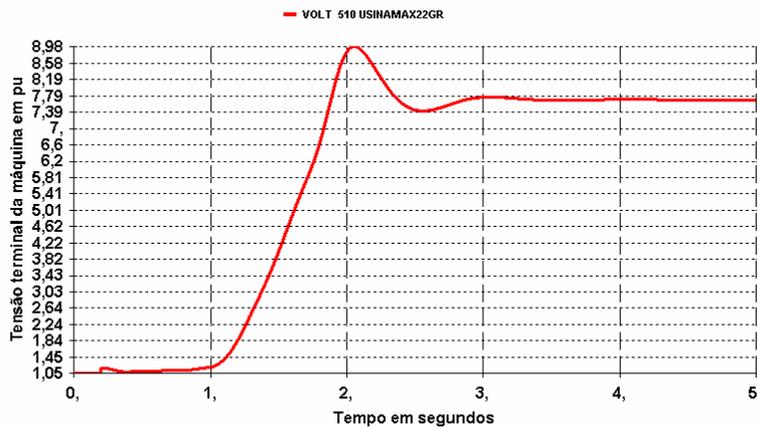


Figura 70- Tensão terminal da máquina desconsiderando a regulação primária

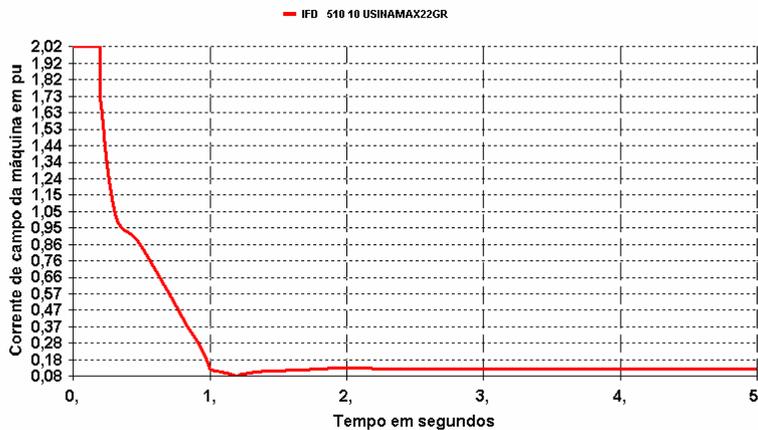


Figura 71- Corrente de campo da máquina desconsiderando a regulação primária

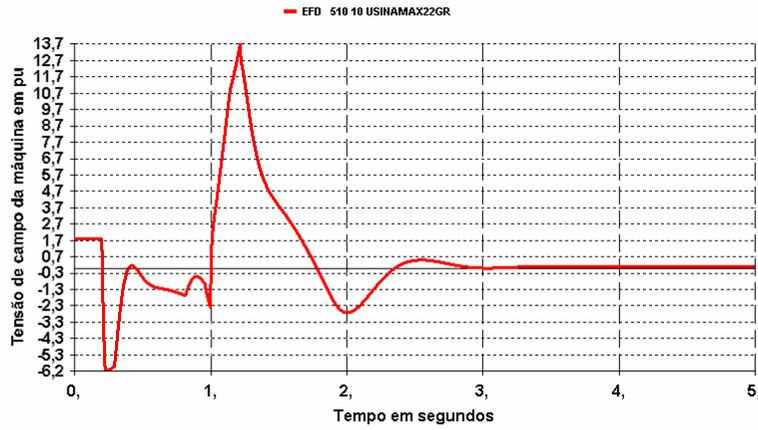


Figura 72- Tensão de campo da máquina desconsiderando a regulação primária

➤ Comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.6.1 e 4.6.1.1.

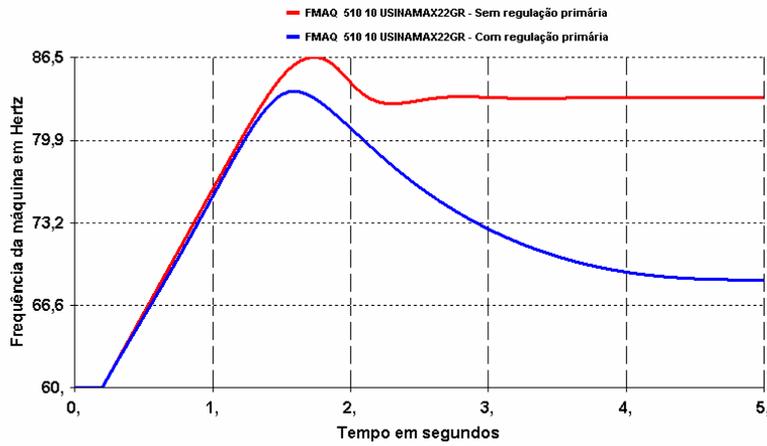


Figura 73- Frequência da máquina para ambas as considerações

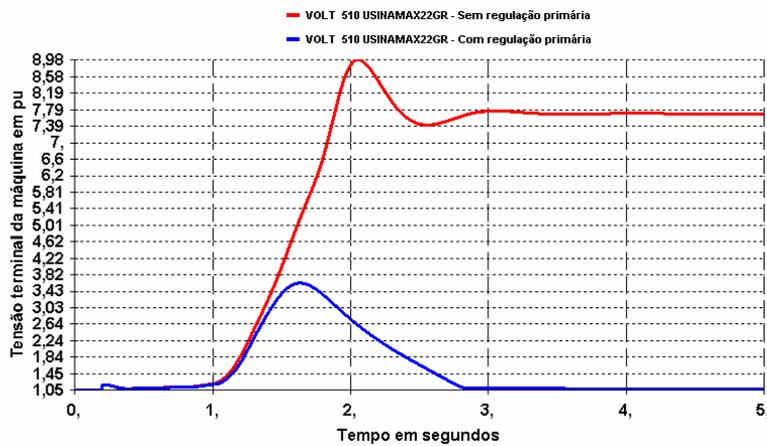


Figura 74- Tensão terminal da máquina para ambas as considerações

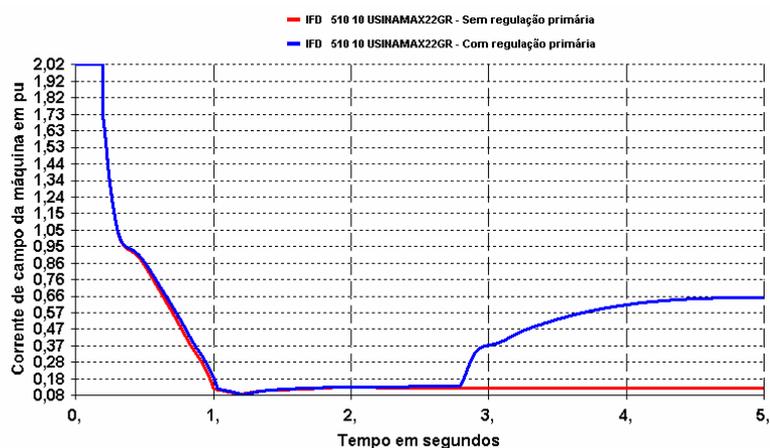


Figura 75- Corrente de campo da máquina para ambas as considerações

➤ **Conclusões a respeito da comparação entre os itens 4.6.1 e 4.6.1.1:**

- ✓ As curvas acima comparadas mostraram que as respostas pertinentes à rejeição de carga são altamente dependentes da variação da frequência e conseqüentemente da atuação da regulação primária;
- ✓ A grande diferença entre as duas respostas foi o valor máximo da frequência e o seu valor final de ajuste. Essas diferenças causaram grande impacto na resposta da tensão terminal. Podemos perceber que o valor da rampa não foi modificado nas duas condições simuladas;
- ✓ A subida da corrente de campo, no caso considerando a regulação primária, após 3 segundos, se deve ao fato de que a tensão terminal volta ao seu valor de regime. Por este motivo, a corrente de campo sai do limite mínimo estipulado;
- ✓ Vale citar que a análise aqui apresentada tem caráter **qualitativo**, o que significa que na prática não existirá este comportamento após um determinado período de tempo, pois algumas proteções já teriam atuado no sistema;

- ✓ Considerando o sistema sem regulação de velocidade, as perdas elétricas inerentes ao sistema são responsáveis pela frenagem da máquina.

4.6.2- Resposta da máquina frente a uma rejeição de carga na barra 514, considerando a capacidade de corrente negativa do sistema de excitação

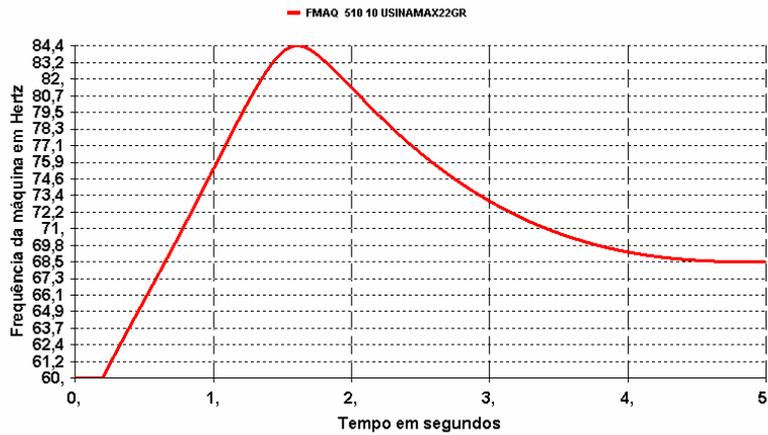


Figura 76- Frequência da máquina considerando a capacidade de corrente negativa

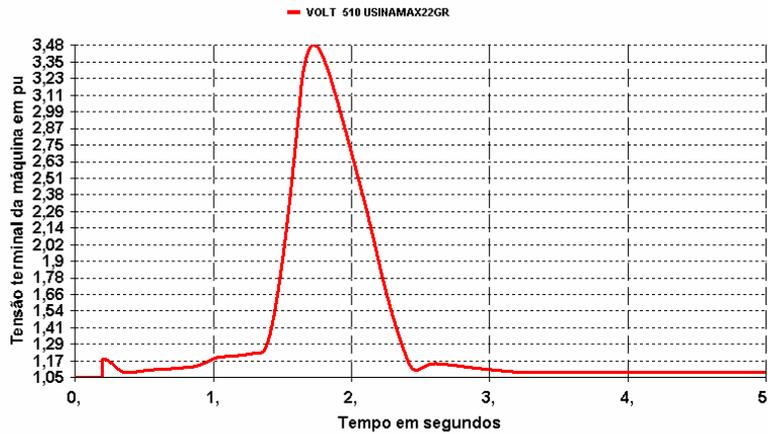


Figura 77- Tensão terminal da máquina considerando a capacidade de corrente negativa

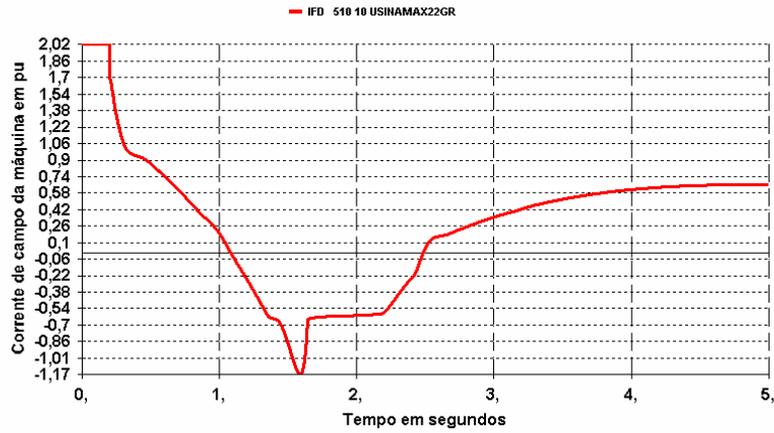


Figura 78- Corrente de campo da máquina considerando a capacidade de corrente negativa

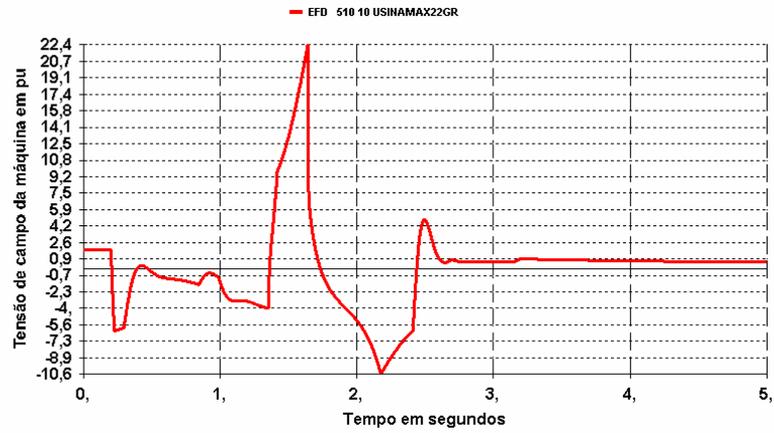


Figura 79- Tensão de campo da máquina considerando a capacidade de corrente negativa

➤ **Comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.5, 4.6.1 e 4.6.2:**

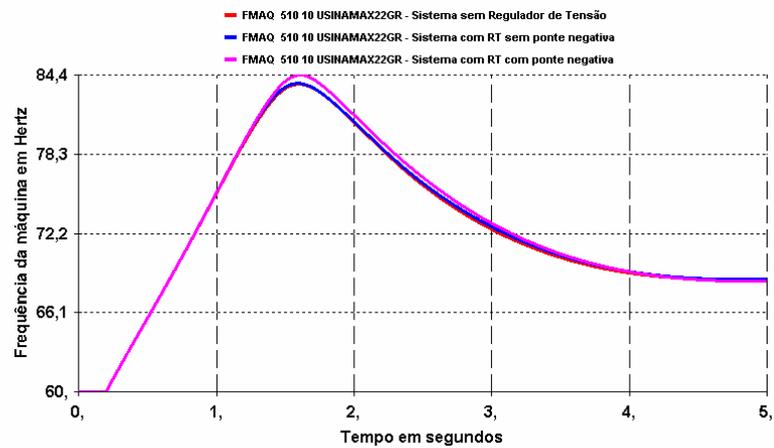


Figura 80- Frequência da máquina para ambos os casos

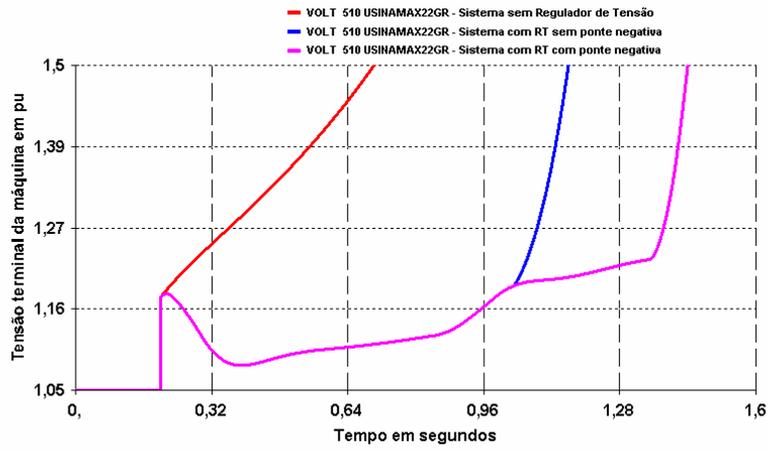


Figura 81- Tensão terminal da máquina para ambos os casos

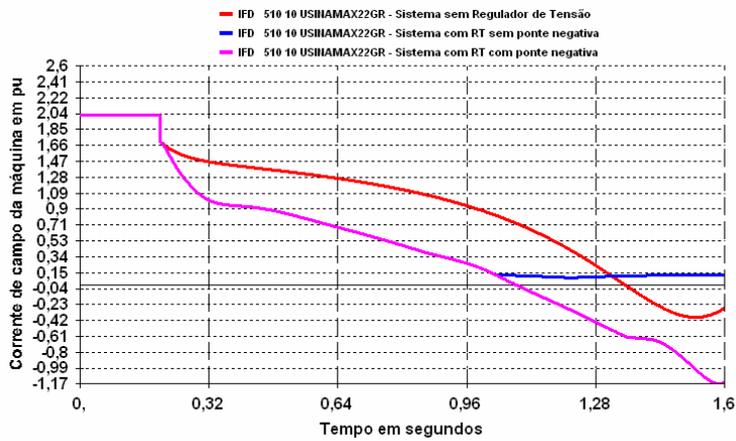


Figura 82- Corrente de campo para ambos os casos

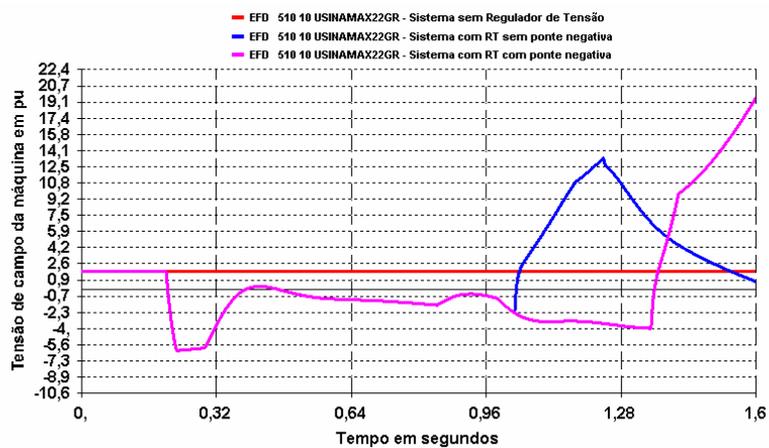


Figura 83- Tensão de campo para ambos os casos

➤ **Conclusões a respeito da comparação entre os itens 4.5, 4.6.1 e 4.6.2:**

- ✓ Quanto a excursão da frequência, nos três casos analisados, não foram verificadas mudanças significativas nas respostas;
- ✓ Analisando a Figura 81, que compara a tensão terminal da máquina nos três casos, conclui-se que a atuação do regulador de tensão no eixo d retardou o crescimento da tensão do sistema. Na máquina sem regulador de tensão, não houve nenhuma ação neste sentido. O tempo de retardo foi maior quando o sistema de excitação estava dotado com capacidade de corrente negativa;
- ✓ A Figura 81 também mostra que o sistema de excitação, com capacidade de corrente negativa, retardou o crescimento da tensão, que caracteriza a ocorrência da auto-excitação, em aproximadamente 350 ms, o que é uma grande vantagem para atuação da proteção quando comparada com o caso sem esta capacidade negativa;
- ✓ O controle de E_{fd} , nos dois casos com regulador de tensão, atua no sentido de controlar a corrente de campo da máquina. Nestes casos, ocorre atuação no sentido de manter a corrente dentro dos seus limites estabelecidos;
- ✓ A curva de tensão não atinge os valores de pico apresentados, pois alguma proteção já teria atuado mudando o perfil desta curva. Um valor de tensão que permite a leitura qualitativa seria de aproximadamente 1,4 pu e respectivos tempos para as outras grandezas plotadas.

4.7- Influência da correção dos parâmetros do sistema de transmissão com a freqüência da ilha elétrica

4.7.1- Rejeição de carga considerando a correção dos parâmetros com a freqüência da ilha

(Resultados apresentados no item 4.6.1)

4.7.2- Rejeição de carga desconsiderando a correção dos parâmetros com a freqüência da ilha

➤ Comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.7.1 e 4.7.2:

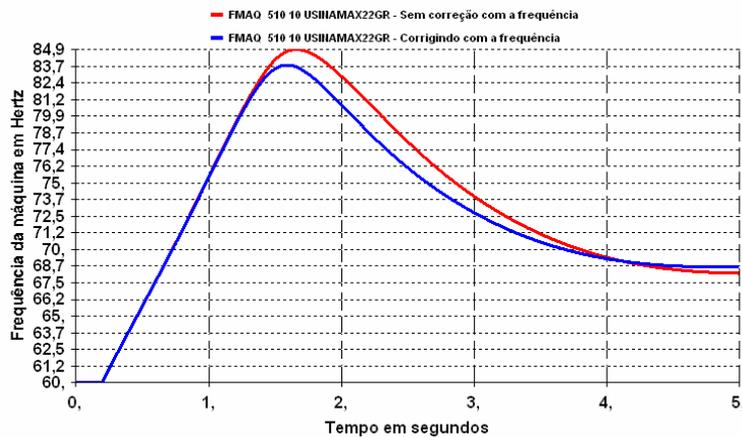


Figura 84- Freqüência da máquina com e sem a correção dos parâmetros

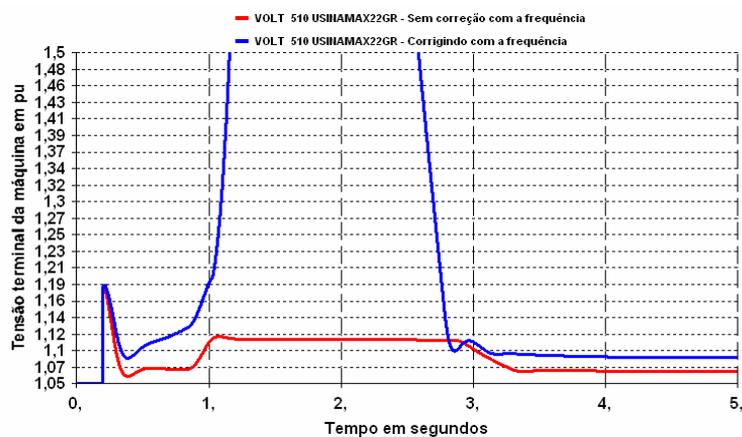


Figura 85- Tensão terminal da máquina com e sem a correção dos parâmetros

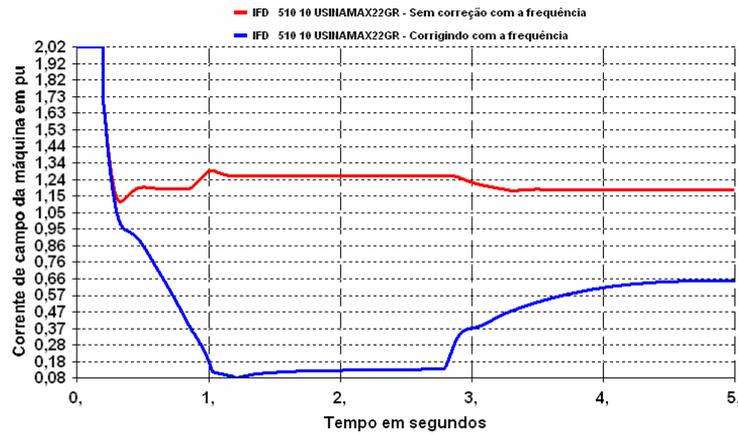


Figura 86- Corrente de campo da máquina com e sem a correção dos parâmetros

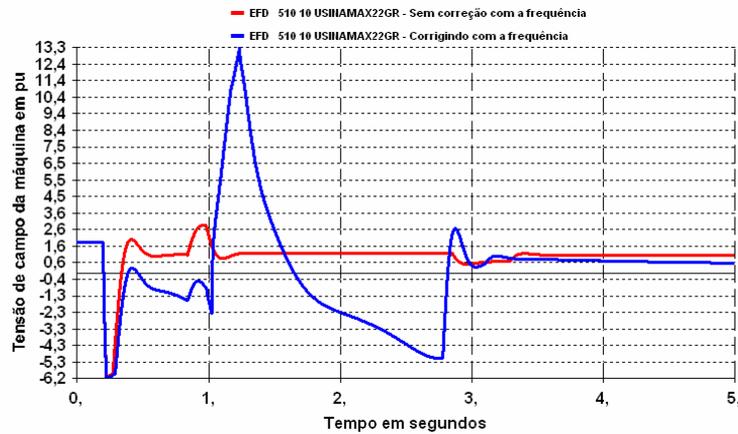


Figura 87- Tensão de campo da máquina com e sem a correção dos parâmetros

➤ **Conclusões a respeito da comparação entre os itens 4.7.1 e 4.7.2:**

- ✓ Analisando a Figura 85, conclui-se que a representação da correção dos parâmetros da rede pela frequência é de grande importância para um estudo de rejeição de carga, pois a não representação destes parâmetros no estudo levará a um erro de interpretação das respostas obtidas;
- ✓ Com o aumento da frequência da ilha elétrica, a reatância capacitiva equivalente tende a ficar menor, enquanto os parâmetros indutivos da máquina são aumentados. Essas características descritas são fundamentais para o entendimento dos fenômenos envolvidos numa rejeição de carga;

- ✓ As curvas plotadas neste item mostraram que, ao representar a correção com a frequência, ocorreu auto-excitação do gerador. Este fenômeno não foi visualizado quando essa representação foi descartada;
- ✓ O cuidado de se representar ou não essa correção pode levar a conclusões erradas a respeito da análise de rejeição de carga.

4.8- Rejeição de carga considerando um regulador de tensão simplificado (modelo - DRGT02 BUILT-IN do ANATEM)

Para as simulações deste item foi considerado um modelo de regulador de tensão mais simples, sem nenhum tipo de controle interno e limitações adicionais, padronizado e existente na biblioteca de modelos prontos do programa ANATEM[®]. Foi desconsiderado o sinal estabilizador desse equipamento por motivos de funcionamento de lógica, e inserido o mesmo regulador de velocidade, conforme os testes anteriores. A Figura 88 [28] mostra o diagrama de blocos referente a este controlador.

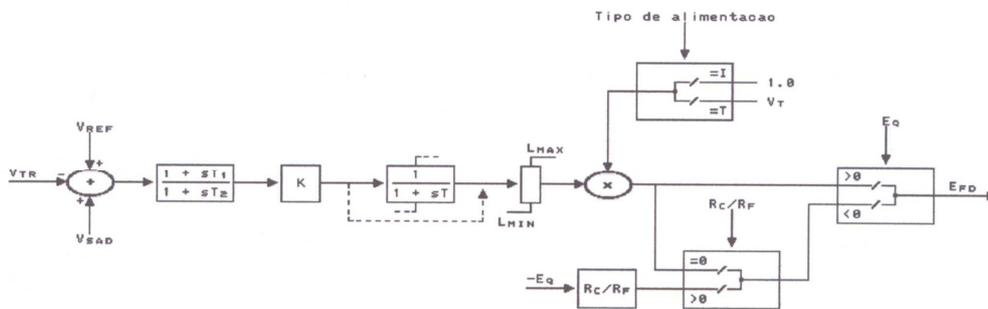


Figura 88- Diagrama de blocos referente à modelagem do regulador de tensão tipo SCRX

Este regulador de tensão é representado por uma modelagem de excitatriz estática, que pode ter ou não capacidade de corrente negativa, que será analisada em cada item abaixo. A descrição dos parâmetros, assim como os valores adotados para cada caso, será analisada. Vale ressaltar, analisando a Figura 88, que o único elemento limitador deste diagrama é o da tensão de campo E_{fd} . Este tipo de controlador não apresenta limitadores de sobre e subexcitação, nem limitadores PQ, conforme um modelo mais completo.

Uma forma de controle, visualizada na Figura 88, é a relação r_c/r_f que determina se este controlador irá ter ou não capacidade de corrente negativa. Se este valor for diferente de zero, ele não apresentará essa capacidade negativa. Se for igual a zero, ele permitirá a excursão da corrente de campo em valores negativos. Os valores adotados nessa relação influenciam diretamente no valor da corrente de campo da máquina e nos valores positivos. Este comportamento pode ser visualizado nas simulações a seguir.

4.8.1- Rejeição de carga não considerando capacidade de corrente negativa da ponte retificadora, através do valor da razão R_c/R_f

O regulador de tensão mostrado na Figura 88 pode apresentar capacidade de corrente negativa ou não através do ajuste de r_c/r_f . Os ajustes feitos aqui, e visualizados na Tabela 11, farão com que este controlador não tenha essa capacidade de condução. Assim:

Tabela 11- Tabela descritiva dos parâmetros do regulador de tensão modelo SCRX

Parâmetro	Descrição	Valor adotado	Unidade
K	Ganho de regime do sistema.	100	pu/pu
T	Constante de tempo do filtro do RT.	0,05	s
T1	Constante de tempo de avanço do compensador de fase do RT.	1,00	s
T2	Constante de tempo de atraso do compensador de fase do RT.	1,00	s
Lmin	Limite inferior da tensão do RT.	-5,29	pu
Lmax	Limite superior da tensão do RT.	7,00	pu
R_c/R_f	Relação entre a resistência de descarga do circuito de campo para tensão inversa e a resistência normal do enrolamento para circuito sem essa capacidade.	5	sem unidade

➤ Considerando um valor inicial de R_c/R_f de 5

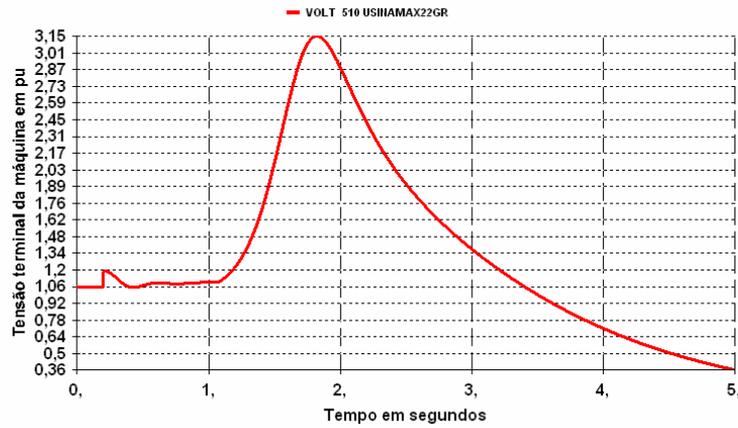


Figura 89- Tensão terminal da máquina considerando um R_c/R_f igual a 5

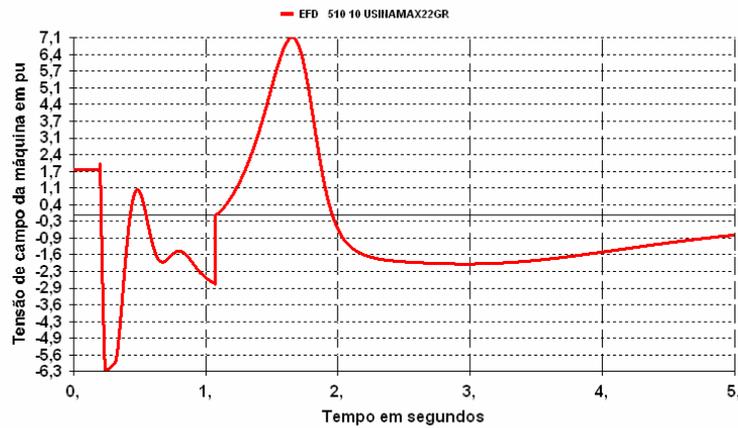


Figura 90- Tensão de campo da máquina considerando um R_c/R_f igual a 5

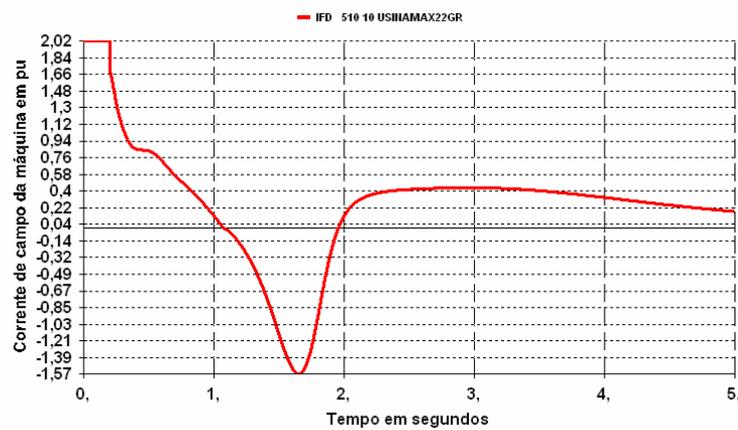


Figura 91- Corrente de campo da máquina considerando um R_c/R_f igual a 5

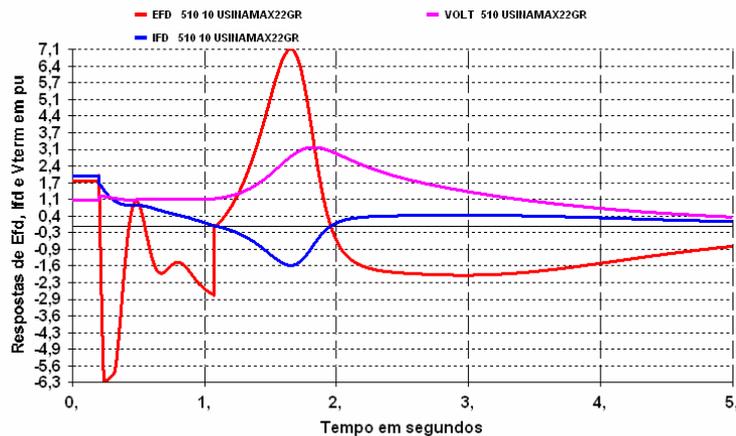


Figura 92- Respostas de Efd, Ifd e Vterm da máquina para um Rc/Rf igual a 5

➤ **Conclusões sobre os resultados obtidos neste item**

- A Figura 89 mostra que a rejeição de carga deste sistema, considerando este modelo de regulador de tensão, ocasionou auto-excitação nos geradores síncronos.
- O valor ajustado inicialmente para rc/rf de 5 não foi capaz de manter a característica da ponte de não ter capacidade de corrente negativa. Esta análise pode ser feita visualizando a Figura 91. Para obtenção da característica citada anteriormente seria necessário aumentar a razão de rc/rf para valores muito acima do estipulado aqui;
- Segundo a literatura técnica, o valor máximo aceitável para a razão rc/rf seria de aproximadamente 10. Como o estipulado aqui foi 5, e a resposta não foi aceitável, conclui-se que este modelo não é bom para ser usado em estudos de rejeição de carga que desconsideram a ponte negativa. Outro fator que também influencia nesta conclusão é a ausência de outros limitadores que controlam as grandezas da máquina. Basicamente, este modelo é muito limitado para ser usado num estudo de rejeição de carga de uma alternativa do sistema interligado brasileiro;

4.8.2- Estudo considerando o sistema de excitação com capacidade de corrente negativa.

Esta parte será feita apenas como uma forma ilustrativa de representação do referido sistema de excitação com ponte negativa.

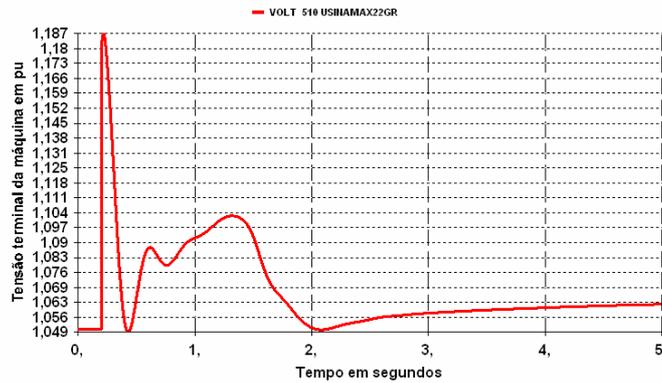


Figura 93- Tensão terminal da máquina considerando capacidade de ponte negativa

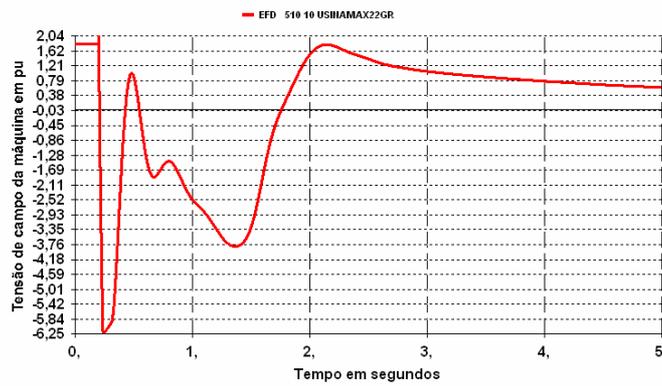


Figura 94- Tensão de campo da máquina considerando capacidade de ponte negativa

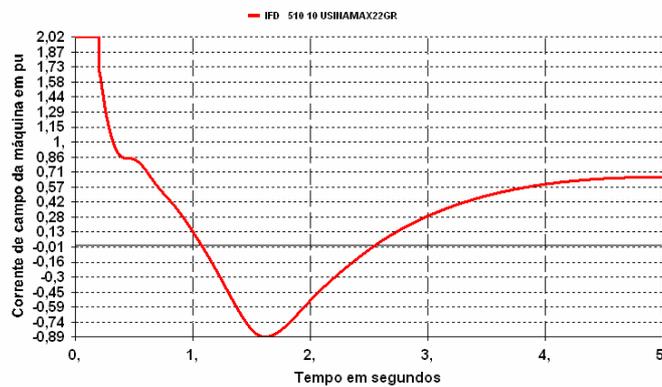


Figura 95- Corrente de campo da máquina considerando capacidade de ponte negativa

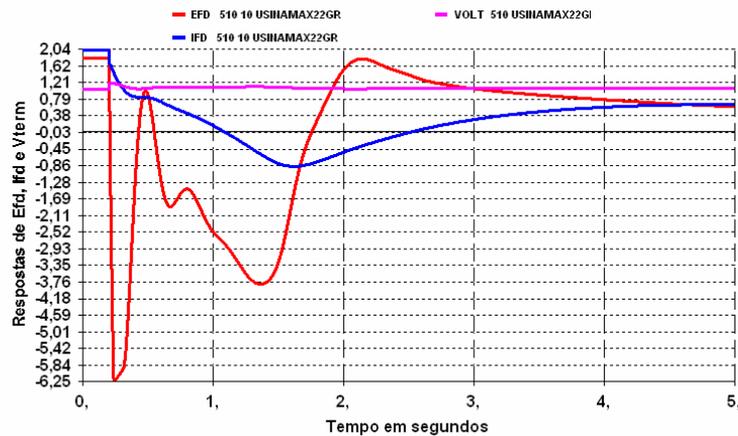


Figura 96- Respostas de Efd, Ifd e Vterm da máquina considerando ponte negativa

- Analisando a resposta da Figura 93, podemos perceber que os ajustes estabelecidos, considerando a razão r_c/r_f igual a zero, foi capaz de evitar o fenômeno da auto-excitação neste gerador;
- A figura referente a tensão de campo mostra que essa grandeza atuou no sentido de controlar a tensão terminal da máquina;
- O valor máximo obtido para a corrente de campo, 89 %, é considerado muito alto para capacidade negativa de uma ponte retificadora real. Geralmente, este valor é menor e especificado através das características do sistema de excitação. O que alguns projetistas de sistemas fazem é dotar esta ponte com uma capacidade extra de sobrecarga temporária;
- Este valor da corrente de campo pode ter sido obtido pela ausência de um limitador de corrente mínima que fizesse com que a tensão de campo controlasse esta corrente;
- As simulações desenvolvidas mostraram, mais uma vez, que esta modelagem não é apropriada para ser utilizada num estudo de rejeição de carga do sistema interligado brasileiro, pois muitos elementos limitadores não são representados.

4.9- Representação da saturação do transformador elevador

Uma característica intrínseca aos equipamentos que possuem circuitos magnéticos, como o transformador, é a saturação que relaciona a não linearidade entre uma corrente e um fluxo gerado. Assim, como a auto-excitação está diretamente ligada a correntes, fluxos e tensões, a saturação tem influência direta neste fenômeno. Desta forma, dependendo das suas características, ela limita as sobretensões que venham a surgir nos terminais da máquina quando ocorrer uma rejeição de carga. Basicamente, a corrente capacitiva gerada pelo sistema não aumentará o fluxo interno da máquina, fazendo assim com que as sobretensões sejam minimizadas a partir do joelho da curva característica.

No programa utilizado para as simulações de rejeição de carga à frequência fundamental, ANATEM[®], não é representada a característica de saturação dos transformadores elevadores da usina, devido até mesmo o propósito do programa ser estudos de estabilidade eletromecânica. Para representação da saturação neste programa foi feito um modelo de carga dinâmica não-linear que insere esta característica na simulação e que foi retirado originalmente do programa EMTP[®]. Assim, a curva característica associada a esta modelagem pode ser vista na Figura 97.

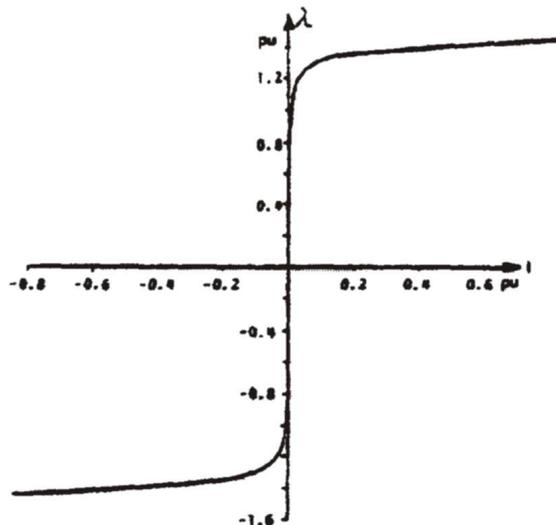


Figura 97- Curva característica representada no ANATEM, através da carga dinâmica

Conforme já citado anteriormente, a representação da saturação foi feita

considerando uma modelagem de carga não-linear conectada em uma das barras do transformador elevador, sendo neste caso a barra de menor tensão. A modelagem desta carga no programa ANATEM[®] foi feita através de um CDU que descreve o diagrama de blocos representativo da saturação, conforme apresentado na Figura 98.

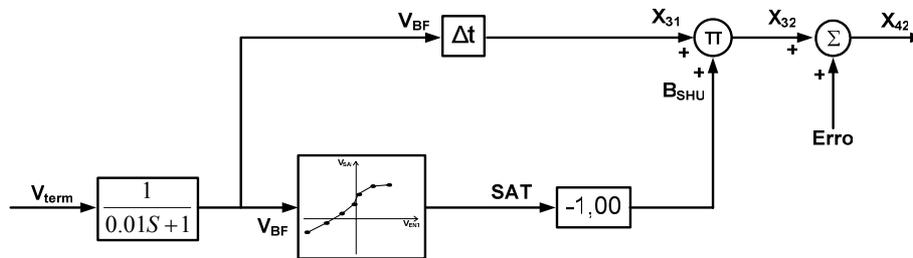


Figura 98- Diagrama de blocos referente a modelagem da saturação do transformador elevador

O controle mostrado na Figura 98, através da leitura da sua tensão, insere uma susceptância na barra que corresponde à parcela reativa absorvida pela carga dinâmica. Esta carga dinâmica não-linear representa a característica da saturação do transformador elevador.

No diagrama de blocos, o termo V_{BF} representa a tensão da barra após uma filtragem. A função pontos a seguir determina os valores correspondentes de atuação para a carga dinâmica, os quais são correspondentes a uma corrente indutiva através do ganho -1. A malha superior existente, na qual a tensão V_{BF} passa por um atraso, é necessária para que não haja problemas de “loops algébricos” no processo envolvido de cálculo. A entrada do sinal “erro” é necessária para a inicialização do modelo e está representando uma corrente residual de magnetização que é existente e muito pequena, mas necessária para o processo de convergência. Assim, a potência reativa em pu calculada em X_{32} é somada com este erro e fornece o valor final da variável X_{42} . A Tabela 12 mostra os valores usados para representação da função pontos da saturação.

Tabela 12- Valores referentes à função “pontos” da carga dinâmica

P1 – Tensão em pu	P2 – Corrente em pu	P3-Tensão em pu	P4-Corrente em pu
0,0	0,0	1,4	0,300
0,8	0,001	1,5	1,0
1,2	0,05		

Os valores mostrados na Tabela 12 são referentes aos pontos da curva da carga dinâmica que representa a característica de saturação do transformador elevador. Analisando esses valores, é notório que a saturação só começa apresentar grande influência na resposta da auto-excitação quando a tensão da barra, que é representada pela coluna de pontos **p1** e **p3**, chega ao valor de 1,2 pu. A influência desta curva, num estudo de rejeição de carga à frequência fundamental, poderá ser vista nas simulações abaixo. Vale ressaltar que os pontos usados para representação desta curva são típicos de uma característica de saturação para um transformador real.

A Figura 99 mostra a plotagem da característica de saturação usada para representação da curva do transformador elevador da usina, que está sendo representada por uma função pontos nesse diagrama de blocos. Assim:

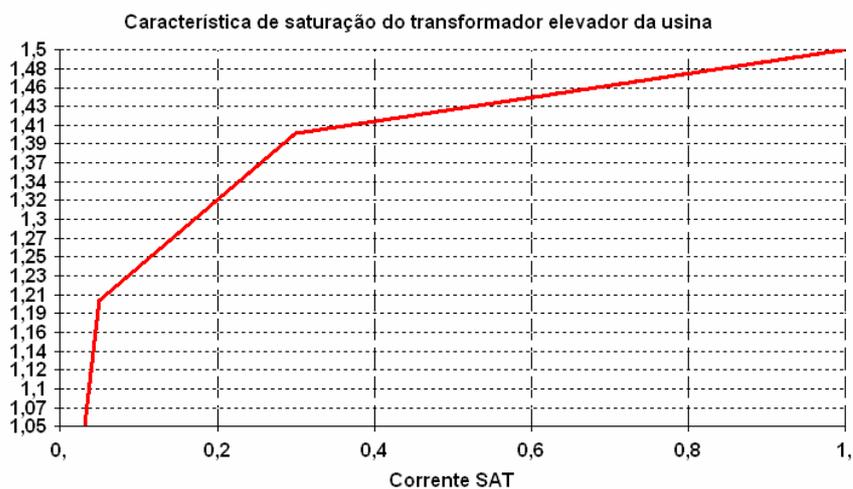


Figura 99- Diagrama de blocos referente a modelagem da saturação do transformador elevador

Analisando a Figura 99 pode-se perceber o formato da curva característica da saturação do transformador elevador, que teoricamente foi retirado da curva da Figura 97 e representado nesta dissertação pela função pontos da Tabela 12 em um controlador definido pelo usuário (CDU). Esta curva mostra que a característica está correta e que o controlador está reproduzindo com fidelidade a curva teórica.

O interesse das simulações desenvolvidas nesta parte do trabalho é somente a saturação do transformador elevador da usina. Portanto, as características ligadas a outros elementos não serão consideradas aqui.

4.9.1- Análise da saturação numa rejeição de carga

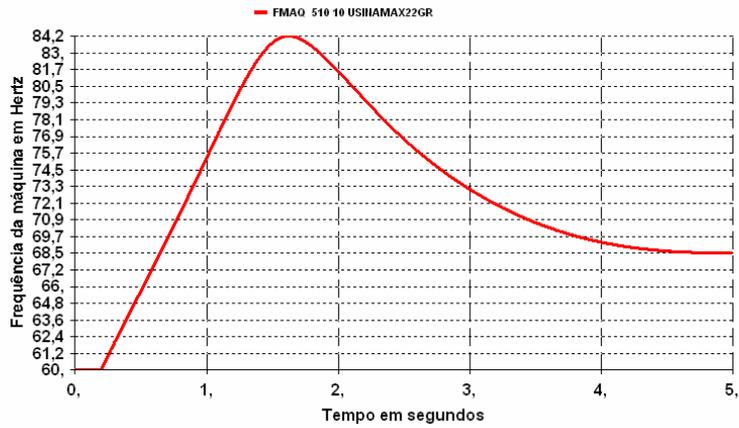


Figura 100- Frequência da máquina considerando a saturação do transformador

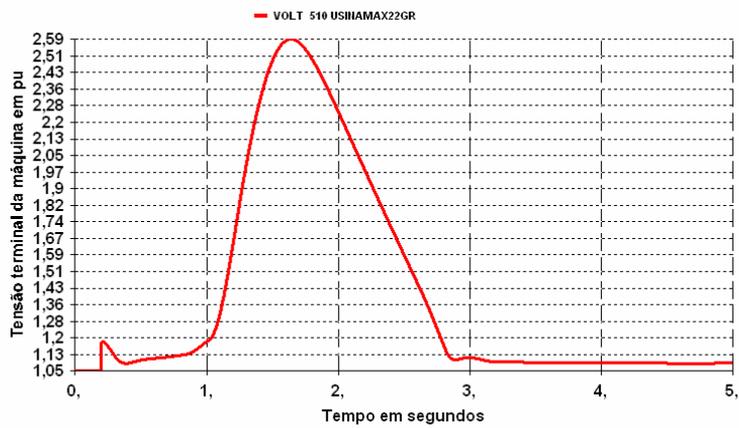


Figura 101- Tensão terminal da máquina considerando a saturação do transformador

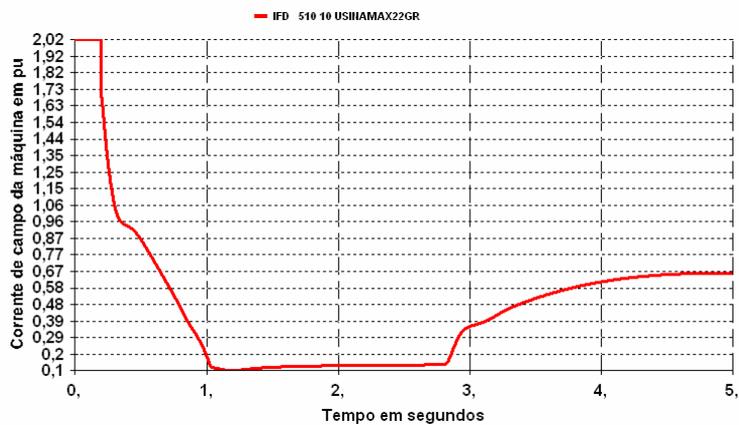


Figura 102- Corrente de campo da máquina considerando a saturação do transformador

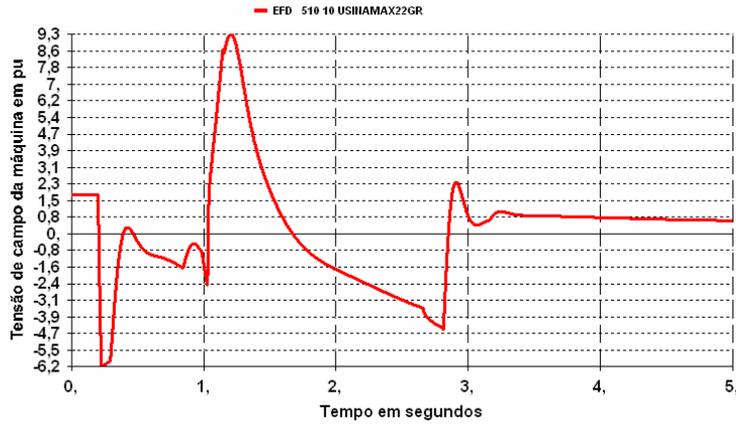


Figura 103- Tensão de campo da máquina considerando a saturação do transformador

➤ Comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.6.1 e 4.9.1 deste trabalho

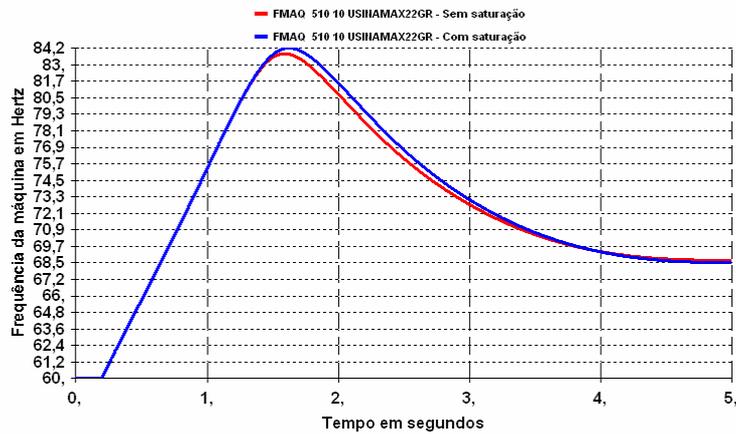


Figura 104- Frequência da máquina com e sem a representação da saturação do transformador elevador

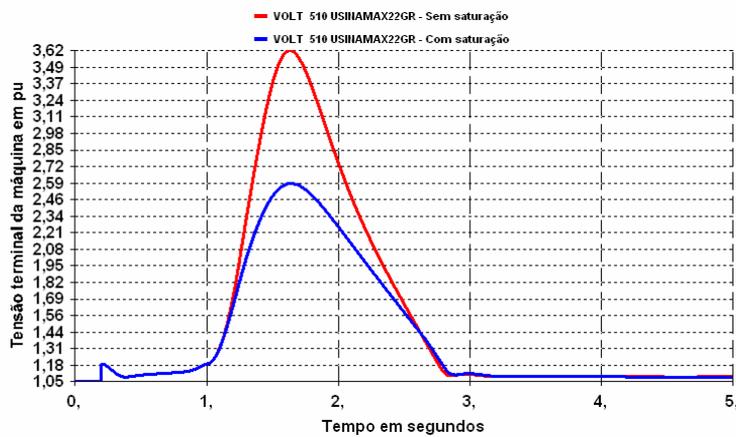


Figura 105- Tensão terminal da máquina com e sem a representação da saturação do transformador elevador

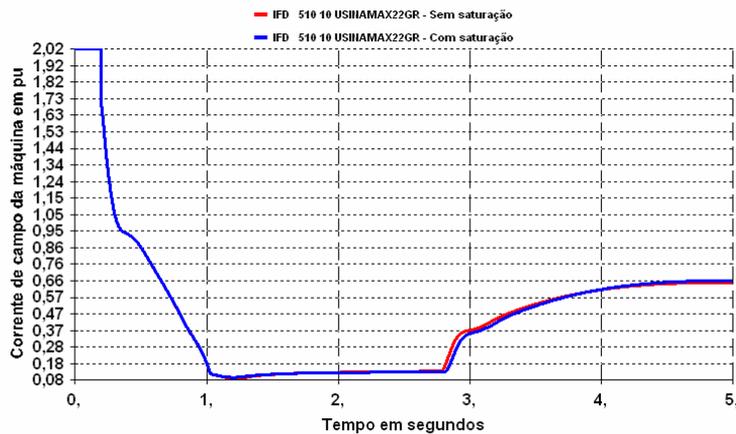


Figura 106- Corrente de campo da máquina com e sem a representação da saturação do transformador elevador

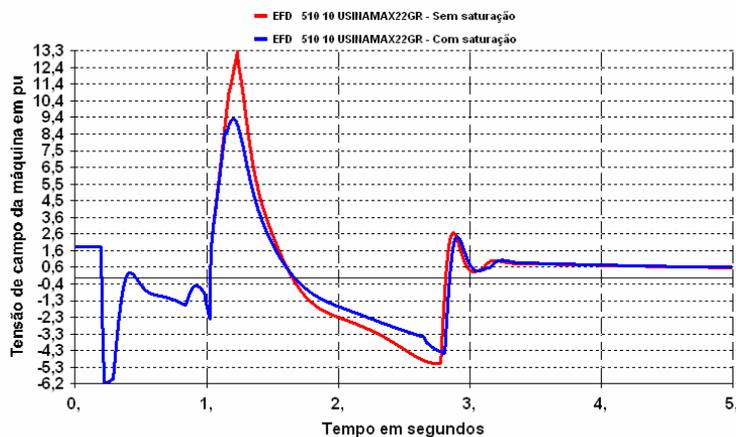


Figura 107- Tensão de campo da máquina com e sem a representação da saturação do transformador elevador

➤ **Conclusões sobre os resultados da comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.6.1 e 4.9.1.**

- Analisando as curvas mostradas na Figura 105 é notório que a representação da curva característica da saturação do transformador elevador, no estudo de rejeição de carga, reduz as sobretensões originadas pelo efeito da auto-excitação nas máquinas síncronas;
- A curva teórica da característica de saturação, que foi apresentada na Figura 97, foi reproduzida através da função pontos mostrada

na Tabela 12. Esta conclusão pode ser observada através da Figura 99;

- Neste caso em particular, o efeito da saturação apenas é visualizado a partir de aproximadamente 1 segundo de simulação. Este fenômeno está ligado às características da curva de saturação, conforme representado pela Figura 97 e detalhada na Tabela 12, e também da resposta da máquina frente a esta rejeição. Apesar das respostas apresentadas aqui para tensão terminal da máquina, a característica de saturação não deve ser usada como método de mitigação do fenômeno da auto-excitação, pois esta curva está ligada às características do equipamento;
- Comparando as respostas da Figura 106 e da Figura 107, entre as tensões e correntes de campo, podemos perceber que o controle da tensão de campo é mais eficaz na condição em que a saturação do transformador elevador é representada nas simulações. Este controle é concebido no sentido de controlar a corrente de campo e não deixar que ela ultrapasse o valor mínimo estipulado. Para o ajuste do valor mínimo da corrente de campo foi necessário um valor menor de E_{fd} quando inserida a saturação do transformador;
- A curva de tensão não atinge os valores de pico apresentados, pois alguma proteção já teria atuado mudando o perfil desta curva. Um valor de tensão que permite a leitura qualitativa seria de aproximadamente 1,4 pu e respectivos tempos para as outras grandezas plotadas.

4.10- Estudo da auto-excitação considerando abertura de circuitos a montante (transfer-trip)

4.10.1- Considerando um transfer-trip em 100 ms para a barra 513

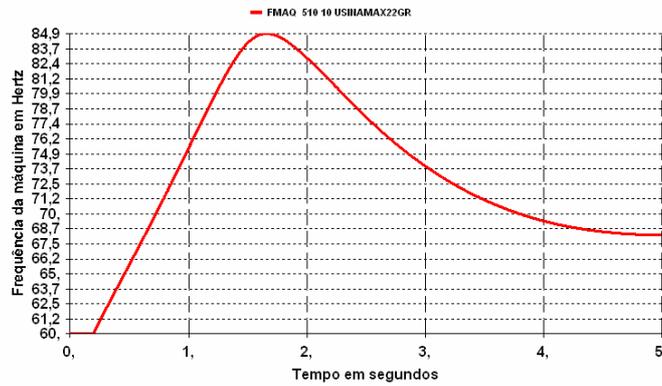


Figura 108- Frequência da máquina considerando um transfer-trip em 100 ms a montante

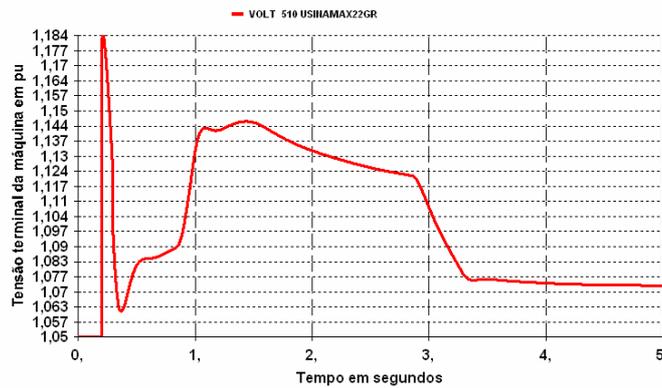


Figura 109- Tensão terminal da máquina considerando um transfer-trip em 100 ms a montante

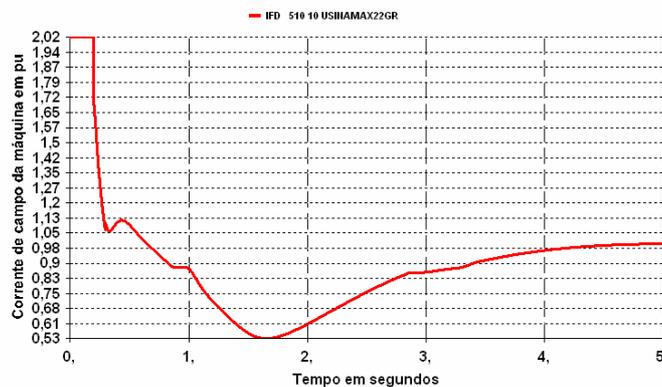


Figura 110- Corrente de campo da máquina considerando um transfer-trip em 100 ms a montante

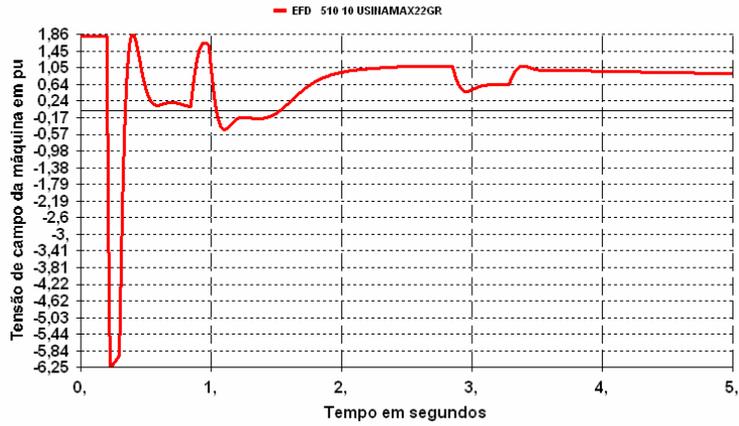


Figura 111- Tensão de campo da máquina considerando um transfer-trip em 100 ms a montante

4.10.2- Considerando um transfer-trip em 800 ms para a barra 513

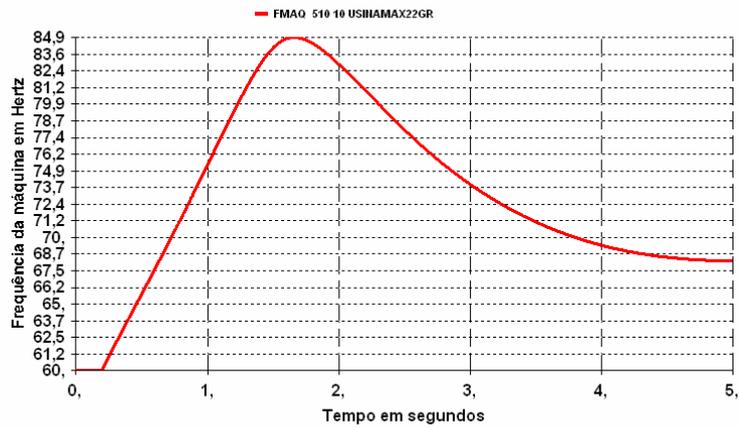


Figura 112- Frequência da máquina considerando um transfer-trip em 800 ms a montante

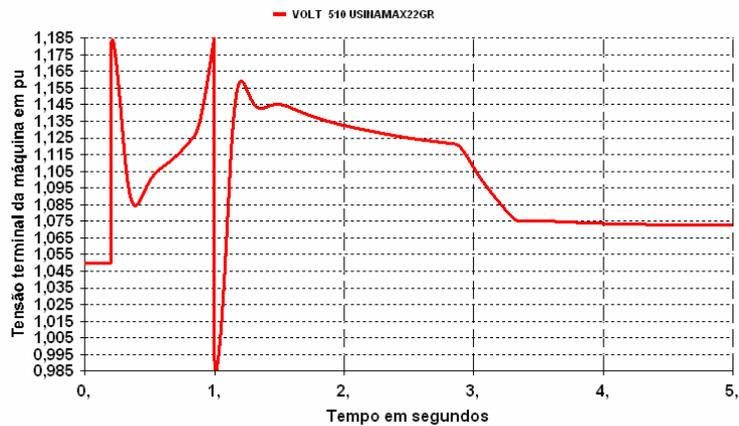


Figura 113- Tensão terminal da máquina considerando um transfer-trip em 800 ms a montante

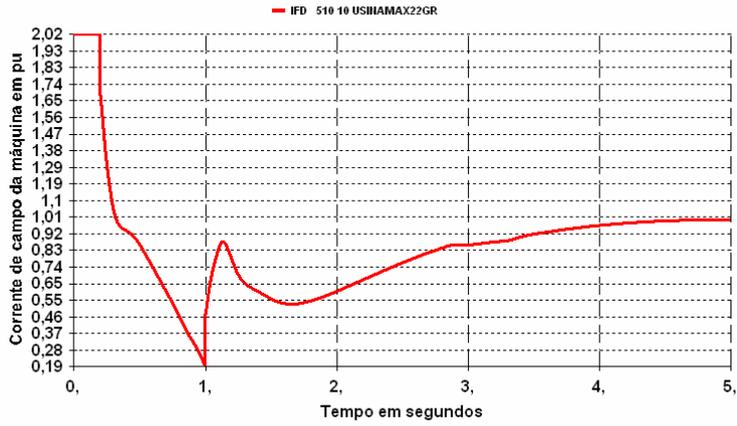


Figura 114- Corrente de campo da máquina considerando um transfer-trip em 800 ms a montante

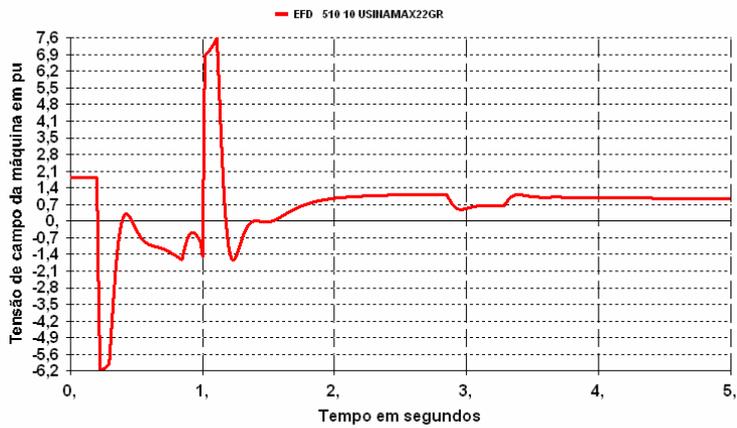


Figura 115- Tensão de campo da máquina considerando um transfer-trip em 800 ms a montante

4.10.3- Considerando um transfer-trip em 900 ms para a barra 513

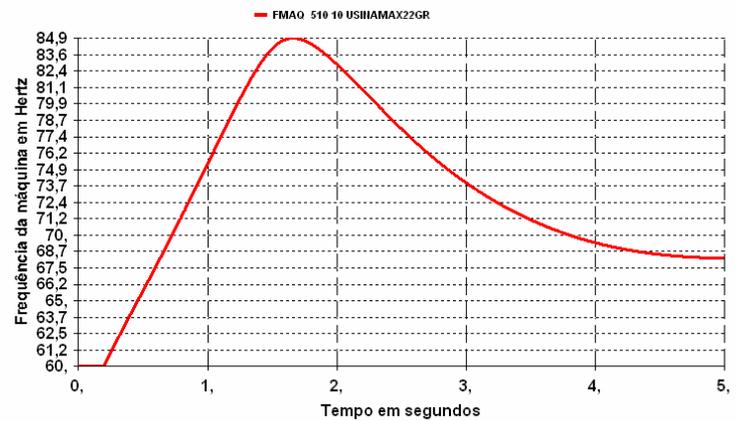


Figura 116- Frequência da máquina considerando um transfer-trip em 900 ms a montante

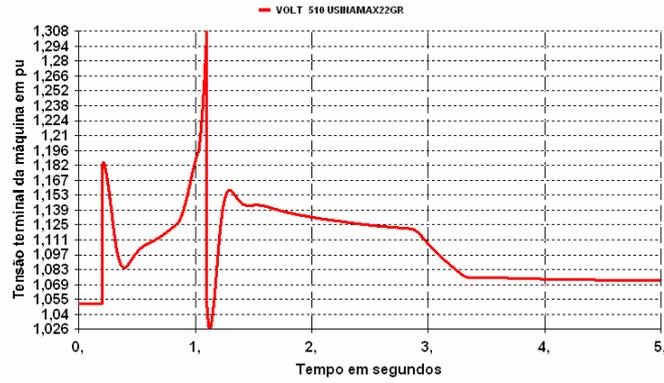


Figura 117- Tensão terminal da máquina considerando um transfer-trip em 900 ms a montante

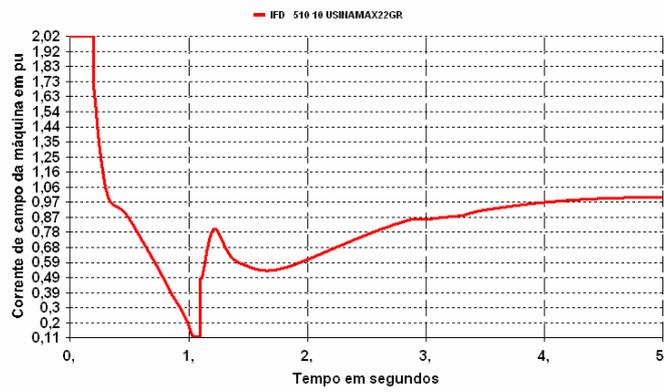


Figura 118- Corrente de campo da máquina considerando um transfer-trip em 900 ms a montante

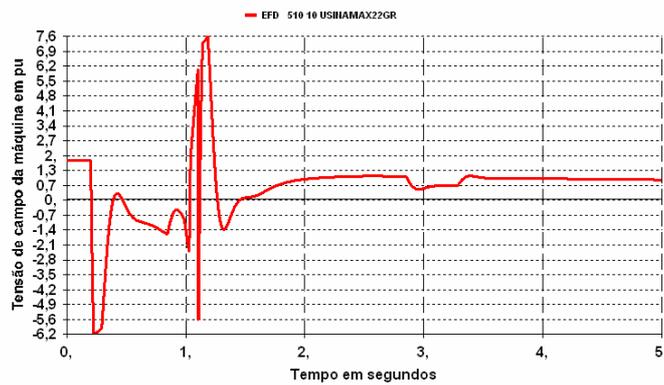


Figura 119- Tensão de campo da máquina considerando um transfer-trip em 900 ms a montante

➤ **Conclusões sobre os resultados da comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.10.1, 4.10.2 e 4.10.3.**

- Analisando as curvas mostradas nos itens 4.10.1, 4.10.2 e 4.10.3 é notório que a medida operativa de transferência de disparo para

outros disjuntores a montante da rejeição é uma forma bastante eficaz de adiar ou até mesmo, dependendo do número de disparos, evitar o surgimento da auto-excitação numa rejeição de carga, evitando assim o crescimento da tensão dos geradores síncronos;

- Outro fator importante, que apresenta influência neste recurso operativo, conforme visualizado nas simulações, é o tempo que este canal de comunicação leva para fazer os disparos dos outros disjuntores. À medida que o tempo de transferência de disparo para outros disjuntores vai aumentando, a probabilidade de se conseguir evitar a auto-excitação se torna cada vez menor, pelo fato da energia capacitiva gerada já ser muito grande para sua redução;
- De uma maneira geral, pode-se dizer que o sucesso dessa medida operativa é uma função do tempo de transferência, do montante de potência reativa gerado, do teto de tensão do sistema de excitação e da configuração do sistema após a transferência de disparo. Na prática, estudos especiais devem ser feitos para que se determine o número de transferências adotadas, assim como o tempo de disparo e a configuração sistêmica que deve ser obedecida.

4.11- Inserção de reatores chaveados no sistema

Uma das formas de minimizar o efeito da auto-excitação num gerador síncrono é a inserção de reatores no sistema quando ocorre uma rejeição de carga. Esses reatores, quando inseridos no sistema após uma configuração propícia para AEX, absorvem uma parcela da potência reativa. Dessa maneira, minimizam o efeito da auto-excitação na máquina. Vale ressaltar que a inserção desses equipamentos no sistema não tem capacidade de evitar a ocorrência do fenômeno e sim atrasar o surgimento da auto-excitação de modo a dar mais tempo, ou segurança, para atuação das respectivas

proteções contra sobretensões ou sobrefrequência e assim evitar danos aos equipamentos. Neste caso, a inserção destes reatores será feita através de um esquema de controle que será mostrado na figura abaixo e que leva em consideração a correção da susceptância pela frequência.

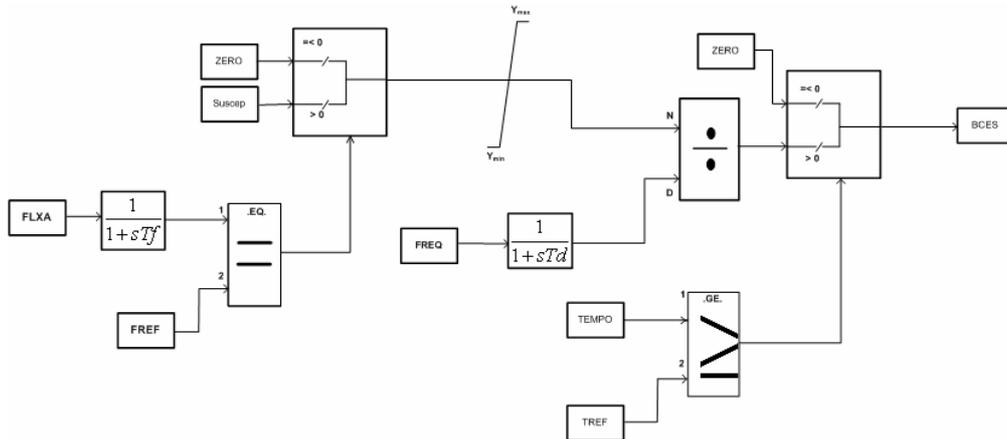


Figura 120- Diagrama de blocos referente ao controle para a inserção dos reatores

O princípio de funcionamento deste controlador baseia-se na medição da potência ativa num determinado trecho do circuito. Quando a potência ativa for igual a zero neste trecho é enviado um sinal para que seja efetuado o chaveamento de uma susceptância indutiva. Após este chaveamento, o valor ajustado da susceptância passa por um limitador e é corrigido pela frequência da ilha elétrica. Feita esta correção, o sinal fica na espera para que seja atingido o tempo ajustado para inserção desta susceptância na barra.

A descrição completa das constantes e dos parâmetros existentes no diagrama de blocos apresentado na Figura 120 será mostrada na Tabela 13.

Tabela 13- Descrição das constantes e parâmetros da lógica de atuação

Parâmetros/Constantes	Descrição	Valor usado
FLXA	Fluxo de potência ativa do circuito a ser aberto.	Leitura do canal de potência ativa.
FREF	Referência do fluxo de potência ativa para atuação da lógica.	0 MW
ZERO	Valor inicial para algumas entradas.	0
BCES	Susceptância de saída do reator.	Valor final de simulação
REAT	Valor da entrada de susceptância para o reator.	-9,00 pu
FREQ	Sinal da frequência da ilha elétrica para correção da susceptância.	Leitura do canal de frequência.
TEMPO	Tempo de simulação.	Leitura do tempo de simulação.
TREF	Tempo de referência para atuação da lógica.	Ajuste para o tempo de atuação do reator manobrável, contado a partir da rejeição.
T_f	Constante de tempo do filtro de medição da potência ativa.	0,01s
T_d	Constante de tempo do filtro de medição de frequência	0,01s
Y_{max}	Limite máximo da Susceptância	0
Y_{min}	Limite mínimo da Susceptância	-9,00 pu

Neste caso da dissertação, em virtude de somente estar sendo feita rejeição de carga no sistema e nenhum outro evento, foi escolhida a potência ativa como canal de medição para inserção dos reatores chaveados. Num sistema de potência real devem ser feitas análises do melhor canal de comunicação para inserção dos reatores, pois o sistema está sujeito a outros eventos como curtos e oscilações de potência que podem influenciar erroneamente na inserção desses equipamentos. Como sugestão desta dissertação, para um estudo real, pode ser usado o canal de abertura de disjuntores ou até mesmo a tensão de uma determinada barra do sistema. Devem ser feitos estudos mais aprofundados que determinem a melhor opção de leitura para o chaveamento desses reatores.

4.11.1- Inserção de 1800 Mvar de reatores chaveados, no momento da rejeição, sendo 900 na barra 512 e 900 na barra 513

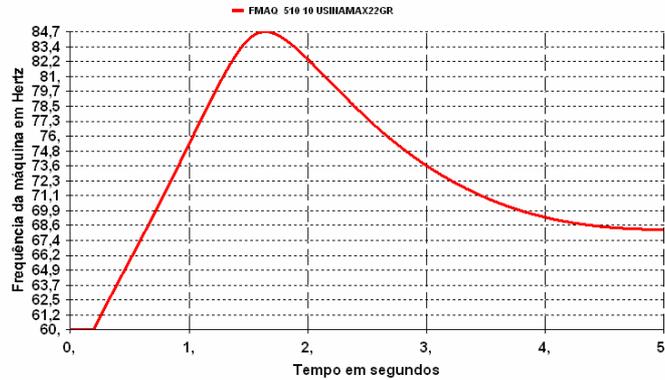


Figura 121-Freqüência da máquina considerando inserção de reatores no momento da rejeição

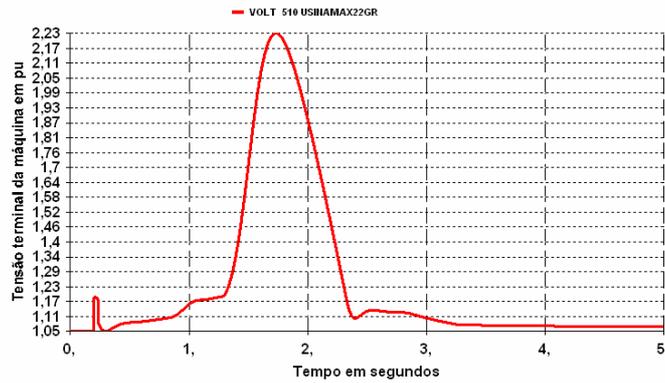


Figura 122- Tensão terminal da máquina considerando inserção de reatores no momento da rejeição

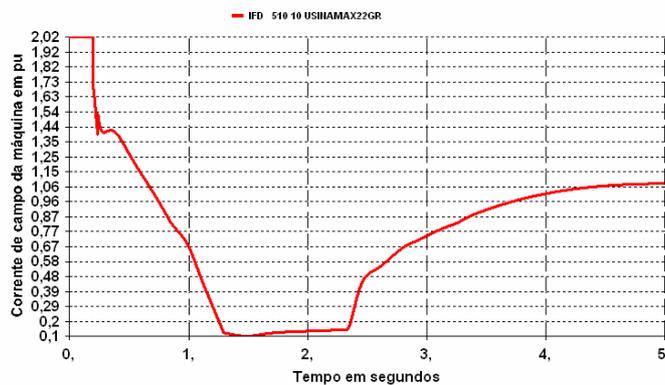


Figura 123- Corrente de campo da máquina considerando inserção de reatores no momento da rejeição

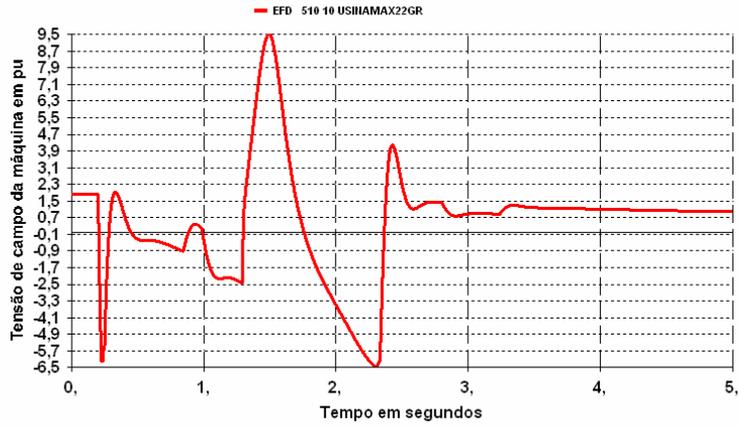


Figura 124- Tensão de campo da máquina considerando inserção de reatores no momento da rejeição

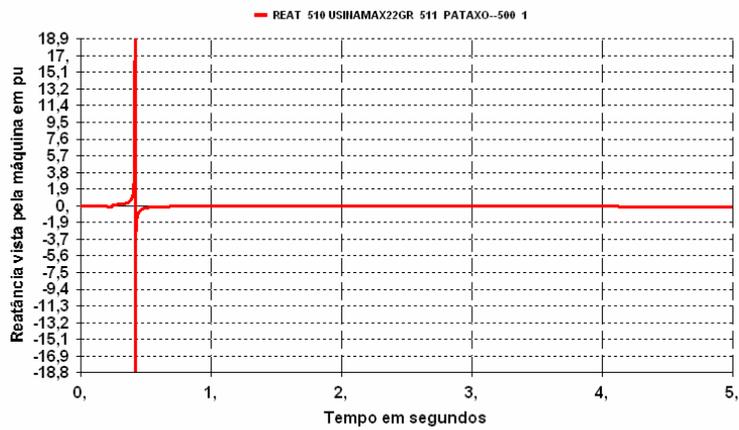


Figura 125- Reatância equivalente vista nos circuitos considerando inserção de reatores no momento da rejeição

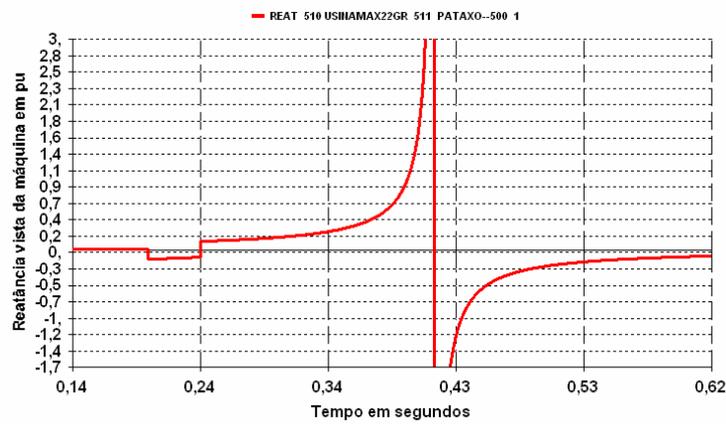


Figura 126- Reatância equivalente detalhada, vista nos circuitos considerando inserção de reatores no momento da rejeição

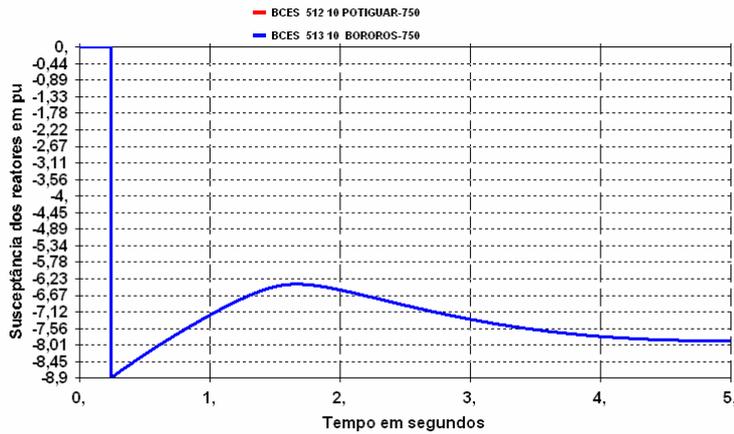


Figura 127- Susceptância dos reatores chaveados no momento da rejeição

4.11.2- Inserção de 1800 Mvar de reatores chaveados, 200 ms após a rejeição, sendo 900 na barra 512 e 900 na barra 513

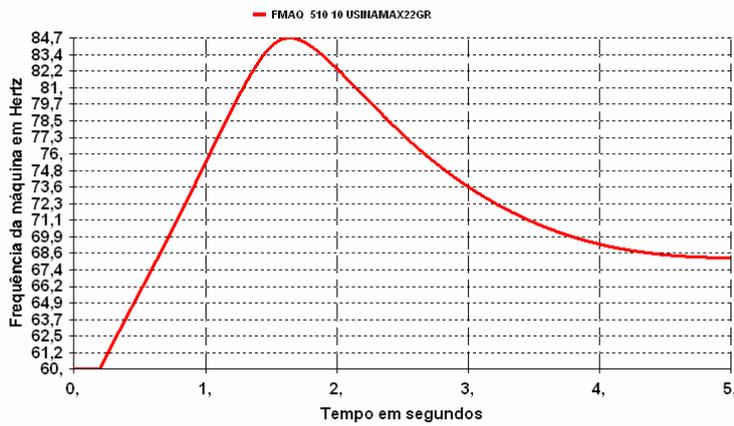


Figura 128- Frequência da máquina considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição

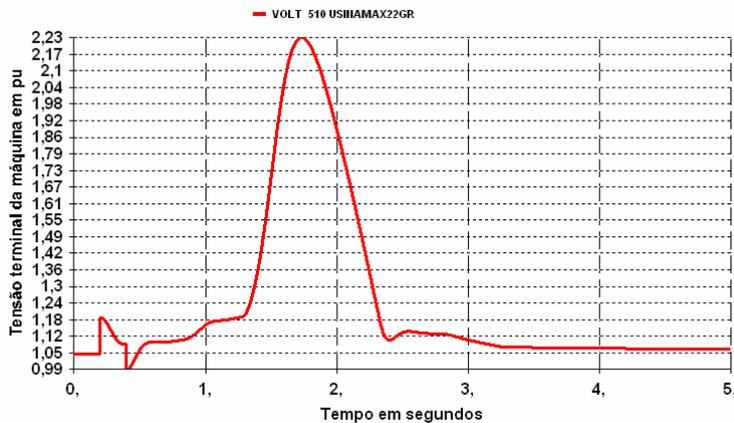


Figura 129- Tensão terminal da máquina considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição

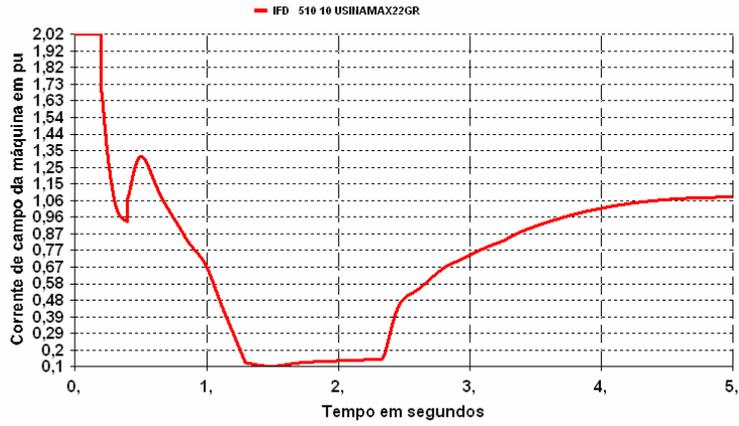


Figura 130- Corrente de campo da máquina considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição

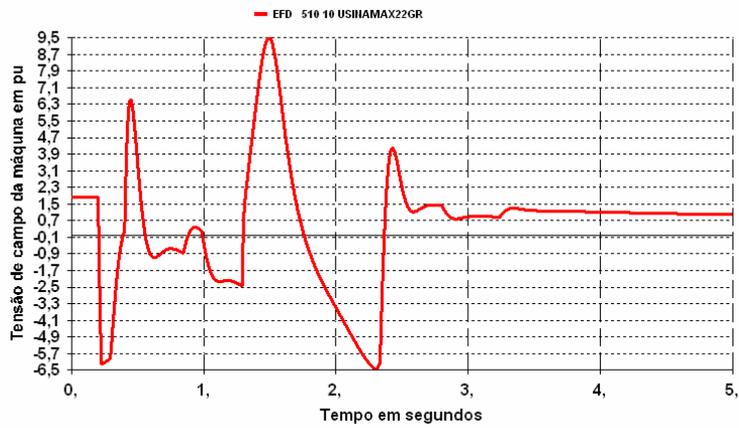


Figura 131- Tensão de campo da máquina considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição

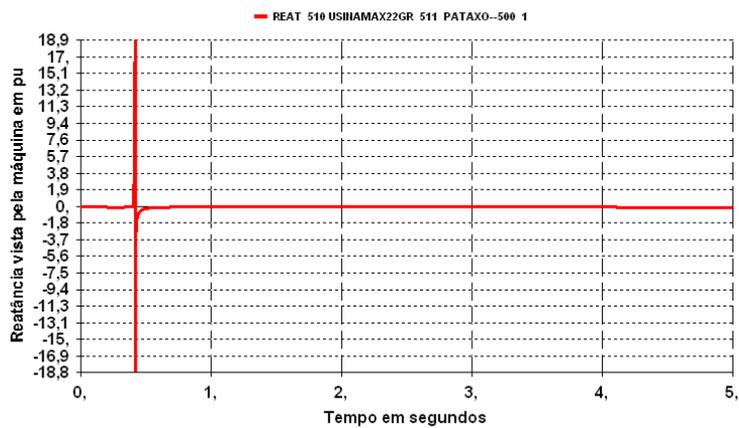


Figura 132- Reatância equivalente vista nos circuitos considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição

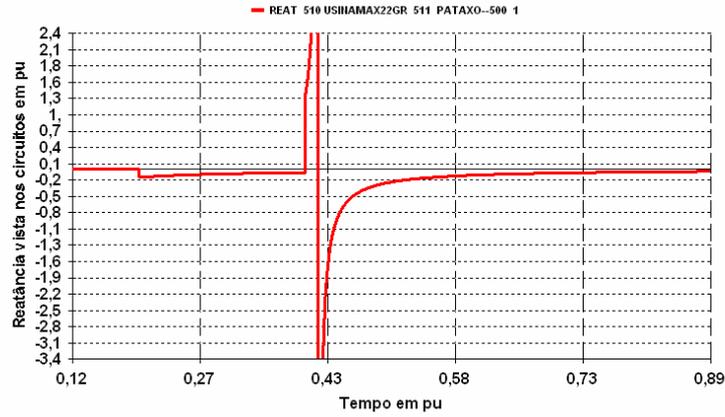


Figura 133- Reatância equivalente detalhada, vista nos circuitos considerando inserção de reatores 200 ms após a rejeição

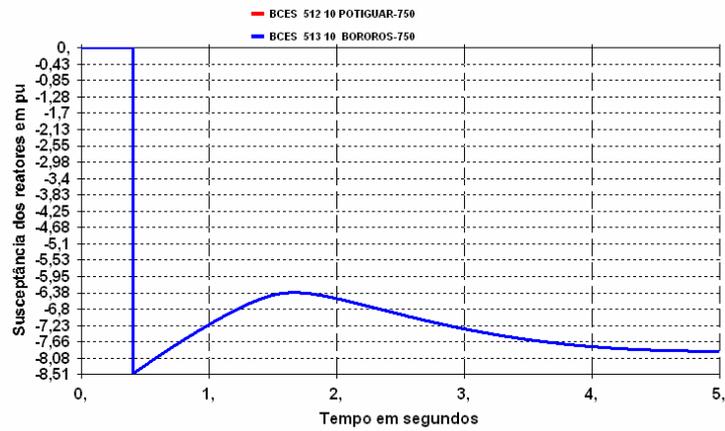


Figura 134- Susceptância dos reatores chaveados 200 ms após a rejeição

4.11.3- Inserção de 1800 Mvar de reatores chaveados, 1 segundo após a rejeição, sendo 900 na barra 512 e 900 na barra 513

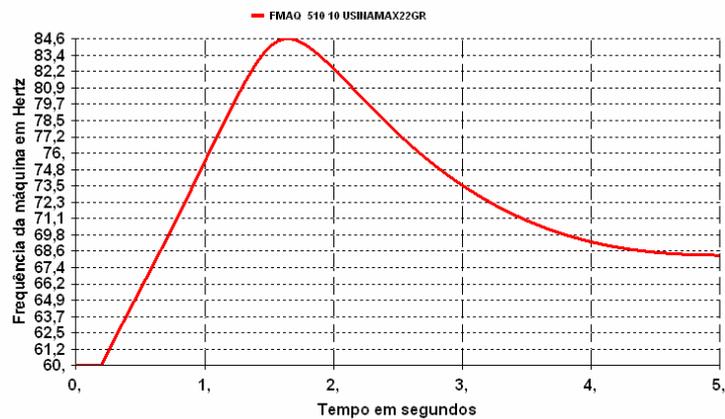


Figura 135- Frequência da máquina considerando inserção de reatores 1 s após a rejeição

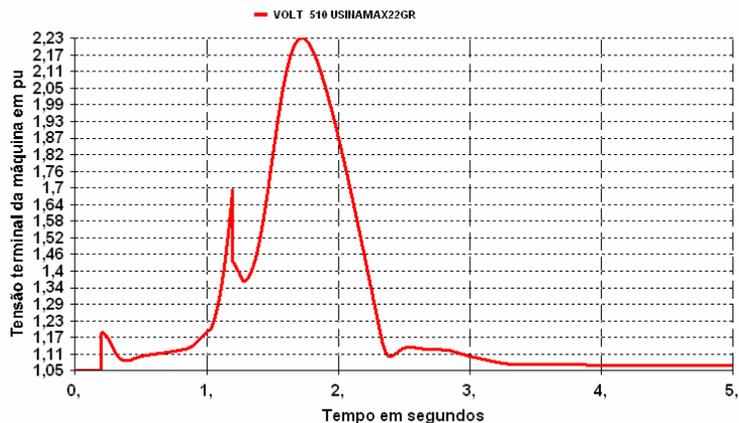


Figura 136- Tensão terminal da máquina considerando inserção de reatores 1 s após a rejeição

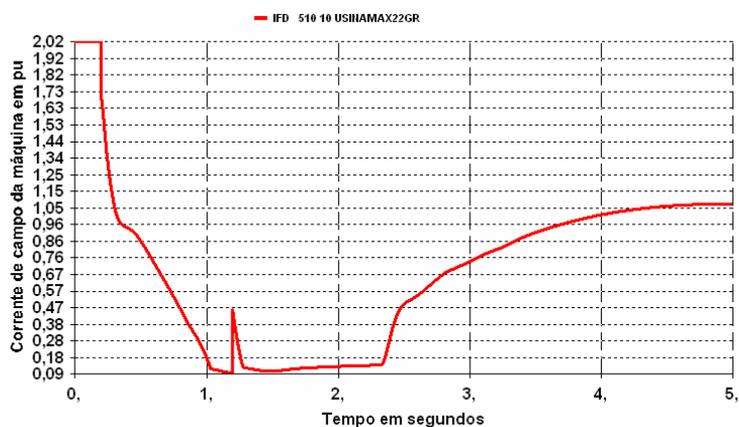


Figura 137- Corrente de campo da máquina considerando inserção de reatores 1 s após a rejeição

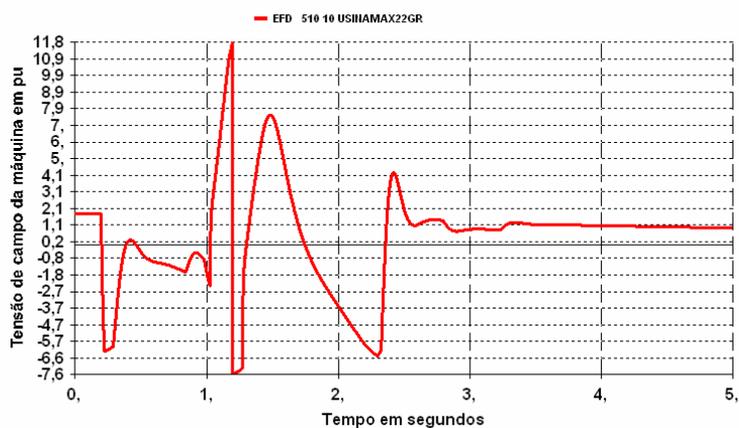


Figura 138- Tensão de campo da máquina considerando inserção de reatores 1 s após a rejeição

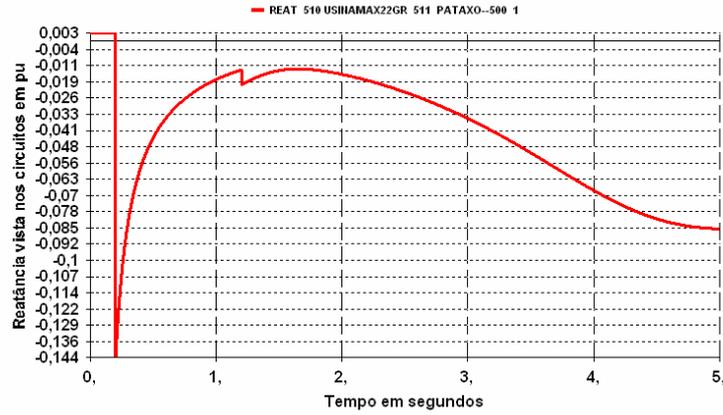


Figura 139- Reatância equivalente vista nos circuitos considerando inserção de reatores 1s após a rejeição

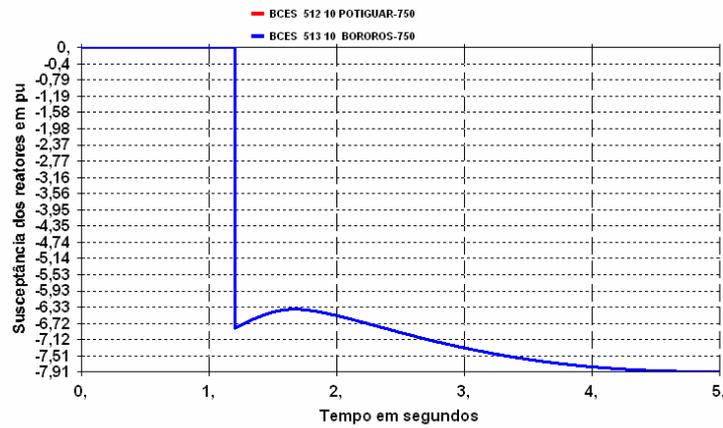


Figura 140- Susceptância dos reatores chaveados 1s após a rejeição

➤ **Comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.11.1, 4.11.2 e 4.11.3 referentes aos reatores manobráveis.**

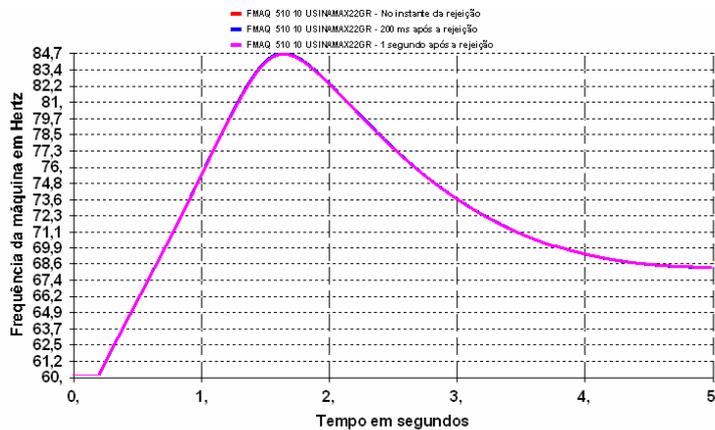


Figura 141- Comparação da frequência da máquina entre os tempos simulados

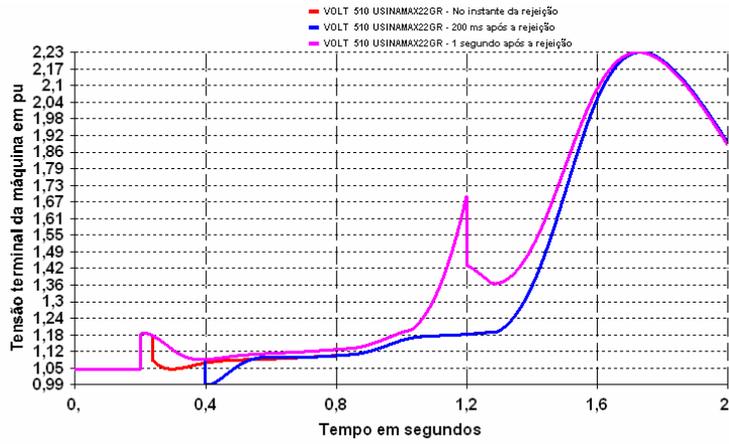


Figura 142- Comparação da tensão terminal da máquina entre os tempos simulados

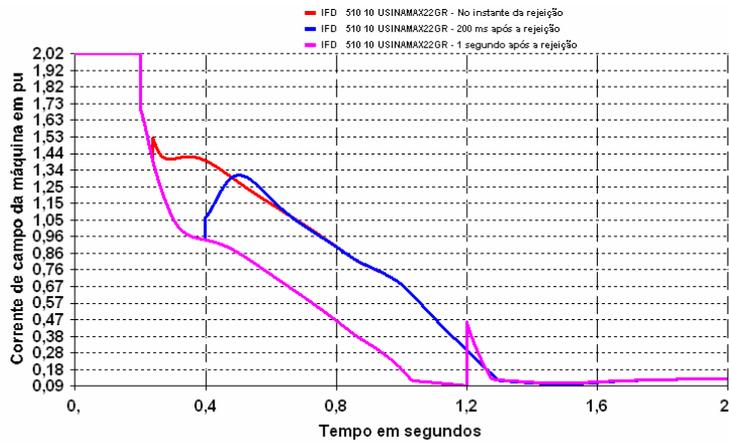


Figura 143- Comparação da corrente de campo da máquina entre os tempos simulados

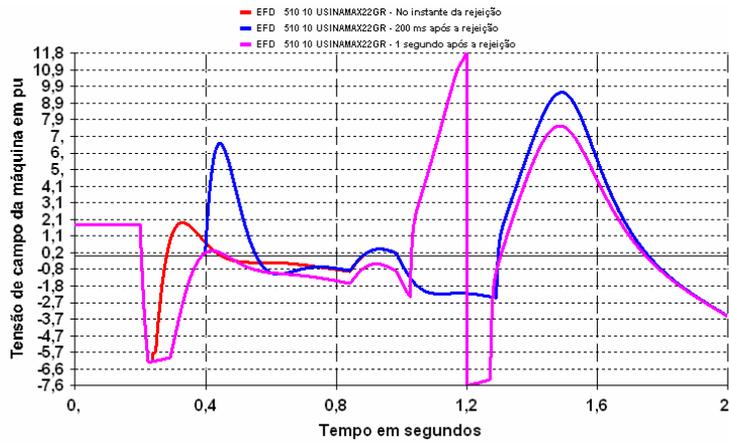


Figura 144- Comparação da tensão de campo da máquina entre os tempos simulados

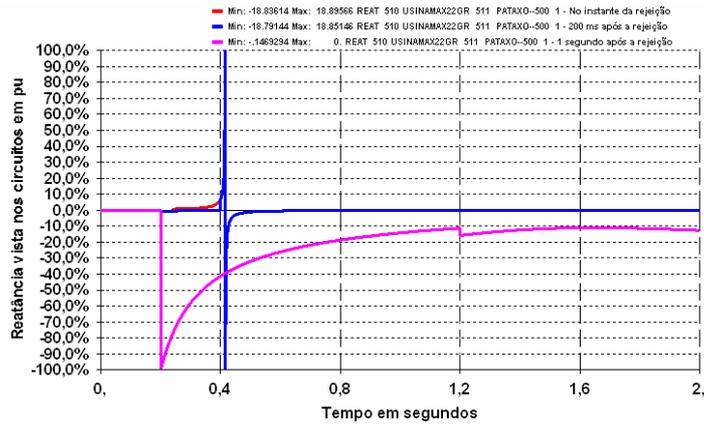


Figura 145- Comparação entre as reatâncias vistas nos circuitos entre os tempos simulados

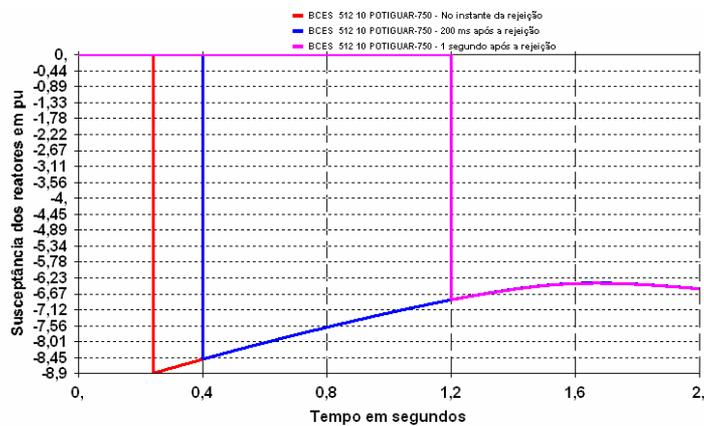


Figura 146- Comparação detalhada entre as susceptâncias dos reatores nos tempos simulados

➤ **Conclusões sobre a comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.11.1, 4.11.2 e 4.11.3.**

- Analisando as curvas mostradas nos itens 4.11.1, 4.11.2 e 4.11.3 é notório que a medida operativa de inserção de reatores chaveados em barras do sistema apresenta influência na resposta da tensão terminal da máquina e que pode ser um meio eficiente de se retardar o crescimento da tensão do gerador síncrono;
- Outra característica bem visualizada nas respostas obtidas é a influência do tempo de inserção desses reatores no sistema. A conclusão que se chega é que, quanto mais rápido for o sistema de controle para detecção da rejeição e inserção dos reatores,

maior será a garantia de sucesso de retardamento do crescimento da tensão e conseqüente sucesso da atuação da proteção;

- Outro fator importante é o montante de reatores que deve ser inserido no sistema de modo que ocasione o retardamento do crescimento da tensão. Num estudo real de auto-excitação, este valor deve ser bem analisado considerando aspectos técnicos e econômicos;
- De uma maneira geral, pode-se dizer que o sucesso desta medida operativa é uma função do tempo de inserção desses reatores, do montante a ser inserido, assim como o tamanho do circuito que ainda permanece ligado ao gerador síncrono;
- A inserção dos reatores pode ser feita em conjunto com outras medidas operativas ou até mesmo com sistemas de excitação com capacidade de corrente negativa, de modo a reduzir o montante a ser inserido ou até mesmo possibilitar um tempo maior para inserção. Um conjunto dessas medidas garante maior taxa de sucesso quanto ao retardamento do crescimento da tensão do gerador síncrono;
- A Figura 126 e a Figura 133 mostram o comportamento da reatância equivalente do sistema numa rejeição de carga seguida de inserção de reatores no sistema em diversos tempos simulados. As curvas em vermelho e azul, da Figura 145, mostram as chamadas zonas de ressonância que podem ocorrer no sistema. Este fenômeno é caracterizado pela igualdade entre as reatâncias capacitivas e indutivas do sistema. Assim, quando $|X_C| = |X_L|$, corrigido cada uma pela frequência da ilha elétrica, o sistema apresenta esses picos que mostram essas zonas de ressonância. Na curva em magenta da Figura 145 não é visualizado este fenômeno pelo fato de que $|X_C|$ será sempre maior que $|X_L|$ em virtude do tempo de inserção dos reatores.

4.11.4- Inserção de 1800 Mvar, no momento da rejeição, sendo 900 na barra 512 e 900 na barra 513. Neste caso está sendo considerado o RSC (Reator Shunt Controlado por ponte tiristorizada).

Neste caso, como elemento controlador de tensão, está sendo considerada a inserção dos reatores controlados por eletrônica de potência (RSC). Basicamente, a modelagem dinâmica deste elemento é um estático convencional que apresenta alta rapidez de resposta devido ao chaveamento da ponte tiristorizada presente no terciário do transformador. A Figura 147 mostra o esquema de representação deste equipamento.

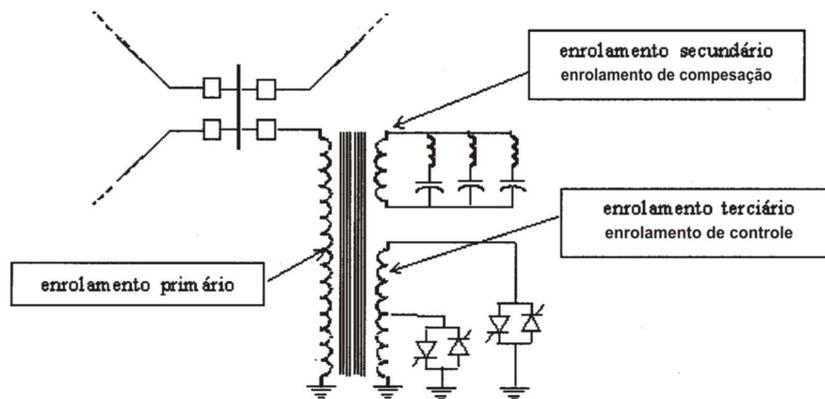


Figura 147- Esquema de representação de um RSC

Como a modelagem dinâmica deste equipamento é semelhante a de um estático convencional, ela não será mostrada aqui. Os resultados obtidos para uma rejeição de carga total, considerando o RSC como único equipamento controlador de tensão no sistema de transmissão, podem ser visualizados através das figuras abaixo.

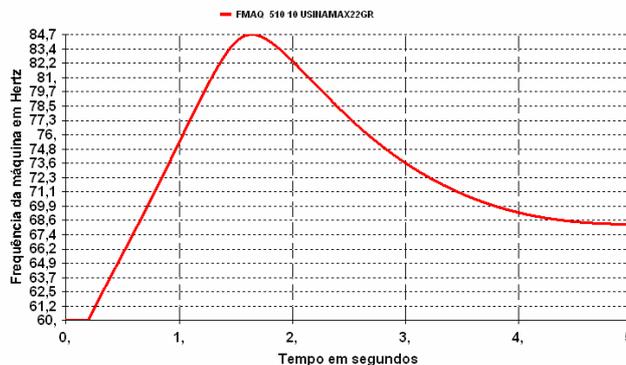


Figura 148- Frequência da máquina considerando a inserção de um RSC

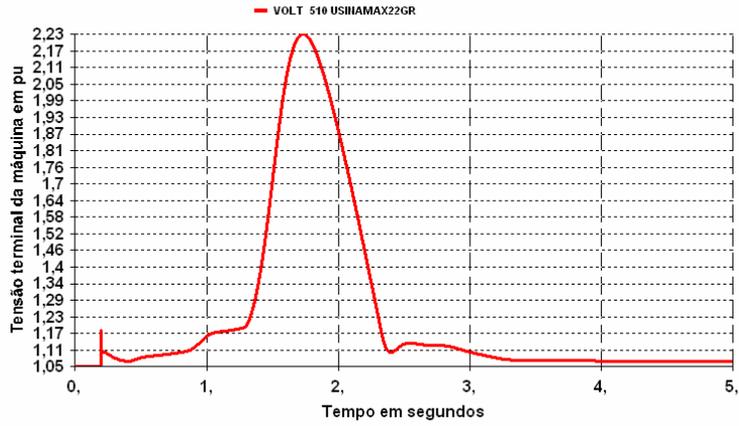


Figura 149- Tensão terminal da máquina considerando a inserção de um RSC

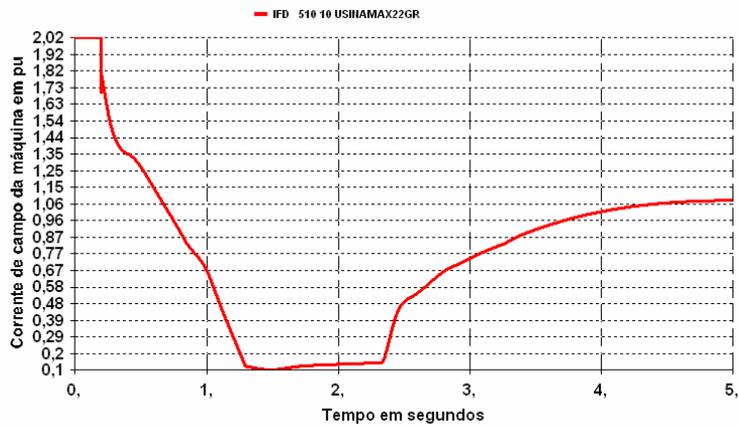


Figura 150- Corrente de campo da máquina considerando a inserção de um RSC

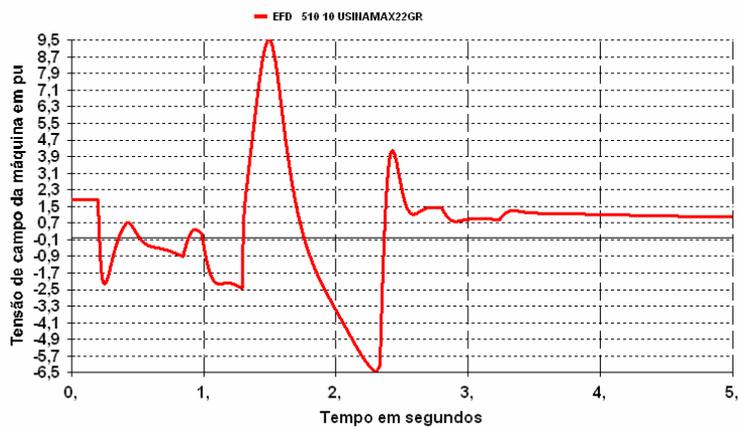


Figura 151- Tensão de campo da máquina considerando a inserção de um RSC

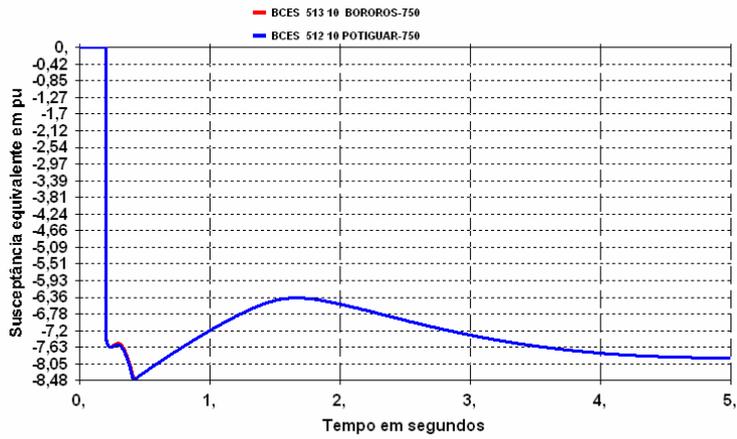


Figura 152- Susceptância equivalente dos RSCs

➤ **Comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.11.1 e 4.11.4 entre reatores convencionais e o CSR.**

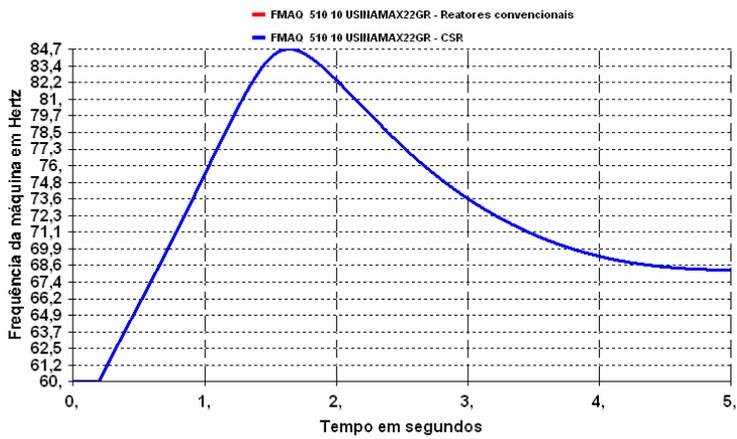


Figura 153- Comparação da frequência da máquina entre as respostas de reatores e RSC

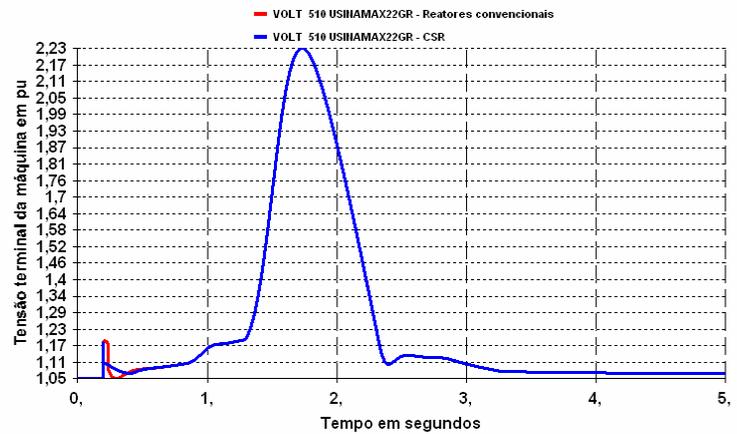


Figura 154- Comparação da tensão terminal da máquina entre as respostas de reatores e RSC

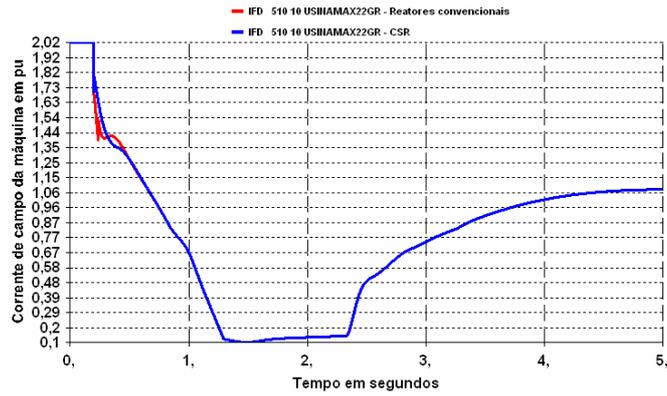


Figura 155- Comparação da corrente de campo da máquina entre as respostas de reatores e RSC

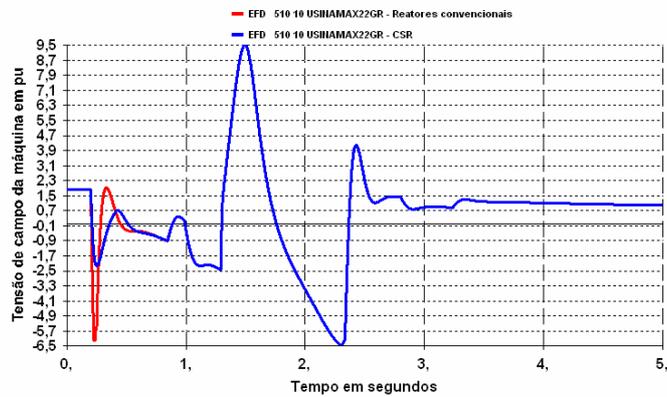


Figura 156- Comparação da tensão de campo da máquina entre as respostas de reatores e RSC

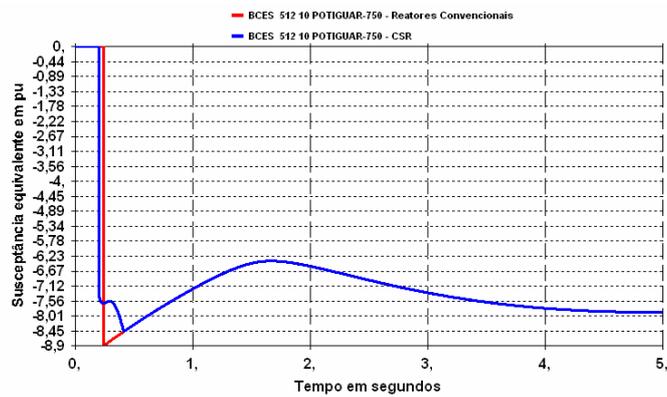


Figura 157- Comparação das susceptâncias entre as respostas de reatores e RSC

➤ **Comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.11.1 e 4.11.4.**

- Comparando as respostas entre a inserção de reatores chaveados e o equipamento RSC pode ser visualizado que não há grande

diferença entre o uso de tais equipamentos com a finalidade de se retardar o crescimento da tensão, após uma rejeição de carga;

- A diferença básica, entre as respostas obtidas para os dois casos, foi o comportamento da tensão de campo. A Figura 156 mostra que a variação inicial de E_{fd} , considerando um RSC, é menor quando comparada com a resposta do reator. No RSC, o valor de pico chegou até -2,0 pu. No caso do uso de reatores, este valor atingiu aproximadamente -6,3 pu. Assim, inicialmente, pelas suas características, o RSC apresentou resposta melhor;
- As respostas obtidas para as susceptâncias nos dois casos, conforme Figura 157, podem ser explicadas pelo fato de que nos reatores os valores inseridos são discretos, o que não acontece no RSC, pois não apresenta este tipo de controle;
- Se a rejeição de carga fosse o único critério adotado para especificação dos tetos da tensão de campo do sistema de excitação da máquina, o uso de RSC's poderia diminuir o valor negativo adotado, conforme resposta apresentada pela Figura 156;
- A curva de tensão não atinge os valores de pico apresentados, pois alguma proteção já teria atuado mudando o perfil desta curva. Um valor de tensão que permite a leitura qualitativa seria de aproximadamente 1,4 pu e respectivos tempos para as outras grandezas plotadas.

4.12- Influência do número de máquinas despachadas

O número de máquinas despachadas influencia na capacidade de absorção da potência reativa gerada pela linha. A redução do número de máquinas despachadas reduz a capacidade de controle da tensão terminal e conseqüentemente da tensão

interna, levando ao aumento dessa tensão. Uma outra forma de analisar esta condição seria dizer que, quanto menor o número de máquinas em paralelo, maiores serão os valores das reatâncias internas da máquina equivalente, o que pode levar este equipamento para condições piores de operação após uma rejeição de carga.

4.12.1- Considerando uma máquina equivalente a 88 máquinas despachadas na sua potência nominal

As respostas da frequência, tensão terminal, corrente de campo e tensão de campo, referentes a este item, podem ser visualizadas nas figuras plotadas no item 4.6.1 deste trabalho.

4.12.2- Considerando uma máquina equivalente a 44 máquinas despachadas na sua potência nominal

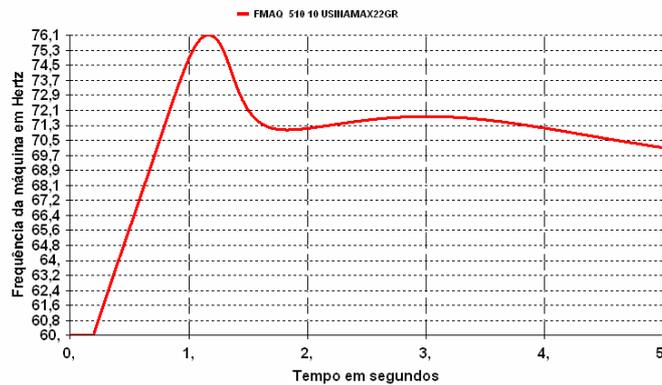


Figura 158- Frequência da máquina equivalente

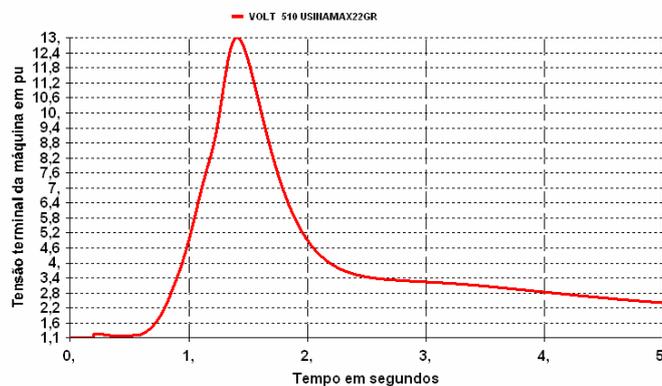


Figura 159- Tensão terminal da máquina equivalente

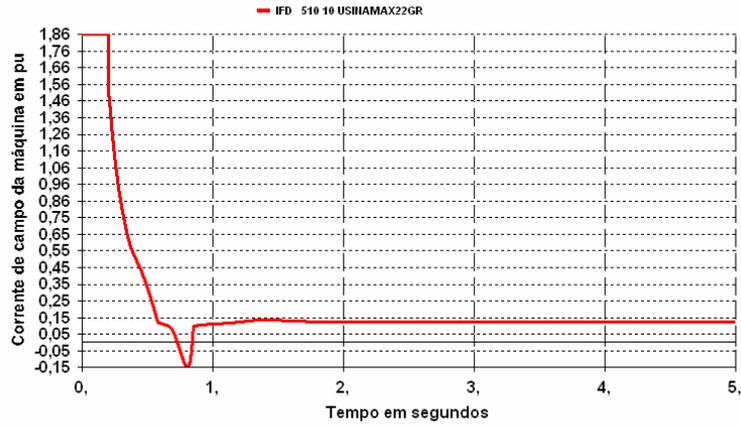


Figura 160- Corrente de campo da máquina equivalente

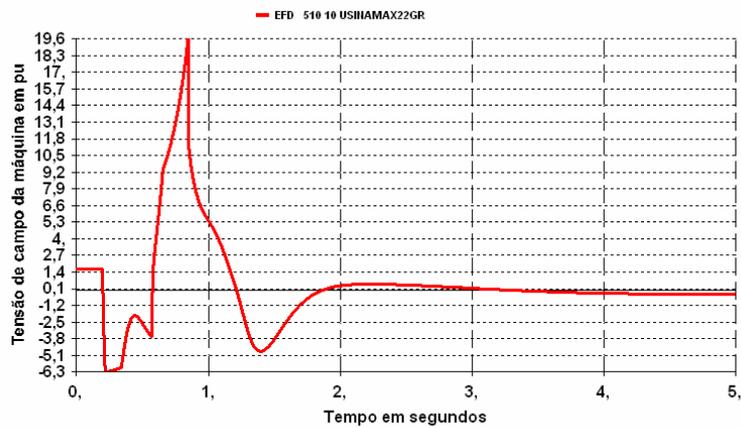


Figura 161- Tensão de campo da máquina equivalente

➤ **Comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.12.1 e 4.12.2 referentes ao número de máquinas despachadas.**

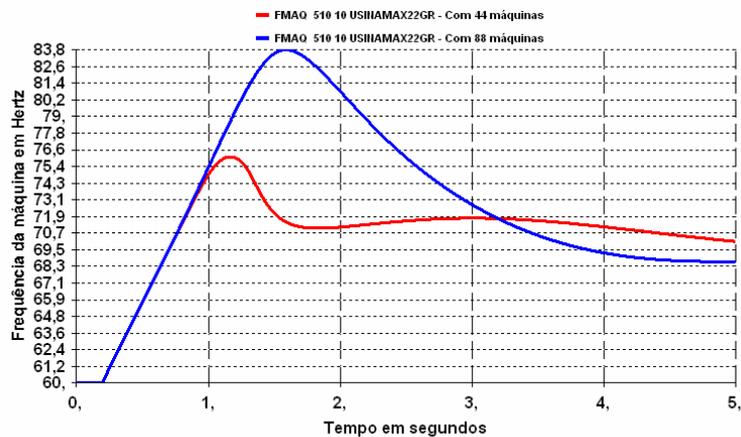


Figura 162- Frequência da máquina equivalente para 88 e 44 máquinas

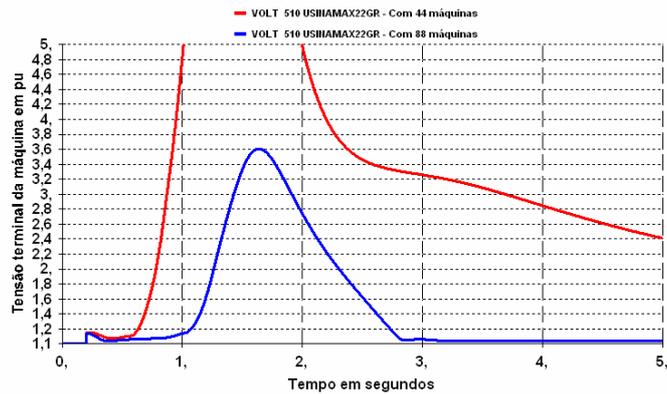


Figura 163- Tensão terminal da máquina equivalente para 88 e 44 máquinas

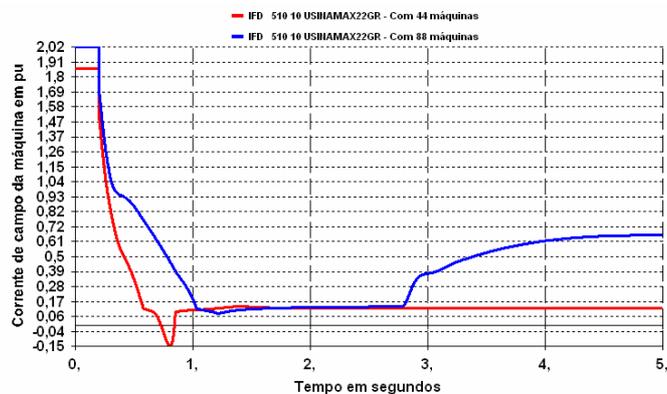


Figura 164- Corrente de campo da máquina equivalente para 88 e 44 máquinas

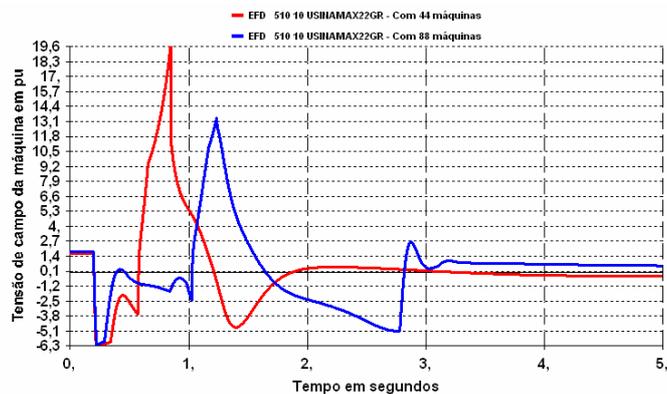


Figura 165- Tensão de campo da máquina equivalente para 88 e 44 máquinas

➤ **Conclusões sobre os resultados da comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.12.1 e 4.12.2.**

- A análise dessas figuras mostra que, quanto menor o número de máquinas despachadas numa determinada usina, mais severo é o

efeito da auto-excitação para uma mesma rejeição de carga. Esta característica pode ser melhor visualizada através da Figura 163, que mostra a tensão terminal do gerador equivalente de ambos os casos;

- O regulador de velocidade apresenta maior influência no caso em que o sistema está com menor número de máquinas despachadas. Esta característica está ligada com o fato de que a máquina equivalente para 44 está com despacho menor;
- Assim, a condição mais drástica para o gerador síncrono, considerando a auto-excitação, é quando uma usina está com número pequeno de máquinas despachadas em 100% da sua potência total. Esta conclusão está diretamente ligada à abertura máxima do distribuidor das máquinas, maior potência reativa gerada pelas linhas e conseqüente ponto de operação da máquina próximo aos limites máximos de absorção de potência reativa, que reduz a capacidade de controle da máquina. Este princípio pode ser visto no item 2.8 deste trabalho;
- A curva de tensão não atinge os valores de pico apresentados, pois alguma proteção já teria atuado mudando o perfil desta curva. Um valor de tensão que permite a leitura qualitativa seria de aproximadamente 1,4 pu e respectivos tempos para as outras grandezas plotadas;

4.13- Influência do nível de compensação série das linhas

A medida que o nível de compensação série de um tronco de transmissão é aumentado, a reatância capacitiva vista pelo sistema tende a aumentar, logo a potência reativa gerada pela linha tende a diminuir. Assim, teoricamente, a compensação série atuaria no sentido de retardar a auto-excitação dos geradores síncronos do sistema. A análise prática da auto-excitação, considerando a variação do nível de compensação

série da linha de 60 a 100 % da reatância indutiva total da linha, será desenvolvida nos itens abaixo.

Foram usados os montantes de 60 a 100 % de compensação série em relação à reatância indutiva da linha e mantida a compensação shunt nos mesmos valores em todos os casos, conforme apresentado na Tabela 17 do apêndice b, para visualizar somente o efeito da variação desta compensação nas sobretensões originadas no sistema.

4.13.1- Montante de 60% de compensação série nas linhas

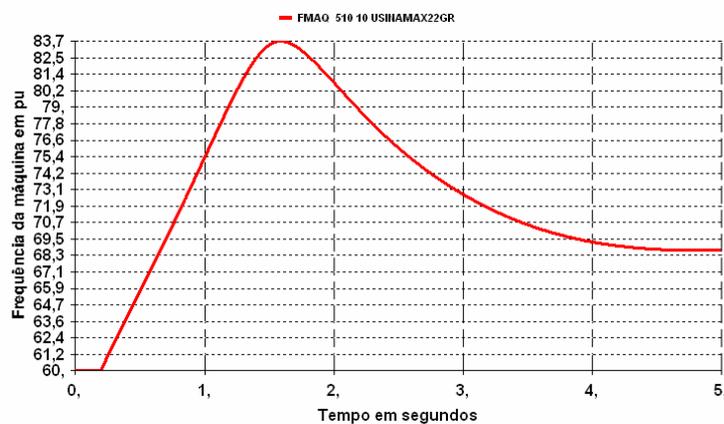


Figura 166- Frequência da máquina para um nível de 60% de compensação série

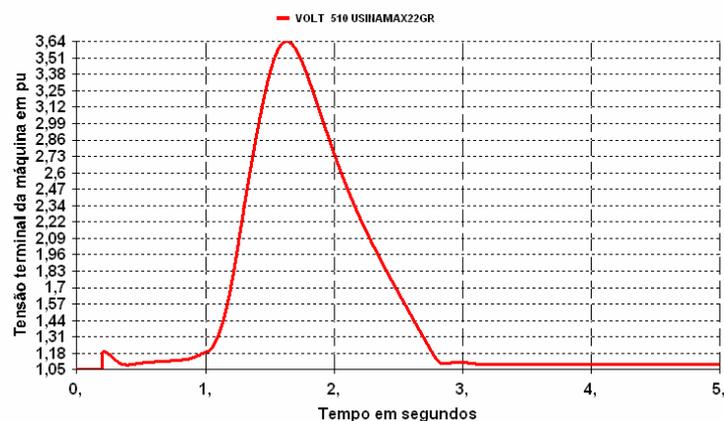


Figura 167- Tensão terminal da máquina para um nível de 60% de compensação série

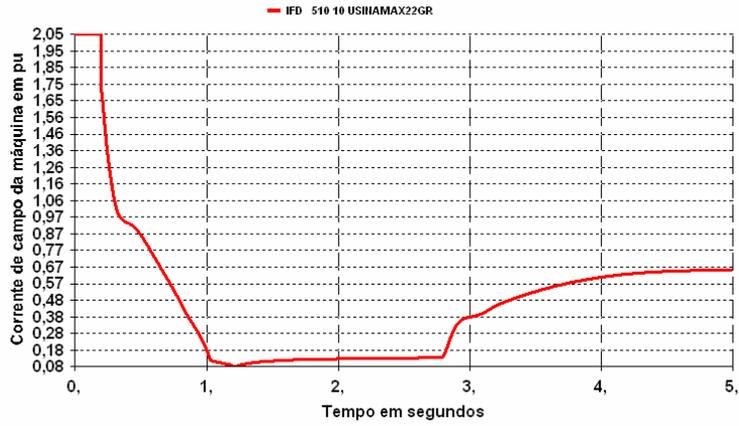


Figura 168- Corrente de campo da máquina para um nível de 60% de compensação série

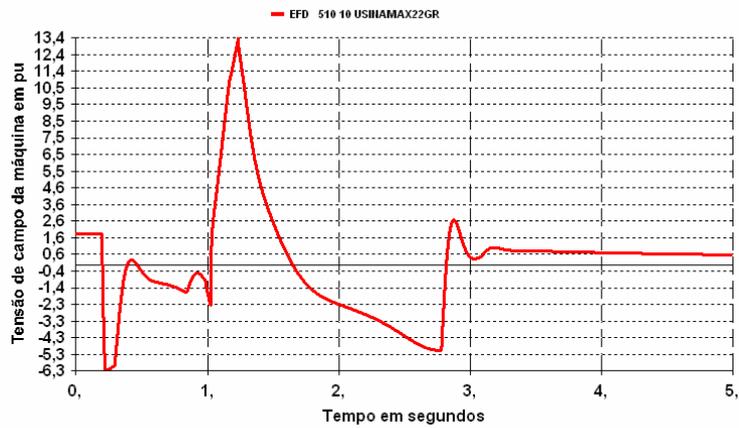


Figura 169- Tensão de campo da máquina para um nível de 60% de compensação série

4.13.2- Montante de 70% de compensação série nas linhas

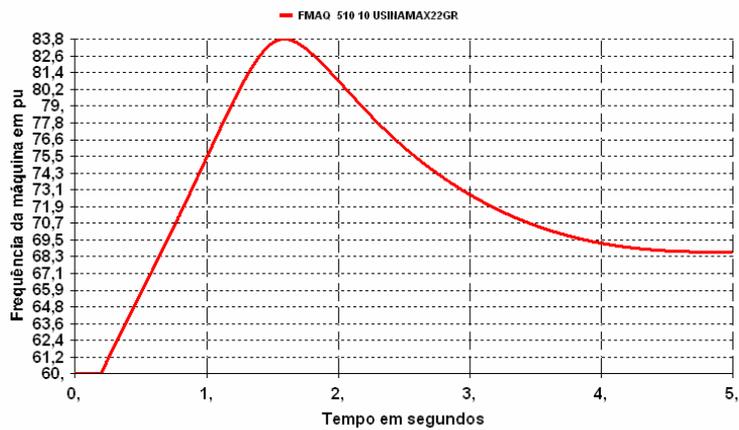


Figura 170- Frequência da máquina para um nível de 70% de compensação série

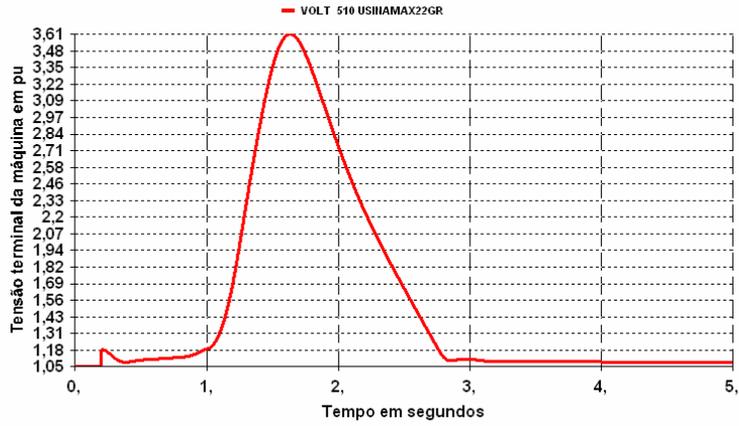


Figura 171- Tensão terminal da máquina para um nível de 70% de compensação série

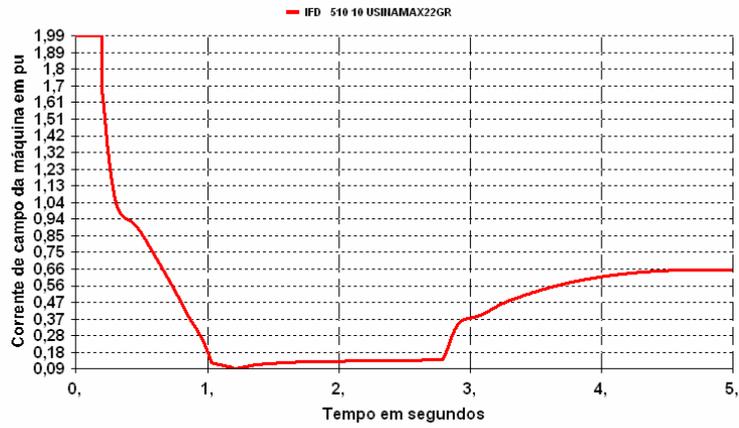


Figura 172- Corrente de campo da máquina para um nível de 70% de compensação série

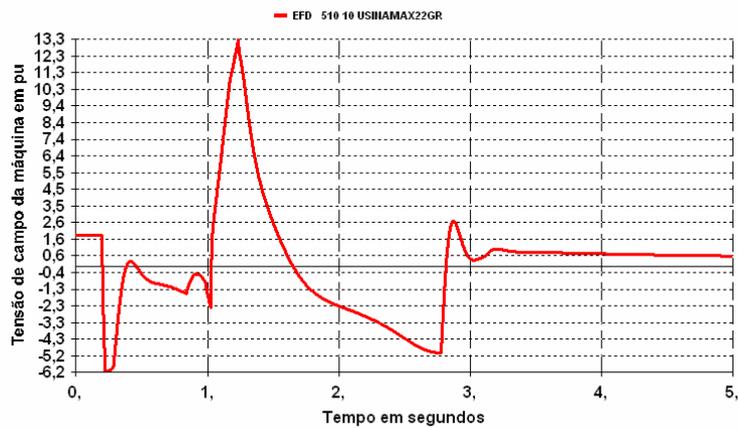


Figura 173- Tensão de campo da máquina para um nível de 70% de compensação série

4.13.3- Montante de 80% de compensação série nas linhas

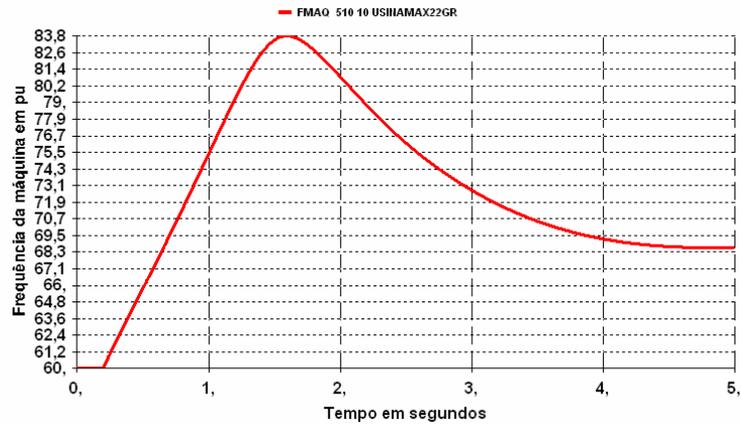


Figura 174- Frequência da máquina para um nível de 80% de compensação série

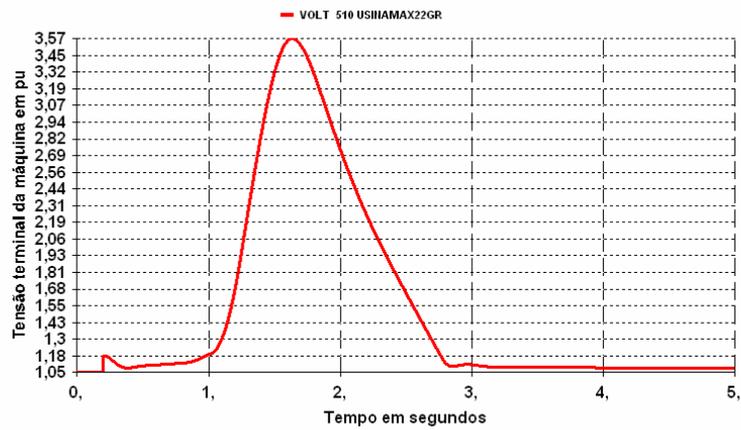


Figura 175- Tensão terminal da máquina para um nível de 80% de compensação série

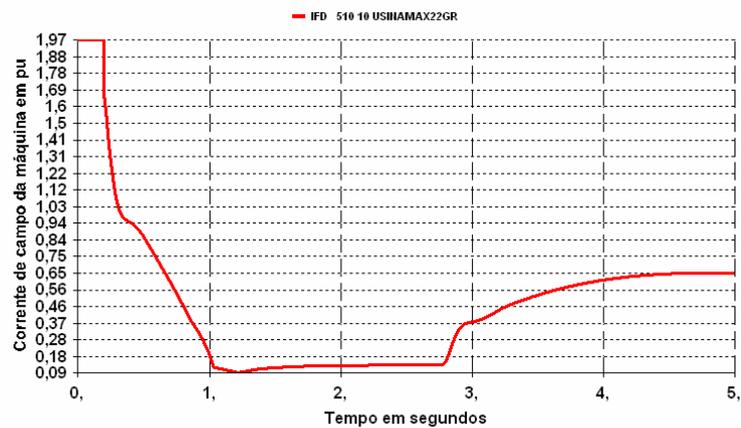


Figura 176- Corrente de campo da máquina para um nível de 80% de compensação série

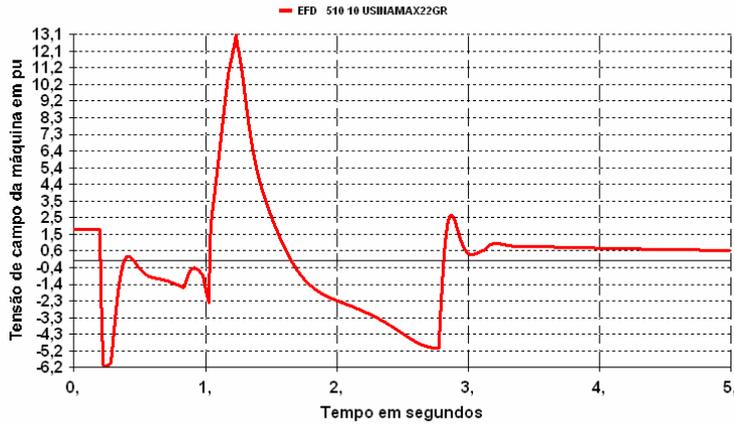


Figura 177- Tensão de campo da máquina para um nível de 80% de compensação série

4.13.4- Montante de 90% de compensação série nas linhas

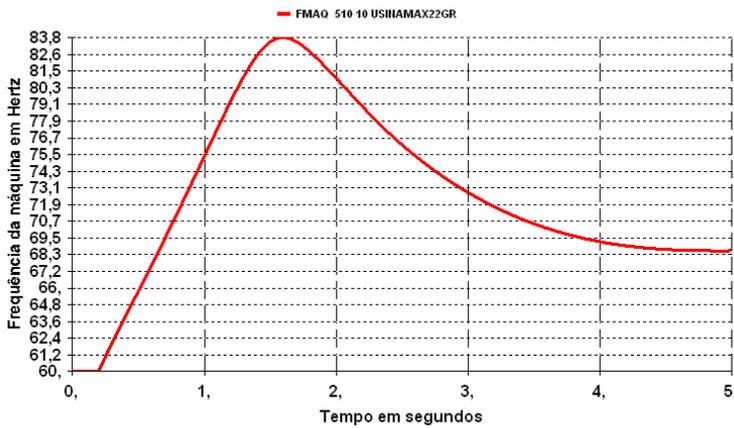


Figura 178- Frequência da máquina para um nível de 90% de compensação série

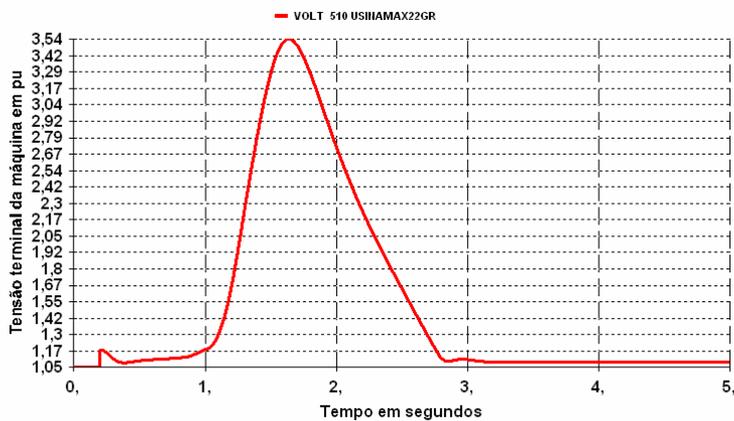


Figura 179- Tensão terminal da máquina para um nível de 90% de compensação série

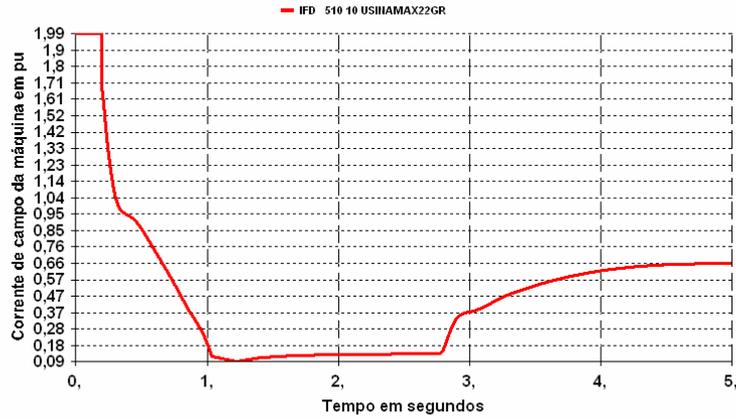


Figura 180- Corrente de campo da máquina para um nível de 90% de compensação série

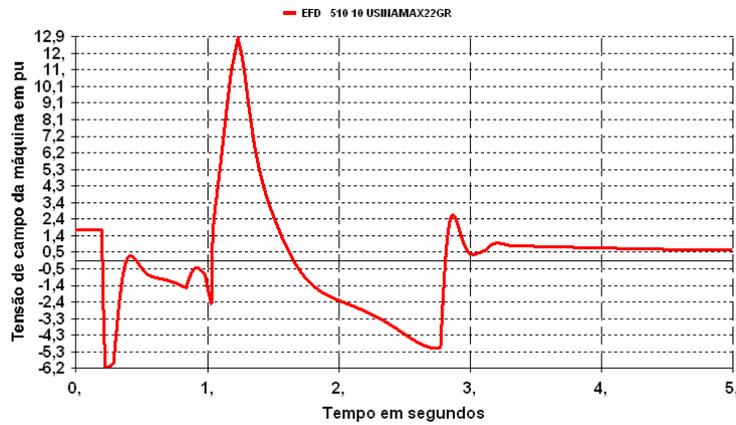


Figura 181- Tensão de campo da máquina para um nível de 90% de compensação série

4.13.5- Montante de 100% de compensação série nas linhas

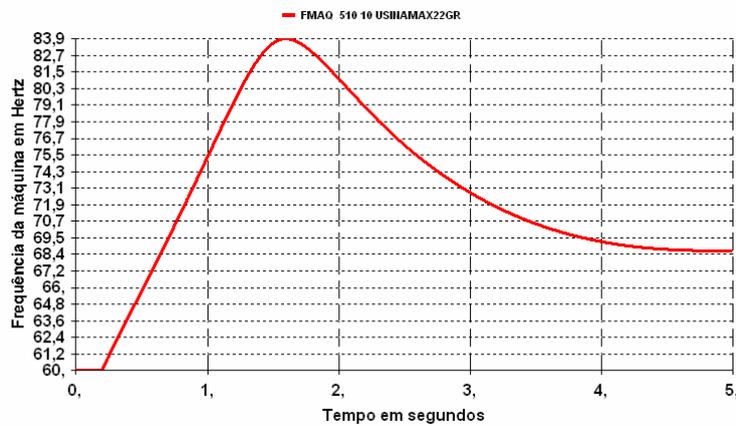


Figura 182- Frequência da máquina para um nível de 100% de compensação série

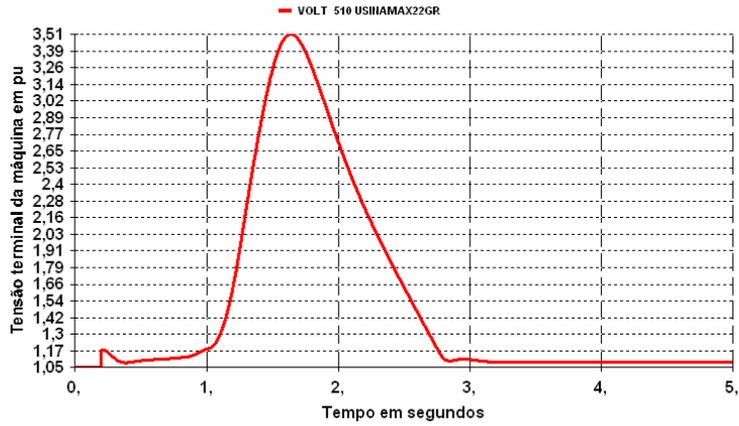


Figura 183- Tensão terminal da máquina para um nível de 100% de compensação série

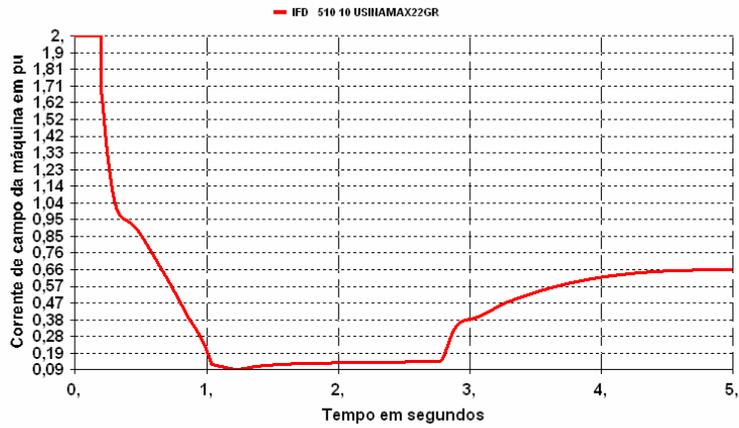


Figura 184- Corrente de campo da máquina para um nível de 100% de compensação série

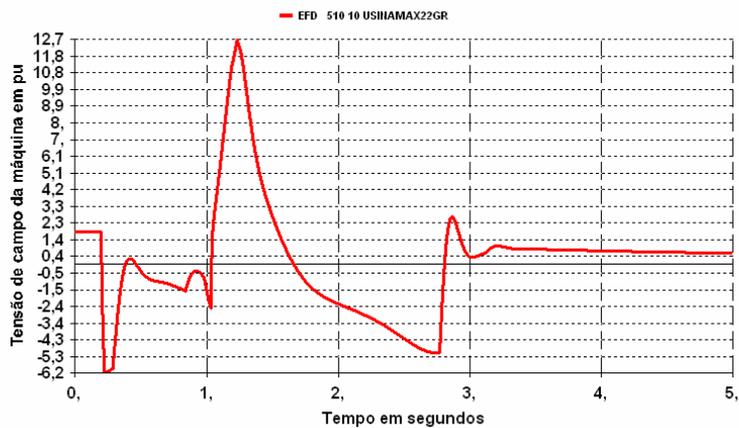


Figura 185- Tensão de campo da máquina para um nível de 100% de compensação série

➤ **Comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.13.1, 4.13.2, 4.13.3, 4.13.4 e 4.13.5 referentes aos níveis de compensação série das linhas.**

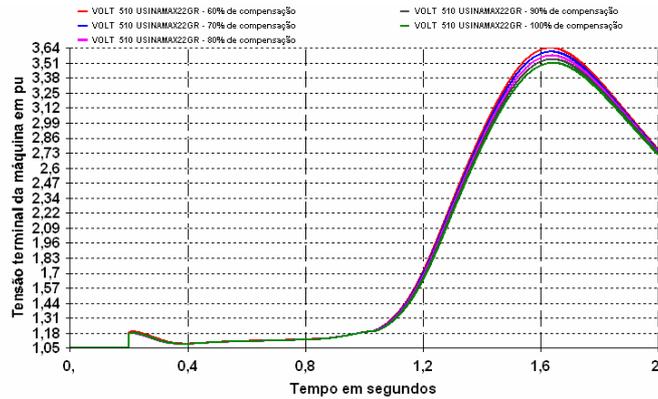


Figura 186- Tensão terminal da máquina para todos os níveis de compensação série

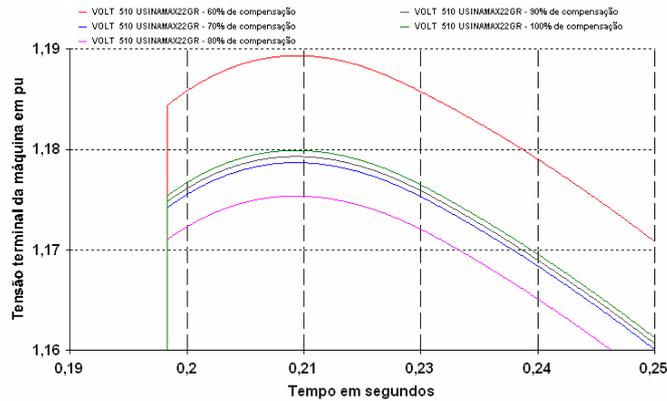


Figura 187- Detalhamento da subida da tensão terminal da máquina no momento da rejeição para todos os níveis de compensação série

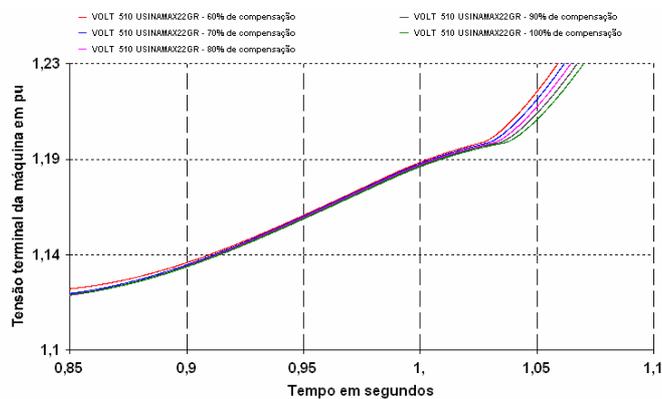


Figura 188- Detalhamento da subida da tensão terminal da máquina, após o surgimento da AEX, para todos os níveis de compensação série

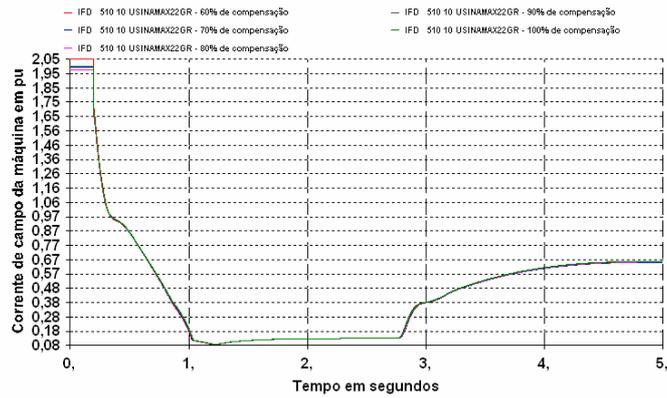


Figura 189- Corrente de campo da máquina para todos os níveis de compensação série

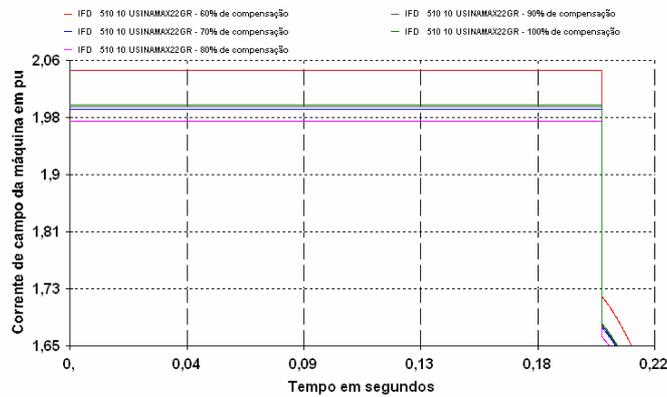


Figura 190- Detalhamento inicial da corrente de campo da máquina para todos os níveis de compensação série

➤ **Conclusões sobre os resultados da comparação entre as respostas obtidas nos itens 4.13.1, 4.13.2, 4.13.3, 4.13.4 e 4.13.5.**

- Analisando as curvas da Figura 188, pode-se dizer que, apesar de teoricamente a compensação série exercer alguma influência na resposta da auto-excitação, praticamente o seu efeito no sistema é muito pequeno. Por este motivo, o artifício de usar um montante de compensação série para estabilizar ou retardar o crescimento da tensão não deve ser usado, pois outros problemas devem aparecer antes, além deste elemento não ser projetado com esta finalidade específica;

4.14- Influência do montante de filtros capacitivos na perda de um elo CC

Num sistema de transmissão CC, ou num Back-to-Back, é necessária a inserção de filtros capacitivos nos terminais para a eliminação ou redução dos harmônicos gerados pelo chaveamento dos tiristores. Assim, quando há perda deste sistema de transmissão, os filtros ainda podem ficar conectados ao barramento após esta rejeição. Neste caso, quando há máquinas neste terminal, poderá ocorrer auto-excitação ou até mesmo o curto-circuito capacitivo dependendo do montante ligado, assim como o número de máquinas despachadas nas usinas. Por este motivo, as análises abaixo têm o objetivo de mostrar a relação entre o montante de filtros capacitivos usado para uma transmissão CC e o número de máquinas despachadas numa usina para que os fenômenos citados possam ser visualizados.

4.14.1- Rejeição de carga no sistema equivalente CC, conforme Figura 51, com 3200 Mvar totais de filtros a 1 pu de tensão e fp de 0,998. O montante de carga está sendo considerado como $P = 6450$ MW e $Q = 3160$ Mvar

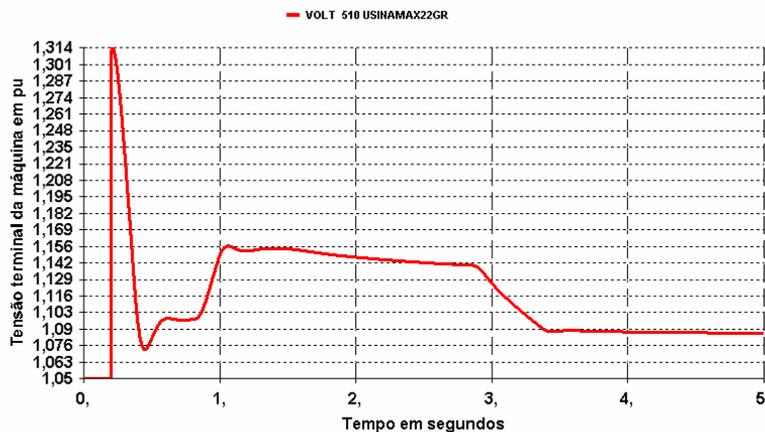


Figura 191- Tensão terminal da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC

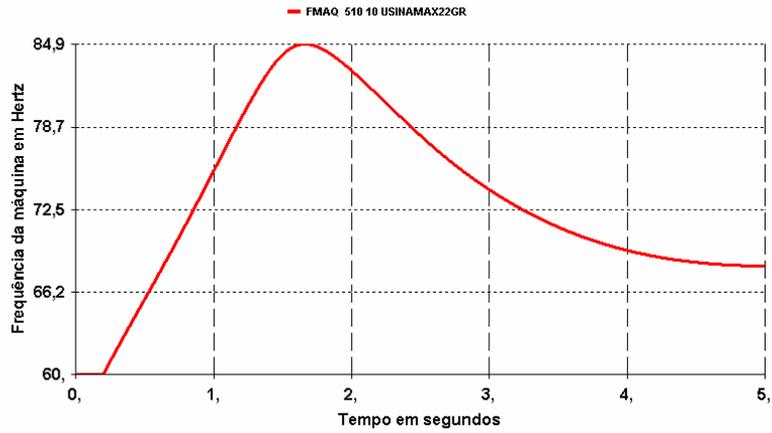


Figura 192- Frequência da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC

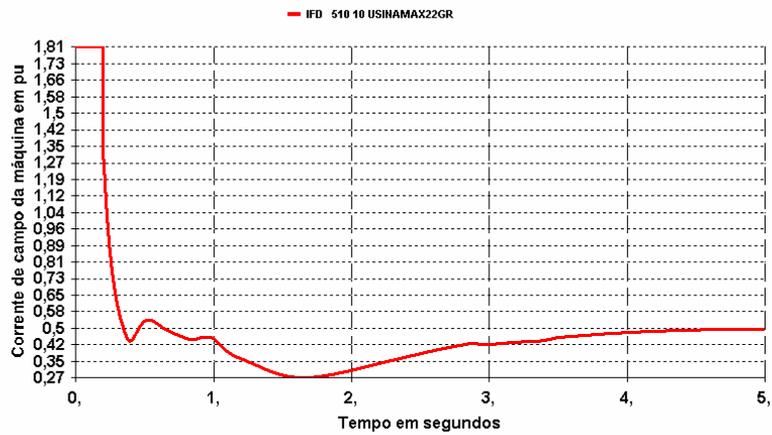


Figura 193- Corrente de campo da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC

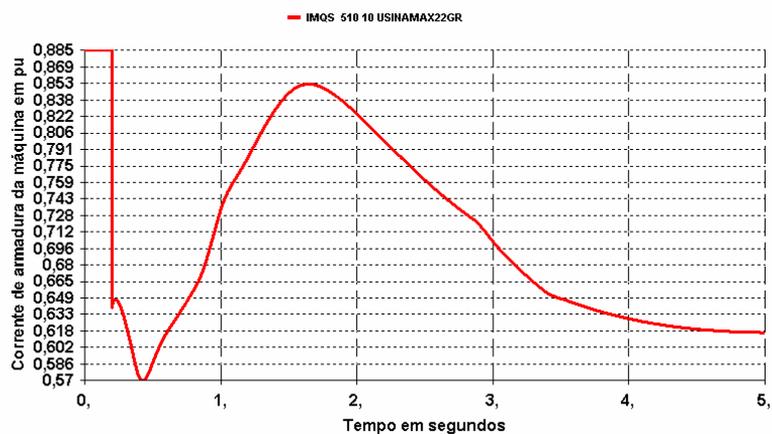


Figura 194- Corrente de armadura da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC

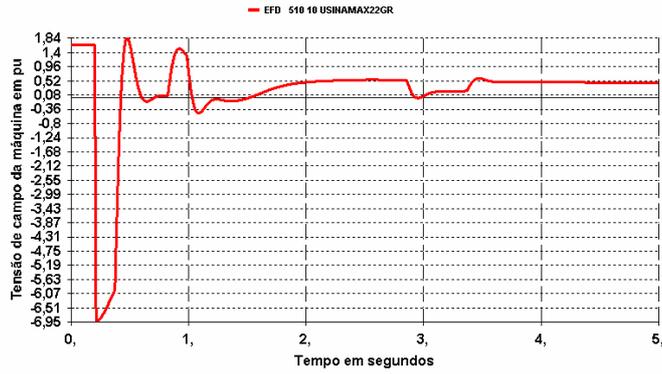


Figura 195- Tensão de campo da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC

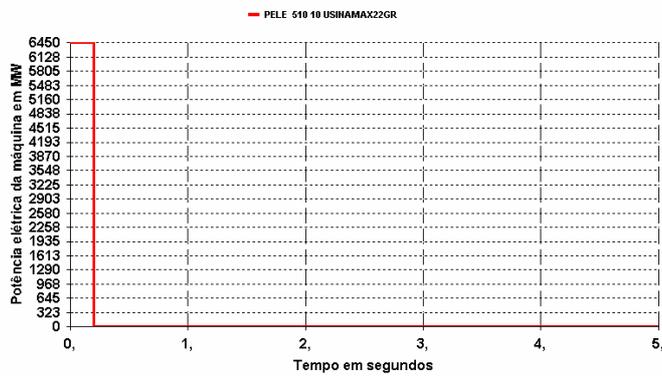


Figura 196- Potência elétrica da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC

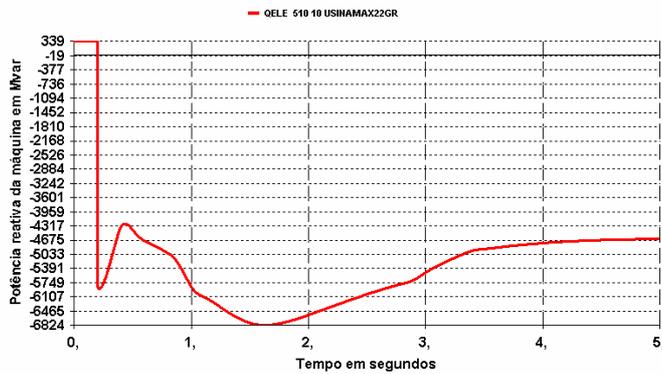


Figura 197- Potência reativa da máquina numa rejeição de carga considerando transmissão CC

➤ **Comentários sobre os resultados obtidos no item 4.14.1.**

- Analisando as curvas acima, principalmente a resposta da Figura 191, percebe-se que o sistema de excitação conseguiu trazer a máquina de volta às condições normais de funcionamento, após a rejeição de carga;

- As respostas de I_{fd} , E_{fd} , $IMQS$ e $QELE$ estão coerentes com as respostas esperadas para uma máquina em condições normais;
- A resposta da corrente de armadura, conforme Figura 194, no momento da rejeição, se deve ao fato de que, como a potência elétrica vai ser próxima de zero e a tensão sobe neste mesmo instante, a corrente de armadura deve ser reduzida para o fechamento do balanço de Pele. Seguido este momento, a corrente de armadura irá seguir a curva da potência reativa absorvida ou gerada pela máquina. Como a resposta da corrente de armadura está sendo dada em módulo, ela somente pode aumentar ou diminuir positivamente. Por este motivo, na Figura 198, a corrente de armadura apresenta este comportamento.

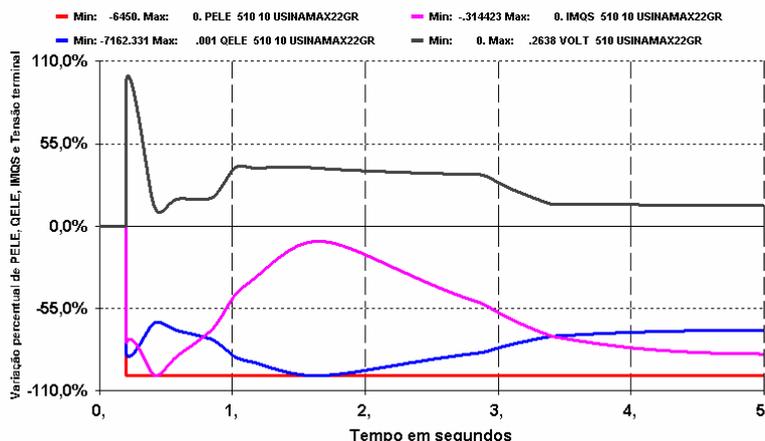


Figura 198- Comparação entre PELE, QELE, IMQS e VOLT

4.14.2- Rejeição de carga no mesmo sistema equivalente CC, conforme Figura 51, com os mesmos montantes de filtros e carga, agora considerando corte de geração;

4.14.2.1- Considerando o corte de 32 máquinas no momento da rejeição e permanecendo um total de 56 máquinas conectadas ao sistema

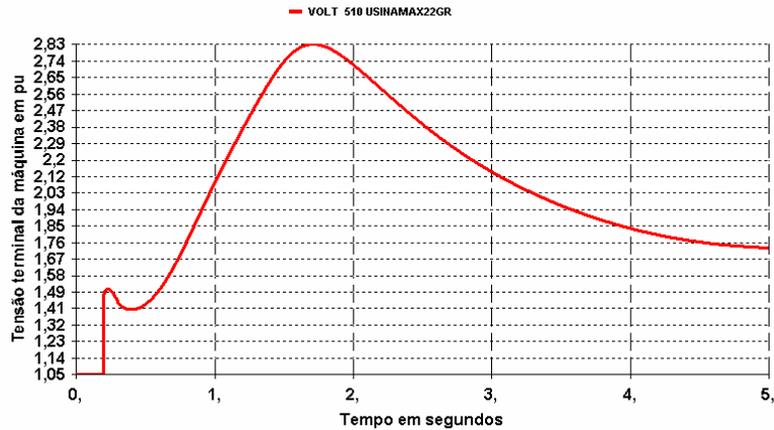


Figura 199- Tensão terminal da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas

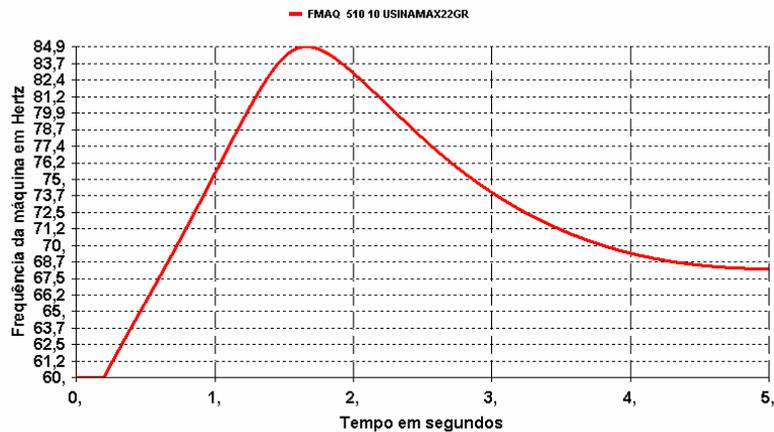


Figura 200- Frequência da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas

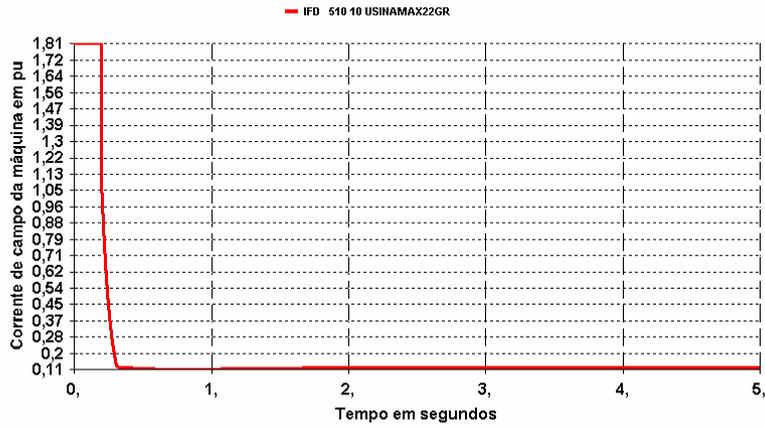


Figura 201- Corrente de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas

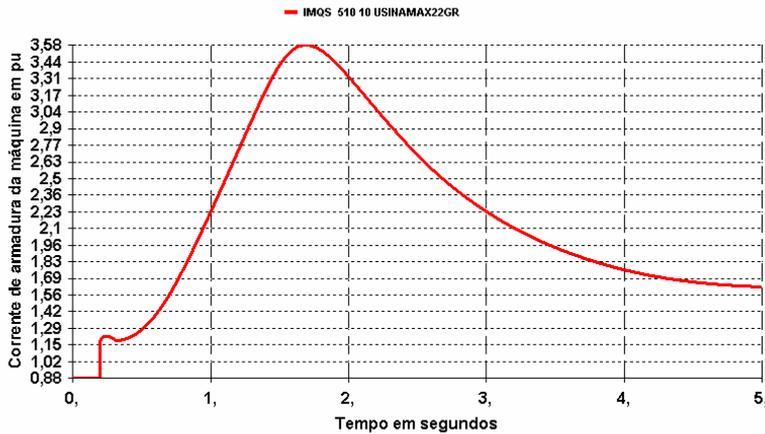


Figura 202- Corrente de armadura da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas

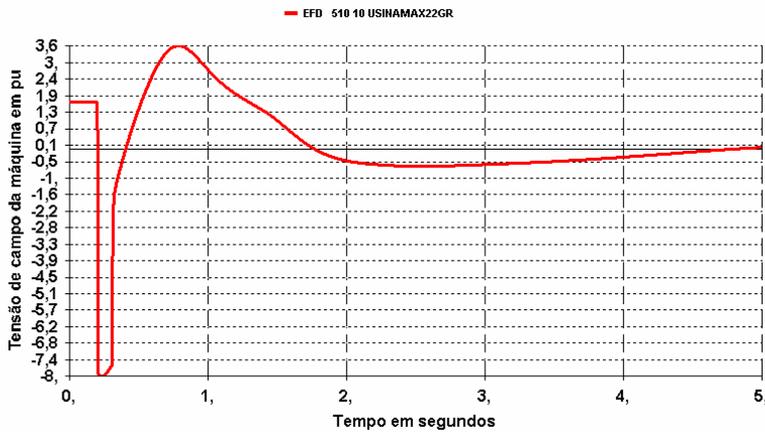


Figura 203- Tensão de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas

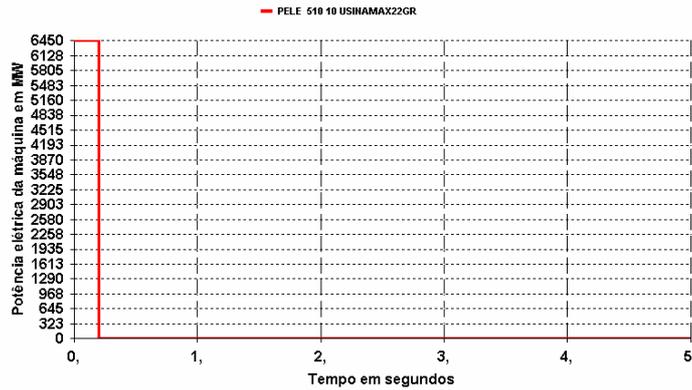


Figura 204- Potência elétrica da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas

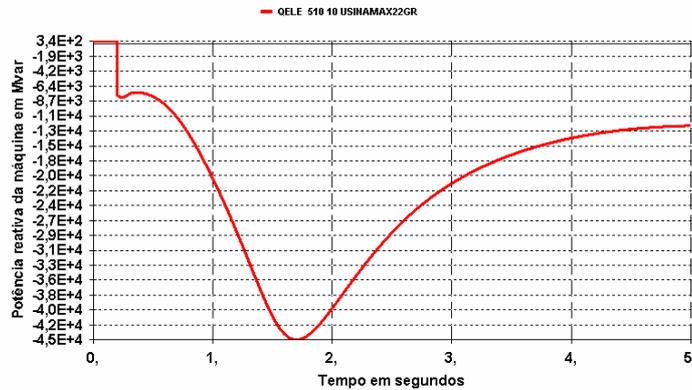


Figura 205- Potência reativa da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 32 máquinas

➤ **Comentários sobre os resultados obtidos no item 4.14.2.1.**

- Analisando as curvas acima, principalmente a resposta da Figura 199, percebe-se que o sistema de excitação, considerando este montante de corte de geração, não conseguiu evitar a auto-excitação após a rejeição de carga no sistema CC.
- As repostas de I_{fd} , E_{fd} , $IMQS$ e $QELE$ estão coerentes com as respostas esperadas para uma máquina em tais condições de auto-excitação;
- A resposta da corrente de armadura, conforme Figura 202, segue a curva da potência reativa absorvida ou gerada pela máquina.

Como a resposta da corrente está sendo dada em módulo, ela somente pode aumentar ou diminuir positivamente. Por este motivo, ela apresenta este comportamento. Esta análise pode ser vista através da Figura 206.

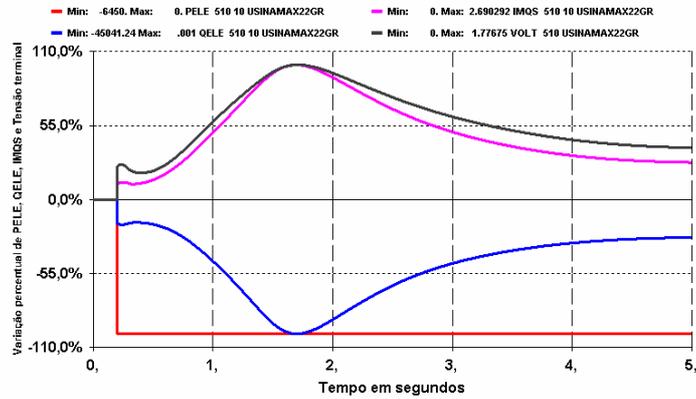


Figura 206- Comparação entre PELE, QELE, IMQS e VOLT

- A curva de tensão não atinge os valores de pico apresentados, pois alguma proteção já teria atuado mudando o perfil desta curva. Um valor de tensão que permite a leitura qualitativa seria de aproximadamente 1,4 pu e respectivos tempos para as outras grandezas plotadas;

4.14.2.2- Considerando o corte de 44 máquinas no momento da rejeição e permanecendo um total de 44 máquinas conectadas ao sistema

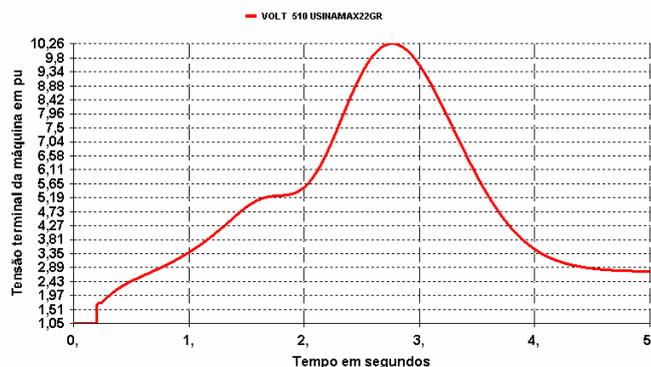


Figura 207- Tensão terminal da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas

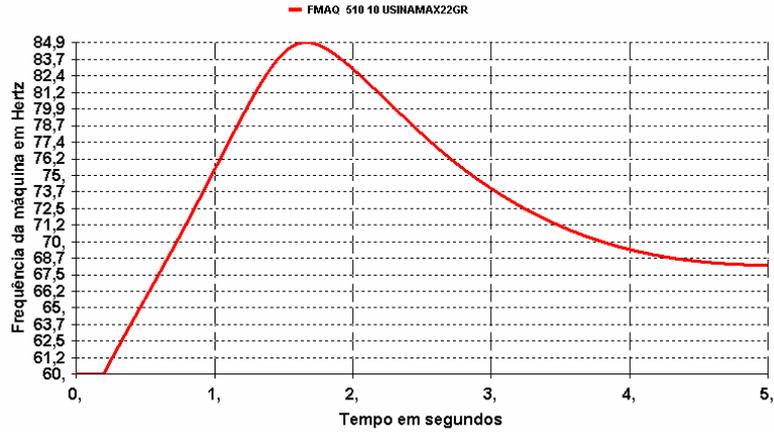


Figura 208- Frequência da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas

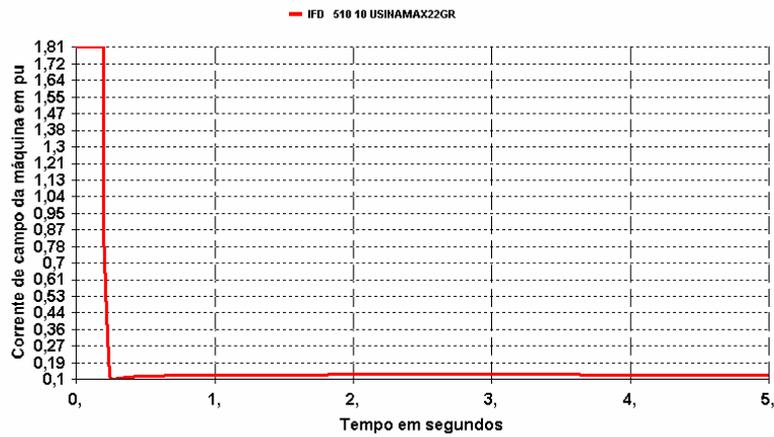


Figura 209- Corrente de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas

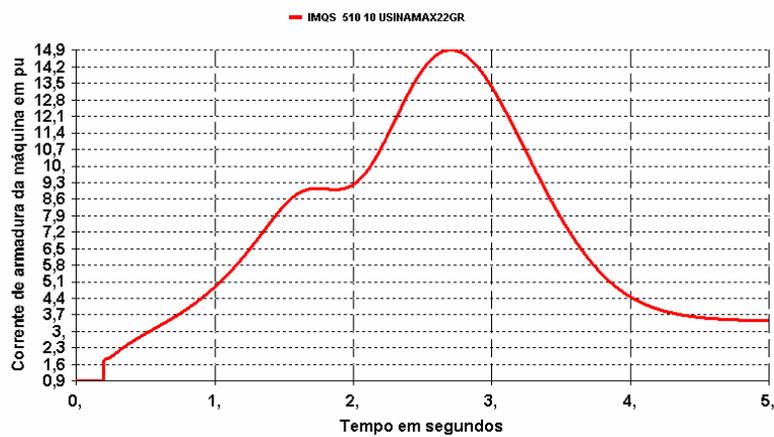


Figura 210- Corrente de armadura da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas

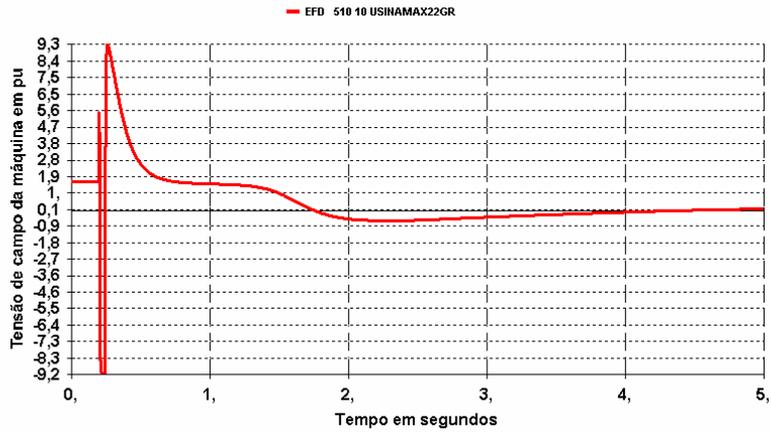


Figura 211- Tensão de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas

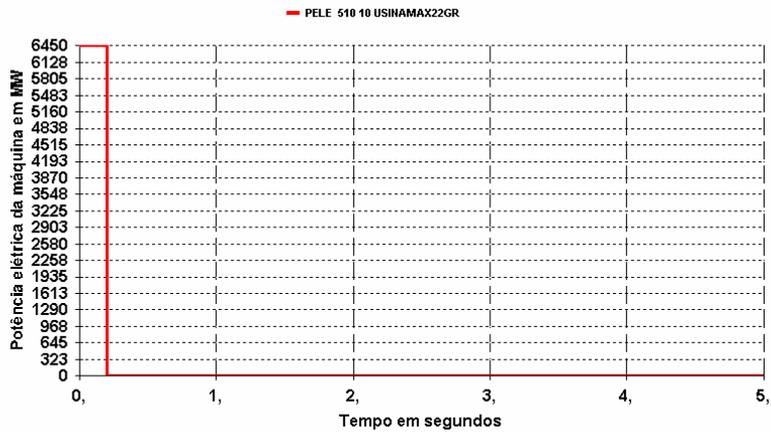


Figura 212- Potência elétrica da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas

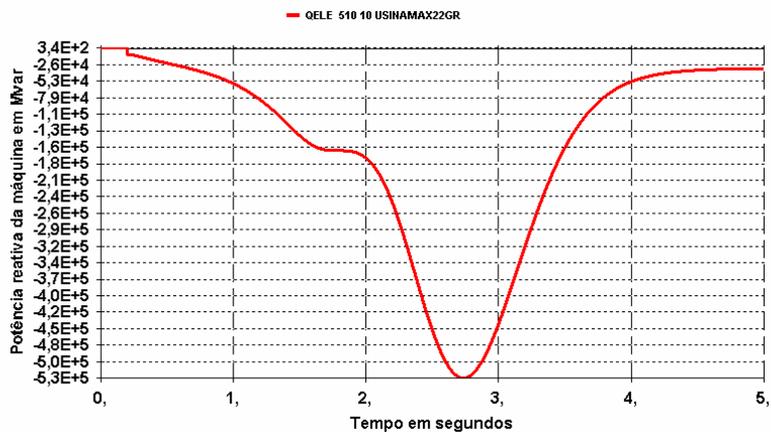


Figura 213- Potência reativa da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 44 máquinas

➤ **Comentários sobre os resultados obtidos no item 4.14.2.2.**

- Analisando as curvas acima, principalmente a resposta da Figura 207, percebe-se que o sistema de excitação, considerando este montante de corte de geração, não conseguiu evitar a auto-excitação após a rejeição de carga no sistema CC.
- As respostas de I_{fd} , E_{fd} , $IMQS$ e $QELE$ estão coerentes com as respostas esperadas para uma máquina em tais condições de auto-excitação;
- O pico positivo inicial da tensão de campo pode ser explicado pela atuação do limitador de subexcitação (1) que participa do processo de cálculo da referência que entra no somador na parte em vermelho da Figura 54;
- A resposta da corrente de armadura, conforme Figura 210, segue a curva da potência reativa absorvida ou gerada pela máquina. Como a resposta da corrente está sendo dada em módulo, ela somente pode aumentar ou diminuir positivamente. Por este motivo, ela apresenta este comportamento. Esta análise pode ser analisada na Figura 214;
- A curva de tensão não atinge os valores de pico apresentados, pois alguma proteção já teria atuado mudando o perfil desta curva. Um valor de tensão que permite a leitura qualitativa seria de aproximadamente 1,4 pu e respectivos tempos para as outras grandezas plotadas.

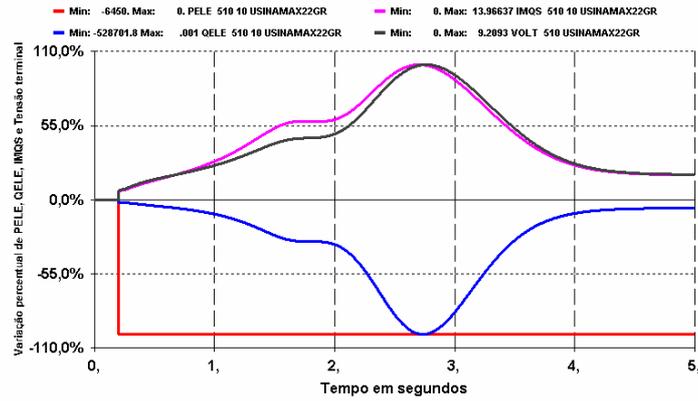


Figura 214- Comparação entre PELE, QELE, IMQS e VOLT

4.14.2.3- Considerando o corte de 72 máquinas no momento da rejeição e permanecendo um total de 16 máquinas conectadas ao sistema

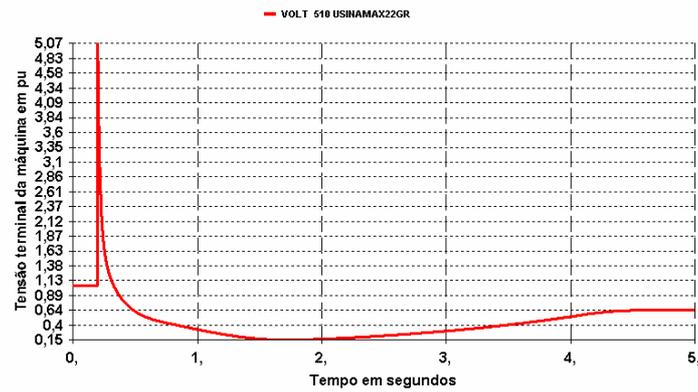


Figura 215- Tensão terminal da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas

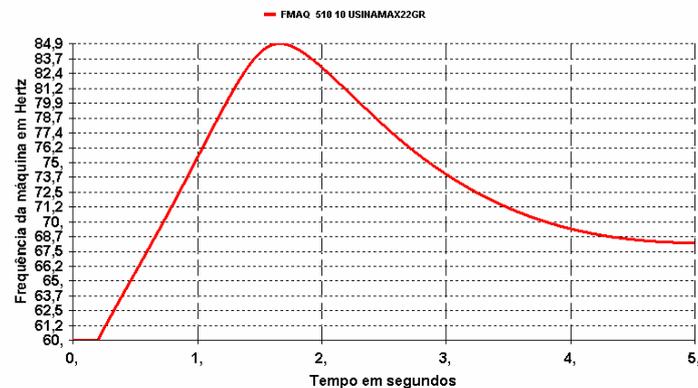


Figura 216- Frequência da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas

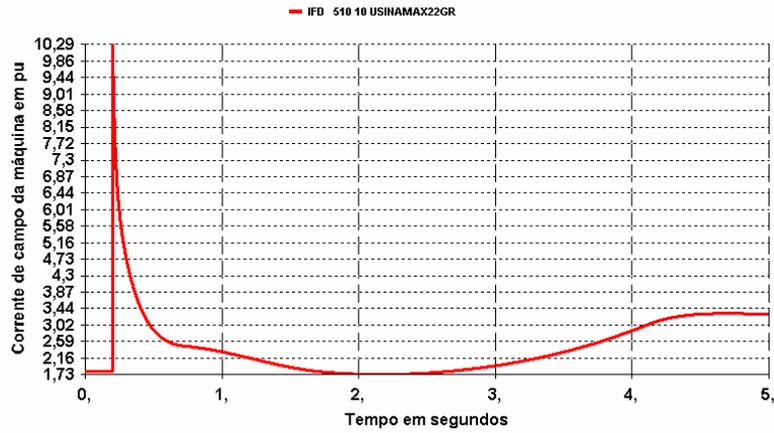


Figura 217- Corrente de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas

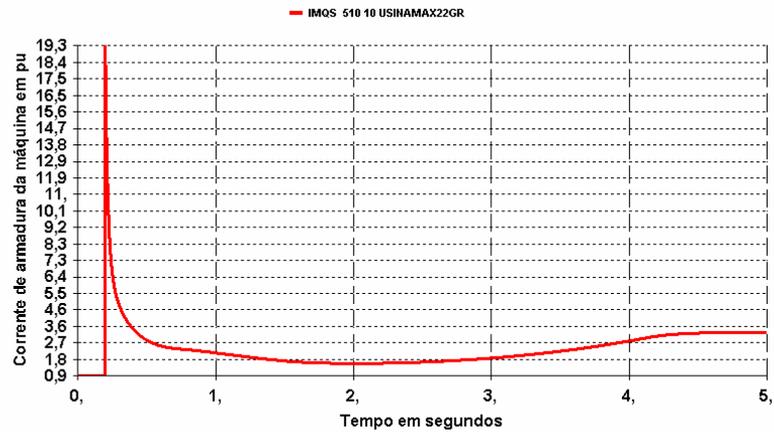


Figura 218- Corrente de armadura da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas

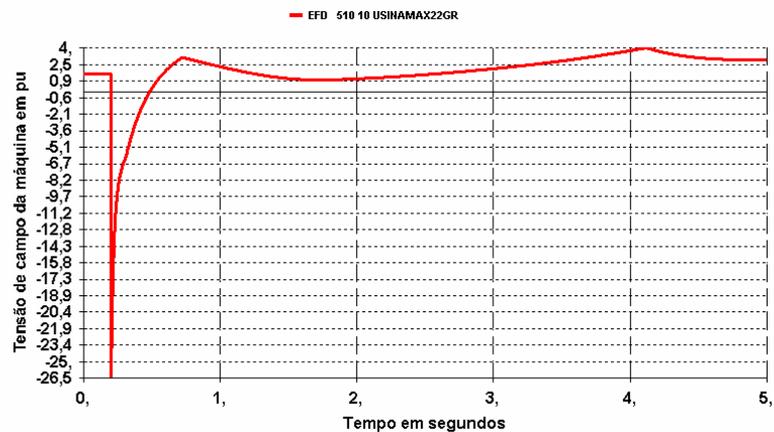


Figura 219- Tensão de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas

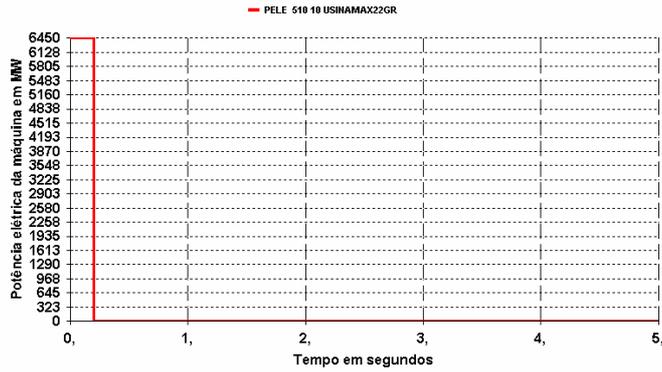


Figura 220- Potência elétrica da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas

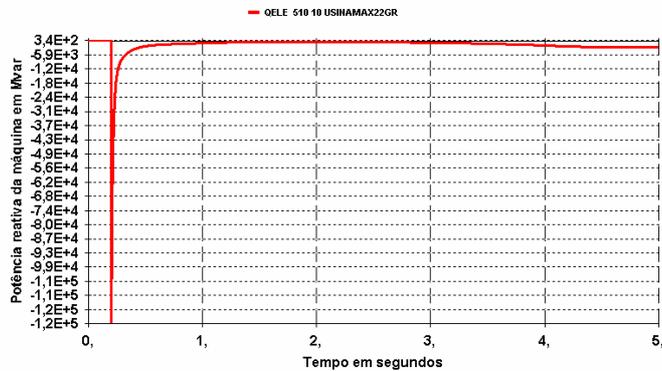


Figura 221- Potência reativa da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 72 máquinas

➤ **Comentários sobre os resultados obtidos no item 4.14.2.3.**

- Analisando as curvas acima, principalmente a Figura 215, percebe-se que a máquina está numa situação limite entre os fenômenos de auto-excitação e curto-circuito capacitivo, que está sendo gerada pelo número de máquinas despachadas que influencia nos valores de X_d , X''_d , X_q e X''_q ;
- Neste caso, segundo as características das respostas, o valor de X_c deve estar bem próximo de X''_d , que teoricamente limita a auto-excitação do CCC. Vale ressaltar que o valor de X''_d , neste caso, está aumentando pelo fato de se ter menos máquinas em paralelo. Assim, com a correção temporal da reatância da rede com a

freqüência, o sistema passa apresentar características de auto-excitação e curto-circuito capacitivo;

- O comportamento de E_{fd} pode ser explicado pela atuação, inicialmente, do limitador de sobre-excitação da máquina, que tenta reduzir o valor da corrente de campo, visto que no momento da rejeição o seu valor chega a 10,29 pu. Após o momento inicial da rejeição, o controle de E_{fd} é feito entre a malha principal do sistema de excitação e o limitador de sobre-excitação;
- O comportamento da corrente de armadura, no caso IMQS, juntamente com as potências ativa e reativa, pode ser visualizada na Figura 222;
- A curva de tensão não atinge os valores de pico apresentados, pois alguma proteção já teria atuado mudando o perfil desta curva. Um valor de tensão que permite a leitura qualitativa seria de aproximadamente 1,4 pu e respectivos tempos para as outras grandezas plotadas.

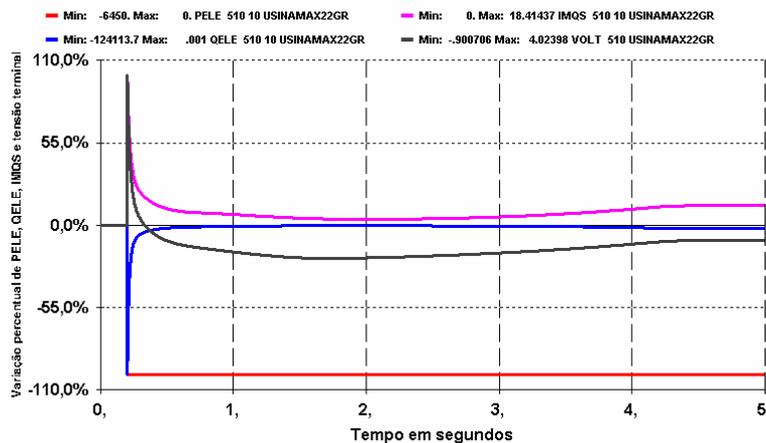


Figura 222- Comparação entre QELE, PELE, IMQS e VOLT

4.14.2.4- Considerando o corte de 80 máquinas no momento da rejeição e permanecendo um total de 8 máquinas conectadas ao sistema

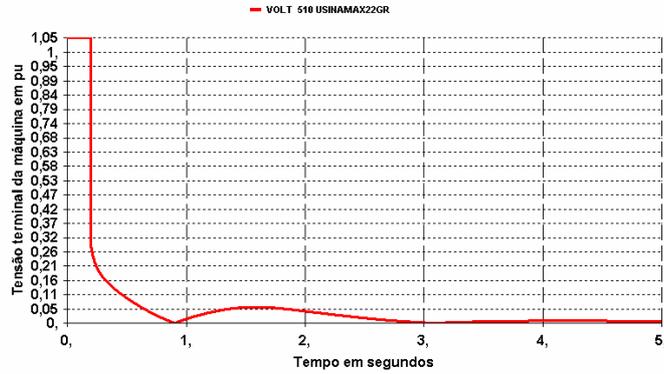


Figura 223- Tensão terminal da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas

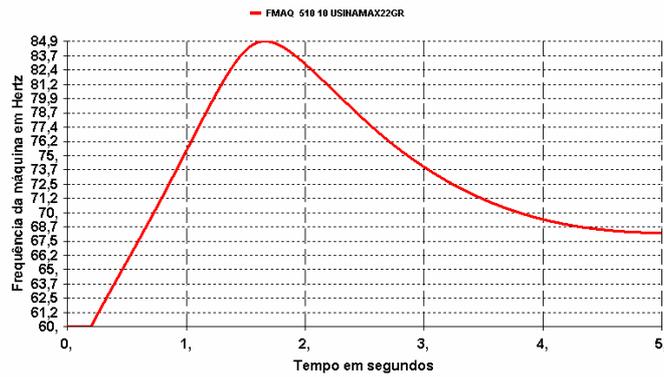


Figura 224- Frequência da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas

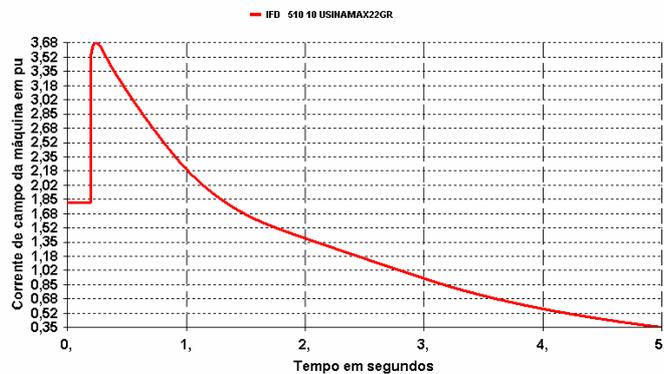


Figura 225- Corrente de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas

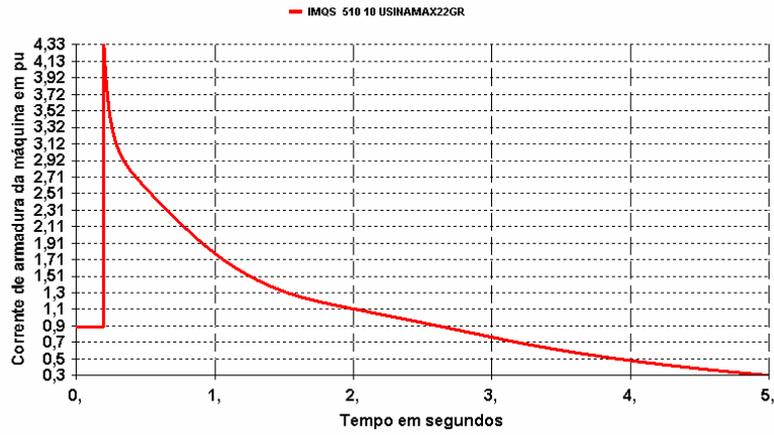


Figura 226- Corrente de armadura da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas

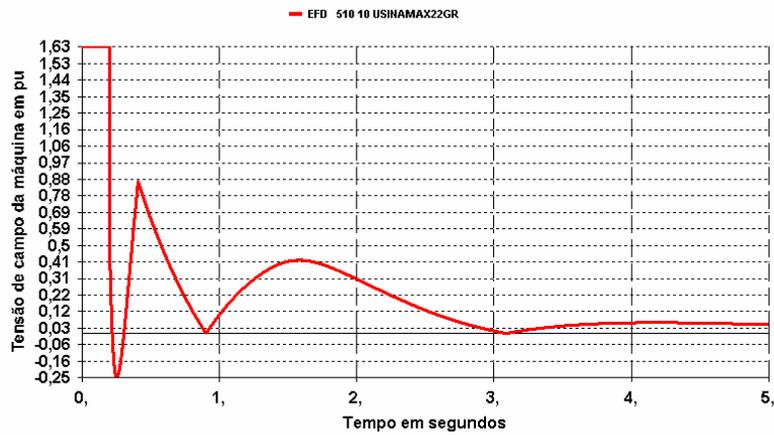


Figura 227- Tensão de campo da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas

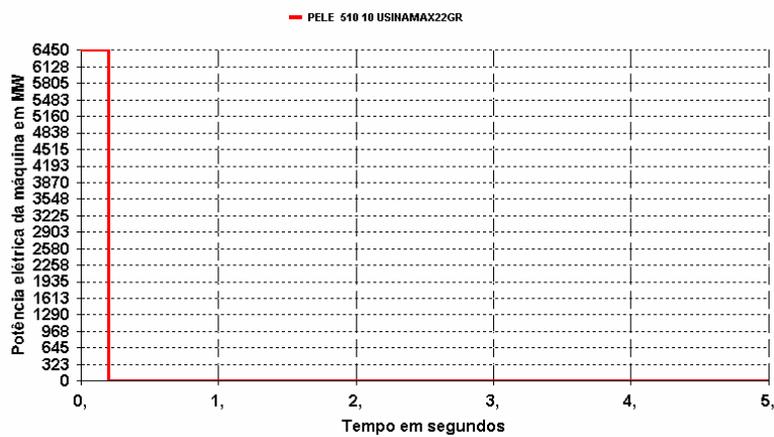


Figura 228- Potência elétrica da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas

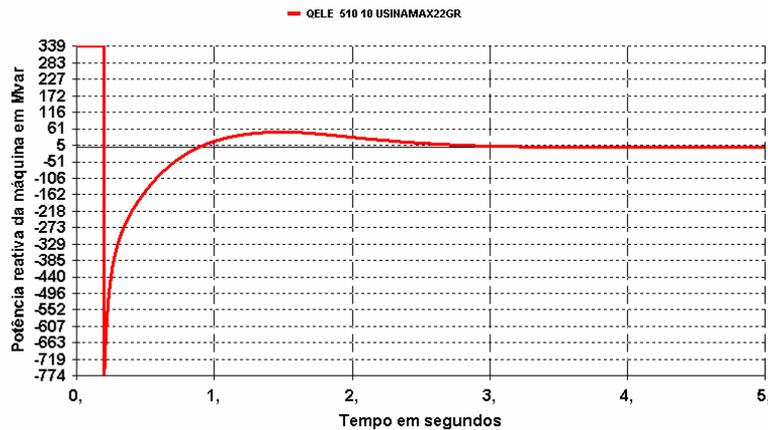


Figura 229- Potência reativa da máquina equivalente, numa rejeição de carga considerando transmissão CC e corte de 80 máquinas

➤ **Comentários sobre os resultados obtidos no item 4.14.2.4.**

- Analisando as curvas da tensão terminal e do módulo da corrente de armadura percebe-se claramente, conforme a teoria apresentada, a ocorrência do fenômeno do curto-circuito capacitivo no gerador síncrono. As características intrínsecas a este fenômeno são queda de tensão e aumento da corrente de armadura da máquina;
- A corrente de campo I_{fd} subiu instantaneamente à rejeição de carga seguindo o aumento do módulo da corrente de armadura. Nos períodos após a rejeição, ela começa a sofrer ação do controle do limitador de sobre-excitação que faz com que a tensão de campo reduza esta corrente e assim, conseqüentemente, reduzindo-a;
- O comportamento de E_{fd} pode ser explicado pela atuação do limitador de sobre-excitação da máquina, que tenta reduzir o valor da corrente de campo, visto que no momento da rejeição o seu valor chega a 3,68 pu;
- O curto-circuito capacitivo, por natureza, é bem mais drástico ao sistema em relação à auto-excitação e é analisado em termos de

corrente. Este fenômeno é visualizado quando a reatância capacitiva vista durante a rejeição é muito pequena e menor que o X''_d da máquina.

5-CONCLUSÕES

5.1- Conclusões gerais

Nesta parte da dissertação serão mostradas as conclusões gerais sobre todas as simulações desenvolvidas.

De um modo geral, as ações operativas desenvolvidas aqui serviram como base para avaliar os respectivos impactos gerados nos estudos de auto-excitação ou curto-circuito capacitivo, após uma rejeição de carga, num sistema em corrente alternada ou contínua.

Para um estudo completo de auto-excitação, para uma determinada alternativa de transmissão, podem ser necessárias análises complementares em programas de transitórios eletromagnéticos que considerem representação de pára-raios e disjuntores, para visualizar os impactos nestes elementos.

Vale ressaltar que as ações consideradas nesta dissertação apenas atuam no sentido de retardar o crescimento da auto-excitação, para que seja dado mais tempo para atuação das devidas proteções de sobretensão que desligue automaticamente os elementos capacitivos da rede.

Através da análise dos resultados apresentados no item **4.14** é importante observar que a medida de corte de geração, em condições de risco de auto-excitação, deve ser evitada pelo fato de que o sistema pode caminhar para situações mais drásticas em termos de operação.

A implantação de capacidade de corrente negativa no sistema de excitação se mostrou bastante eficiente quanto ao retardo do crescimento da tensão da máquina. No caso particular apresentado nesta dissertação, itens **4.6.1** e **4.6.2**, o retardo do crescimento da tensão foi de aproximadamente 350ms quando comparado com um caso sem esta capacidade. Um fator muito importante, e que deve ser levado em conta na hora de especificar esta capacidade, é o modo como é feito o chaveamento da ponte da

parte positiva para a negativa. Este processo, quando feito muito rapidamente, pode ocasionar queima de equipamentos do sistema de excitação por causa da inversão da corrente. Assim, como característica de fabricante, pode ocorrer certo retardo entre a comutação desses dois modos para evitar queima da ponte.

Os reatores de inserção também se apresentam como uma forma bastante viável para o tratamento da auto-excitação. Neste caso, o montante a ser usado, assim como o canal de comunicação e o tempo para chaveamento dos reatores, deve ser bem especificado de modo a obter sucesso na sua atuação. Os canais de leitura para o comando de inserção dos reatores, na prática, podem ser especificados através da abertura de disjuntores ou até mesmo pela leitura da tensão terminal da barra na qual estão inseridos. A resposta do **RSC** se mostrou bastante eficaz no início da simulação, quando comparada com o mesmo montante de reatores chaveados da rejeição de carga. Por exemplo, segundo a curva apresentada na Figura 156, o sistema de excitação não necessitaria de um teto negativo de -5,29 pu para esta rejeição e sim menor. Outros fatores devem ser levados em consideração para determinação desta característica.

A saturação do transformador elevador é uma característica intrínseca a este equipamento. As simulações mostraram que a representação desta característica, nos estudos de rejeição de carga, apresenta influência na resposta da auto-excitação. As respostas apresentadas para a tensão terminal e corrente de campo foram consideradas coerentes com a curva de saturação apresentada, pois a sua característica só começa a ser vista a partir de 1,2 pu de tensão. Os valores para representação desta curva podem ser analisados na Tabela 12. Vale ressaltar que esta característica é intrínseca ao projeto do transformador elevador da usina. Geralmente, esta característica não é representada nos estudos de rejeição de carga à frequência fundamental, pelo fato de que o programa utilizado, a saber, ANATEM[®] é específico para estudos de estabilidade eletromecânica que não necessita desta representação. Ela somente é representada em programas que levam em conta um maior detalhamento das representações, como EMTDC, PSCAD ou ATP. A curva característica de saturação do transformador elevador não pode ser usada como meio de mitigação do processo de auto-excitação, pois é uma característica intrínseca de um equipamento.

A correção dos parâmetros da rede, com a frequência da ilha elétrica, é de vital

importância para as conclusões tomadas num estudo de rejeição de carga. Sem esta representação, os parâmetros indutivos e capacitivos da rede não serão corrigidos e os fenômenos associados à auto-excitação dificilmente serão visualizados, o que pode ocasionar interpretações incorretas quanto ao comportamento do sistema frente a rejeição de carga. As figuras mostradas no item 4.7 comparam as duas condições, que considera ou não a correção dos parâmetros indutivos e capacitivos do sistema com a frequência da ilha elétrica.

A transferência de disparo para abertura de circuitos a montante é uma medida muito eficaz para redução da auto-excitação e do curto-circuito capacitivo. Esta medida, basicamente, reduz o montante da capacitância gerada pela linha e que é responsável pelas sobretensões nas máquinas. A atuação efetiva desta alternativa depende basicamente do número de disjuntores afetados, do sucesso de abertura nestes disjuntores, como também do tempo de comunicação entre esses elementos. Devem ser feitos estudos elétricos que visam a coordenação desta ação de controle e suas conseqüências no sistema.

O uso de compensação série no sistema de transmissão, para controle dos fenômenos de auto-excitação, foi totalmente descartada, pois a sua influência no sentido de retardar o surgimento das sobretensões originadas foi considerada muito pequena. Elevados montantes de compensação série levariam a ocorrência de outros fenômenos, como a Ressonância Subsíncrona ou sobretensões em pontos de conexão do capacitor série ao longo da linha. Estes fatos anulam totalmente o uso de compensação série da linha como meio de mitigação da auto-excitação, pois este elemento não foi projetado para tal finalidade.

Num estudo de rejeição de carga, o sistema de excitação da máquina deve ter o máximo de componentes possível. Isso inclui seus limitadores de sobre e subexcitação, limitadores de corrente mínima de campo e outros tipos de controle que possam ser inseridos na lógica de atuação. Portanto, a modelagem dos sistemas de excitação não deve ser simplificada, nos estudos de rejeição de carga, pois alguns comportamentos podem não estar sendo considerados. Esta conclusão pode ser tirada analisando as repostas obtidas no item 4.8 que considera o modelo de sistema de excitação tipo SCRX intrínseco à base de dados do programa ANATEM[®]. Neste exemplo não são

considerados os limitadores de sobre e subexcitação e o limitador de corrente mínima de campo é feito através da inserção da razão r_c/r_f , que neste exemplo precisou ter um valor muito acima do geralmente praticado para que a corrente de campo fosse levada a zero. Assim, a principal conclusão sobre esta modelagem é que uma simplificação nos modelos não seria bem aceita para estudos de rejeição de carga. A modelagem completa usada para o sistema de excitação, nas análises efetuadas, foi fornecida por um fabricante e implementada a lógica de limitação da corrente de campo.

A atuação do regulador de tensão, no sentido de controlar a auto-excitação na máquina síncrona, pode ser comprovada analisando as figuras mostradas no item 4.5. Controlando o crescimento dos enlaces de fluxo do eixo d, o regulador de tensão acaba retardando o crescimento da tensão da máquina, visto que a tensão terminal é dada pelo somatório das tensões nos seus eixos magnéticos. Somente depois da condição $X_c < X_q$ que começa a ser percebido o fenômeno da auto-excitação no gerador síncrono. O tempo no qual o crescimento da tensão será retardado dependerá das características da ponte conversora e se a mesma vai ter capacidade ou não de corrente negativa. Se a ponte for projetada com esta capacidade, a auto-excitação ocorrerá posteriormente ou, em conjunto com outras medidas, pode até evitar o surgimento deste fenômeno.

A representação do regulador de velocidade também apresenta grande importância nos estudos de rejeição de carga. Basicamente, numa rejeição de carga, o regulador deve atuar controlando a rampa de subida e também limitando o valor máximo da frequência em valores aceitáveis. A rampa de frequência e o teto máximo desenvolvido nas análises foram considerados aceitáveis e comparados posteriormente com a modelagem completa fornecida pelo fabricante da máquina. Nenhuma diferença foi visualizada na comparação entre essas duas modelagens, tanto para a rampa quanto para o valor máximo da frequência. A influência de se representar um regulador de velocidade num estudo de rejeição de carga pode ser visto no item 4.6.1.1.

Após várias análises dos resultados obtidos nas simulações aqui desenvolvidas, podemos dizer que a resposta da corrente de armadura da máquina pode ser bastante representativa quanto ao comportamento da resposta da auto-excitação. Partindo do princípio que esta corrente é uma consequência das potências ativa e reativa da máquina após uma rejeição de carga, ela traduz qualitativamente o desempenho da máquina

nestas condições operativas.

As conclusões mais específicas, que englobam o comportamento para cada análise efetuada, podem ser encontradas no final de cada item desenvolvido ao longo desta dissertação.

Embora esta dissertação possa servir como uma referência básica para os futuros trabalhos de auto-excitação à frequência fundamental do sistema interligado brasileiro, cada estudo em particular deverá apresentar problemas intrínsecos ao tipo de sistema analisado que deverá ter uma solução específica para o caso descrito.

5.2- Trabalhos Futuros

Analisando todo conteúdo desta dissertação, vários novos trabalhos, a partir deste, podem ser desenvolvidos de modo a aprimorar a literatura técnica a respeito do assunto tratado aqui.

Outras análises, além das desenvolvidas aqui, podem ser estudadas de forma a retardar a AEX. Outro procedimento operativo seria a inserção de resistores de frenagem nos terminais das máquinas, para atenuação da aceleração após uma rejeição de carga. Podem ser propostos novos equipamentos que venham a atuar de forma positiva no controle das sobretensões originadas ou até mesmo a coordenação da atuação entre as diversas ações já debatidas aqui.

Um novo tema a ser abordado seria a análise das ações de controle desenvolvidas aqui em programas de transitórios eletromagnéticos que levam em consideração maiores detalhes para a representação do sistema, como os pára-raios e a saturação dos transformadores elevadores. Poderiam ser debatidos e comparados os resultados obtidos em cada análise efetuada.

A influência dos limites máximo e mínimo da tensão de campo do sistema de excitação de uma máquina síncrona pode ser amplamente analisada de forma a visualizar a conseqüência dos ajustes adotados numa auto-excitação ou curto-circuito

capacitivo.

O uso de reatores chaveados e as suas filosofias de controle para chaveamento, ou outros equipamentos de controle de tensão, podem ser mais debatidas de forma que a sua eficiência de atuação, após uma rejeição de carga, possa ser aumentada.

O modo de representação dos controles do chaveamento de uma ponte retificadora, que contenha capacidade de corrente negativa, pode ser melhor debatida para que a sua modelagem seja mais próxima possível das adotadas no campo pelos diversos fabricantes de sistemas de excitação das máquinas síncronas.

Os fenômenos de auto-excitação e curto-circuito capacitivo podem ser ainda bastante explorados considerando um motor de indução. Esses fenômenos podem ser visualizados nestas máquinas considerando que muitas linhas de produção das fábricas devem corrigir os seus respectivos fatores de potência com cargas capacitivas, que dependendo do tamanho da linha de produção, podem atingir altos valores. Por este motivo, estas máquinas estão sujeitas a tais problemas durante suas operações.

Outras formas de modelagem matemática dos fenômenos de auto-excitação e curto-circuito capacitivo podem ser desenvolvidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] P. KUNDUR, *Power System Stability and Control*. New York, EUA, McGraw-Hill, 1994.

[2] A.E. FITZGERALD, C. KINGSLEY, S.D. UMANS, *Electric Machinery*, Sixth Edition, McGraw-Hill Companies, Inc., EUA, 2003.

[3] W.D. STEVENSON JR., J.J. GRAINGER, *Power System Analysis*, International Edition, McGraw-Hill, Inc., EUA, 1994.

[4] MURDOCH, A., D'ANTONIO, M.J., "Generator Excitation Systems - Performance Specification to Meet Interconnection Requirements", IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC, MIT, June 2001.

[5] ERCEG, G., ERCEG, R., "Specific Applications of the Transistor Converter in Excitation Systems of Synchronous Generators", Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference on, 2001.

[6] SUZUKI, K., SUMIDA, T., UDA, S., SHIMOURA, M., TANAKA, S., "The Characteristics of Excitation System", IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, *Vol.2, Issue, pp.479-484*, Hong Kong, November 1991.

[7] SHAO, W., XU, Z., "Excitation System Parameter Setting for Power System Planning", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, *Vol.1, Issue, pp.541-546, 2002*.

[8] MARQUES, N.L., PEDROSO, A.S., SILVA, J.B.S., FERREIRA, S.T., "Grandes Cargas Capacitivas Aplicadas às Máquinas Síncronas", VII Seminário Nacional de Transmissão e Produção de Energia Elétrica, Grupo IV, Brasília, *Mai*o 1984.

[9] GUIMARÃES, C.H.C., RANGEL, R.D., “Diagramas Operacionais de Unidades Geradoras”, X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Florianópolis, Operação, *Maio* 2006.

[10] SHOUZHEN, Z., SHANDE, S., HOULIAN, C., JIANMIN, J., “Effects of the Excitation System Parameters on Power System Transient Stability Studies”, IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, *Vol.2, Issue, pp.532-535*, Hong Kong, December 1993.

[11] BÉRUBÉ, G.R., HAJAGOS, L.M., “Testing & Modeling of Generator Controls”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, *vol.3, Issue, pp.13-22, July2003*.

[12] DE MELLO, F.P., DOLBEC, A.C., SWANN, D.A., TEMOSHOK, M., “Analog Computer Studies of System Overvoltages Following Load Rejections”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 82, n° 65, *Pt. III, pp.42-49*, April 1963.

[13] DE MELLO, F.P., LEUZINGER, L.M., MILLS, R.J., “Load Rejection Overvoltages As Affected By Excitation System Control”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Paper T 74 337-2, Summer Meeting, *1974*.

[14] GABA, G., LEFEBVRE, S., MUKHEDKAR, D., “Comparative Analysis and Study of the Dynamic Stability of AC/DC Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, vol.3, n° 3, pp. 978-985, August *1988*.

[15] CONCORDIA, C., “Power System Objectives’ Side Effects: Good and Bad”, IEEE Power Engineering Review, v.10, Issue 9, pp. 12-13, September *1990*.

[16] YOUFANG, X., “The Practical Criterion of Generator Self Excitation and Its Field Example Analysis”, IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, vol. 1, pp. *321-323, December* 1993.

[17] EL-SERAFFI, A.M., KAR, N.C. “A New Method for Calculating the Q-Axis

Saturation Characteristics of Salient-Pole Synchronous Machines”, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 1, pp. 557-562, 2001.

[18] LOUIE, K.W., “A Study on Magnetic Saturation Effects in a Synchronous Generator During Unbalanced Faults”, International Conference on Power System Technology, vol. 2, pp.1496-1501, November 2004.

[19] WANG, F., “A Nonlinear Saturation Model for Salient-Pole Synchronous Machines in High Performance Drive Applications”, Conference Record of the Industry Applications Conference, vol. 2, pp. 906-910, Octobre 2003.

[20] EL-SERAFI, A.M., KAR, N.C. “Experimental Methods for Measuring the Q-Axis Saturation Characteristics of Synchronous Machines”, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 1, pp. 425-428, May 2004.

[21] DE MELLO, F.P., HANNET, L.N., “Representation of Saturation in Synchronous Machines”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. PWRS-1, n. 4, pp. 8-18, November 1986.

[22] EL-SERAFI, A.M., KAR, N.C. “Methods for Determining the Q-Axis Saturation Characteristics of Salient-Pole Synchronous Machines from the Measured D-Axis Characteristics”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, n. 1, pp. 80-86, March 2003.

[23] DE MELLO, F.P., CONCORDIA, C., “Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, Issue 4, pp. 316-329, April 1969.

[24] HU, Y., MCLAREN, P.G., GOLE, A.M., FEDIRCHUK, D.J., CASTRO, A., “Self-Excitation Operating Constraint for Generators Connected to DC Lines”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, n. 3, pp.1003-1009, August 1999.

[25] LOPES, C.E.V.M., *Desempenho Transitório de Sistemas de Potência com Informação de Margem de Estabilidade*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio

de Janeiro, Brasil, Junho 2006.

[26] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO, Base de Dados para Estudos de Estabilidade Eletromecânica, página na internet: www.ons.org.br, Outubro 2005.

[27] GUIMARÃES, C.H.C., *Simulação Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Considerando os Fenômenos de Longa Duração*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Dezembro 2003.

[28] CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA, *Manual do Usuário do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM*, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

[29] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, IEEE Std 421.5-1992, August, 1992.

[30] SIEMENS-PTI, *Advanced Power System Dynamics Course*, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

[31] ELETROBRÁS, *Dinâmica das Máquinas Elétricas I*, vol. 4, Rio de Janeiro, Brasil, 1979.

[32] ELETROBRÁS, *Dinâmica das Máquinas Elétricas II*, vol. 5, Rio de Janeiro, Brasil, 1979.

[33] ERMIS, M., ÇAKIR, Z., ÇADIRCI, I., ZENGINOBUZ, G., TEZCAN, H., “Self-Excitation of Induction Motors Compensated by Permanently Connected Capacitors and Recommendations for IEEE Std 141-1993”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 5, pp.3135-3145, October 2000.

[34] FILHO, M.Z.T., JUHLIN, L.E., PORANGABA, H.D., “Análise do Fenômeno de Auto-Excitação dos Compensadores Síncronos da Subestação Conversora

de São Roque - Aplicação da Chave de Amortecimento”, VII Seminário Nacional de Transmissão e Produção de Energia Elétrica, Grupo IV, Brasília, *Mai*o 1984.

[35] MOHAMED, E.A., SWIFT, G.W., “Prediction of DC Load-Rejection Dynamic Overvoltages Using Pattern Recognition”, IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol.135, *pp.480-486*, November 1988.

[36] LOUIE, K.W., WILSON, P., WACHAL, R.W., WANG, A., BUCHANAN, P., “HVDC POWER SYSTEM HARMONIC ANALYSIS IN THE TIME AND FREQUENCY DOMAINS”, Power System Technology, 2006, PowerCon 2006, International Conference On, *pp.1-8*, October 2006.

[37] GILSIG, T., “An Interconnected AC Filter for HVDC Converters”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, Issue 3, *pp.463-469*, March 1970.

[38] PEDROSO, A.S., “Notas de Aula dos Cursos de Modelagem Matemática de Máquinas Elétricas e Dinâmica de Curto-Prazo”. Aulas ministradas na COPPE – UFRJ pelo referido professor.

APÊNDICE A- REGIME PERMANENTE

Para a execução das análises desenvolvidas ao longo deste trabalho foram preparados arquivos de simulação no programa de estabilidade eletromecânica ANATEM[®], desenvolvido pelo CEPEL. Os casos em regime permanente, que são as condições iniciais para a análise deste trabalho, foram desenvolvidos no programa ANAREDE[®] também do CEPEL. Na confecção dos casos de regime permanente, desta análise, foram adotados os critérios citados no item 4.4. Assim, a configuração do sistema em regime permanente, seguindo os critérios e as premissas adotadas, pode ser vista nas figuras abaixo.

➤ **Configuração do sistema de transmissão para o regime permanente da análise dos itens 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12.**

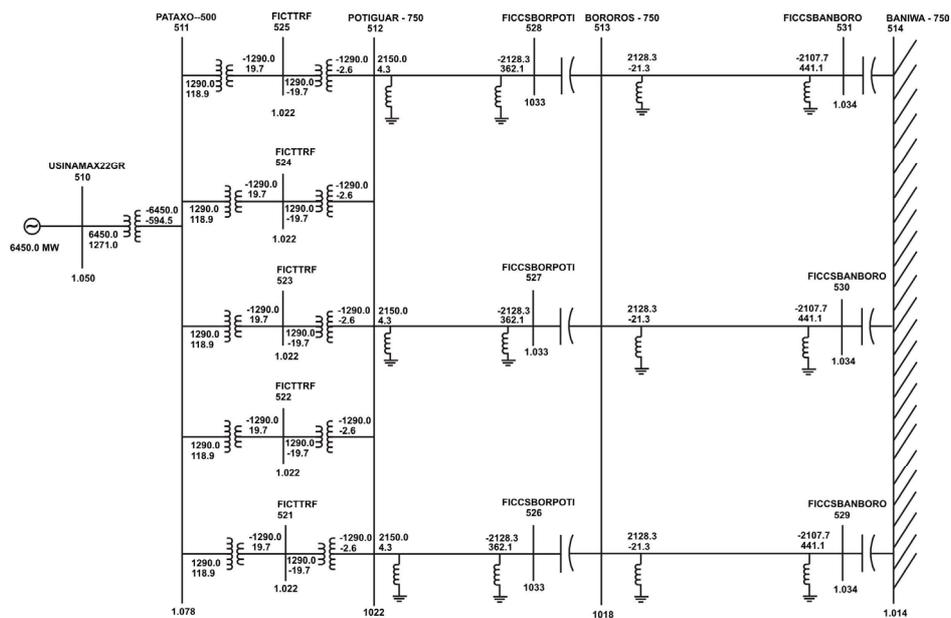


Figura 230- Configuração do sistema em regime permanente para todos os casos com e sem ponte negativa e que consideram compensação série de 65%

➤ **Configuração do sistema de transmissão para o regime permanente da análise do item 4.13.**

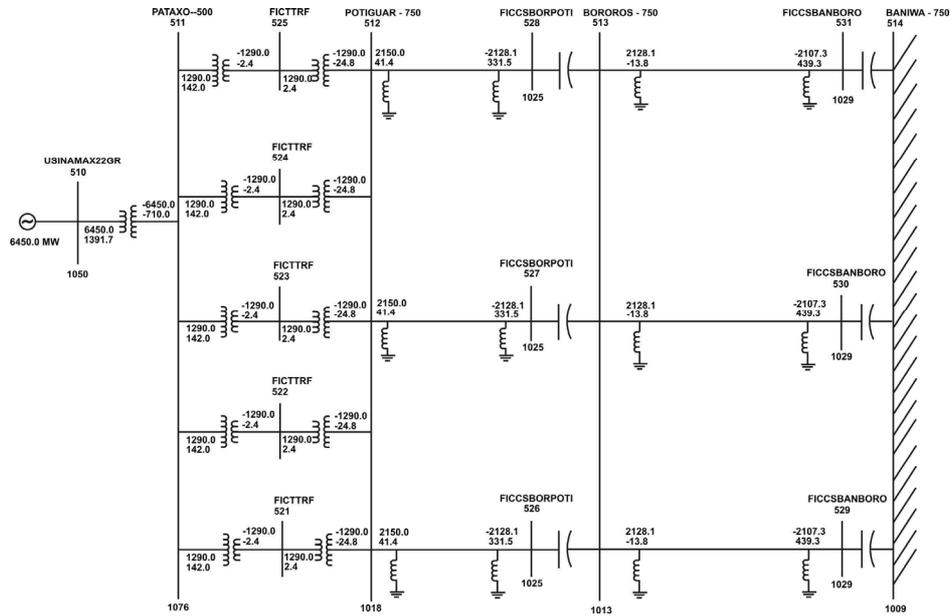


Figura 231- Configuração do sistema em regime permanente para os casos sem ponte negativa e que consideram compensação série de 60%

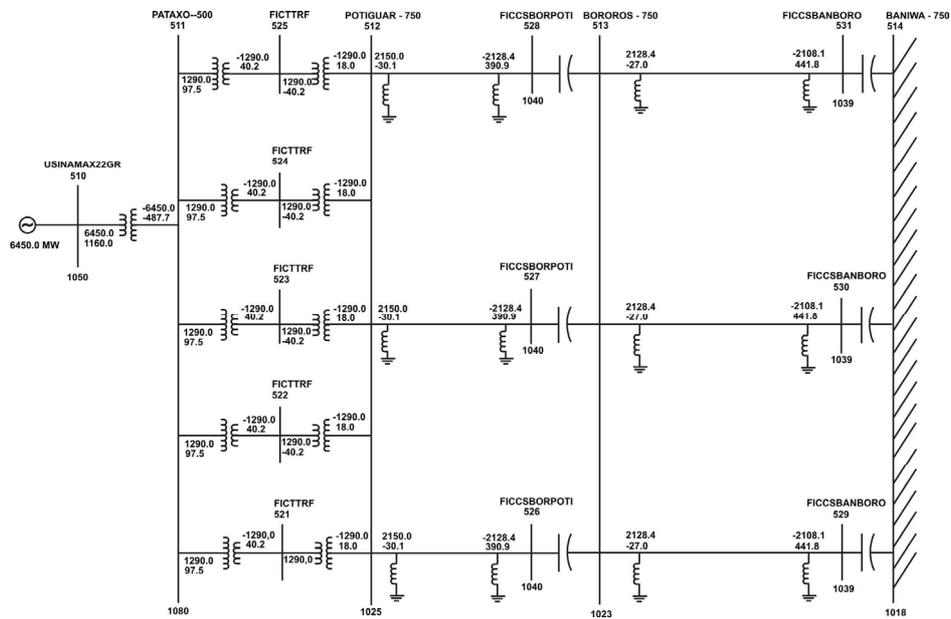


Figura 232- Configuração do sistema em regime permanente para os casos sem ponte negativa e que consideram compensação série de 70%

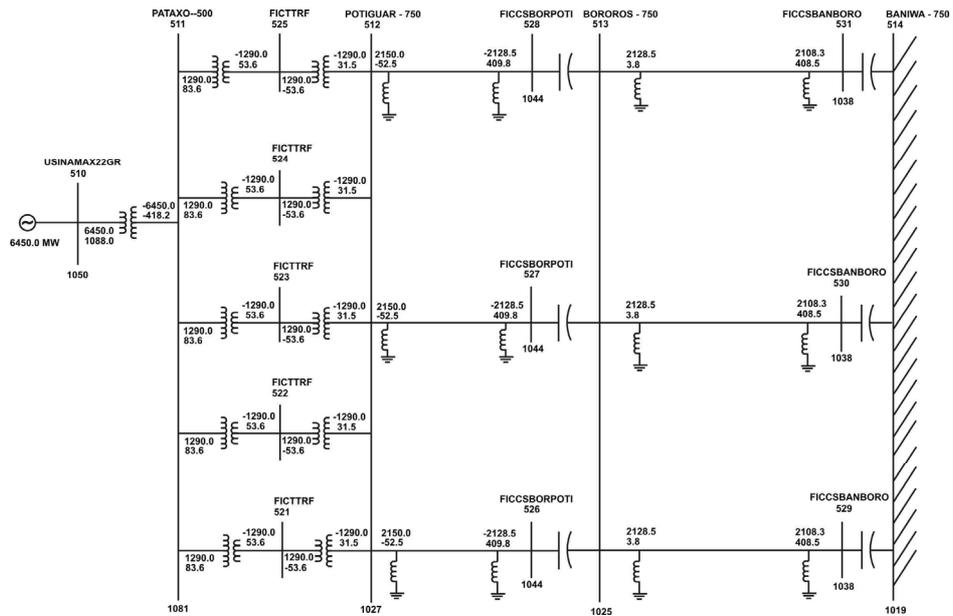


Figura 233- Configuração do sistema em regime permanente para os casos sem ponte negativa e que consideram compensação série de 80%

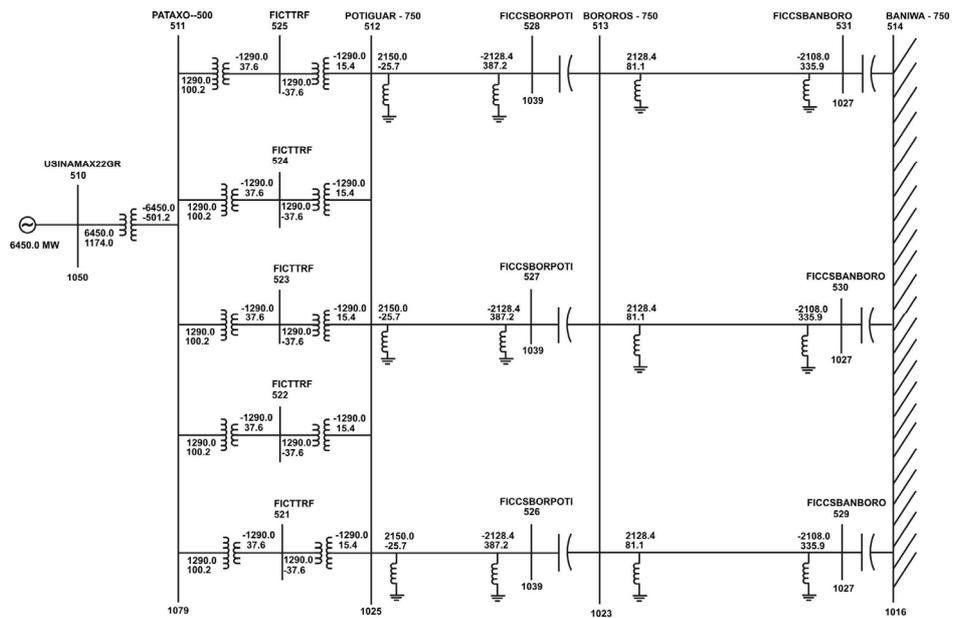


Figura 234- Configuração do sistema em regime permanente para os casos sem ponte negativa e que consideram compensação série de 90%

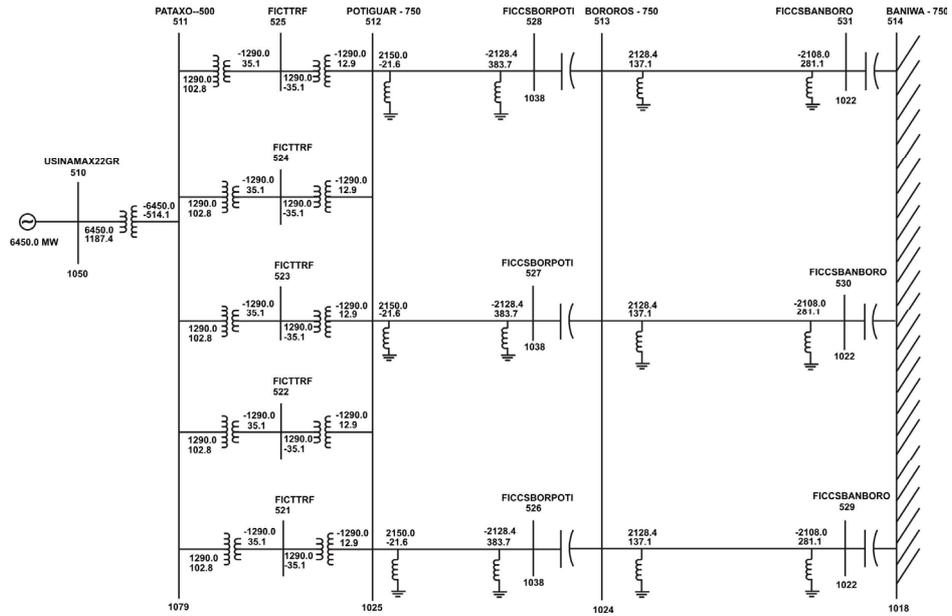


Figura 235- Configuração do sistema em regime permanente para os casos sem ponte negativa e que consideram compensação série de 100%

➤ **Configuração do sistema de transmissão para o regime permanente da análise desenvolvida no item 4.14.**

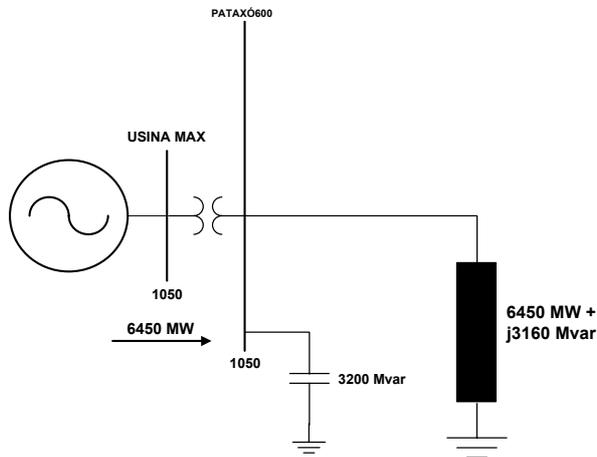


Figura 236- Representação em regime permanente de um sistema CC equivalente de 3 bipólos

APÊNDICE B-PARÂMETROS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

➤ **Dados das linhas do sistema de transmissão em corrente alternada**

Tabela 14- Tabela referente aos dados das linhas de transmissão em corrente alternada

Barras		Parâmetros			Reatância no nível de compensação de (%)					
De	Para	R (%)	X (%)	B (Mvar)	60%	65%	70%	80%	90%	100%
512	513	0,05	1,20	1357,6	-0,72	-0,78	0,84	-0,96	-1,08	-1,20
513	514	0,05	1,13	1270,6	-0,678	-0,73	0,79	-0,90	-1,02	-1,13

Tabela 15- Tabela referente aos comprimentos dos trechos da linha de transmissão CA

Barras		Comprimento (km)
De	Para	
512	513	320 km
513	514	300 km

➤ **Dados dos transformadores do sistema de transmissão em corrente alternada.**

Tabela 16- Tabela dos dados dos transformadores do sistema CA

Circuitos - Barra		Reatância	Unidades
De	Para	X (%)	
510	511	4,18	22
511	512	0,73	5

➤ **Dados dos reatores de linha do sistema de transmissão em corrente alternada.**

Tabela 17- Tabela dos dados referentes aos reatores de linha

Circuitos – Barra		Circuitos	Valor em Mvar		Nível de Compensação Shunt em Relação ao B da linha
De	Para		De	Para	
512	513	1, 2, 3	600	600	88 %
513	514	1, 2, 3	600	600	94 %

APÊNDICE C- SISTEMA DE EXCITAÇÃO

➤ **Parâmetros referentes ao sistema de excitação**

Tabela 18- Tabela dos parâmetros referentes ao sistema de excitação

Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição
FRMAX	1,8	pu	Limite Máximo da Frequência
GCA2	1,12	pu	Limite Máximo V/Hz
GCA3	0,88	pu	Limite Mínimo V/Hz
MAXCA1	1,1	pu	Tensão Máxima de Referência
MIN_U	0,9	pu	Tensão Mínima de Referência
GRV1	100	pu	Ganho Proporcional da Malha Principal
TRV2	5	s	Constante de Tempo do Integrador
TRV1	1	s	Constante de Tempo do Numerador do filtro Lead-Lag
TRV3	1	s	Constante de Tempo do Denominador do Filtro Lead-Lag
PRV6	1	s	Ganho de Alta Frequência da Realimentação da Tensão Terminal
TRV6	1	s	Constante de Tempo da Realimentação da Tensão
UEX_MAX	7,00	pu	Teto Positivo da Excitação, considerando a tensão nominal
UEX_MIN	-5,29	pu	Teto Negativo da Excitação, considerando a tensão nominal

➤ **Limitador de Sobreexcitação**

Tabela 19- Tabela dos parâmetros referentes ao limitador de sobreexcitação

Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição
Limite de Teto			
IFP	3,25	pu	Referência da Corrente Máxima
GIE1	4	pu	Ganho (malha do teto)
TIE1	1	s	Constante de Tempo Integral (malha do teto)
TIE7	1	s	Constante de Tempo do Numerador do Filtro para o Avanço de Fase
TIE3	1	s	Constante de Tempo do Denominador do Filtro para o Avanço de Fase
Limite Térmico			
INF1	2,24	pu	Referência da Corrente Térmica
GIE2	0,15	pu	Ganho do Limite Térmico
TIE2	1	s	Constante de Tempo do Limite Térmico
TMPIE1	10	s	Referência de Tempo da Corrente Máxima

➤ **Limitador de Subexcitação**

Tabela 20- Tabela dos parâmetros referentes ao limitador de subexcitação

Parâmetros	Valor	Unidade	Descrição
GSE3	0,1	pu	Ganho
TSE1	0,5	s	Constante de Tempo Integral
VAR_A	-0,89	pu	Ponto A: Potência Reativa na Tensão Nominal
PWR_A	0,00	pu	Ponto A: Potência Ativa
VAR_B	-0,95	pu	Ponto B: Potência Reativa na Tensão Nominal
PWR_B	0,20	pu	Ponto B: Potência Ativa
VAR_C	-0,65	pu	Ponto C: Potência Reativa na Tensão Nominal
PWR_C	0,80	pu	Ponto C: Potência Ativa
VAR_D	-0,30	pu	Ponto D: Potência Reativa na Tensão Nominal
PWR_D	1,00	pu	Ponto D: Potência Ativa