



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Sistemas e Controle de Energia

**Sobre a Determinação de Parâmetros de Geradores
Síncronos para Estudos de Comportamento Dinâmico de
Sistemas Elétricos**

Autor: Juan Carlos Pequena Suni

Orientador: Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho (FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Silvio Ikuyo Nabeta (EPUSP/USP)

Prof. Dr. Gilmar Barreto (FEEC/UNICAMP)

Campinas, 31 de julho de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

P399s Pequena Suni, Juan Carlos
Sobre a determinação de parâmetros de geradores síncronos para estudos de comportamento dinâmico de sistemas elétricos / Juan Carlos Pequena Suni. -- Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Ernesto Ruppert Filho.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Máquinas elétricas síncronas. 2. Máquinas elétricas. 3. Transitorios (Eletricidade). 4. Energia elétrica - Produção. I. Ruppert Filho, Ernesto. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: On the determination of parameters of synchronous generators for the study of dynamic behavior of power systems

Palavras-chave em Inglês: Electric machinery synchronous, Electric machinery, Transients (Electricity), Electric power production

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Silvio Ikuyo Nabeta, Gilmar Barreto

Data da defesa: 31/07/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Juan Carlos Pequeña Suni

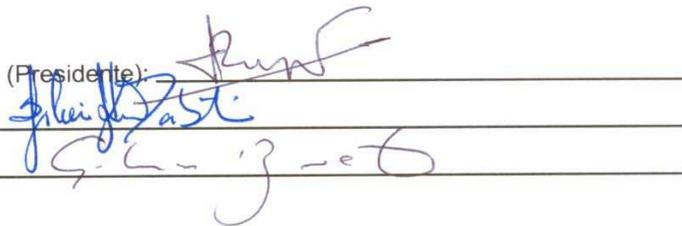
Data da Defesa: 31 de julho de 2009

Título da Tese: "Sobre a Determinação de Parâmetros de Geradores Síncronos para Estudos de Comportamento Dinâmico de Sistemas Elétricos"

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho (Presidente):

Prof. Dr. Silvio Ikuyo Nabeta:

Prof. Dr. Gilmar Barreto:



The image shows three horizontal lines for signatures. The first line has a signature in blue ink that appears to be 'Ernesto Ruppert Filho'. The second line has a signature in blue ink that appears to be 'Silvio Nabeta'. The third line has a signature in blue ink that appears to be 'Gilmar Barreto'.

Agradecimentos

A Deus pela vida e oportunidade sem par de desenvolvimento pessoal e acadêmico, por cada amizade gerada nesse período, pelas lutas travadas ao longo desses anos de trabalho, e pela visão renovada a cada manhã na fé e na esperança, que me permitem experiências tão construtivas como a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho, meu orientador, por todos os conselhos profissionais e por toda a dedicação, paciência e principalmente pela amizade demonstrada que me ajudaram bastante durante o desenvolvimento desta dissertação.

A minha família pelo amor e por todo o apoio em todos os sentidos.

Aos amigos do DSCE e colegas do laboratório e fora dele também, à Audirene, Grace, Carol, Iris, Yurany, Michelle, Bianca, Magali, Alicia, Karen, David, Elviz, Alex, Roger e muitos mais que apesar de alguns estarem longe sempre me demonstraram seu apoio e força de uma ou outra forma.

Pelas conversas e pelos conselhos, muito obrigado.

Ao CNPq e à CPFL pelo apoio financeiro através de Bolsas de Estudos que recebi.

Dedico este trabalho à minha mãe, Felipa;
ao meu pai, Severino;
às minhas irmãs Maria, Vilma e Giovanna;
e à A.J.C.C., eu
consegui! 😊.

“Solo se enseña con el ejemplo, nadie
ignora todo, nadie sabe todo, por eso
aprendemos siempre”

Jc

Resumo

Os parâmetros do modelo matemático dinâmico dos geradores síncronos como a resistência elétrica dos enrolamentos de estator por fase, a resistência elétrica do enrolamento de campo, as resistências elétricas dos enrolamentos amortecedores de eixo direto e de eixo em quadratura, as reatâncias de dispersão dos enrolamentos de estator por fase, do enrolamento de campo e dos enrolamentos amortecedores, bem como as reatâncias de magnetização de eixo direto e de eixo em quadratura do gerador são possíveis de serem determinadas, com razoável aproximação, através de ensaios específicos como o ensaio para determinação da reatância de Potier, o ensaio de curto-circuito trifásico brusco e os ensaios de rejeição de carga.

Neste trabalho discute-se o problema da determinação de parâmetros do gerador síncrono auxiliado pela realização de simulações dinâmicas usando o software Matlab/Simulink e a sua biblioteca SimPowerSystems para determinação de parâmetros de um gerador de pólos lisos e de um gerador de pólos salientes através de ensaios de medição da reatância síncrona de eixo direto, ensaio de Potier, ensaio de curto-circuito brusco e ensaio de rejeição de carga.

Diversos resultados e conclusões são apresentados usando os parâmetros padronizados mostrados explicitamente por Krause em seu importante livro publicado em 1986. Trata-se de um trabalho que tem finalidades didática e tecnológica de discutir essa questão.

Palavras-chave: Determinação de parâmetros, ensaio de curto circuito, ensaio rejeição de carga, gerador síncrono, máquinas elétricas, simulação.

Abstract

The synchronous generator dynamic mathematical model parameters like the per phase stator winding electrical resistance, the field winding resistance, the direct and quadrature damping winding resistances, the field winding leakage reactance, the per phase stator winding leakage reactance, the damping winding leakage reactances, and direct and quadrature magnetizing reactances are possible to be determined with some accuracy through specific tests like the Potier reactance determination, the sudden short-circuit test and the load rejection tests.

This work is addressed to the problem of salient poles and cylindrical rotor synchronous generator parameters determination aided by the use of dynamic simulations implemented with the Matlab/Simulink package using its SimPowerSystems library.

Some results and conclusions about the parameters determination are presented using the standardized and fundamental parameters as shown in the Krause book published in 1986. This paper has both didactic and technological subjects and it is addressed to discuss several aspects on the real parameters determination activities

Keywords: parameters determination, short-circuit test, load rejection test, synchronous generator, electrical machines, simulation.

Sumário

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas.....	viii
Lista de Símbolos	ix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica.....	1
1.2 A Modelagem Matemática Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica.....	2
1.3 A Necessidade dos Parâmetros do Gerador Síncrono para uso em Simulações Dinâmicas de Sistemas de Energia Elétrica.	3
1.4 A Determinação dos Parâmetros do Gerador Síncrono	4
1.5 Objetivo e Conteúdo da Tese	5
Capítulo 2	7
Modelagem Matemática Dinâmica de Geradores Síncronos	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Modelagem Matemática Dinâmica do Gerador Síncrono Trifásico	13
2.2.1 Equações de Tensões do Gerador Síncrono em Variáveis Trifásicas abc no Estator ..	13
2.2.2 Equação de Torque Eletromagnético	18
2.2.3 Equações de Transformação de Variáveis abc para dq0	18
2.2.4 Equações de Tensões Referenciadas ao Rotor	20
2.2.5 Equação do Torque Eletromagnético do Gerador em Variáveis qd0.....	23
2.2.6 Ângulo de Potência do Gerador	23
2.2.7 Equação de Conservação de Energia do Sistema Gerador e Turbina ou Equação Eletromecânica	24
Capítulo 3	27
Parâmetros Elétricos de Geradores Síncronos para Modelagem Matemática Dinâmica	27
3.1 Introdução.....	27
3.2 Obtenção de Parâmetros Operacionais de Geradores Síncronos	28
3.2.1 Circuito Elétrico Equivalente de Gerador Síncrono com Dois Enrolamentos de Rotor	29
3.2.2 Determinação de Parâmetros Operacionais de Eixo Direto de Geradores Síncronos de Pólos Lisos com um Enrolamento de Campo e um Enrolamento Amortecedor de Eixo Direto no Rotor.....	32
3.2.3 Determinação de Parâmetros Operacionais de Eixo em Quadra-tura de Geradores Síncronos de Pólos Lisos com Dois Enrolamentos Amortecedores de Eixo em Quadratura no Rotor.....	34
3.2.4 Circuito Equivalente Operacional de Gerador Síncrono de Pólos Salientes com um Enrolamento de Rotor	35
3.3 Parâmetros Padronizados	37
3.3.1 Constantes de Tempo Subtransitórias e Transitórias de Circuito Aberto e de Curto-Circuito de Eixos Direto e em Quadratura	39
3.3.2 Reatâncias Transitórias e Subtransitórias.....	43
3.3.3 Valores das Reatâncias $x_d(s)$ e $x_q(s)$ em Regime Permanente, Transitório e Subtransitório.	45
3.3.4 Dados de Geradores Utilizados Neste Trabalho	46

Capítulo 4	51
Ensaio Para Determinação de Parâmetros do Modelo Matemático Dinâmico de Geradores Síncronos	51
4.1 Introdução.....	51
4.2 Ensaio para Determinação da Curva Característica de Circuito Aberto do Gerador Síncrono	53
4.3 Ensaio para Determinação da Curva Característica de Curto-Circuito do Gerador Síncrono	54
4.4 Determinação da Reatância Síncrona a Partir Curva Característica de Circuito Aberto e da Curva Característica de Curto-Circuito de um Gerador Síncrono.....	55
4.5 Característica em Carga Puramente Indutiva do Gerador Síncrono e Determinação da Reatância de Potier do Gerador Síncrono	59
4.6 Ensaio de Curto Circuito Trifásico Brusco no Gerador Síncrono.....	61
4.7 Ensaio de Rejeição de Carga.....	64
4.7.1 Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto	65
4.7.2 Ensaio de rejeição de carga de eixo em quadratura	71
4.7.3 Rejeição de Carga em Eixo Magnético de Armadura Arbitrário.	73
Capítulo 5	77
Resultados de Simulações de Ensaio para Determinação dos Parâmetros Operacionais de Geradores Síncronos	77
5.1 Introdução.....	77
5.2 Simulação Dinâmica da Operação do Gerador Síncrono Usando o Software Matlab/Simulink e sua Biblioteca SimPowerSystems	78
5.3 Simulação de Ensaio Realizados com o Gerador de Pólos Salientes	82
5.3.1 Simulação dos Ensaio para a Obtenção da Reatância Síncrona de eixo Direto (x_d) ..	82
5.3.2 Simulação do Ensaio para a Determinação da Reatância de Potier (x_p)	83
5.3.3 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo Direto Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador.....	84
5.3.4 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo em Quadratura para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador	87
5.3.5 Simulação do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário para a determinação de parâmetros padronizados de eixo em quadratura Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador	89
5.3.6 Simulação do ensaio de curto-circuito brusco para a determinação dos parâmetros padronizados de eixo direto.....	93
5.3.7 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo Direto sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador.....	95
5.3.8 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo em Quadratura para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura Sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador	97
5.3.9 Simulação do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário para a determinação de parâmetros padronizados de eixo em quadratura sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador.....	99
5.4 Simulação de Ensaio Realizados com o Gerador de Pólos Lisos	104

5.4.1	Simulação dos Ensaios para a Obtenção da Reatância Síncrona de Eixo Direto (x_d)	104
5.4.2	Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo Direto Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador	105
5.4.3	Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo em Quadratura para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador	107
5.4.4	Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Arbitrário para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador	109
5.4.5	Simulação do Ensaio de Curto-Circuito Brusco para a Determinação dos Parâmetros Padronizados de Eixo Direto	113
5.4.6	Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo Direto sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador	114
5.4.7	Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo em Quadratura para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador	117
5.4.8	Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Arbitrário para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador	118
5.5	Tabelas Comparativas de Resultados	122
5.6	Conclusões	125
Capítulo 6		127
	Discussão, Conclusão e Sugestões para Novos Trabalhos	127
	Referências Bibliográficas	130
	Publicações Resultantes	131

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - ESQUEMA DOS EIXOS MAGNÉTICOS DOS ENROLAMENTOS DE UM GERADOR SÍNCRONO	10
FIGURA 2.2 - REPRESENTAÇÃO DOS ENROLAMENTOS POR CIRCUITOS ELÉTRICOS EQUIVALENTES DE UMA MÁQUINA IDEALIZADA	12
FIGURA 3.1 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE PADRÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA COM DOIS ENROLAMENTOS AMORTECEDORES NO ROTOR	29
FIGURA 3.2 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE OPERACIONAL POR FASE DE EIXO DIRETO DE GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS LISOS COM UM ENROLAMENTO DE CAMPO E UM ENROLAMENTO AMORTECEDOR NO ROTOR, VISTO DO LADO DO ESTATOR.....	33
FIGURA 3.3 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE OPERACIONAL POR FASE DE GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS LISOS COM DOIS ENROLAMENTOS AMORTECEDORES NO ROTOR, VISTO DO LADO DO ESTATOR.....	34
FIGURA 3.4 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE OPERACIONAL POR FASE DE GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS SALIENTES COM UM ENROLAMENTO NO ESTATOR E UM NO ROTOR VISTOS DO LADO DO ESTATOR.....	35
FIGURA 3.5 - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE OPERACIONAL POR FASE DE EIXO EM QUADRATURA DE GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS SALIENTES	36
FIGURA 3.6 - PERÍODO SUBTRANSITÓRIO E TRANSITÓRIO DE TENSÃO EM GERADOR SÍNCRONO DURANTE A REJEIÇÃO DE CARGA.....	39
FIGURA 3.7- CIRCUITO EQUIVALENTE DE EIXO DIRETO SEM ENROLAMENTO AMORTECEDOR.....	43
FIGURA 3.8 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE EIXO DIRETO COM ENROLAMENTO AMORTECEDOR	44
FIGURA 4.1 - CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DO GERADOR SÍNCRONO COM RETA DE ENTREFERRO.....	54
FIGURA 4.2 - CURVA CARACTERÍSTICA DE CURTO-CIRCUITO	55
FIGURA 4.3 - DETERMINAÇÃO DA REATÂNCIA SÍNCRONA	56
FIGURA 4.4 - CIRCUITO EQUIVALENTE DO GERADOR SÍNCRONO PARA DETERMINAÇÃO DE FORÇA ELETROMOTRIZ.....	56
FIGURA 4.5 - CURVAS PARA DETERMINAÇÃO DA REATÂNCIA DE POTIER.....	60
FIGURA 4.6 - (A) CORRENTES DAS FASES A, B, C DURANTE O CURTO CIRCUITO, (B) CORRENTE DE CAMPO DURANTE O CURTO CIRCUITO	62
FIGURA 4.7 - CURVAS DAS ENVOLTÓRIAS DAS CORRENTES E A ENVOLTÓRIA MÉDIA.....	62
FIGURA 4.8 – ENVOLTÓRIA DA MÉDIA ARITMÉTICA DAS 3 CORRENTES DURANTE O CURTO CIRCUITO	63
FIGURA 4.9 - DIAGRAMA VETORIAL NO ENSAIO DE REJEIÇÃO DE CARGA NO EIXO DIRETO	66
FIGURA 4.10 – CURVAS DE ENVOLTÓRIAS DAS TENSÕES DA ARMADURA DAS TRÊS FASES E CURVA DA TENSÃO MÉDIA DURANTE A REJEIÇÃO.....	67
FIGURA 4.11 – CURVA DA MÉDIA DAS ENVOLTÓRIAS DE TENSÃO DE FASE DA ARMADURA	67
FIGURA 4.12 – CURVA MÉDIA ENVOLTÓRIA E TENSÃO TERMINAL DE ARMADURA	68
FIGURA 4.13 – CURVA ENVOLTÓRIA v_t MOSTRANDO A, B, C E CONSTANTES DE TEMPO.....	69
FIGURA 4.14 – CURVA DO CAMPO i_{fd} DURANTE A REJEIÇÃO.....	71
FIGURA 4.15 – DIAGRAMA VETORIAL NO INSTANTE DA REJEIÇÃO DA CARGA NO EIXO q	72
FIGURA 4.16 – CURVA ENVOLTÓRIA v_t COM VALORES DE A, B E C	73
FIGURA 4.17 – CURVA ENVOLTÓRIA $v_t \text{ Sen} \delta$ DE REJEIÇÃO NO EIXO ARBITRÁRIO	75
FIGURA 5.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DA MÁQUINA SÍNCRONA NO SIMPOWER	79
FIGURA 5.2 – DIAGRAMA BLOCOS DO SUBSISTEMA <i>SM_MECHANICS</i> QUE MODELA A PARTE MECÂNICA DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	79
FIGURA 5.3 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SUBSISTEMA <i>SOURCE</i> DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	80
FIGURA 5.4 – DIAGRAMA BLOCOS USADO NAS SIMULAÇÕES.....	81
FIGURA 5.5 – CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TENSÃO E CORRENTE DO GERADOR DE PÓLOS SALIENTES	82
FIGURA 5.6 - TRIANGULO DE POTIER DO HIDROGERADOR.....	83
FIGURA 5.7 – TENSÕES DE FASE QUANDO ACONTECE A REJEIÇÃO EM $t = 35 \text{ s}$	84
FIGURA 5.8 - TENSÃO TERMINAL NA REJEIÇÃO	85
FIGURA 5.9 - CORRENTE DE CAMPO DURANTE A REJEIÇÃO	86
FIGURA 5.10 - TENSÕES DE FASE DURANTE A REJEIÇÃO	87
FIGURA 5.11 - TENSÃO TERMINAL DURANTE A REJEIÇÃO.....	88

FIGURA 5.12 - FORMA DE ONDA DAS TENSÕES DURANTE A REJEIÇÃO	89
FIGURA 5.13 - TENSÃO TERMINAL NO EIXO D, EM ESCALA SEMILOG	90
FIGURA 5.14 - FORMA DE ONDA DAS TENSÕES DURANTE A REJEIÇÃO	91
FIGURA 5.15 - TENSÃO TERMINAL DE EIXO DIRETO EM ESCALA SEMILOG	92
FIGURA 5.16 - FORMA DE ONDA DAS CORRENTES DURANTE O CURTO CIRCUITO	93
FIGURA 5.17 - ENVOLTORIA MÉDIA DAS CORRENTES EM ESCALA SEMILOG	94
FIGURA 5.18 - TENSÃO TERMINAL NA REJEIÇÃO	95
FIGURA 5.19 - TENSÃO TERMINAL AMPLIADO	96
FIGURA 5.20 - CORRENTE DE CAMPO DURANTE A REJEIÇÃO PARA OBTENÇÃO DE CONSTANTES DE TEMPO	96
FIGURA 5.21 - CORRENTE DE CAMPO AMPLIADA.....	97
FIGURA 5.22 - TENSÃO TERMINAL DURANTE A REJEIÇÃO EM ESCALA SEMILOG	98
FIGURA 5.23 - TENSÃO TERMINAL DE EIXO DIRETO DURANTE A REJEIÇÃO EM ESCALA SEMILOG.	100
FIGURA 5.24 - TENSÃO TERMINAL DURANTE A REJEIÇÃO.....	101
FIGURA 5.25 - ENVOLTÓRIAS DAS TENSÕES DE FASE TERMINAIS E SUA MÉDIA ARITMÉTICA.	102
FIGURA 5.26 – MÉDIA DAS ENVOLTÓRIAS DAS TENSÕES TERMINAIS POR FASE E A TENSÃO TERMINAL MEDIDA.	102
FIGURA 5.27 - VELOCIDADE (Wr), TENSÃO TERMINAL (Vt), ÂNGULO DE CARGA (δ°).	103
FIGURA 5.28 - TENSÃO TERMINAL DE EIXO DIRETO DURANTE A REJEIÇÃO EM ESCALA SEMILOG.	103
FIGURA 5.29 - CARACTERÍSTICA DA TENSÃO EM VAZIO E DA CORRENTE EM CURTO CIRCUITO.	104
FIGURA 5.30 - TENSÃO TERMINAL DE EIXO DIRETO DURANTE A REJEIÇÃO.....	105
FIGURA 5.31 - AMPLIAÇÃO DA FIG. 5.30.....	106
FIGURA 5.32 - CORRENTE DE CAMPO DURANTE A REJEIÇÃO.	106
FIGURA 5.33 - AMPLIAÇÃO DA FIG. 5.32.....	107
FIGURA 5.34 - VELOCIDADE (Wr), TENSÃO TERMINAL (Vt) DURANTE A REJEIÇÃO.....	108
FIGURA 5.35 - AMPLIAÇÃO DA FIG. 5.34 Vt/Wr	108
FIGURA 5.36 - VELOCIDADE (Wr), TENSÃO TERMINAL (Vt), ÂNGULO DE CARGA (δ°) DURANTE A REJEIÇÃO.	109
FIGURA 5.37 - TENSÃO TERMINAL DE EIXO DIRETO PARA CÁLCULOS NA PARTE TRANSITÓRIA.....	110
FIGURA 5.38 – AMPLIAÇÃO DA FIG. 5.37 PARA CÁLCULOS NA PARTE SUBTRANSITÓRIA.	110
FIGURA 5.39 - VELOCIDADE (Wr), TENSÃO TERMINAL (Vt), ÂNGULO DE CARGA (δ°) DURANTE A REJEIÇÃO.	111
FIGURA 5.40 - TENSÃO TERMINAL DE EIXO DIRETO EM ESCALA SEMILOG DURANTE A REJEIÇÃO.	112
FIGURA 5.41 - AMPLIAÇÃO DA PARTE SUBTRANSITÓRIA DA TENSÃO TERMINAL DA FIG. 5.40.....	112
FIGURA 5.42 – MÉDIA DAS ENVOLTÓRIAS DAS CORRENTES DE CURTO CIRCUITO EM ESCALA SEMILOG.	113
FIGURA 5.43 - AMPLIAÇÃO DA FIG. 5.42.....	114
FIGURA 5.44 - TENSÃO TERMINAL DURANTE A REJEIÇÃO.....	115
FIGURA 5.45 - AMPLIAÇÃO DA FIG. 5.44.....	115
FIGURA 5.46 - CORRENTE DE CAMPO DURANTE A REJEIÇÃO.	116
FIGURA 5.47 - AMPLIAÇÃO DA FIG. 5.46.....	116
FIGURA 5.48 - VELOCIDADE (Wr), TENSÃO TERMINAL (Vt), DURANTE A REJEIÇÃO.....	117
FIGURA 5.49 - AMPLIAÇÃO DA PARTE Vt/Wr DA FIG. 5.48, EM ESCALA SEMILOG.	118
FIGURA 5.50 - VELOCIDADE (Wr), TENSÃO TERMINAL (Vt), ÂNGULO DE CARGA (δ°) DURANTE A REJEIÇÃO.	119
FIGURA 5.51 - TENSÃO TERMINAL DE EIXO DIRETO DURANTE A REJEIÇÃO EM ESCALA SEMILOG.	119
FIGURA 5.52 - VELOCIDADE (Wr), TENSÃO TERMINAL (Vt), ÂNGULO DE CARGA (δ°) DURANTE A REJEIÇÃO.	120
FIGURA 5.53 - TENSÃO TERMINAL DE EIXO DIRETO DURANTE A REJEIÇÃO EM ESCALA SEMILOG.	121
FIGURA 5.54 - AMPLIAÇÃO DA PARTE SUBTRANSITÓRIA DA FIG. 5.53.	121

Lista de Tabelas

TABELA 3.1 - GERADOR SÍNCRONO TRIFÁSICO DE PÓLOS SALIENTES.	46
TABELA 3.2 - EXPRESSÕES PARA O CALCULO DOS VALORES BASE UTILIZADOS.	47
TABELA 3.3 - GERADOR SÍNCRONO TRIFÁSICO DE PÓLOS LISOS [1].....	49
TABELA 3.4 - DADOS DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO.....	49
TABELA 5.1 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO GERADOR DE PÓLOS SALIENTES, SEM SATURAÇÃO.....	122
TABELA 5.2 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO GERADOR DE PÓLOS SALIENTES, COM SATURAÇÃO.	123
TABELA 5.3 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO GERADOR DE PÓLOS LISOS, SEM SATURAÇÃO.....	124
TABELA 5.4 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO GERADOR DE PÓLOS LISOS, COM SATURAÇÃO.	125

Lista de Símbolos

Convenções gerais:

Os subscritos a , b , c , e fd se referem às três fases do enrolamento de armadura e ao enrolamento de campo, respectivamente.

Os subscritos d e q se referem aos enrolamentos de eixo direto e em quadratura da armadura respectivamente.

Os subscritos que terminam em ns e s se referem a valores de parâmetros não saturados e saturados, respectivamente.

Os subscritos $kq1$, $kq2$, kd e fd se referem a valores de parâmetros de enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura, de eixo direto, e enrolamento de campo respectivamente.

Os subscrito r , $'$, se referem ao marco de referencia no rotor e a quantidades referidas respectivamente, neste caso são referidas ao enrolamento de estator.

rpm	rotações por minuto
f_s	frequência elétrica
ω_s , $\omega_{sm} = \omega_r$	velocidade angular e velocidade mecânica do rotor (máquina de dois pólos equivalente).
P	número de pólos da máquina
L_{mkq1}	indutância de magnetização do enrolamento amortecedor $kq1$
L_{mkq2}	indutância de magnetização do enrolamento amortecedor $kq2$
L_{mfd}	indutância de magnetização do enrolamento de campo fd
L_{mkd}	indutância de magnetização do enrolamento amortecedor kd
L_{kq1kq2}	indutância mutua entre os enrolamentos amortecedores $kq1$ e $kq2$
L_{kq2kq1}	indutância mutua entre os enrolamento amortecedores $kq2$ e $kq1$
L_{fdkd}	indutância mutua entre os enrolamento amortecedores fd e kd
L_{kdfd}	indutância mutua entre os enrolamento amortecedores kd e fd

T	sobrescrito que representa matriz transposta
v_{ds}^r, i_{ds}^r	tensão e corrente de enrolamento de estator de eixo direto respectivamente
v_{qs}^r, i_{qs}^r	tensão e corrente de enrolamento de estator de eixo em quadratura respectivamente
v_{fd}^r, i_{fd}^r	tensão e corrente de campo respectivamente
v_{kd}^r, i_{kd}^r	tensão e corrente de enrolamento amortecedor de eixo direto respectivamente
$v_{kq1}^r, i_{kq1}^r, v_{kq2}^r, i_{kq2}^r$	tensões e correntes de enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura respectivamente
R_s	resistência elétrica por fase de enrolamento de estator
R_{fd}^r	resistência elétrica de enrolamento de campo referida ao estator
R_{kd}^r	resistência elétrica de enrolamento amortecedor de eixo direto referida ao estator
R_{kq1}^r, R_{kq2}^r	resistência elétrica dos enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura referidas ao estator
L_d, L_{md}	indutância total e indutância de magnetização (mútua) de eixo direto de enrolamento de estator
L_q, L_{mq}	indutância total e indutância de magnetização (mútua) de eixo em quadratura de enrolamentos de estator
x_d, x_{md}	reatância total e reatância de magnetização de enrolamento de estator de eixo direto
x_q, x_{mq}	reatância total e reatância de magnetização de enrolamento de estator de eixo em quadratura
x_{ls}	reatância de dispersão de enrolamento de estator (eixo d e eixo q)
x_{fd}^r	reatância do enrolamento de campo referida ao estator

x'_{lkd}	reatância do enrolamento amortecedor de eixo direto referida ao estator
x'_{lkq1}, x'_{lkq2}	reatâncias dos enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura referidas ao estator
ψ_{ds}^r, ψ_{qs}^r	fluxos mgnéticos de eixo direto e de quadratura da máquina
ψ_{fd}^r	fluxo magnético de enrolamento de campo
ψ_{kd}^r	fluxo magnético de enrolamento amortecedor de eixo direto
$\psi_{kq1}^r, \psi_{kq2}^r$	fluxos magnéticos de enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura
θ_r	posição angular mecânica do rotor
T_{em}	torque eletromagnético
T_{mec}	torque mecânico no eixo do rotor
T_{amort}	torque de amortecimento
H	constante de inércia do rotor
x'_d, x'_q	reatâncias transitórias, de eixo direto e em quadratura respectivamente (em pu ou em ohms conforme o caso)
x''_d, x''_q	reatâncias subtransitórias, de eixo direto e em quadratura respectivamente (em pu ou em ohms conforme o caso)
T'_{do}, T'_{qo}	constantes de tempo transitórias (em segundos) de circuito aberto de eixo direto e em quadratura respectivamente
T''_{do}, T''_{qo}	constantes de tempo subtransitórias (em segundos) de circuito aberto de eixo direto e em quadratura respectivamente
T'_d, T'_q	constantes de tempo transitórias (em segundos) de curto circuito de eixo direto e em quadratura respectivamente
T''_d, T''_q	constantes de tempo subtransitórias (em segundos) de curto circuito de eixo direto e em quadratura respectivamente
x_{potier}	reatância de Potier

x_{ss}	reatância síncrona saturada
x_{sns}	reatância síncrona não saturada
\bar{E}_a, \bar{I}_a	tensão interna (força eletromotriz) e corrente terminal (em fasores)
$L_d(s), L_q(s)$	indutâncias operacionais de eixo direto e em quadratura respectivamente, vistas do lado do estator
T_{dk}	constantes de tempo no numerador e no denominador das indutâncias operacionais de eixo direto $L_d(s)$, $k=1,2,\dots$ (em segundos)
T_{qk}	constantes de tempo no numerador e no denominador das indutâncias operacionais de eixo em quadratura $L_q(s)$, $k=1,2,\dots$ (em segundos)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica

A maioria dos grandes sistemas de energia elétrica atualmente é composta essencialmente de diversos sistemas trifásicos que operam em sincronismo, ou seja, os geradores operam em velocidade constante fazendo com que a frequência elétrica do sistema seja constante assim como as tensões terminais das subestações das usinas. Desse modo as tensões em cada barra do sistema devem ser senoidais de mesma amplitude (salvo quando há transformadores) com frequências também de mesmo valor. As cargas do sistema são essencialmente trifásicas na transmissão, porém na distribuição elas podem ser trifásicas, bifásicas ou monofásicas. A distribuição das cargas monofásicas e bifásicas deve ser tal que o sistema elétrico global forme um sistema trifásico balanceado na geração, transmissão e distribuição.

Na geração as usinas convertem energia mecânica (de combustíveis fósseis, nucleares, hidráulicos e alternativos como é o caso dos recursos energéticos denominados renováveis) em elétrica através do uso de grupos turbina-gerador-controles onde os geradores síncronos predominam em praticamente 100% dos casos. Ao longo da transmissão e da distribuição, uma série de transformadores alteram os níveis de tensão das barras do sistema de acordo com a necessidade de operação.

O sistema elétrico completo é formado por múltiplas fontes de geração de energia elétrica, ou seja, usinas com diversos geradores, e por diversas camadas e níveis de circuitos de transmissão, conferindo ao sistema global considerável grau de interconexões de modo que ele possa resistir aos efeitos das diversas contingências que podem ocorrer sem que haja interrupção de fornecimento de energia para os consumidores na tensão e frequência nominais.

A função primordial do sistema de energia elétrica é a de manter o equilíbrio entre a energia elétrica produzida e a consumida, transportando-a para os diversos pontos de consumo. A energia elétrica, dentre todos os tipos de energia, é a que apresenta maior facilidade de transporte e controle tal que reservas adequadas devem ser controladas devidamente para que a demanda possa ser atendida de maneira contínua ao mínimo custo possível, com o mínimo impacto ecológico e com qualidade. Isso significa atendimento com o mínimo número de possíveis interrupções de fornecimento e com fornecimento ao consumidor em tensão e frequência constantes e com nível baixo de componentes harmônicos na tensão.

O sistema de controle da geração é responsável pelo controle da frequência e da alocação econômica da energia. Ele controla a geração de cada unidade geradora do sistema. Cada unidade geradora, constituída basicamente da parte que manuseia o combustível primário (de combustíveis fósseis, nucleares, hidráulicos e alternativos), da turbina e seus periféricos e do gerador e seus periféricos apresentam um sistema de controle do acionamento primário que realiza o controle da potência ativa a ser fornecida pelo gerador e o controle do sistema de excitação do gerador que controla a potência reativa fornecida pelo gerador.

Os estudos para projeto e operação desse sistema são frequentemente estudos baseados em simulações dinâmicas, entre as quais, a dos sistemas de geração onde a modelagem matemática dinâmica dos componentes (turbina, gerador síncrono, sistema de excitação, sistemas de controle de tensão e de velocidade) é de grande importância. Esse sistema controla a tensão, a frequência, as potências fornecidas por cada um dos geradores. Por último aparece o controle da energia transmitida ao sistema (controle da transmissão) que controla a tensão, as potências ativa e reativa e o fluxo de potência nas linhas, nos elos e no sistema de transmissão de energia elétrica.

Em todas essas etapas de controle, a modelagem matemática dos componentes do sistema possui importância vital.

1.2 A Modelagem Matemática Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica

A estabilidade do sistema de energia elétrica consiste em manter a interconexão de todos os geradores síncronos com o sistema de energia elétrica. Desta forma a compreensão de suas características e a adequada modelagem matemática de seu desempenho dinâmico é muito

importante para o estudo da estabilidade de sistemas de energia elétrica. A modelagem matemática e a análise dos geradores síncronos tem sido sempre um grande desafio [1], [2], [3].

Essa problemática vem sendo estudada desde 1920 e até os dias de hoje ainda preocupa haja vista os diversos blackouts que tem ocorrido em diversos países do mundo incluindo Estados Unidos e Brasil. Diversos fenômenos que existem e se manifestam na prática ainda não estão claramente modelados como: o efeito pelicular, a dispersão de fluxo magnético nos enrolamentos, o efeito da dispersão de fluxo nas cabeças de bobina do estator dos geradores, a histerese magnética, as perdas adicionais e outros.

O uso de técnicas de estimação de parâmetros com algoritmos para atuação em tempo real juntamente com técnicas de inteligência artificial tem sido estudadas e desenvolvidas para ajudarem a resolver problemas e para permitir um melhor controle e desempenho do sistema elétrico, podendo ser consideradas ferramentas matemáticas para uso em um futuro próximo.

Entretanto essas técnicas ainda não tem sido capazes de fornecerem resultados abrangentes e carecem de mais maturidade.

Neste trabalho apresenta-se o uso da modelagem matemática dinâmica desenvolvida em [4] e utilizada na biblioteca de utilitários para sistemas de energia elétrica como é o caso da biblioteca SimPowerSystems do software Matlab/Simulink [5] para simular o comportamento dinâmico de geradores síncronos permitindo o seu uso na simulação da realização de ensaios em geradores síncronos com o objetivo de aperfeiçoar a metodologia de identificar seus parâmetros através de ensaios que podem ser realizados nas fábricas, na plantas ou nas usinas de geração de eletricidade. Esses ensaios, apesar de tem sido desenvolvidos há muito tempo sempre tem apresentado dificuldades no momento da caracterização dos parâmetros dos geradores síncronos.

1.3 A Necessidade dos Parâmetros do Gerador Síncrono para uso em Simulações Dinâmicas de Sistemas de Energia Elétrica.

Diversos modelos matemáticos dinâmicos foram desenvolvidos para estudos de dinâmica e de estabilidade de sistemas de energia elétrica ao longo do tempo, desde os trabalhos de Park publicados em 1929 [6]. Em [7] alguns modelos apropriados para estudos de dinâmica e estabilidade de sistemas de energia elétrica são apresentados e recebem diferentes denominações como: a) o modelo matemático dinâmico do gerador síncrono com três enrolamentos

amortecedores (um de eixo d e dois de eixo q) que é o modelo a ser desenvolvido e estudado neste trabalho. Nessa modelagem aparecem descritos três diferentes intervalos de tempo a serem descritos mais tarde que são: o de regime permanente, o de regime transitório e o de regime subtransitório, b) o modelo em que o período subtransitório é ignorado pelo fato das constantes de tempo subtransitórias de eixo direto e de eixo em quadratura serem supostas suficientemente pequenas.

O número de equações diferenciais elétricas nesse modelo cai de seis no caso anterior para quatro e a esse modelo dá-se o nome de modelo de dois eixos, c) o modelo de um eixo que despreza o transitório de eixo em quadratura no qual uma equação elétrica é eliminada, sobrando apenas três equações, d) um quarto modelo, denominado modelo clássico, é o mais simples de todos e é difícil de ser justificado, porém, incrivelmente ele funciona em curtíssimos intervalos de tempo suficientes para se observar a possibilidade perda de estabilidade de um gerador. Ele é chamado de modelo de força eletromotriz atrás de uma reatância transitória de eixo direto e tem apenas duas equações diferenciais mecânicas. O torque mecânico do acionador é feito constante.

Trata-se de um modelo matemático que vale apenas para os primeiros instantes de oscilação do ângulo de carga do gerador.

Em todos os modelos matemáticos dinâmicos mencionados acima, usados em estudos de dinâmica de sistemas de energia elétrica e, também, em estudos sobre comportamento dinâmico de geradores síncronos para estudos de controle, operação e manutenção, os parâmetros necessários para representá-los matematicamente são de suma importância e não são poucos.

1.4 A Determinação dos Parâmetros do Gerador Síncrono

Para geradores síncronos de pólos lisos (turbogeradores) contabilizam-se pelo menos doze parâmetros necessários para representar a parte elétrica do modelo matemático mais completo do gerador. Além dos parâmetros elétricos deve-se considerar pelo menos três outros mecânicos. No caso dos geradores síncronos de pólos salientes tem-se pelo menos dez parâmetros.

Os parâmetros fundamentais dos geradores síncronos são os parâmetros de seus circuitos elétricos que representam os seus enrolamentos de estator e de rotor. São resistências elétricas e indutâncias. Deles somente as resistências elétricas de enrolamento de estator por fase e de enrolamento de campo podem ser obtidos por medição direta. Os restantes só podem ser

determinados através de cálculos usando todos os dados de projeto do gerador ou obtidos através de ensaios realizados com o gerador.

Nesses ensaios, padronizados por diversas normas internacionais e, principalmente pelo IEEE americano, não é possível obtê-los diretamente. Entretanto consegue-se obter os chamados parâmetros padronizados que são reatâncias e constantes de tempo. Usando-os, é possível, através de modelagem matemática desenvolvida ao longo dos anos, obter expressões dos parâmetros padronizados em função dos parâmetros fundamentais e determinar os parâmetros fundamentais a partir dos padronizados.

Existem diversas metodologias desenvolvidas para a determinação dos parâmetros do modelo matemático dinâmico de geradores síncronos. Dentre elas as mais importantes são: a determinação através de ensaios realizados com o gerador, a determinação através da resposta em frequência em situações de alinhamento do rotor do gerador segundo os eixos direto e em quadratura, a determinação através do uso de técnicas de elementos finitos, a determinação através de perturbações de pequenas intensidades, a determinação em operação através de metodologias de otimização e outras.

1.5 Objetivo e Conteúdo da Tese

O objetivo deste trabalho é o de contribuir para o estudo da determinação de parâmetros dos geradores síncronos de pólos lisos com três enrolamentos amortecedores, sendo um de eixo direto e dois de eixo em quadratura e para a determinação dos parâmetros dos geradores síncronos de pólos salientes, com dois enrolamentos amortecedores, sendo um de eixo direto e outro de eixo em quadratura, através da realização de ensaios adequados para tal descritos na literatura.

Pretende-se através de simulações dinâmicas simular os ensaios destinados a determinar os parâmetros padronizados para avaliar as suas dificuldades e tentar estabelecer procedimentos para a avaliação dos resultados obtidos durante a sua realização. Nas usinas automatizadas muitas vezes a realização de determinados ensaios pode ficar limitada de modo que este trabalho se aplica a mostrar que é possível determinar todos os parâmetros de um gerador síncrono através de algumas medições e dos ensaios de rejeição de carga.

Pretende-se aproveitar a experiência deste trabalho para fornecer subsídios para a realização de ensaios adequados, principalmente os ensaios de rejeição de carga, de modo a permitir a previsão de instrumentos e de software adequado para tratamento de dados.

No capítulo dois apresenta-se a modelagem matemática dinâmica dos geradores síncronos segundo os eixos direto e em quadratura. Desenvolve-se um conjunto de seis equações elétricas e duas equações mecânicas.

No capítulo três são descritos os parâmetros fundamentais e obtidos os parâmetros padronizados em função dos fundamentais. No capítulo quatro são apresentados os principais métodos de ensaios descritos na literatura para determinação de parâmetros padronizados dos geradores síncronos.

No capítulo cinco apresenta-se uma síntese de uso do bloco de simulação “Synchronous Generator” da biblioteca SymPowerSystems do Matlab/Simulink [5] bem como resultados de simulações de ensaios realizados com dois geradores síncronos sendo um de pólos salientes real e existente no sistema de geração de uma concessionária de energia elétrica brasileira cujos dados de gerais de projeto e de parâmetros foram fornecidos pelo fabricante e o outro de pólos lisos cujos dados aparecem em [1]. No capítulo 6 apresenta-se uma discussão sobre o assunto, conclusões e sugestões para novos trabalhos.

Capítulo 2

Modelagem Matemática Dinâmica de Geradores Síncronos

2.1 Introdução

Embora a construção da máquina elétrica síncrona trifásica seja relativamente mais cara do que a da máquina de indução trifásica, o seu maior rendimento é uma vantagem importante quando se trata de potências elevadas como é o caso dos geradores usados em usinas de geração de energia elétrica de alta potência. Dessa forma, os geradores síncronos trifásicos são comumente usados como gerador na maioria dos sistemas de geração a vapor, a gás, e a energia hidráulica no mundo inteiro. Além disso, deve-se considerar que a máquina síncrona apresenta uma relação constante entre a sua velocidade mecânica e a sua frequência elétrica, fato que não ocorre com as máquinas de indução que, quando usadas como gerador precisam do auxílio de conversores eletrônicos de potência.

O gerador síncrono pode ser de rotor de pólos lisos (rotor cilíndrico) ou de rotor de pólos salientes. As construções de pólos salientes são usadas na maior parte das vezes em aplicações de baixa velocidade, menores do que 1500 *rpm* onde o diâmetro do rotor pode ser muito grande, por acomodar uma grande quantidade de pólos, em relação ao comprimento do rotor. Os geradores síncronos de pólos lisos, para velocidades maiores do que 1500 *rpm* apresentam comprimento de rotor muito maior do que o seu diâmetro.

Os geradores síncronos de pólos salientes são freqüentemente usados como hidrogeradores devido ao fato de que as velocidades nos aproveitamentos hidrelétricos são sempre menores do que 1500 *rpm* e se exige grande inércia das partes girantes da turbina e do gerador para operações em baixas velocidades, usuais em aplicações com turbinas hidráulicas.

A construção do rotor cilíndrico é favorável em aplicações de velocidades elevadas (usinas termoelétricas e a gás) onde o diâmetro do rotor tem que ser pequeno para sustentar o esforço mecânico da força centrífuga dentro de limites aceitáveis.

Os geradores síncronos apresentam no estator, independentemente do tipo de rotor, três enrolamentos distribuídos, balanceados, iguais e defasados de 120 graus um em relação aos outros, como mostrado esquematicamente na figura 2.1. Esses enrolamentos são denominados enrolamentos de armadura da máquina porque o estator do gerador síncrono constitui a parte magnética chamada de armadura e porque é nesse enrolamento que ocorre a força eletromotriz induzida responsável pela tensão terminal do gerador. Por esses enrolamentos circula um sistema trifásico de correntes alternadas senoidais quando a máquina opera em regime permanente sob condições equilibradas de tensão e de carga. Dessa forma, na armadura do gerador síncrono (estator) tem-se um enrolamento que é denominado enrolamento trifásico e balanceado.

No rotor eles apresentam dois enrolamentos: um deles, denominado enrolamento de campo, que produz o campo magnético principal da máquina quando alimentado em tensão contínua e percorrido por corrente contínua em regime permanente. O outro, denominado enrolamento amortecedor, apresenta-se curto circuitado e tem a finalidade principal de amortecer oscilações de origem eletromecânica do rotor durante a operação do gerador.

No caso do gerador síncrono de rotor de pólos salientes o enrolamento de campo é concentrado em cada pólo físico da máquina, chamado peça polar. Os pólos são construídos com lâminas de material magnético, no caso da máquina de pólos lisos o enrolamento de campo é distribuído em ranhuras ao longo da superfície circular do rotor.

O enrolamento amortecedor, no caso de máquinas de pólos salientes, é constituído de barras de cobre curto circuitadas montadas em ranhuras feitas nas faces dos pólos. Essas barras podem ser curto circuitadas por um anel de cobre, em cada lado dos pólos, como nas gaiolas de rotores de máquinas de indução. O anel pode ser fechado ao longo da circunferência do rotor ou pode ser formado de pedaços de anel que só curto circuitam as barras de cada pólo. No caso de máquinas de pólos lisos, geralmente, o enrolamento amortecedor não existe fisicamente, porém como essas máquinas são de rotor de pólos sólidos (não laminados como são os das máquinas de pólos salientes por causa da alta velocidade do rotor) existirá sempre o efeito amortecedor devido à existência do efeito pelicular na superfície do rotor sólido de aço.

O gerador síncrono básico para o estudo que será aqui realizado apresenta dois pólos salientes no rotor sobre os quais são enroladas duas bobinas (enrolamento de campo). O enrolamento de campo é alimentado com corrente contínua que, para um valor constante, produz uma força magnetomotriz também constante. Ao se movimentar com velocidade angular ω_{rm} , o enrolamento de rotor produz um campo magnético girante no entreferro da máquina.

Por ter três enrolamentos de estator idênticos e defasados de 120 graus entre si conduzindo correntes alternadas de frequência elétrica f_s (velocidade angular $\omega_s = 2\pi f_s$) e um enrolamento de campo no rotor que conduz corrente contínua e que gira com velocidade do rotor ω_{sm} ambas as velocidades angulares, quando vistas de um mesmo enrolamento devem ter o mesmo valor para que haja conversão eletromecânica de energia (princípio fundamental da conversão eletromecânica de energia [8]). Dessa maneira a velocidade angular mecânica de giro do rotor, ω_{sm} , de um gerador síncrono, em regime permanente, deverá ter o valor $\omega_{sm} = (2/P)\omega_s$, onde P é o número de pólos da máquina.

Daí a denominação de gerador síncrono, ou seja, máquina de corrente alternada trifásica cujo rotor gira na velocidade síncrona com a frequência da tensão de alimentação dos enrolamentos de estator. Para caracterizar melhor a velocidade do rotor tanto em regime permanente como em regime transitório ela será denominada, daqui para frente, de ω_r ao invés de ω_{sm} como denominada anteriormente por razões estritamente didáticas.

Na figura 2.1 o enrolamento trifásico do estator apresenta um enrolamento por fase com eixos magnéticos defasados de 120 graus e representados pelas letras a , b e c . O eixo magnético de qualquer enrolamento representa a direção e o sentido do fluxo magnético produzido quando uma corrente elétrica por ele circula. O enrolamento de campo será representado neste trabalho por fd e seu eixo magnético será representado pela letra d (eixo direto do enrolamento de campo). Os enrolamentos amortecedores, que serão detalhados em seguida, são representados pelas letras kd e kq tem eixos magnéticos d coincidente com o eixo magnético do enrolamento de campo e q que está em quadratura com o eixo d do campo.

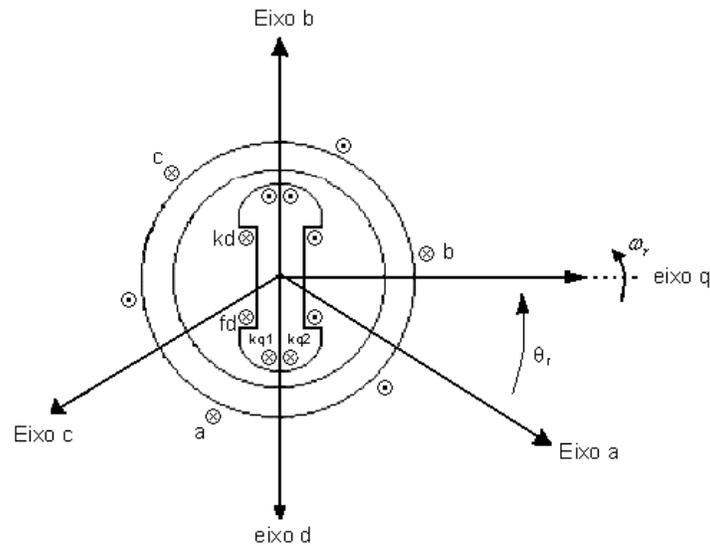


Figura 2.1 - Esquema dos eixos magnéticos dos enrolamentos de um gerador síncrono

Devido ao fato dos geradores síncronos terem um sistema trifásico de correntes alternadas no enrolamento de estator e de terem corrente contínua no enrolamento de campo e também ao fato dos geradores síncronos de pólos salientes terem entreferro bastante variável ao longo de toda a sua circunferência, para modelá-lo matematicamente é necessário usar um sistema de referência constituído de dois eixos ortogonais denominados eixo direto (eixo d) e eixo em quadratura (eixo q).

A esse sistema ortogonal de coordenadas d e q dá-se o nome de sistema $dq0$ sendo o “0” representativo de uma seqüência zero de tensões, correntes elétricas ou fluxos concatenados, quando há desbalanceamento de fases no sistema trifásico de forças eletromotrizes produzidas no enrolamento de estator. Algumas publicações como [4] chamam esse sistema de $qd0$ colocando o eixo q atrasado em relação ao eixo d com referência ao sentido anti-horário. Trata-se apenas de uma convenção já as posições dos eixos não alteram o desempenho da modelagem a ser mostrada mais a frente. O sistema de referência $dq0$ pode ser um sistema estacionário ou pode estar girando com qualquer velocidade ao longo do rotor do gerador nos estudos de dinâmica de máquinas elétricas. São usuais nos estudos de dinâmicas de máquinas elétricas os sistemas $dq0$ girarem com a mesma velocidade do rotor, com a velocidade síncrona ou estarem em repouso (sistema $dq0$ estacionário).

É interessante ressaltar nesse momento que não se deve confundir o sistema de eixos dq dos enrolamentos de rotor (campo e amortecedores) com o sistema de eixos $dq0$ de referência. Eles são distintos. A referência básica utilizada para ser a origem da contagem do deslocamento do rotor (ângulo do rotor) é sempre tomada como o eixo geométrico da fase a do enrolamento de estator.

O enrolamento de campo, que é constituído de bobinas montadas sobre os corpos dos dois pólos norte e sul, tem seu eixo magnético coincidente com o eixo geométrico dos pólos norte e sul da máquina, denominado eixo direto ou eixo d . O eixo em quadratura (eixo q) forma com o eixo direto um ângulo de 90 graus elétricos e o enrolamento trifásico de armadura, formado por três enrolamentos monofásicos defasados fisicamente de 120 graus entre si e distribuídos pelas diversas ranhuras que se encontram na parte magnética do estator, é representado pelos eixos a , b e c que podem ser projetados sobre os eixos d e q , do sistema de referência, através de uma transformação matemática denominada transformação abc para $dq0$ que será vista com detalhes mais à frente.

Os três enrolamentos de armadura podem ser conectados em ligação estrela (com ou sem neutro acessível, portanto com 3 ou 4 fios) ou em ligação delta (com 3 fios) fornecendo energia elétrica para o sistema de energia elétrica trifásico ou alimentando um consumidor de energia elétrica trifásica isolado em seus terminais.

Nos geradores síncronos de pólos salientes a forma da sapata polar é tal que o comprimento de entreferro varia de forma aproximadamente proporcional ao inverso do seno do ângulo do rotor correspondente ao ponto considerado. Dessa forma a relutância do entreferro ao longo da sapata do pólo pode ser descrita por uma função aproximadamente senoidal em função do ângulo do rotor.

Por isso num gerador síncrono de pólos salientes operando sem carga, com o rotor girando na velocidade síncrona e com corrente elétrica contínua circulando pelo enrolamento de campo, a força magnetomotriz do campo produzirá um fluxo magnético girante no entreferro. O fluxo girante terá direção ao longo dos dois pólos e com sentido dado pela regra da mão direita que coincidirá com o sentido do eixo direto (eixo d). Esse fluxo magnético terá variação senoidal com o ângulo do rotor. A sua variação dentro das bobinas do enrolamento de estator produzirá três forças eletromotrizes (fem) pulsantes induzidas nos enrolamentos trifásicos do estator com um único valor eficaz e frequência igual à frequência de rotação do rotor, denominada tensão interna

do enrolamento de estator. A soma algébrica das forças eletromotrizes pulsantes, na velocidade síncrona, produzirá uma onda viajante (girante) ao longo do entreferro.

A força eletromotriz, dada de acordo com a Lei de Lenz, por $d\lambda_{af} / dt$, onde λ_{af} é o fluxo produzido pela corrente que circula no enrolamento de campo concatena-se com cada fase do enrolamento de estator. Ela é senoidal e será representada por um vetor que terá como direção a direção do eixo em quadratura (eixo q) e como sentido o sentido do eixo em quadratura, conforme mostrado na figura 2.2.

Nessa figura pode-se ver, também, os eixos magnéticos dos campos magnéticos induzidos nas fases a , b e c dos enrolamentos de estator.

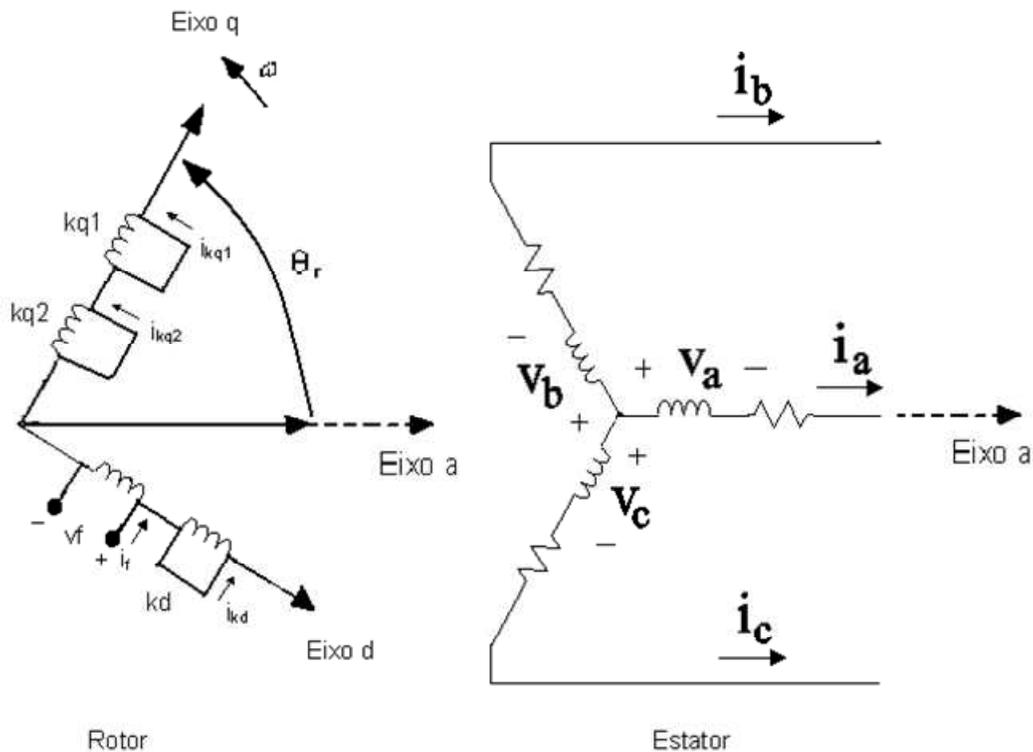


Figura 2.2 - Representação dos enrolamentos por circuitos elétricos equivalentes de uma máquina idealizada

Conforme descrito nas referências [3], [4], [10] e [11], tanto o gerador síncrono de pólos salientes como o de pólos lisos pode ser modelado matematicamente por duas equações diferenciais que descrevem os dois circuitos elétricos constituídos pelos enrolamentos de estator, segundo os eixos d e q do sistema de referência, e por três ou mais equações diferenciais que descrevem os circuitos elétricos de enrolamentos de rotor, segundo os eixos d e q , dependendo do

número de enrolamentos amortecedores que forem considerados. Adicionalmente há também equações de conservação de energia, como será visto à frente.

Os geradores de pólos salientes são geralmente descritos por dois enrolamentos amortecedores sendo um de eixo d (kd) e outro de eixo q (kq). Diz-se que o gerador é de dois enrolamentos amortecedores enquanto que os geradores de pólos lisos são descritos, em geral, por um enrolamento amortecedor de eixo d (kd) e por dois enrolamentos de eixo em quadratura ($kq1$ e $kq2$) e eles são ditos geradores de três enrolamentos amortecedores. Na verdade só há um enrolamento amortecedor real mais seus efeitos, devido à geometria da máquina, precisam ser descritos por mais de um enrolamento como será visto no capítulo 3.

2.2 Modelagem Matemática Dinâmica do Gerador Síncrono Trifásico

2.2.1 Equações de Tensões do Gerador Síncrono em Variáveis Trifásicas abc no Estator

No gerador síncrono supõe-se como sentido positivo das correntes dos enrolamentos de estator o sentido de corrente saindo pelos terminais dos enrolamentos, como mostrado na figura 2.2, que são os mesmos sentidos dos eixos magnéticos a , b e c [4].

Na figura 2.2 o eixo q é o eixo da fem do estator e também o eixo dos enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura $kq1$ e $kq2$ enquanto que o eixo d é o eixo magnético dos enrolamentos de campo fd e amortecedor de eixo direto kd . O sistema de eixos gira na velocidade do rotor que, para geradores síncronos, é a velocidade síncrona da máquina em regime permanente.

Park [6] foi quem apresentou o primeiro trabalho usando esse sistema de eixos para a máquina síncrona e definiu as transformações de coordenadas de um sistema trifásico de variáveis abc num sistema de coordenadas $qd0$ que gira na velocidade do rotor do gerador. Essa transformação recebeu o seu nome (Transformação de Park) e transforma as variáveis trifásicas (tensões, correntes e fluxos magnéticos) de coordenadas abc em coordenadas $qd0$ e vice-versa.

As equações de tensão dos enrolamentos do estator e do rotor em função das variáveis abc da máquina síncrona podem ser expressas em forma matricial para um gerador [4], como:

$$v_{abcs} = -R_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (2.1)$$

$$v_{qdr} = -R_r i_{qdr} + p \lambda_{qdr} \quad (2.2)$$

Nessas equações p é o operador de diferenciação ($p = d / dt$). Tanto o vetor de tensões nas fases a , b e c como o de correntes elétricos e de fluxos magnéticos concatenados mostrados nas equações (2.1) e (2.2) podem ser chamados de variáveis genéricas e representados pela letra f e denotadas pelos vetores:

$$\begin{aligned} (f_{abc})^T &= [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \\ (f_{qdr})^T &= [f_{kq1} \quad f_{kq2} \quad f_{jd} \quad f_{kd}] \end{aligned} \quad (2.3)$$

Nessas variáveis f_{as} , f_{bs} e f_{cs} representam as componentes do vetor f nos eixos a , b e c . O vetor fluxo concatenado com os diversos enrolamentos de estator e de rotor pode ser escrito como [4]:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abc} \\ i_{qdr} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Nessas equações L_s , L_r e L_{sr} são matrizes de indutâncias próprias e mútuas entre enrolamentos de estator e de rotor definidas conforme se vê a seguir:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) \\ -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2} L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Expressando as auto e mútuas indutâncias dos enrolamentos amortecedores. A matriz indutância L_{sr} e L_r pode ser expressa como:

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{skq1} \cos \theta_r & L_{skq2} \cos \theta_r & L_{sfd} \text{sen} \theta_r & L_{skd} \text{sen} \theta_r \\ L_{skq1} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{skq2} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{sfd} \text{sen} \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{skd} \text{sen} \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{skq1} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{skq2} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{sfd} \text{sen} \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{skd} \text{sen} \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lkq1} + L_{mkq1} & L_{kq1kq2} & 0 & 0 \\ L_{kq1kq2} & L_{lkq2} + L_{mkq2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lfd} + L_{mfd} & L_{fdkd} \\ 0 & 0 & L_{fdkd} & L_{lkd} + L_{mkd} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Nessas equações os valores de L_A , L_B , L_{sfd} , L_{mfd} são definidos [4]:

$$\begin{aligned} L_A &= \left(\frac{N_s}{2} \right)^2 \pi \mu_0 r l \alpha_1 \\ L_B &= \frac{1}{2} \left(\frac{N_s}{2} \right)^2 \pi \mu_0 r l \alpha_2 \\ L_{sfd} &= \left(\frac{N_s}{2} \right) \left(\frac{N_f}{2} \right) \pi \mu_0 r l \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2} \right) \\ L_{mfd} &= \left(\frac{N_f}{2} \right)^2 \pi \mu_0 r l \left(\alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Onde:

μ_0 = Permeabilidade absoluta do ar

r = Raio médio do entreferro da máquina

l = Comprimento axial do entreferro da máquina

N_s = Número de espiras de cada enrolamento distribuído de fase do estator

N_f = Número de espiras do enrolamento de campo.

α_1 e α_2 são valores tais que: $1/(\alpha_1 + \alpha_2) = g_{\min}$ e $1/(\alpha_1 - \alpha_2) = g_{\max}$ com g sendo o comprimento do entreferro.

Em (2.5) $L_A > L_B$ além de isso L_B é zero para uma máquina de rotor liso, os subscritos s e r denotam variáveis associadas com os enrolamentos do estator e do rotor respectivamente. Em

(2.5) e (2.7) as indutâncias de dispersão dos enrolamentos de estator e de rotor são denotadas com o subscrito l .

Os subscritos $skq1$, $skq2$, sfd , e skd em (2.6) denotam indutâncias mútuas entre os enrolamentos do estator e do rotor, as indutâncias de magnetização de eixo direto e de eixo em quadratura do enrolamento do estator por fase, são definidas como:

$$L_{md} = \frac{3}{2}(L_A + L_B) \quad (2.9)$$

$$L_{mq} = \frac{3}{2}(L_A - L_B) \quad (2.10)$$

Com isto é fácil mostrar que:

$$\begin{aligned} L_{skq1} &= \left(\frac{N_{kq1}}{N_s}\right)\left(\frac{2}{3}\right)L_{mq} & L_{skq2} &= \left(\frac{N_{kq2}}{N_s}\right)\left(\frac{2}{3}\right)L_{mq} \\ L_{sfd} &= \left(\frac{N_{fd}}{N_s}\right)\left(\frac{2}{3}\right)L_{md} & L_{skd} &= \left(\frac{N_{kd}}{N_s}\right)\left(\frac{2}{3}\right)L_{md} \\ L_{mkq1} &= \left(\frac{N_{kq1}}{N_s}\right)^2\left(\frac{2}{3}\right)L_{mq} & L_{mkq2} &= \left(\frac{N_{kq2}}{N_s}\right)^2\left(\frac{2}{3}\right)L_{mq} \\ L_{mfd} &= \left(\frac{N_{fd}}{N_s}\right)^2\left(\frac{2}{3}\right)L_{md} & L_{mkd} &= \left(\frac{N_{kd}}{N_s}\right)^2\left(\frac{2}{3}\right)L_{md} \\ L_{kq1kq2} &= \left(\frac{N_{kq2}}{N_{kq1}}\right)L_{mkq1} & L_{kq2kq1} &= \left(\frac{N_{kq1}}{N_{kq2}}\right)L_{mkq2} \\ L_{fdkd} &= \left(\frac{N_{kd}}{N_{fd}}\right)L_{mfd} & L_{kdfd} &= \left(\frac{N_{fd}}{N_{kd}}\right)L_{mkd} \end{aligned} \quad (2.11)$$

É conveniente incorporar a seguinte substituição de variáveis a qual refere às variáveis do rotor para os enrolamentos do estator.

$$\dot{i}_j = \left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{N_j}{N_s}\right)\dot{i}_j \quad (2.12)$$

$$v_j' = \left(\frac{N_s}{N_j} \right) v_j \quad (2.13)$$

$$\lambda_j' = \left(\frac{N_s}{N_j} \right) \lambda_j \quad (2.14)$$

Onde j pode ser $kq1$, $kq2$, fd , ou kd , agora referindo as variáveis dos enrolamentos de rotor para o enrolamento do estator, os vetores fluxos concatenados podem ser escritos como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc}' \\ \lambda_{qdr}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr}' \\ \frac{2}{3} (L_{sr}')^T & L_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abcs}' \\ i_{qdr}' \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$L_{sr}' = \begin{bmatrix} L_{mq} \cos \theta_r & L_{mq} \cos \theta_r & L_{md} \text{sen} \theta_r & L_{md} \text{sen} \theta_r \\ L_{mq} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{mq} \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{md} \text{sen} \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{md} \text{sen} \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{mq} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{mq} \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{md} \text{sen} \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{md} \text{sen} \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$L_r' = \begin{bmatrix} L_{lkq1}' + L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & L_{lkq2}' + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{ffd}' + L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{lkd}' + L_{md} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

As equações de tensão, expressas em termos de variáveis abc referidas para o enrolamento do estator, podem ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} v_{abcs}' \\ v_{qdr}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_s & pL_{sr}' \\ \frac{2}{3} p(L_{sr}')^T & r_r' + pL_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{abcs}' \\ i_{qdr}' \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Em (2.18) e (2.19):

$$r'_j = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{N_s}{N_j}\right)^2 r_j \quad (2.19)$$

$$L'_{lj} = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{N_s}{N_j}\right)^2 L_{lj} \quad (2.20)$$

Onde novamente, j pode ser $kq1$, $kq2$, fd , ou kd . A tensão de (2.18) é válida para a direção positiva das correntes do estator assumindo-se saindo dos terminais do estator (geradores).

2.2.2 Equação de Torque Eletromagnético

A energia armazenada no campo magnético de uma máquina síncrona é dada por:

$$W_{arm} = \frac{1}{2} (i_{abcs})^T (L_s - L_{ls}I) i_{abcs} - (i_{abcs})^T L'_{sr} i'_{qdr} + \frac{1}{2} \left(\frac{3}{2}\right) (i'_{qdr})^T (L'_r - L'_{lr}I) i'_{qdr} \quad (2.21)$$

De acordo com [4], I é a matriz identidade e L'_{lr} é uma matriz diagonal cuja diagonal é $[L'_{lqk1} \ L'_{lqk2} \ L'_{lfd} \ L'_{lkd}]$.

$$T_{em} = \frac{\partial}{\partial \theta_r} W_{arm}(\theta_r) \quad (2.22)$$

$$T_{em} = \left(\frac{P}{2}\right) \left(-\frac{1}{2} (i_{abcs})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L_s - L_{ls}I] i_{abcs} + (i_{abcs})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L'_{sr}] i'_{qdr} \right) \quad (2.23)$$

2.2.3 Equações de Transformação de Variáveis abc para $dq0$

Uma transformação das variáveis trifásicas dos elementos de um circuito estacionário abc para um sistema de referência arbitrário $dq0$ girando com velocidade ω arbitrária pode ser expressa da seguinte forma [4]:

$$f_{qd0s} = K_s f_{abcs} \quad (2.24)$$

onde:

$$(f_{qd0s})^T = [f_{qs} \ f_{ds} \ f_{0s}] \quad (2.25)$$

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (2.26)$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen} \theta & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (2.28)$$

onde ξ é uma variável de integração. A transformação inversa desta transformação é feita pela matriz $(K_s)^{-1}$ como se vê abaixo:

$$(K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen} \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

f = Variável genérica que pode representar tensão, corrente ou fluxo concatenado.

T = Notação de matriz transposta (observa-se que a matriz de transformação K_s definida como foi tem inversa igual à transposta de modo que a transformação definida será invariante em potência).

s = Notação que indica que as variáveis transformadas estão associadas a circuitos estacionários.

A transformação de variáveis pode ser aplicada para variáveis de quaisquer naturezas e formas de onda, porém ela é mais apropriada para aplicações em variáveis senoidais, trifásicas e equilibradas.

2.2.4 Equações de Tensões Referenciadas ao Rotor

R.H. Park foi o primeiro pesquisador a incorporar uma transformação de variáveis na análise do gerador síncrono [6], transformando as variáveis do estator para o sistema de referência $dq0$ com velocidade do rotor que elimina as variações das indutâncias com tempo nas equações de tensões.

Após algebrismos necessários [4] obtém-se as equações de tensões para os enrolamentos do estator escritas no sistema $dq0$, girando na velocidade do rotor, como mostrado nas equações (2.30) e (2.31) a seguir apresentadas:

$$v_{qd0s}^r = -R_s i_{qd0s}^r + \omega_r \lambda_{dqs}^r + p \lambda_{qd0s}^r \quad (2.30)$$

$$v_{qdr}^r = R_r i_{qdr}^r + p \lambda_{qdr}^r \quad (2.31)$$

Nessas equações:

$$\left(\lambda_{dqs}^r \right)^T = \left[\lambda_{ds}^r \quad -\lambda_{qs}^r \quad 0 \right] \quad (2.32)$$

Para um sistema magneticamente linear, os fluxos concatenados com os diversos enrolamentos podem ser expressos na forma vetorial em coordenadas do sistema $dq0$ fixo ao rotor como:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s}^r \\ \lambda_{qdr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s^r L_s (K_s^r)^{-1} & K_s^r L_{sr}^r \\ \frac{2}{3} (L_{sr}^r)^T (K_s^r)^{-1} & L_r^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qd0s}^r \\ i_{qdr}^r \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

onde:

$$K_s^r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{sen } \theta_r & \text{sen}\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$(K_s^r)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \text{sen } \theta_r & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \text{sen}\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

então usando identidades trigonométricas pode-se escrever:

$$K_s^r L_s (K_s^r)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$K_s^r L_{sr}' = \begin{bmatrix} L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$\frac{2}{3} (L_{sr}')^T (K_s^r)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Expandindo e usando (2.30) e (2.31) e expressando as tensões e os fluxos concatenados em termos de reatâncias, obtém-se:

$$v_{qs}^r = -R_s i_{qs}^r + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{ds}^r + \frac{P}{\omega_b} \psi_{qs}^r \quad (2.39)$$

$$v_{ds}^r = -R_s i_{ds}^r - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qs}^r + \frac{P}{\omega_b} \psi_{ds}^r \quad (2.40)$$

$$v_{0s} = -R_s i_{0s} + \frac{P}{\omega_b} \psi_{0s} \quad (2.41)$$

$$v_{kq1}^r = R_{kq1}^i i_{kq1}^r + \frac{P}{\omega_b} \psi_{kq1}^r \quad (2.42)$$

$$v_{kq2}^r = R_{kq2}^i i_{kq2}^r + \frac{P}{\omega_b} \psi_{kq2}^r \quad (2.43)$$

$$v_{fd}^r = R_{fd}^i i_{fd}^r + \frac{P}{\omega_b} \psi_{fd}^r \quad (2.44)$$

$$v_{kd}^r = R_{kd}^i i_{kd}^r + \frac{P}{\omega_b} \psi_{kd}^r \quad (2.45)$$

Nessas equações ω_b é a velocidade base elétrica angular usada para calcular as reatâncias indutivas. Trabalhando com as equações (2.33) a (2.38) obtém-se os fluxos concatenados com os enrolamentos ds , qs , $0s$, fd , kd , $kq1$ e $kq2$ como se vê a seguir:

$$\begin{aligned} \psi_{qs}^r &= -x_{ls} i_{qs}^r + x_{mq} \left(-i_{qs}^r + i_{kq1}^r + i_{kq2}^r \right) \\ \psi_{ds}^r &= -x_{ls} i_{ds}^r + x_{md} \left(-i_{ds}^r + i_{fd}^r + i_{kd}^r \right) \\ \psi_{0s} &= -x_{ls} i_{0s} \\ \psi_{kq1}^r &= x_{lkq1}^i i_{kq1}^r + x_{mq} \left(-i_{qs}^r + i_{kq1}^r + i_{kq2}^r \right) \\ \psi_{kq2}^r &= x_{lkq2}^i i_{kq2}^r + x_{mq} \left(-i_{qs}^r + i_{kq1}^r + i_{kq2}^r \right) \\ \psi_{fd}^r &= x_{lfd}^i i_{fd}^r + x_{md} \left(-i_{ds}^r + i_{fd}^r + i_{kd}^r \right) \\ \psi_{kd}^r &= x_{lkd}^i i_{kd}^r + x_{md} \left(-i_{ds}^r + i_{fd}^r + i_{kd}^r \right) \end{aligned} \quad (2.46)$$

Das equações diferenciais (2.39) a (2.46) que representa a parte elétrica da modelagem dinâmica do gerador síncrono pode-se concluir que os parâmetros elétricos do gerador síncrono

necessários para a resolução das equações são: as resistências elétricas $R_s, R_{fd}, R_{kd}, R_{kq1}, R_{kq2}$, as reatâncias de dispersão $x_{ls}, x_{ffd}, x_{lkd}, x_{lkq1}, x_{lkq2}$ e as reatâncias de magnetização x_{md} e x_{mq} .

São ao todo doze parâmetros que devem ser conhecidos para permitir a simulação do comportamento dinâmico dos geradores síncronos usando a modelagem acima exposta.

2.2.5 Equação do Torque Eletromagnético do Gerador em Variáveis $qd0$

Usando as matrizes de transformação (2.27) e (2.29) obtém-se:

$$T_{em} = \frac{P}{2} \left[(K_s^r)^{-1} (i_{qd0s}^r)^T \right] \left[-\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L_s - L_{ls} I] (K_s^r)^{-1} i_{qd0s}^r + \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L_{sr}'] i_{qdr}^r \right] \quad (2.47)$$

Após substituições usando as relações vistas anteriormente pode-se escrever:

$$T_{em} = \left(\frac{3}{2} \right) \frac{P}{2} \left[L_{md} (-i_{ds}^r + i_{fd}^r + i_{kd}^r) i_{qs}^r - L_{mq} (-i_{qs}^r + i_{kq1}^r + i_{kq2}^r) i_{ds}^r \right] \quad (2.48)$$

$$T_{em} = \frac{3P}{4\omega_b} (\psi_{ds}^r i_{qs}^r - \psi_{qs}^r i_{ds}^r) \quad (2.49)$$

2.2.6 Ângulo de Potência do Gerador

O desplazamiento angular do rotor geralmente referenciado para o valor máximo positivo da componente fundamental da tensão terminal da fase a é definido como ângulo do rotor ou de potência do gerador (δ) em radianos elétricos:

$$\begin{aligned} \delta &= \theta_r - \theta_{ev} \\ \delta &= \int_0^t [\omega_r(t) - \omega_e] dt + \theta_r(0) - \theta_{ev}(0) \end{aligned} \quad (2.50)$$

θ_r e θ_{ev} são ângulos dos eixos q_r e q_e do rotor e do sistema de referência que gira a velocidade síncrona, respectivamente, medidos com respeito ao eixo estacionário do enrolamento da fase a do estator.

A diferença $\omega_r(t) - \omega_e$ será zero quando o gerador estiver em regime permanente, porque o primeiro termo que é a velocidade do rotor alcançará a velocidade síncrona ω_e em regime permanente.

2.2.7 Equação de Conservação de Energia do Sistema Gerador e Turbina ou Equação Eletromecânica

Em regime permanente o conjugado mecânico fornecido ao gerador pela turbina é igual ao conjugado eletromagnético do gerador somado ao conjugado de perdas rotacionais (magnéticas elétricas e mecânicas) e de perdas adicionais (correntes parasitas nos condutores, componentes harmônicos em geral) em geral desprezadas. Se a diferença entre esses dois conjugados não for nula o conjunto turbina-gerador estará acelerando ou freando o gerador e a sua velocidade estará, respectivamente aumentando ou diminuindo.

Em geral, pelo fato das perdas rotacionais e adicionais não serem perfeitamente conhecidas para quaisquer condições elétrica e mecânica de operação da máquina, elas são desprezadas trabalhando-se com velocidades transitórias que, embora não sejam perfeitamente corretas, não estão muito longe do valor correto já que aquelas perdas não são muito grandes pois, os grandes geradores síncronos apresentam rendimentos superiores a 96%.

Qualquer variação no conjugado de saída (conjugado eletromagnético ou potência eletromagnética) deverá ser sustentada pela energia armazenada na massa rotativa, provocando alteração na velocidade. Então, o desequilíbrio entre o conjugado mecânico e o conjugado eletromagnético deve acarretar aceleração ou desaceleração da máquina. A dinâmica do rotor do conjunto turbina e gerador é dada pela seguinte equação:

$$T_{mec} - T_{em} - T_{amort} = \frac{2J}{P} \frac{d\omega_r(t)}{dt} \quad (2.51)$$

Nesta equação J é o momento de inércia da massa girante (rotor da turbina e rotor do gerador), P é o número de pólos do gerador, $\omega_r(t)$ é a velocidade angular do rotor do conjunto composto por gerador e turbina, T_{mec} é o torque aplicado ao eixo pela turbina, T_{amort} é o torque de perdas ou de amortecimento (perdas rotacionais e adicionais) e T_{em} é o torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador, conforme a equação (2.49). O conjugado de amortecimento pode ser modelado por:

$$T_{amort} = k_v \omega_{rm} + k_a \omega_{rm}^2 = k_v \frac{2}{P} \omega_r + k_a \left(\frac{2}{P} \omega_r \right)^2 \quad (2.52)$$

onde:

ω_{rm} = Velocidade mecânica do rotor.

k_a, k_v = Coeficientes de amortecimento ou de perdas mecânicas.

Capítulo 3

Parâmetros Elétricos de Geradores Síncronos para Modelagem Matemática Dinâmica

3.1 Introdução

A determinação dos valores dos parâmetros dos geradores síncronos é muito importante para que, a partir da modelagem matemática dinâmica dos geradores mostrada no capítulo anterior, seja possível prever o comportamento dinâmico dos mesmos e também dos sistemas de energia elétrica que eles alimentam através de simulações digitais.

Com base nos resultados dessas simulações é possível tomar-se decisões como as de realizar estudos de estabilidade dinâmica do sistema de energia elétrica, realizar ajustes dos sistemas de regulação de velocidade e de excitação de cada gerador, realizar ajustes da proteção do sistema de energia elétrica, de estudar os efeitos da saída ou entrada de uma carga ou de linhas, de determinação de limites de operação do sistema e de realizar os demais tipos de estudos pertinentes e necessários à operação de um sistema dinâmico.

Dessa forma é necessário que as simulações descrevam satisfatoriamente o comportamento real do sistema analisado. Para que isso seja possível a modelagem matemática dinâmica do gerador, além de adequada, deve contar com os valores mais confiáveis possíveis dos parâmetros do modelo matemático dinâmico.

Como já visto, os parâmetros elétricos fundamentais dos geradores síncronos são as resistências dos enrolamentos de estator por fase, as resistências elétricas do enrolamento de campo e amortecedores, as reatâncias de dispersão desses enrolamentos e as reatâncias de magnetização de eixo direto e de eixo em quadratura. Entretanto, desses parâmetros os únicos que podem ser medidos diretamente são as resistências dos enrolamentos de estator por fase e do

enrolamento de campo. Os demais têm de ser obtidos indiretamente através de ensaios que podem ser realizados e que serão descritos neste trabalho.

Os ensaios acima mencionados não permitem a determinação direta dos parâmetros fundamentais acima citados mas sim a determinação de parâmetros padronizados que são funções dos parâmetros fundamentais. Os parâmetros elétricos padronizados são as reatâncias síncronas de eixo direto e de eixo em quadratura (x_d e x_q), as reatâncias transitórias de eixo direto e de eixo em quadratura (x'_d e x'_q), as reatâncias subtransitórias de eixo direto e de eixo em quadratura (x''_d e x''_q), as constantes de tempo transitórias e subtransitórias de circuito aberto (T'_{do} , T''_{do} , T'_{qo} , T''_{qo}) e as constantes de tempo transitórias e subtransitórias de curto-circuito (T'_d , T''_d , T'_q , T''_q).

Neste capítulo são apresentados os parâmetros operacionais dos geradores síncronos estudados por Park [6], entre outros pesquisadores. Eles são apresentados a partir dos circuitos elétricos equivalentes de eixo direto e de eixo em quadratura do gerador síncrono para efeito de resposta em frequências, vistos do lado do estator, conforme proposto em [4] e [1], aqui denominados circuitos equivalentes operacionais do gerador síncrono. A partir dos parâmetros operacionais é possível determinar os parâmetros padronizados necessários para, finalmente, determinar os parâmetros fundamentais dos geradores síncronos.

É interessante lembrar novamente que os geradores síncronos de pólos lisos são usualmente representados com um enrolamento amortecedor de eixo direto e com dois enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura no rotor. Os geradores síncronos de pólos salientes são representados com um enrolamento amortecedor de eixo direto e com um enrolamento amortecedor de eixo em quadratura. Baseado nesta hipótese é que se desenvolve este trabalho.

3.2 Obtenção de Parâmetros Operacionais de Geradores Síncronos

Neste tópico determina-se expressões para os parâmetros operacionais de um gerador síncrono que são as indutâncias (ou reatâncias) operacionais de eixo direto e de eixo em quadratura $L_{ds}(s)$ e $L_{qs}(s)$ em função dos parâmetros fundamentais que são as resistências elétricas dos enrolamentos de estator e de rotor, as reatâncias (ou indutâncias) de dispersão dos enrolamentos de estator e de rotor e as reatâncias de magnetização de eixos direto e em quadratura. Para isso utiliza-se os circuitos equivalentes operacionais de eixo direto e de eixo em

quadratura de geradores síncronos. Dessa forma e com as expressões que serão obtidas para os parâmetros operacionais é possível obter os parâmetros padronizados e, a partir do conhecimento dos valores desses parâmetros, obtidos através de ensaios, determinar os parâmetros fundamentais do gerador síncrono.

3.2.1 Circuito Elétrico Equivalente de Gerador Síncrono com Dois Enrolamentos de Rotor

Os geradores síncronos de pólos lisos são geralmente modelados matematicamente com um enrolamento amortecedor de eixo direto e com dois enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura. O enrolamento de campo é um enrolamento de eixo direto. Dessa forma, os circuitos elétricos equivalentes operacionais por fase, tanto de eixo direto como de eixo em quadratura, de um gerador síncrono de pólos lisos apresentam a topologia mostrada na figura 2.3 onde aparece um enrolamento de estator por fase e dois enrolamentos de rotor por fase, com os parâmetros de rotor referidos ao lado do estator.

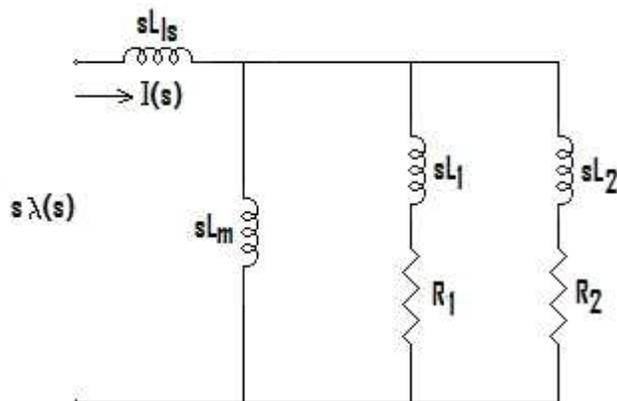


Figura 3.1 - Circuito elétrico equivalente padrão da máquina síncrona com dois enrolamentos amortecedores no rotor

Sendo $L(s)$ a indutância operacional equivalente do circuito elétrico equivalente operacional genérico do gerador síncrono mostrado na figura 3.1, onde L_s é a indutância de dispersão do enrolamento de estator por fase, L_m é a indutância de magnetização genérica, por fase, do enrolamento de estator (se o circuito elétrico equivalente operacional for de eixo direto ela será denotada por L_{md} e, se for de eixo em quadratura, ela será denotada por L_{mq}) e R_1 , R_2 ,

L_1 e L_2 as resistências elétricas e reatâncias de dispersão dos dois enrolamentos de rotor, pode-se escrever:

$$sL(s) = \frac{s\lambda(s)}{I(s)} = sL_{ls} + \frac{1}{\frac{1}{sL_m} + \frac{1}{R_1 + sL_1} + \frac{1}{R_2 + sL_2}}$$

$$sL(s) = \frac{s\lambda(s)}{I(s)} = sL_{ls} + \frac{sL_m (R_1 + sL_1)(R_2 + sL_2)}{(R_1 + sL_1)(R_2 + sL_2) + sL_m (R_1 + sL_1) + sL_m (R_2 + sL_2)}$$

Dessa forma:

$$L(s) = L_{ls} + \frac{s^2 L_1 L_2 L_m + s(L_1 L_m R_2 + L_2 L_m R_1) + R_1 R_2 L_m}{s^2 (L_1 L_2 + L_1 L_m + L_2 L_m) + s(L_1 R_2 + L_2 R_1 + L_m R_1 + L_m R_2) + R_1 R_2}$$

$$L(s) = \frac{s^2 L_{ls} (L_1 L_2 + L_1 L_m + L_2 L_m) + s(L_{ls} (L_1 R_2 + L_2 R_1 + L_m R_1 + L_m R_2) + s^2 L_1 L_2 L_m + (L_1 L_m R_2 + L_2 L_m R_1)) + R_1 R_2 L_{ls} + R_1 R_2 L_m}{s^2 (L_1 L_2 + L_1 L_m + L_2 L_m) + s(L_1 R_2 + L_2 R_1 + L_m R_1 + L_m R_2) + R_1 R_2}$$

$$L(s) = (L_{ls} + L_m) \frac{s^2 \frac{L_{ls} (L_1 L_2 + L_1 L_m + L_2 L_m) + L_1 L_2 L_m}{R_1 R_2 (L_{ls} + L_m)} + s \frac{L_{ls} (L_1 R_2 + L_2 R_1 + L_m R_1 + L_m R_2) + L_1 L_m R_2 + L_2 L_m R_1}{R_1 R_2 (L_{ls} + L_m)} + 1}{s^2 \frac{L_1 L_2 + L_1 L_m + L_2 L_m}{R_1 R_2} + s \frac{L_1 R_2 + L_2 R_1 + L_m (R_1 + R_2)}{R_1 R_2} + 1} \quad (3.1)$$

$$L(s) = (L_s + L_m) \frac{s^2 T_4 T_6 + s(T_4 + T_5) + 1}{s^2 T_1 T_3 + s(T_1 + T_2) + 1} \quad (3.2)$$

Das equações (3.1) e (3.2) tem-se:

$$T_1 + T_2 = \frac{L_1 R_2 + R_1 L_2 + L_m (R_1 + R_2)}{R_1 R_2} = \frac{(L_1 + L_m) R_2}{R_1 R_2} + \frac{(L_2 + L_m) R_1}{R_1 R_2} \quad (3.3)$$

Separando T_1 e T_2 de (3.3) tem-se:

$$T_1 = \frac{L_1 + L_m}{R_1} \quad (3.4)$$

$$T_2 = \frac{L_2 + L_m}{R_2} \quad (3.5)$$

Das equações (3.1), (3.2) e (3.5) tem-se:

$$T_1 T_3 = \frac{L_1 L_2 + L_1 L_m + L_2 L_m}{R_1 R_2} = \frac{L_1 + L_m}{R_1} T_3 \quad (3.6)$$

$$T_3 = \frac{R_1}{L_1 + L_m} \frac{L_1 L_2 + L_1 L_m + L_2 L_m}{R_1 R_2} = \frac{R_1}{L_1 + L_m} \frac{L_2 (L_1 + L_m) + L_1 L_m}{R_1 R_2} \quad (3.7)$$

Resultando T_3

$$T_3 = \frac{1}{R_2} \left(L_2 + \frac{L_1 L_m}{L_1 + L_m} \right) \quad (3.8)$$

Das equações (3.1) e (3.2) tem-se:

$$T_4 + T_5 = \frac{R_2 (L_{ls} L_1 + L_{ls} L_m + L_1 L_m)}{R_1 R_2 (L_{ls} + L_m)} + \frac{R_1 (L_{ls} L_2 + L_{ls} L_m + L_2 L_m)}{R_1 R_2 (L_{ls} + L_m)} \quad (3.9)$$

$$T_4 + T_5 = \frac{1}{R_1} \left(L_1 + \frac{L_{ls} L_m}{L_{ls} + L_m} \right) + \frac{1}{R_2} \left(L_2 + \frac{L_{ls} L_m}{L_{ls} + L_m} \right)$$

Separando-se T_4 e T_5 tem-se

$$T_4 = \frac{1}{R_1} \left(L_1 + \frac{L_{ls} L_m}{L_{ls} + L_m} \right) \quad (3.10)$$

$$T_5 = \frac{1}{R_2} \left(L_2 + \frac{L_{ls} L_m}{L_{ls} + L_m} \right) \quad (3.11)$$

$$T_4 T_6 = \frac{L_{ls} (L_1 L_2 + L_1 L_m + L_2 L_m)}{R_1 R_2 (L_{ls} + L_m)} = \frac{L_{ls} L_1 L_2 + L_{ls} L_1 L_m + L_{ls} L_2 L_m + L_1 L_2 L_m}{R_1 R_2 (L_{ls} + L_m)}$$

$$T_4 T_6 = \frac{1}{R_1} \left(L_1 + \frac{L_{ls} L_m}{L_{ls} + L_m} \right) T_6 \quad (3.12)$$

obtêm-se, dessa forma:

$$T_6 = \frac{L_{ls} L_1 L_2 + L_{ls} L_1 L_m + L_{ls} L_2 L_m + L_1 L_2 L_m}{R_1 R_2 (L_{ls} + L_m)} \frac{R_1 (L_{ls} + L_m)}{L_1 L_{ls} + L_1 L_m + L_{ls} L_m}$$

$$T_6 = \frac{L_2 (L_{ls} L_1 + L_{ls} L_m + L_1 L_m) + L_{ls} L_1 L_m}{R_2} \frac{1}{L_1 L_{ls} + L_1 L_m + L_{ls} L_m} \quad (3.13)$$

$$T_6 = \frac{1}{R_2} \left(L_2 + \frac{L_m L_{ls} L_1}{L_1 L_{ls} + L_1 L_m + L_{ls} L_m} \right) \quad (3.14)$$

Do circuito elétrico visto pode-se obter os parâmetros correspondentes ao circuito equivalente de eixo q de geradores síncronos de pólos lisos com dois enrolamentos amortecedores (figura 3.1) e, também, os parâmetros correspondentes ao circuito equivalente de eixo d , com um enrolamento de estator, o enrolamento de campo é um enrolamento amortecedor de eixo direto, como se vê a seguir.

3.2.2 Determinação de Parâmetros Operacionais de Eixo Direto de Geradores Síncronos de Pólos Lisos com um Enrolamento de Campo e um Enrolamento Amortecedor de Eixo Direto no Rotor

A partir da figura 3.1, pode-se obter, usando as expressões (3.2) a (3.14) acima obtidas, as expressões dos parâmetros operacionais de eixo direto de um gerador síncrono de pólos lisos com um enrolamento de campo de eixo direto e um enrolamento amortecedor de eixo direto fazendo, naquela figura, $R_1 = R_{fd}$, $R_2 = R_{kd}$, $L_1 = L_{fd}$ e $L_2 = L_{kd}$ obtendo-se o circuito equivalente operacional de eixo direto visto na figura 3.2.

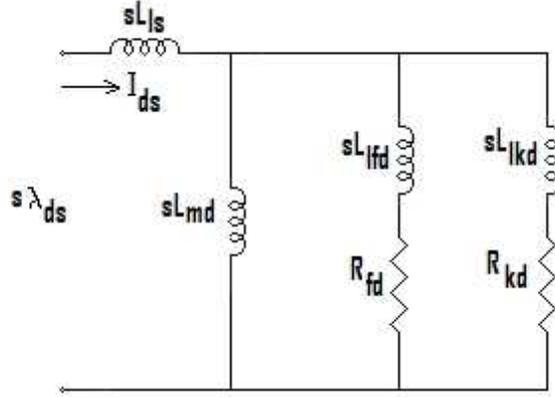


Figura 3.2 - Circuito elétrico equivalente operacional por fase de eixo direto de gerador síncrono de pólos lisos com um enrolamento de campo e um enrolamento amortecedor no rotor, visto do lado do estator

Usando-se as expressões (3.2), (3.4), (3.5), (3.7), (3.9), (3.10) e (3.14) obtêm-se os parâmetros operacionais de eixo direto em função dos parâmetros fundamentais.

$$L_d(s) = L_d \frac{1 + (T_{d4} + T_{d5})s + (T_{d4}T_{d6})s^2}{1 + (T_{d1} + T_{d2})s + (T_{d1}T_{d3})s^2} \quad (3.15)$$

$$L_d = L_{ls} + L_{md} \quad (3.16)$$

$$T_{d1} = \frac{1}{R_{fd}} (L_{lfd} + L_{lkd}) \quad (3.17)$$

$$T_{d2} = \frac{1}{R_{kd}} (L_{lfd} + L_{lkd}) \quad (3.18)$$

$$T_{d3} = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{lkd} + \frac{L_{md}L_{lfd}}{L_{md} + L_{lfd}} \right) \quad (3.19)$$

$$T_{d4} = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{lfd} + \frac{L_{md}L_{ls}}{L_{ls} + L_{md}} \right) \quad (3.20)$$

$$T_{d5} = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{lkd} + \frac{L_{md}L_{ls}}{L_{ls} + L_{md}} \right) \quad (3.21)$$

$$T_{d6} = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{lkd} + \frac{L_{md}L_{ls}L_{lfd}}{L_{md}L_{ls} + L_{md}L_{lkd} + L_{ls}L_{lkd}} \right) \quad (3.22)$$

3.2.3 Determinação de Parâmetros Operacionais de Eixo em Quadratura de Geradores Síncronos de Pólos Lisos com Dois Enrolamentos Amortecedores de Eixo em Quadratura no Rotor

A partir da figura 3.3 pode-se obter, usando as expressões (3.1) a (3.14) acima obtidas, as expressões dos parâmetros operacionais de eixo em quadratura de um gerador síncrono de pólos lisos com dois enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura fazendo, na figura 3.1,

$$R_1 = R_{kq1}, R_2 = R_{kq2}, L_1 = L_{lkq1} \text{ e } L_2 = L_{lkq2}.$$

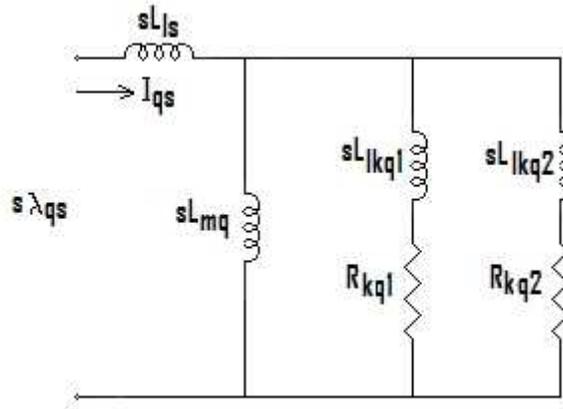


Figura 3.3 - Circuito elétrico equivalente operacional por fase de gerador síncrono de pólos lisos com dois enrolamentos amortecedores no rotor, visto do lado do estator

Usando as expressões (3.2), (3.4), (3.5), (3.7), (3.9), (3.10) e (3.14) obtêm-se os parâmetros operacionais de eixo em quadratura em função dos parâmetros fundamentais.

$$L_q(s) = L_q \frac{1 + (T_{q4} + T_{q5})s + (T_{q4}T_{q6})s^2}{1 + (T_{q1} + T_{q2})s + (T_{q1}T_{q3})s^2} \quad (3.23)$$

$$L_q = L_{ls} + L_{mq} \quad (3.24)$$

$$T_{q1} = \frac{1}{R_{kq1}} (L_{lkq1} + L_{mq}) \quad T_{q2} = \frac{1}{R_{kq2}} (L_{lkq2} + L_{mq}) \quad (3.25)$$

$$T_{q3} = \frac{1}{R_{kq2}} \left(L_{lkq2} + \frac{L_{mq}L_{lkq1}}{L_{lkq1} + L_{mq}} \right) \quad (3.26)$$

$$T_{q4} = \frac{1}{R_{kq1}} \left(L_{lkq1} + \frac{L_{mq} L_{ls}}{L_{ls} + L_{mq}} \right) \quad (3.27)$$

$$T_{q5} = \frac{1}{R_{kq2}} \left(L_{lkq2} + \frac{L_{mq} L_{ls}}{L_{ls} + L_{mq}} \right) \quad (3.28)$$

$$T_{q6} = \frac{1}{R_{kq2}} \left(L_{lkq2} + \frac{L_{mq} L_{ls} L_{lkq1}}{L_{mq} L_{ls} + L_{mq} L_{lkq1} + L_{ls} L_{lkq1}} \right) \quad (3.29)$$

3.2.4 Circuito Equivalente Operacional de Gerador Síncrono de Pólos Salientes com um Enrolamento de Rotor

Os geradores síncronos de pólos salientes, como já foi mencionado, são geralmente modelados com um enrolamento amortecedor de eixo direto e um enrolamento amortecedor de eixo em quadratura, o enrolamento de campo é um enrolamento de eixo direto. Dessa forma o circuito elétrico equivalente operacional por fase de eixo direto de um gerador síncrono de pólos salientes é idêntico ao circuito equivalente por fase de eixo direto de um gerador síncrono de pólos lisos apresentado no item 3.2.2. Entretanto o circuito equivalente operacional de eixo em quadratura só terá um circuito de rotor como mostrado na figura 3.4.

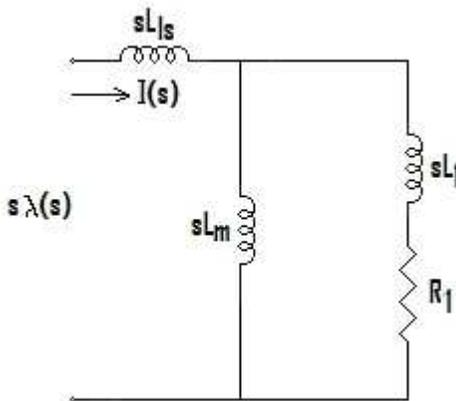


Figura 3.4 - Circuito elétrico equivalente operacional por fase de gerador síncrono de pólos salientes com um enrolamento no estator e um no rotor vistos do lado do estator

$$sL(s) = \frac{s\lambda(s)}{I(s)} = sL_{ls} + \frac{1}{\frac{1}{sL_m} + \frac{1}{R_1 + sL_1}} = sL_{ls} + \frac{sL_m(R_1 + sL_1)}{R_1 + s(L_1 + L_m)} \quad (3.30)$$

$$L(s) = L_s + \frac{L_m(R_1 + sL_1)}{R_1 + s(L_1 + L_m)} = \frac{R_1L_s + sL_s(L_1 + L_m) + L_m(R_1 + sL_1)}{R_1 + s(L_1 + L_m)} = \frac{R_1(L_{ls} + L_m) + s(L_{ls}L_1 + L_{ls}L_m + L_1L_m)}{R_1 + s(L_1 + L_m)}$$

$$L(s) = \frac{R_1(L_{ls} + L_m)}{R_1} \frac{1 + \frac{s(L_{ls}L_1 + L_{ls}L_m + L_1L_m)}{R_1(L_{ls} + L_m)}}{1 + s\frac{L_1 + L_m}{R_1}} = (L_{ls} + L_m) \frac{1 + s\frac{L_1(L_{ls} + L_m) + L_{ls}L_m}{R_1(L_{ls} + L_m)}}{1 + s\frac{L_1 + L_m}{R_1}} = (L_{ls} + L_m) \frac{1 + sT_2}{1 + sT_1} \quad (3.31)$$

dessa forma pode-se definir T_1 e T_2 como:

$$T_1 = \frac{L_1 + L_m}{R_1} \quad (3.32)$$

$$T_2 = \frac{1}{R_1} \left(L_1 + \frac{L_{ls}L_m}{L_{ls} + L_m} \right) \quad (3.33)$$

Fazendo na figura 3.4, $R_1 = R_{kq}$, $L_m = L_{mq}$ e $L_1 = L_{lkq}$ obtêm-se o circuito equivalente operacional por fase de eixo em quadratura de um gerador síncrono de pólos salientes com um enrolamento no estator e um enrolamento no rotor vistos do lado do estator, como se vê na figura 3.5.

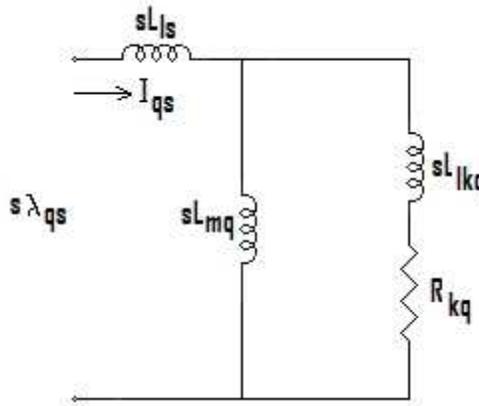


Figura 3.5 - Circuito elétrico equivalente operacional por fase de eixo em quadratura de gerador síncrono de pólos salientes

Pode-se escrever também:

$$L_q(s) = L_q \frac{1 + sT_{q2}}{1 + sT_{q1}} \quad (3.34)$$

$$L_q = L_{ls} + L_{mq} \quad (3.35)$$

$$T_{q1} = \frac{1}{R_{kq1}} (L_{lkq} + L_{mq}) \quad (3.36)$$

$$T_{q2} = \frac{1}{R_{kq}} \left(L_{lkq} + \frac{L_{mq}L_{ls}}{L_{ls} + L_{mq}} \right) \quad (3.37)$$

3.3 Parâmetros Padronizados

Em regime permanente, quando o gerador síncrono opera na velocidade síncrona, não circulam correntes elétricas pelos enrolamentos amortecedores de modo que eles podem ser eliminados do modelo matemático dinâmico do gerador síncrono. Obtêm-se, assim um modelo matemático dinâmico bem mais simples que pode ser transformado no modelo matemático de regime permanente descrito fasorialmente pelas seguintes equações:

$$\bar{E}_a = (R_s + jx_q)\bar{I}_a \quad (3.38)$$

$$\bar{E}_a = E_a \underline{\delta} \quad (3.39)$$

δ é o ângulo de carga do gerador (ângulo entre a tensão de armadura e a força eletromotriz de armadura)

$$I_{ad} = \sqrt{2}I_a \text{sen}[(\theta_{ei}(0) - \theta_{ev}(0) - \delta)] \quad (3.40)$$

onde:

I_{ad} = Componente de eixo direto da corrente de armadura

θ_{ei} = Ângulo da corrente elétrica de armadura

θ_{ev} = Ângulo da tensão de armadura (referência para ângulos)

$$E = \sqrt{2}E_a + (x_d - x_q)I_{ad} \quad (3.41)$$

onde: E = força eletromotriz do gerador vista do lado do estator.

$$E = x_{md}i_{fd}^r \quad (3.42)$$

onde: i_{fd}^r = corrente de campo vista do lado do estator.

Entretanto durante transitórios em que a velocidade do rotor não é a velocidade síncrona, circulam correntes elétricas pelos enrolamentos amortecedores que são induzidas pelo campo girante do estator, como ocorre nas máquinas de indução trifásicas. Durante a operação do gerador síncrono em regime transitório, que dura em geral muito pouco tempo, as correntes induzidas nos enrolamentos amortecedores apresentam uma tendência de queda (ou aumento, dependendo da situação) inicialmente muito acentuada devido a variação da velocidade. Logo em seguida a tendência de queda fica menos acentuada até que elas tendem para o valor de regime permanente onde seu valor será zero, à medida que a velocidade angular volta a seu valor nominal. Esses dois períodos são visivelmente caracterizados, por exemplo, num curto-circuito e numa rejeição de carga, e são denominados períodos subtransitório e transitório, respectivamente.

Durante uma rejeição de carga capacitiva, quando a carga do gerador síncrono é retirada e o distribuidor da turbina é fechado rapidamente, as tensões terminais do gerador diminuem como se vê na figura 3.6. Esses fenômenos são comumente tratados como fenômenos subtransitórios, aquele de duração mais rápida, e transitório, o período de queda menos rápida de todo o fenômeno transitório propriamente dito pelo qual o gerador síncrono passa.

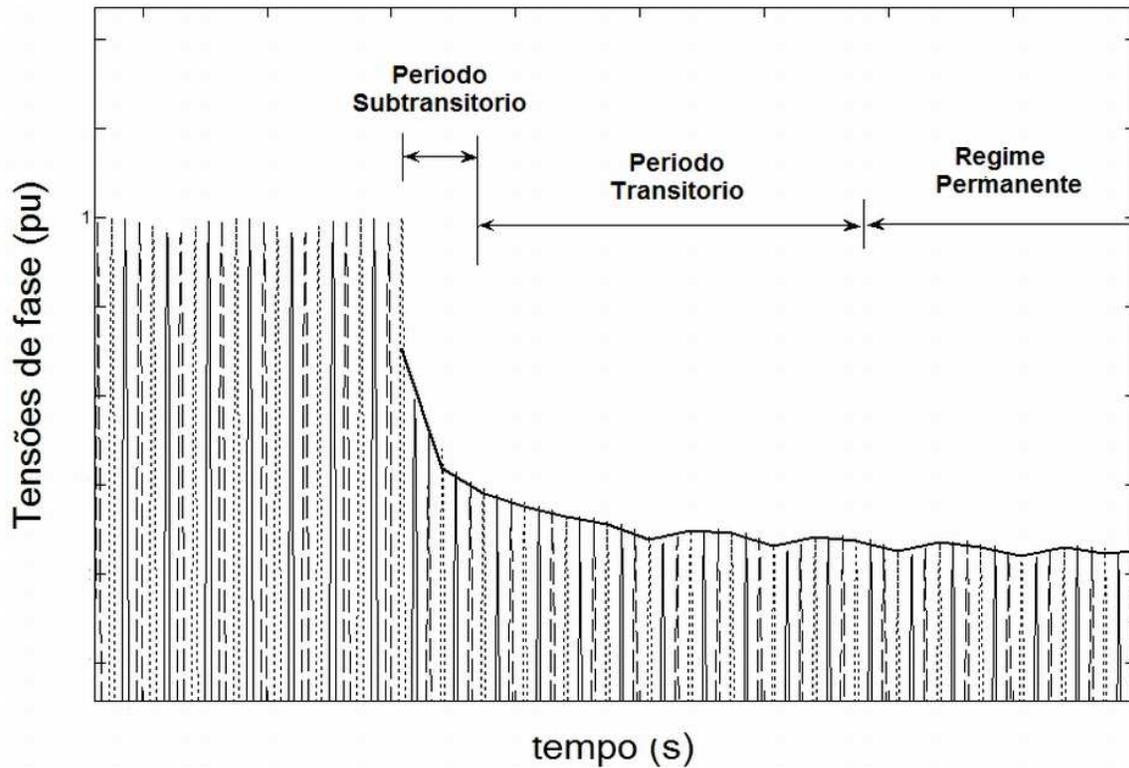


Figura 3.6 - Período subtransitório e transitório de tensão em gerador síncrono durante a rejeição de carga

Dessa forma costuma-se caracterizar esses períodos por reatâncias e constantes de tempo subtransitórias e transitórias de circuito aberto (rejeição de carga) e de curto-circuito, associando-se à modelagem matemática dinâmica do gerador técnicas de sistemas lineares.

3.3.1 Constantes de Tempo Subtransitórias e Transitórias de Circuito Aberto e de Curto-Circuito de Eixos Direto e em Quadratura

No item anterior chegou-se às expressões de indutâncias operacionais de eixo direto e de eixo em quadratura que agora são aqui repetidas nas expressões (3.43) e (3.44).

$$L_d(s) = L_d \frac{1 + (T_{d4} + T_{d5})s + (T_{d4}T_{d6})s^2}{1 + (T_{d1} + T_{d2})s + T_{d1}T_{d3}s^2} \quad (3.43)$$

$$L_q(s) = L_q \frac{1 + (T_{q4} + T_{q5})s + (T_{q4}T_{q6})s^2}{1 + (T_{q1} + T_{q2})s + (T_{q1}T_{q2})s^2} \quad (3.44)$$

Os valores dos parâmetros T_{di} e T_{qi} , $i=1$ a 6, foram determinados em função dos parâmetros fundamentais do gerador síncrono como já visto. Algumas simplificações podem ser feitas, baseadas nos valores desses parâmetros: como $R_{kd} \gg R_{fd}$ pode-se verificar que $(T_{d1} + T_{d2})$ é muito próximo de $(T_{d1} + T_{d3})$ assim como $(T_{d4} + T_{d5})$ é muito próximo de $(T_{d4} + T_{d6})$, assim pode-se escrever:

$$\begin{aligned} 1 + (T_{d1} + T_{d2})s + T_{d1}T_{d3}s^2 &= 1 + (T_{d1} + T_{d3})s + T_{d1}T_{d3}s^2 = (1 + sT_{d1})(1 + sT_{d3}) \\ &= (1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do}) \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} 1 + (T_{d4} + T_{d5})s + T_{d4}T_{d6}s^2 &= 1 + (T_{d4} + T_{d6})s + T_{d4}T_{d6}s^2 = (1 + sT_{d4})(1 + sT_{d6}) \\ &= (1 + sT'_d)(1 + sT''_d) \end{aligned} \quad (3.46)$$

Na expressão (3.45) define-se constante de tempo transitória de eixo direto de circuito aberto (T'_{do}) e constante de tempo subtransitória de eixo direto de circuito aberto (T''_{do}). Na expressão (3.46) define-se constante de tempo transitória de eixo direto de curto-circuito (T'_d) e constante de tempo subtransitória de eixo direto de curto-circuito (T''_d).

As constantes de tempo de circuito aberto aparecem no denominador da expressão da indutância operacional de eixo direto $L_d(s)$ porque em circuito aberto a indutância será infinita. Para isso é necessário trabalhar o denominador da expressão de $L_d(s)$. No curto-circuito trabalha-se o numerador de $L_d(s)$.

No eixo em quadratura verifica-se que $R_{kq2} \gg R_{kq1}$ e conseqüentemente $(T_{q1} + T_{q2})$ é muito próxima de $(T_{q1} + T_{q3})$ assim como $(T_{q4} + T_{q5})$ é muito próxima de $(T_{q4} + T_{q6})$ desse modo pode-se escrever:

$$\begin{aligned} 1 + (T_{q1} + T_{q2})s + T_{q1}T_{q3}s^2 &= 1 + (T_{q1} + T_{q3})s + T_{q1}T_{q3}s^2 = (1 + sT_{q1})(1 + sT_{q3}) \\ &= (1 + sT'_{qo})(1 + sT''_{qo}) \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned}
1 + (T_{q4} + T_{q5})s + T_{q4}T_{q5}s^2 &= 1 + (T_{q4} + T_{q6})s + T_{q4}T_{q6}s^2 = (1 + sT_{q4})(1 + sT_{q6}) \\
&= (1 + sT'_q)(1 + sT''_q)
\end{aligned} \tag{3.48}$$

Analogamente ao que foi feito anteriormente, na expressão (3.47) define-se constante de tempo transitória de eixo em quadratura de circuito aberto (T'_{qo}) e constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura de circuito aberto (T''_{qo}). Na expressão (3.48) define-se constante de tempo transitória de eixo em quadratura de curto-circuito (T'_q) e constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura de curto-circuito (T''_q).

Dessa forma pode-se escrever as constantes de tempo transitórias e subtransitórias de eixo direto e de eixo em quadratura, em função dos parâmetros fundamentais, como:

$$T'_{do} = T_{d1} = \frac{1}{R_{fd}} (L_{lfd} + L_{lkd}) \tag{3.49}$$

$$T''_{do} = T_{d3} = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{lkd} + \frac{L_{md}L_{lfd}}{L_{md} + L_{lfd}} \right) \tag{3.50}$$

$$T'_d = T_{d4} = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{lfd} + \frac{L_{md}L_{ls}}{L_{ls} + L_{md}} \right) \tag{3.51}$$

$$T''_d = T_{d6} = \frac{1}{R_{kd}} \left(L_{lkd} + \frac{L_{md}L_{ls}L_{lfd}}{L_{md}L_{ls} + L_{md}L_{lkd} + L_{ls}L_{lkd}} \right) \tag{3.52}$$

$$T'_{qo} = T_{q1} = \frac{1}{R_{kq1}} (L_{lkq1} + L_{mq}) \tag{3.53}$$

$$T''_{qo} = T_{q3} = \frac{1}{R_{kq2}} \left(L_{lkq2} + \frac{L_{mq}L_{lkq1}}{L_{lkq1} + L_{mq}} \right) \tag{3.54}$$

$$T'_q = T_{q4} = \frac{1}{R_{kq1}} \left(L_{lkq1} + \frac{L_{mq}L_{ls}}{L_{ls} + L_{mq}} \right) \tag{3.55}$$

$$T''_q = T_{q6} = \frac{1}{R_{kq2}} \left(L_{lkq2} + \frac{L_{mq}L_{ls}L_{lkq1}}{L_{mq}L_{ls} + L_{mq}L_{lkq1} + L_{ls}L_{lkq1}} \right) \tag{3.56}$$

Observa-se que as constantes de tempo subtransitórias contém todas as indutâncias de dispersão dos enrolamentos amortecedores enquanto que as constantes de tempo transitórias contem somente uma delas.

A solução das equações abaixo pode fornecer também outros valores aproximados das constantes de tempo.

$$(1 + sT'_{do})(1 + sT''_{do}) = 1 + s(T_{d1} + T_{d2}) + s^2T_{d1}T_{d3} \quad (3.57)$$

$$(1 + sT'_d)(1 + sT''_d) = 1 + s(T_{d4} + T_{d5}) + s^2(T_{d4}T_{d6}) \quad (3.58)$$

resolvendo (3.57) obtêm-se:

$$1 + s(T'_{do} + T''_{do}) + s^2T'_{do}T''_{do} = 1 + s(T_{d1} + T_{d2}) + s^2T_{d1}T_{d3}$$

$$T'_{do} + T''_{do} = T_{d1} + T_{d2}$$

$$T'_{do}T''_{do} = T_{d1}T_{d3}$$

$$T''_{do} = \frac{T_{d1}T_{d3}}{T'_{do}}$$

$$T'_{do} + \frac{T_{d1}T_{d3}}{T'_{do}} = T_{d1} + T_{d2}$$

$$T'^2_{do} - (T_{d1} + T_{d2})T'_{do} + T_{d1}T_{d3} = 0$$

$$T'_{do} = \frac{(T_{d1} + T_{d2}) + \sqrt{(T_{d1} + T_{d2})^2 + 4T_{d1}T_{d3}}}{2}$$

considerando que $T_{d1} + T_{d2} \gg 4T_{d1}T_{d3}$, obtêm-se:

$$T'_{do} = \frac{(T_{d1} + T_{d2}) \pm (T_{d1} + T_{d2})}{2}$$

$$T'_{do} = T_{d1} + T_{d2} \quad (3.59)$$

$$T''_{do} = \frac{T_{d1}T_{d3}}{T_{d1} + T_{d2}} \quad (3.60)$$

da mesma maneira usando (3.53) obtêm-se:

$$T'_d = T_{d4} + T_{d5} \quad (3.61)$$

$$T''_d = \frac{T_{d4}T_{d6}}{T_{d4} + T_{d5}} \quad (3.62)$$

Expressões análogas podem ser obtidas para os parâmetros de eixo em quadratura.

3.3.2 Reatâncias Transitórias e Subtransitórias.

Desprezando-se as resistências elétricas dos enrolamentos de estator e de rotor nos circuitos equivalentes já utilizados nos itens anteriores e calculando-se as reatâncias equivalentes vistas dos terminais de estator, pode-se determinar as reatâncias padronizadas dos geradores síncronos.

O circuito equivalente de eixo direto de um gerador síncrono, sem enrolamentos amortecedores, visto na figura 3.7 permite determinar a reatância transitória de eixo direto (x'_d) enquanto que o circuito equivalente de eixo direto do gerador síncrono com o enrolamento amortecedor, visto na figura 3.8, permite determinar a reatância subtransitória de eixo direto (x''_d).

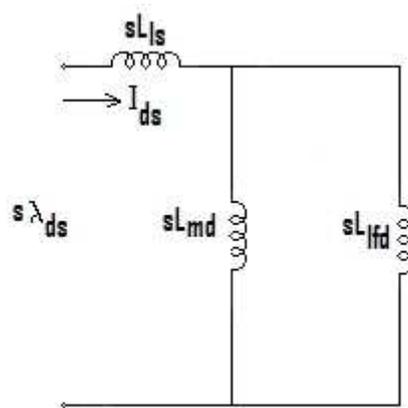


Figura 3.7- Circuito equivalente de eixo direto sem enrolamento amortecedor

$$x'_d = x_{ls} + \frac{x_{md}x_{ffd}}{x_{ffd} + x_{md}} \quad (3.63)$$

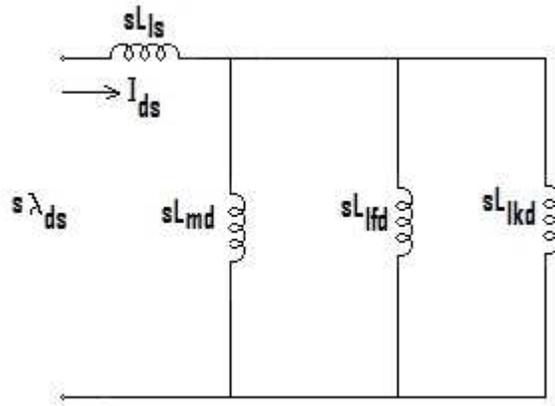


Figura 3.8 - Circuito equivalente de eixo direto com enrolamento amortecedor

$$x_d'' = x_{ls} + \frac{x_{md}x_{lfd}x_{lkd}}{x_{md}x_{lfd} + x_{md}x_{lkd} + x_{lfd}x_{lkd}} \quad (3.64)$$

A reatância subtransitória de eixo em quadratura para um gerador síncrono de pólos salientes, que tem apenas um enrolamento amortecedor de eixo em quadratura, pode ser calculada usando o circuito equivalente da figura 3.7 substituindo-se x_{md} por x_{mq} e x_{lfd} por x_{lkq} obtendo-se:

$$x_q'' = x_{ls} + \frac{x_{mq}x_{lkq}}{x_{lkq} + x_{mq}} \quad (3.65)$$

Nesse caso a reatância transitória de eixo em quadratura não existe, no caso de geradores síncronos de pólos lisos em que há dois enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura pode-se determinar a reatância transitória de eixo em quadratura usando-se a figura 3.7 substituindo-se x_{md} por x_{mq} e x_{lfd} por x_{lkq1} e a reatância subtransitória de eixo em quadratura usando-se a figura 3.8 substituindo-se x_{md} por x_{mq} e x_{lfd} por x_{lkq1} e x_{lkd} por x_{lkq2} obtendo-se, respectivamente:

$$x_q' = x_{ls} + \frac{x_{mq}x_{lkq1}}{x_{lkq1} + x_{mq}} \quad (3.66)$$

$$x_q'' = x_{ls} + \frac{x_{mq}x_{lkq1}x_{lkq2}}{x_{mq}x_{lkq1} + x_{mq}x_{lkq2} + x_{lkq1}x_{lkq2}} \quad (3.67)$$

3.3.3 Valores das Reatâncias $x_d(s)$ e $x_q(s)$ em Regime Permanente, Transitório e Subtransitório.

$$\text{De } L_d(s) = L_d \frac{(1 + sT_d')(1 + sT_d'')}{(1 + sT_{d0}')(1 + sT_{d0}'')} \quad (3.68)$$

para regime permanente fazendo $s \rightarrow 0$ pode-se escrever:

$$L_d(s) = L_d \text{ e conseqüentemente } x_d(s) = x_d \quad (3.69)$$

para transitório rápido (todos os enrolamentos amortecedores operando), fazendo $s \rightarrow \infty$ tem-se:

$$x_d'' = x_d \frac{T_d'T_d''}{T_{d0}'T_{d0}''} \quad (3.70)$$

para transitórios não tão rápidos (sem enrolamento amortecedor)

$$x_d' = x_d \frac{T_d'}{T_{d0}'} \quad (3.71)$$

analogamente para o eixo q pode-se escrever:

$$x_q'' = x_q \frac{T_q'T_q''}{T_{q0}'T_{q0}''} \quad (3.72)$$

$$x_q' = x_q \frac{T_q'}{T_q'} \quad (3.73)$$

As expressões acima são válidas para um gerador síncrono de pólos lisos. Para geradores de pólos salientes, como x'_q , T'_{qo} e T'_q não existem, as expressões (3.72) e (3.73) não se aplicam.

Aplica-se a equação (3.74).

$$x''_q = x_q \frac{T''_q}{T''_{qo}} \quad (3.74)$$

3.3.4 Dados de Geradores Utilizados Neste Trabalho

Tabela 3.1 - Gerador síncrono trifásico de pólos salientes.

Potência nominal: 6250 kVA	
Tensão de linha: 4160 V	
Fator de potência: 0,85 (carga indutiva)	
Numero de pólos: 20	
Velocidade nominal: 360 rpm	
Momento de inércia do sistema combinado gerador turbina:	
$J = 15355 \text{ kg.m}^2$, $H = 7,11 \text{ s}$	
$R_s = 0,00636 \text{ pu}$	
$x_{ls} = 0,1235 \text{ pu}$	
$x_{mq} = 0,5078 \text{ pu}$	$x_{md} = 0,926 \text{ pu}$
$R_{kq} = 0,05366 \text{ pu}$	$x_{lkq} = 0,1678 \text{ pu}$
$R_{fd} = 0,00084 \text{ pu}$	$x_{lfd} = 0,2691 \text{ pu}$
$R_{kd} = 0,03578 \text{ pu}$	$x_{lkd} = 0,1119 \text{ pu}$

Os valores base das grandezas envolvidas foram calculadas com as expressões mostradas na tabela 3.2 apresentada a seguir:

Tabela 3.2 - Expressões para o calculo dos valores base utilizados.

$$\begin{array}{lll}
 \omega_b = 2\pi f_n & \omega_{bm} = \omega_b \left(\frac{2}{P} \right) & S_b = S_n \\
 v_b = \sqrt{2} \left(\frac{v_n}{\sqrt{3}} \right) & i_b = \sqrt{2} \left(\frac{S_b}{\sqrt{3}v_n} \right) & z_b = \frac{v_b}{i_b} \\
 T_b = \frac{S_b}{\omega_{bm}} & H = \frac{1}{2} \frac{J\omega_{bm}^2}{S_b} &
 \end{array}$$

Com: $f_n = 60 \text{ Hz}$, $P = 20$, $S_n = 6250 \text{ kVA}$ e $v_n = 4160 \text{ V}$, apresenta-se a seguir os parâmetros padronizados em pu obtidos dos parâmetros fundamentais usando as expressões (3.49) a (3.56) e (3.63) a (3.65):

$$x_q = x_{mq} + x_{ls} = 0,6313 \text{ pu}$$

$$x_d = x_{md} + x_{ls} = 1,0495 \text{ pu}$$

$$x'_d = x_{ls} + \frac{x_{md}x_{lfd}}{x_{lfd} + x_{md}} = 0,3320 \text{ pu}$$

$$x''_d = x_{ls} + \frac{x_{md}x_{lfd}x_{lkd}}{x_{md}x_{lfd} + x_{md}x_{lkd} + x_{lfd}x_{lkd}} = 0,1963 \text{ pu}$$

$$x''_q = x_{ls} + \frac{x_{mq}x_{lkq}}{x_{lkq} + x_{mq}} = 0,2496 \text{ pu}$$

$$T''_{qo} = \frac{(x_{lkq} + x_{mq})}{\omega_b R_{kq}} = 0,0334 \text{ pu} \tag{3.75}$$

$$T'_{do} = \frac{(x_{lfd} + x_{md})}{\omega_b R_{fd}} = 3,7724 \text{ pu}$$

$$T''_{do} = \frac{\left(x_{lkd} + \frac{x_{md}x_{lfd}}{x_{md} + x_{lfd}} \right)}{\omega_b R_{kd}} = 0,0238 \text{ pu}$$

$$T_q'' = \frac{\left(x_{lkq} + \frac{x_{mq}x_{ls}}{x_{mq} + x_{ls}} \right)}{\omega_b R_{kq}} = 0,0132 \text{ pu}$$

$$T_d' = \frac{\left(x_{lfd} + \frac{x_{md}x_{ls}}{x_{md} + x_{ls}} \right)}{\omega_b R_{fd}} = 1,1939 \text{ pu}$$

$$T_d'' = \frac{\left(x_{lkd} + \frac{x_{md}x_{ls}x_{lfd}}{x_{md}x_{ls} + x_{md}x_{lfd} + x_{ls}x_{lfd}} \right)}{\omega_b R_{kd}} = 0,0140 \text{ pu}$$

Pode-se observar nas expressões anteriores que o gerador de pólos salientes apresenta apenas parâmetros subtransitórios x_q'' , T_{q0}'' , T_q'' no eixo q . Trata-se de uma convenção utilizada na bibliografia por muitos autores, como [4], [1], devido a que nos ensaios realizados para a determinação de parâmetros no eixo q (rejeição de carga) aparece somente uma constante de tempo na dinâmica do processo transitório, que, sendo tão rápida, é considerada um processo subtransitário.

Tabela 3.3 - Gerador síncrono trifásico de pólos lisos [1].

Potência nominal: 555 MVA	
Tensão de linha: 24 kV	
Fator de potência: 0,9 (carga indutiva)	
Numero de pólos: 2	
Velocidade nominal: 3600 rpm	
Momento de inércia do sistema combinado gerador turbina:	
$J = 27547,80 \text{ kg m}^2, H = 3,525 \text{ s}$	
$R_s = 0,003 \text{ pu}$	
$x_{ls} = 0,15 \text{ pu}$	
$x_{mq} = 1,611 \text{ pu}$	$x_{md} = 1,66 \text{ pu}$
$R_{kq1} = 0,00619 \text{ pu}$	$x_{lkq1} = 0,07252 \text{ pu}$
$R_{kq2} = 0,02368 \text{ pu}$	$x_{lkq2} = 0,125 \text{ pu}$
$R_{fd} = 0,0006 \text{ pu}$	$x_{lfd} = 0,165 \text{ pu}$
$R_{kd} = 0,0284 \text{ pu}$	$x_{lkd} = 0,1713 \text{ pu}$

Os valores base foram calculados com as expressões da tabela 3.2 e: $f_n = 60 \text{ Hz}$, $P = 2$, $S_n = 555 \text{ MVA}$ e $v_n = 24 \text{ kV}$, as curvas de magnetização de ambos são apresentadas na tabela 3.4. apresenta-se a seguir os parâmetros padronizados em pu obtidos dos parâmetros fundamentais usando as expressões (3.49) a (3.56) e (3.63) a (3.67):

Tabela 3.4 - Dados da curva de magnetização.

Hidrogerador		Turbogerador	
v_a	i_{fd}	v_a	i_{fd}
0,5	0,4609	0,400	0,654
0,8	0,7541	0,483	0,800
0,9	0,8668	0,630	0,985
1,0	1,0000	0,800	1,100
1,1	1,1730	1,020	1,200
1,2	1,4360	1,380	1,310
-	-	1,780	1,400

$$x_q = x_{mq} + x_{ls} = 1,761 \text{ pu}$$

$$x_d = x_{md} + x_{ls} = 1,81 \text{ pu}$$

$$x'_d = x_{ls} + \frac{x_{md} x_{lfd}}{x_{lfd} + x_{md}} = 0,3001 \text{ pu}$$

$$x'_q = x_{ls} + \frac{x_{mq} x_{lkq1}}{x_{lkq1} + x_{mq}} = 0,6501 \text{ pu}$$

$$x''_d = x_{ls} + \frac{x_{md} x_{lfd} x_{lkd}}{x_{md} x_{lfd} + x_{md} x_{lkd} + x_{lfd} x_{lkd}} = 0,23 \text{ pu}$$

$$x''_q = x_{ls} + \frac{x_{mq} x_{lkq}}{x_{lkq} + x_{mq}} = 0,25 \text{ pu}$$

$$T'_{qo} = \frac{(x_{lkq1} + x_{mq})}{\omega_b R_{kq1}} = 1,0011 \text{ pu}$$

$$T''_{qo} = \frac{1}{R_{kq2}} \left(x_{lkq2} + \frac{x_{mq} x_{lkq1}}{x_{lkq1} + x_{mq}} \right) = 0,07 \text{ pu} \quad (3.76)$$

$$T'_{do} = \frac{(x_{lfd} + x_{md})}{\omega_b R_{fd}} = 8,0683 \text{ pu}$$

$$T''_{do} = \frac{\left(x_{lkd} + \frac{x_{md} x_{lfd}}{x_{md} + x_{lfd}} \right)}{\omega_b R_{kd}} = 0,03 \text{ pu}$$

$$T''_q = \frac{\left(x_{lkq} + \frac{x_{mq} x_{ls}}{x_{mq} + x_{ls}} \right)}{\omega_b R_{kq}} = 0,0269 \text{ pu}$$

$$T'_d = \frac{\left(x_{lfd} + \frac{x_{md} x_{ls}}{x_{md} + x_{ls}} \right)}{\omega_b R_{fd}} = 1,3376 \text{ pu}$$

$$T''_d = \frac{\left(x_{lkd} + \frac{x_{md} x_{ls} x_{lfd}}{x_{md} x_{ls} + x_{md} x_{lfd} + x_{ls} x_{lfd}} \right)}{\omega_b R_{kd}} = 0,023 \text{ pu}$$

Capítulo 4

Ensaio Para Determinação de Parâmetros do Modelo Matemático Dinâmico de Geradores Síncronos

4.1 Introdução

Como já descrito nos capítulos anteriores os parâmetros fundamentais do modelo matemático dinâmico de um gerador síncrono de pólos lisos com três enrolamentos amortecedores sendo um de eixo direto e dois de eixo em quadratura são os seguintes: R_s (resistência elétrica do enrolamento de estator por fase), x_{ls} (reatância de dispersão do enrolamento de estator por fase), R_{fd} (resistência elétrica do enrolamento de campo), x_{lfd} (reatância de dispersão do enrolamento de campo), R_{kd} (resistência elétrica do enrolamento amortecedor de eixo direto), x_{lkd} (reatância de dispersão do enrolamento amortecedor de eixo direto), R_{kq1} (resistência elétrica do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura de número 1), x_{lkq1} (reatância de dispersão do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura de número 1), R_{kq2} (resistência elétrica do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura de número 2), x_{lkq2} (reatância de dispersão do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura de número 2), x_d (reatância de eixo direto do enrolamento de estator por fase), x_q (reatância de eixo em quadratura do enrolamento de estator por fase), x_{md} (reatância de magnetização de eixo direto por fase), x_{mq} (reatância de magnetização de eixo em quadratura por fase) e J (momento de inércia do rotor do gerador). Os parâmetros do modelo matemático dinâmico de um gerador

síncrono de pólos salientes com dois enrolamentos amortecedores sendo um de eixo direto e outro de eixo em quadratura são os seguintes: $R_s, x_{ls}, R_{fd}, x_{ffd}, R_{kd}, x_{lkd}, R_{kq}, x_{lkq}, x_d, x_q, x_{md}, x_{mq}$ e J .

Excetuando o parâmetro J , que é um parâmetro mecânico, todos os outros são parâmetros elétricos. Em geral as perdas mecânicas são desconsideradas na modelagem matemática dinâmica e se tiverem de ser consideradas é necessário acrescentar parâmetros que representem as perdas por atrito viscoso (k_a) devido ao fluido lubrificante dos mancais e (k_v) devido ao atrito com o ar na ventilação. O torque de atrito viscoso é dado por $T_a = k_a \omega_m$ enquanto que o torque de atrito com o ar é dado por $T_v = k_v \omega_m$.

Há diversas maneiras de determinar os valores dos parâmetros elétricos, como mostra a literatura [12], [1] e outros. As mais utilizadas são os particulares ensaios que podem ser realizados em laboratórios ou mesmo na planta e na usina, conforme o caso, os quais são objeto deste trabalho.

Outros dois métodos também usados e mostrados na literatura são o método da resposta em frequência e o método da determinação dos parâmetros usando a formulação de elementos finitos através da determinação dos fluxos ligados aos diversos enrolamentos do gerador. Para este último é necessária a representação gráfica do gerador através dos seus desenhos, especificação de materiais, posicionamento e distribuição dos enrolamentos nos núcleos magnéticos.

A determinação de parâmetros através de processos de identificação de sistemas que usam algoritmos de otimização tem sido usados recentemente porém as aplicações tem sido mais dirigidas para os estudos de regime permanente [13]. Existe atualmente esforços no sentido de identificar parâmetros durante a operação de geradores.

Neste capítulo, discute-se os particulares ensaios que podem ser realizados para determinar os parâmetros elétricos fundamentais de geradores síncronos. Esses ensaios são os seguintes: 1. medição das resistências dos enrolamentos de armadura por fase e do enrolamento de campo, 2. determinação da curva característica de circuito aberto do gerador, 3. determinação da curva característica de curto-circuito do gerador, 4. Ensaio para medição da reatância de Potier (reatância de dispersão), 4. ensaio de curto-circuito trifásico brusco e 5. ensaios de rejeição de carga.

A seguir discutem-se as metodologias de realização dos ensaios bem como a metodologia de determinação dos parâmetros possíveis de serem determinados a partir de cada um dos ensaios.

Na verdade, excetuando a medição das resistências elétricas por fase do enrolamento de estator e do enrolamento de campo bem como o ensaio para medição da reatância de Potier, que é uma aproximação da reatância de dispersão do enrolamento de armadura por fase, os demais determinam os valores de parâmetros padronizados $x_d, x_q, x'_d, x'_q, x''_d, x''_q, T'_{do}, T''_{do}, T'_{qo}, T''_{qo}$. A partir dos valores dos parâmetros padronizados pode-se determinar os valores dos parâmetros fundamentais usando-se as expressões mostradas no capítulo 3.

4.2 Ensaio para Determinação da Curva Característica de Circuito Aberto do Gerador Síncrono

A curva característica de circuito aberto de um gerador síncrono, também chamada curva de magnetização em vazio do gerador, apresenta a relação entre a tensão terminal de fase de armadura em circuito aberto em função da corrente de excitação no enrolamento de campo em regime permanente. Para a sua determinação a máquina deve estar com o rotor girando na velocidade síncrona e com os terminais dos enrolamentos de armadura em circuito aberto.

Os valores das tensões eficazes terminais de fase do enrolamento de estator são obtidos para cada um dos valores de corrente de excitação aplicados ao enrolamento de campo. Pode-se iniciar a construção da curva a partir da corrente máxima possível e segura de ser aplicada ao enrolamento de campo, decrescendo-a até o valor zero. A curva é construída com os valores de corrente de campo e com a média aritmética das três tensões eficazes de fase dos enrolamentos de armadura obtida para cada valor de corrente de campo.

A curva característica de circuito aberto de um gerador síncrono típico é mostrada na figura 4.1. A parte reta da curva, denominada reta de entreferro, representa a parte da curva de magnetização não saturada. Acima da corrente de campo correspondente ao ponto onde a curva de magnetização se descola da reta de entreferro o gerador apresenta saturação magnética.

Frequentemente a curva de magnetização em vazio é representada em valores em *pu* sendo a tensão base a tensão nominal do gerador e a corrente de campo base corresponde à corrente de campo no ponto de descolamento da curva de magnetização da reta do entreferro com se vê na

figura 4.1. Outras vezes adota-se o valor de pico da corrente de armadura como corrente base de campo.

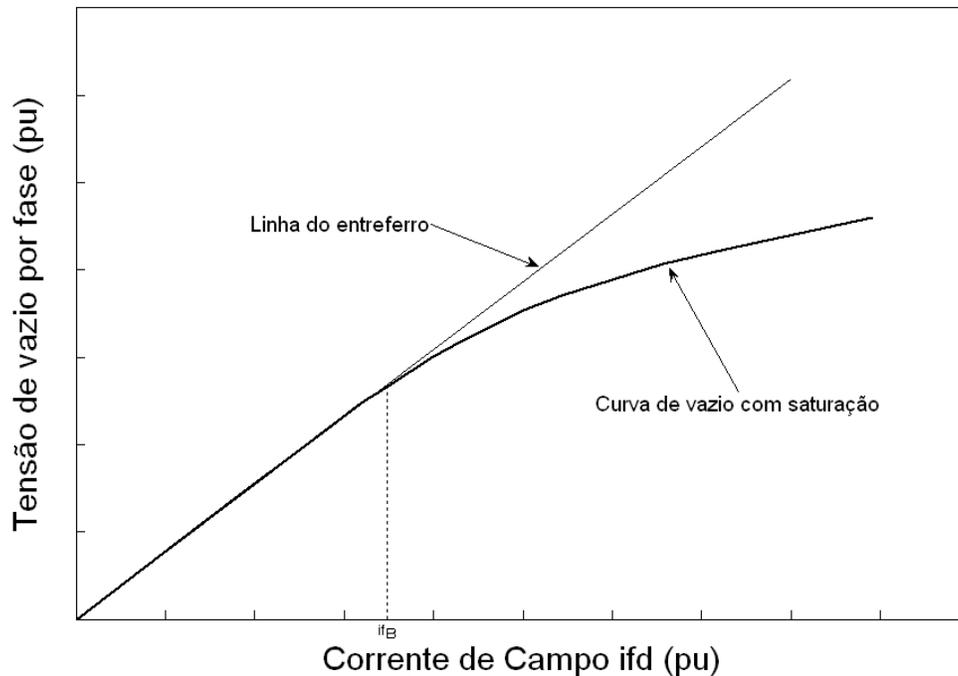


Figura 4.1 - Curva de magnetização do gerador síncrono com reta de entreferro

4.3 Ensaio para Determinação da Curva Característica de Curto-Circuito do Gerador Síncrono

A curva característica de curto-circuito de um gerador síncrono apresenta a relação entre a corrente de armadura em curto-circuito em função da corrente de excitação no enrolamento de campo. Para a sua determinação a máquina deve estar com o rotor girando na velocidade síncrona e com os terminais dos enrolamentos de armadura em curto-circuito.

Os valores das correntes eficazes do enrolamento de estator são obtidos para cada um dos valores de corrente de excitação aplicados ao enrolamento de campo. Pode-se iniciar a construção da curva a partir da corrente máxima possível e segura de campo e da corrente máxima segura da armadura, decrescendo a corrente de campo até o valor zero. A curva é construída com os valores de corrente de campo e com a média aritmética das três correntes eficazes dos enrolamentos de armadura.

A curva característica de curto-circuito de um gerador síncrono típico é mostrada na figura 4.2.

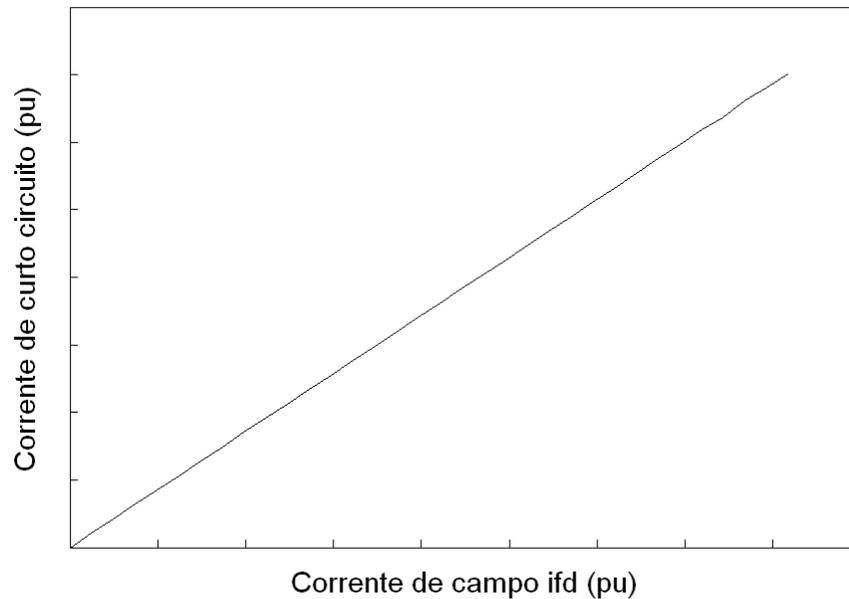


Figura 4.2 - Curva característica de curto-circuito

4.4 Determinação da Reatância Síncrona a Partir Curva Característica de Circuito Aberto e da Curva Característica de Curto-Circuito de um Gerador Síncrono

A figura 4.3 mostra a curva característica de circuito aberto e a curva característica de curto-circuito de um gerador síncrono juntas. A partir delas é possível obter a reatância síncrona não saturada (x_{sns}) e a reatância síncrona saturada (x_{ss}), respectivamente, de um gerador síncrono de pólos lisos (turbogerador), assim como pode-se obter a reatância síncrona não saturada e saturada de eixo direto (x_{dns} e x_{ds}), respectivamente, de um gerador síncrono de pólos salientes. Ambas são determinadas da mesma maneira.

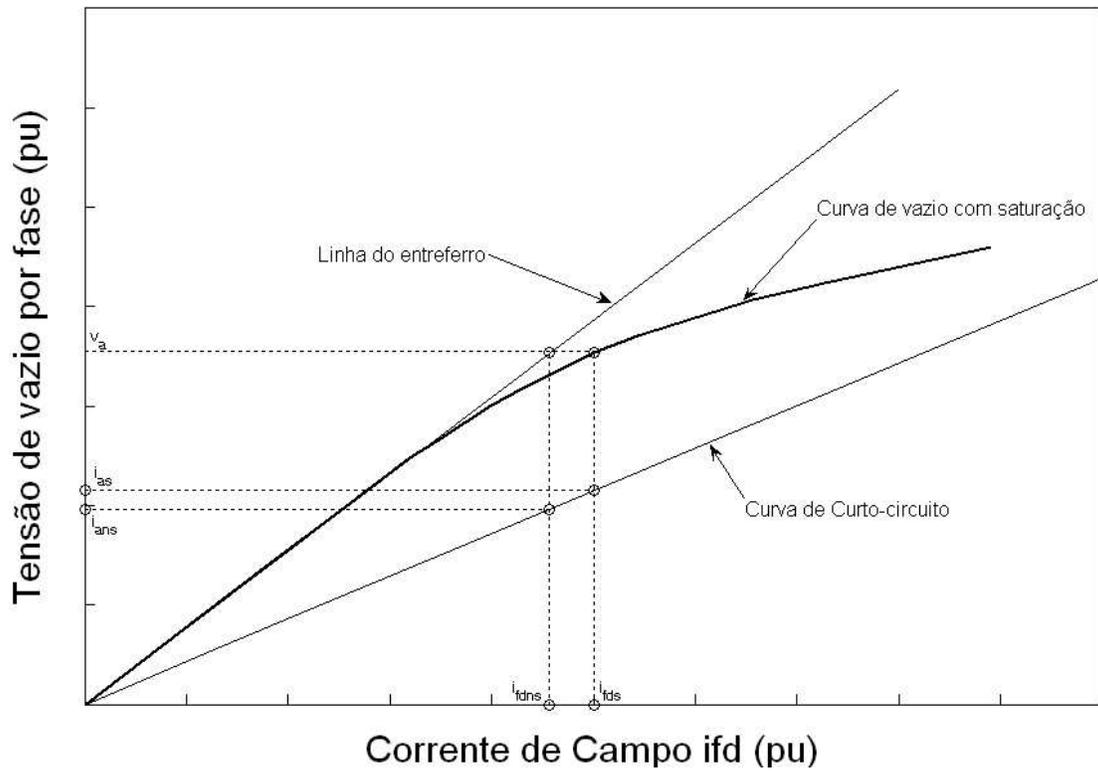


Figura 4.3 - Determinação da reatância síncrona

Em regime permanente, com os enrolamentos de armadura curto-circuitados, o circuito equivalente de regime permanente de um gerador síncrono é mostrado na figura 4.4.

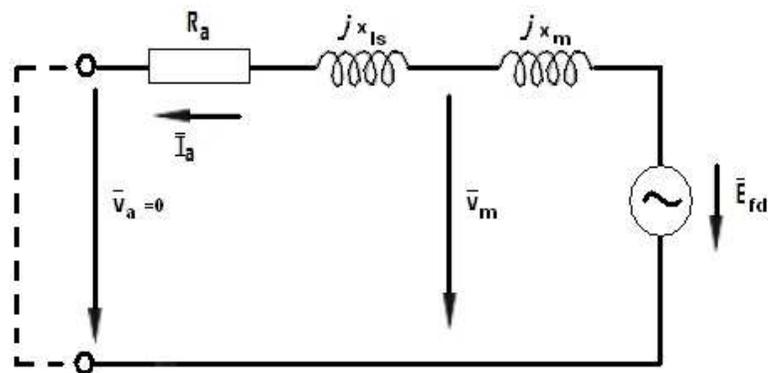


Figura 4.4 - Circuito equivalente do gerador síncrono para determinação de força eletromotriz

E a seguinte equação de tensão em forma fasorial (4.1) pode ser escrita:

$$\bar{E}_{fd} = \bar{I}_a (R_a + jx_s) = \bar{I}_a (R_a + jx_{ls}) + \bar{I}_a jx_m \quad (4.1)$$

Nessa equação \bar{E}_{fd} é a tensão interna em forma fasorial produzida pela corrente de campo vista pelo lado do enrolamento de campo a força eletromotriz \bar{E}_{fd} pode ser escrita como:

$$\bar{E}_{fd} = jx_m \bar{I}_{fd} \quad (4.2)$$

Nas equações (4.1) e (4.2) \bar{I}_a é o fasor da corrente elétrica de enrolamento de armadura, R_a e x_s são, respectivamente, a resistência de enrolamento de armadura por fase e a reatância síncrona do gerador por fase. A reatância síncrona é dada por: $x_s = x_{ls} + x_m$ sendo x_{ls} a reatância de dispersão do enrolamento de armadura por fase e x_m a reatância de magnetização do gerador ou reatância de reação de armadura, \bar{I}_{fd} é o fasor da corrente de excitação ou de campo. Na figura 4.4, \bar{v}_m é o fasor da tensão de magnetização ou tensão do entreferro. Da equação (4.1) e da figura 4.4 tem-se:

Com a armadura em curto-circuito e $R_a \ll x_s$:

$$\bar{v}_m = R_a \bar{I}_a + j\bar{I}_a x_{ls} \quad (4.3)$$

$$\bar{E}_{fd} = jx_m \bar{I}_{fd} = j\bar{I}_a (x_{ls} + x_m) = j\bar{I}_a x_s \quad (4.4)$$

então:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_{fd} (x_m / x_s) \quad (4.5)$$

Assim quando a máquina estiver operando em condições magnéticas não saturadas, x_m / x_s é constante e a corrente de curto-circuito de armadura é proporcional à corrente de excitação, como mostrado anteriormente. Para a corrente nominal de armadura ($\bar{I}_a = 1 pu$) e supondo que

$R_a \ll x_s$ e $x_{ls} = 0,1 pu$ tem-se $\bar{I}_a x_{ls} = 0,1 pu$ e, portanto, $\bar{v}_m = 0,1 pu$. Desse modo conclui-se que em curto-circuito o fluxo de magnetização resultante ou fluxo do entreferro é também $0,1 pu$ o que significa que o gerador em curto-circuito opera bem abaixo da saturação magnética.

Das equações (4.4) e (4.5) obtém-se a equação (4.6) que permite o cálculo da reatância síncrona.

$$x_{sns} = \frac{v_a}{i_{ans}} = x_{dns} \quad (4.6)$$

Na figura 4.3 pode-se verificar os valores de v_a e de i_{ans} que permitem o cálculo de x_{sns} , no caso do gerador síncrono de pólos lisos, e de x_{dns} , no caso de gerador síncrono de pólos salientes. Daqui para frente denominaremos as reatâncias síncronas não saturadas de x_s e x_d , as saturadas serão denotadas por x_{ss} e x_{ds} .

A impedância síncrona é definida como $Z_s = R_s + jx_s$. A resistência elétrica de armadura pode ser medida usando um voltímetro e um amperímetro ou um multímetro com o devido registro de temperatura na qual as medições foram feitas. Se os enrolamentos de estator forem conectados em Y , então R_s é obtida como a média aritmética das resistências elétricas de cada fase do enrolamento de armadura. Caso contrário é necessário uma transformação delta-estrela para a determinação da resistência elétrica por fase já que as equações do modelo matemático dinâmico do gerador é escrito por fase. Em geral, para os geradores síncronos industriais e para os geradores usados em usinas elétricas R_s é bem menor do que x_s .

Embora a reatância síncrona não saturada de eixo direto (x_d) do gerador síncrono de pólos salientes seja determinada conforme foi mostrado para a determinação da reatância síncrona (x_s), para determinar a reatância síncrona de eixo em quadratura (x_q) é necessário realizar outros ensaios, dentre eles, o ensaio de rejeição de carga que será descrito mais a frente.

A reatância síncrona é igual à soma da reatância de magnetização x_m com a reatância de dispersão de armadura x_{ls} . Para a obtenção de x_{ls} e de x_m é necessário realizar um ensaio especial denominado, ensaio de medição da reatância de Potier ou ensaio de fator de potência nulo ou ensaio de determinação de característica do gerador com carga puramente reativa que

permite determinar uma reatância cujo valor se aproxima do valor de x_{ls} (reatância de Potier). O valor de x_m é obtido da relação $x_m = x_s - x_{ls}$. Dessa forma, embora a reatância síncrona x_s possa ser determinada com bom grau de precisão, os valores de x_{ls} e de x_m não são plenamente confiáveis porque a reatância de Potier, determinada no ensaio de medição de reatância de Potier, apresenta valor diferente da reatância de dispersão x_{ls} , principalmente em geradores de pólos salientes.

Quando o gerador opera na tensão terminal é necessário usar o valor da reatância síncrona saturada. Utilizando as curvas características de circuito aberto e de curto-circuito admite-se que o gerador seja substituído por outro equivalente cuja reta de entreferro passe pelo ponto onde a curva característica de circuito aberto passe pela ordenada da tensão nominal como mostrado na figura 4.3. Sobre essa reta, para a tensão terminal nominal, determina-se a corrente de campo i_{fds} .

Para esse valor de i_{fds} determina-se, sobre a curva característica de curto-circuito a corrente de curto-circuito i_{as} . A reatância síncrona saturada é calculada por (4.7).

$$x_{ss} = \frac{v_a}{i_{as}} \quad (4.7)$$

A relação de curto-circuito do gerador é dada por (4.8).

$$RCC = \frac{1}{x_{ss}} \quad (4.8)$$

4.5 Característica em Carga Puramente Indutiva do Gerador Síncrono e Determinação da Reatância de Potier do Gerador Síncrono

Neste ensaio de carga indutiva com fator de potência zero o gerador síncrono, girando na velocidade síncrona, é carregado com carga indutiva com um fator de potência indutivo máximo de 0,2 que está conectada aos terminais do estator. A carga indutiva poderia ser um motor síncrono em vazio e subexcitado. Entretanto há uma série de problemas para a realização desse

ensaio porque é necessário variar o módulo da impedância de carga mantendo o fator de potência nulo.

Na figura 4.5 a característica de carga puramente indutiva do gerador síncrono é mostrada juntamente com a característica de circuito aberto ou em vazio do mesmo.

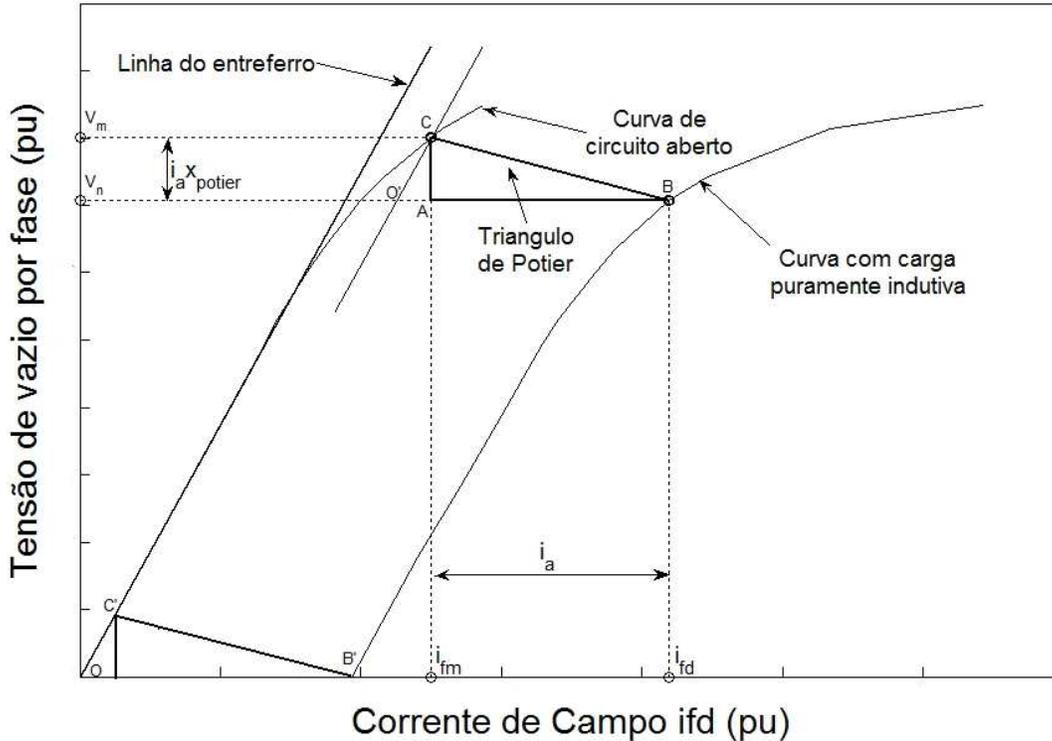


Figura 4.5 - Curvas para determinação da reatância de Potier

O valor do comprimento do segmento OB' é obtido da curva característica de curto circuito para um dado valor de corrente de armadura. Recomenda-se usar a corrente nominal de armadura. Os outros pontos são obtidos a partir da variação da impedância da carga, porém mantendo o fator de potência próximo de zero o que, nem sempre é fácil. Uma maneira expedita de realizar o ensaio consiste em determinar o ponto B da curva de carga indutiva com fator de potência nulo (ou menor do que 0,2) [10]. A partir do ponto B e na reta correspondente à tensão nominal obtém-se o ponto O' fazendo $BO' = B'O$. A partir de O' traça-se uma paralela à reta de entreferro obtendo-se o ponto C . Na perpendicular ao eixo das abscissas que passa por C obtém-se o ponto A .

O segmento AC é tal que $AC = x_{ls} I_a$ e, portanto:

$$x_{ls} \approx x_{potier} = \frac{AC}{I_a} \quad (4.9)$$

O valor da reatância x_{ls} é mais próximo do valor de x_{potier} em geradores de pólos lisos do que em geradores de pólos salientes. Em geradores de pólos salientes pode-se chegar a diferenças de até 20%. A curva característica de carga indutiva com fator de potência nulo ou quase nulo pode ser obtida pela movimentação do triângulo ABC mantendo o vértice C sobre a curva característica em vazio e o lado AB paralelo ao eixo das abscissas. O triângulo ABC é chamado de triângulo de Potier [12].

4.6 Ensaio de Curto Circuito Trifásico Brusco no Gerador Síncrono

Neste ensaio os enrolamentos do estator do gerador síncrono sem carga, com o rotor girando na velocidade nominal e com corrente de campo necessária para manter uma tensão na armadura que pode ser a nominal ou uma tensão reduzida, são simultaneamente curto circuitados [2], [3], [12].

A corrente de armadura e a corrente de campo durante o curto circuito são usadas para obter as diferentes reatâncias e constantes de tempo padronizadas de eixo direto do gerador. Após o curto circuito o rotor continua girando na mesma velocidade constante.

A figura 4.6 mostra as correntes elétricas de curto circuito das fases a , b e c do gerador e a corrente elétrica de campo durante o curto circuito. Elas mostram uma rápida variação no instante do curto-circuito (período subtransitório), uma variação menos rápida a seguir (período transitório) até que o regime permanente seja atingido. Esses períodos são caracterizados por reatâncias subtransitória de eixo direto, transitória de eixo direto, síncrona de eixo direto e por constantes de tempo subtransitória de curto circuito de eixo direto e transitória de curto circuito de eixo direto. Todos esses parâmetros são de eixo direto porque quando o gerador está em curto-circuito só há fluxo de eixo direto.

A figura 4.7 mostra a curva de corrente de curto circuito correspondente ao envelope da média das três correntes elétricas de estator. Com ela pode-se determinar as reatâncias e as constantes de tempo acima mencionadas.

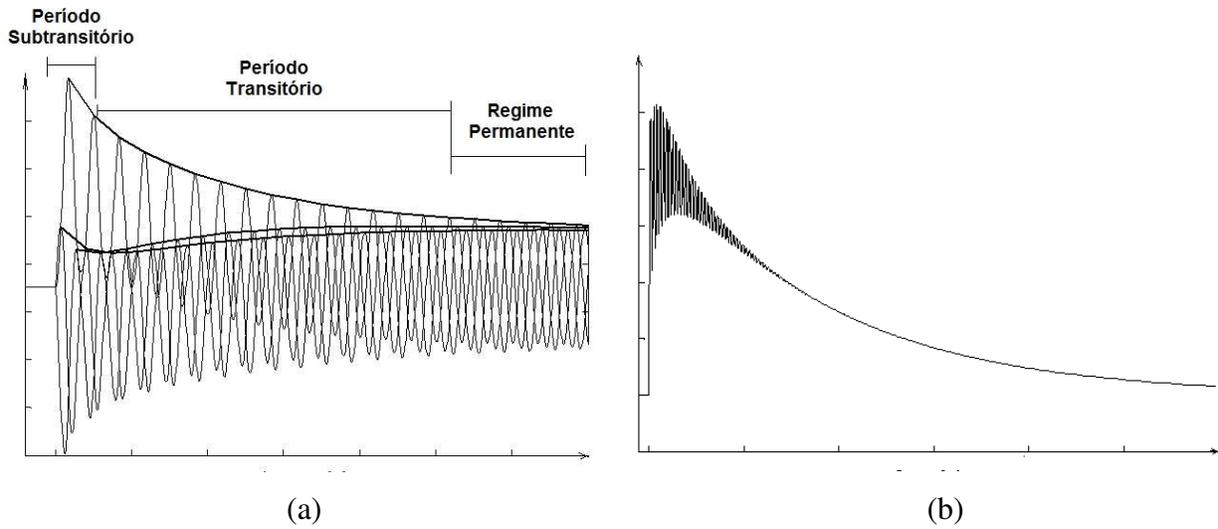


Figura 4.6 - (a) Correntes das fases a, b, c durante o curto circuito, (b) Corrente de campo durante o curto circuito

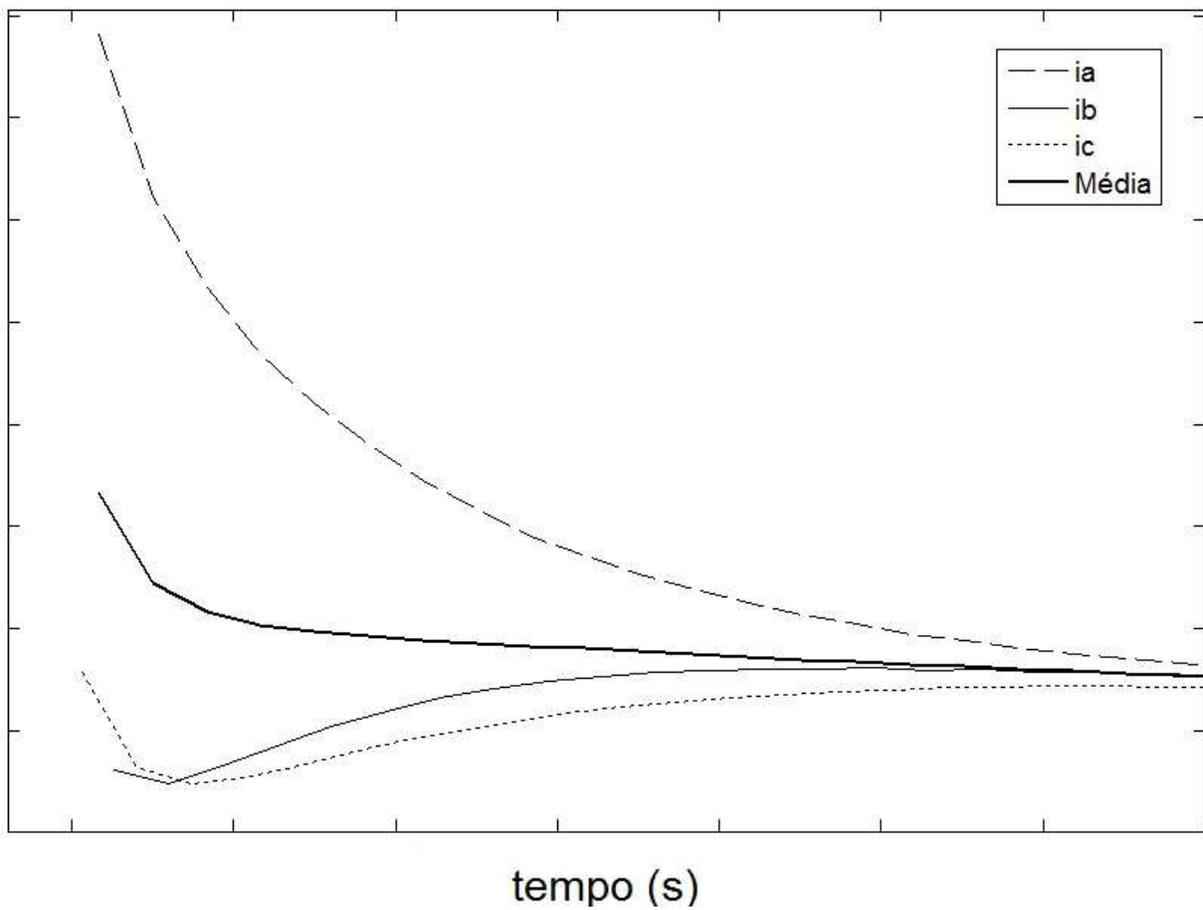


Figura 4.7 - Curvas das envoltórias das correntes e a envoltória média

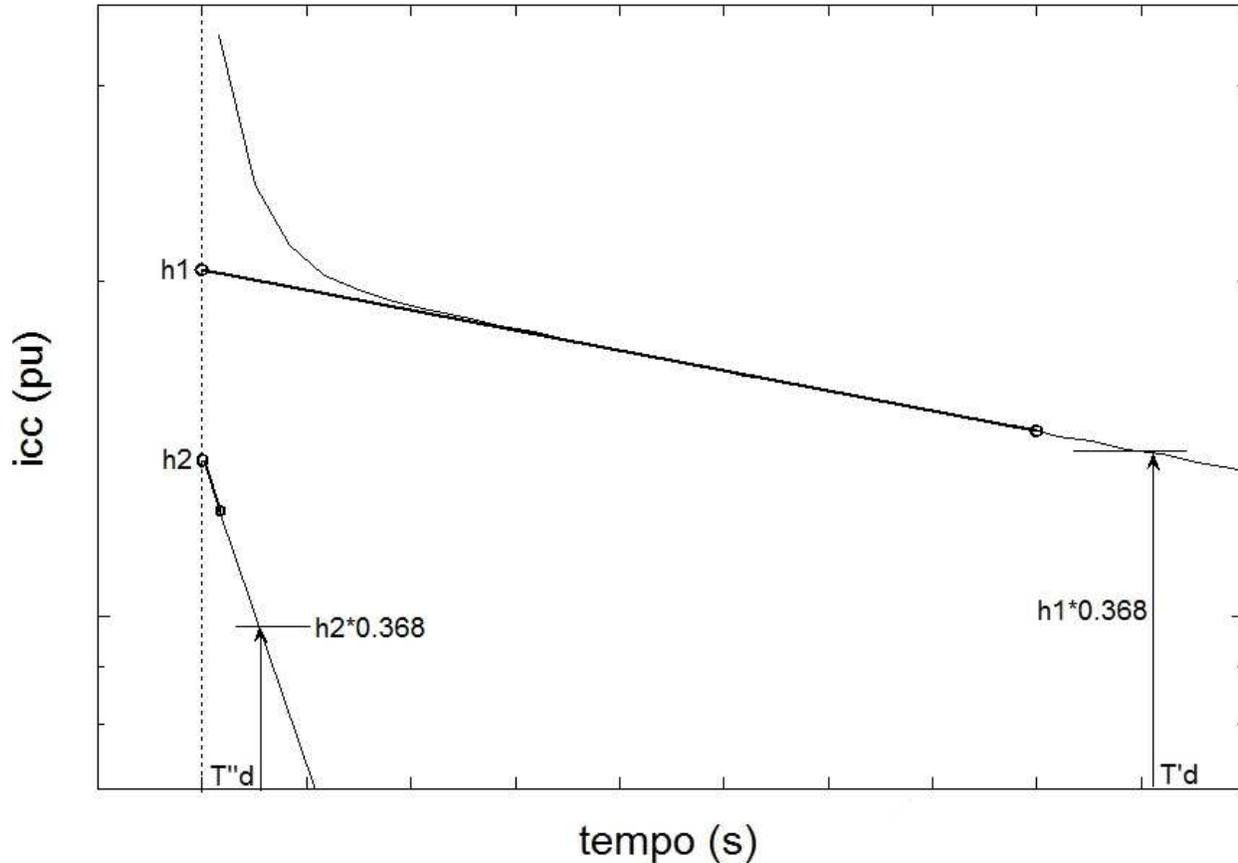


Figura 4.8 – Envoltória da média aritmética das 3 correntes durante o curto circuito

Para o cálculo dos parâmetros utiliza-se o método gráfico como na norma do IEEE [2], [3] prevê aproveitando as quedas exponenciais para o cálculo das constantes de tempo, da figura 4.8. Nessa figura $h1$ é o ponto de interseção com a ordenada no momento do curto circuito para o período transitório da mesma maneira $h2$ para o período subtransitário.

A curva do gráfico com a ordenada em escala logarítmica e sem a componente de regime permanente para uma melhor visualização das curvas exponenciais que compõem a envoltória da curva de curto circuito cabe ressaltar que o método utilizado para obter a interseção com o eixo das ordenadas foi o de registrar no gráfico a tendência das curvas o que se pode observar claramente na figura 4.8, com estes dados pode-se calcular as reatâncias no eixo direto utilizando as seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
x_d &= \frac{E_o}{i_{cc}} \\
x'_d &= \frac{E_o}{i_{cc} + i'_{cc}} \\
x''_d &= \frac{E_o}{i_{cc} + i'_{cc} + i''_{cc}}
\end{aligned}
\tag{4.10}$$

onde:

E_o = Valor de pico da tensão que existia antes do curto circuito.

i_{cc} = Valor de pico da corrente média de regime permanente após do curto circuito.

$i'_{cc} = h1$ e $i''_{cc} = h2$

As constantes de tempo são os tempos requeridos para que as componentes transitória e subtransitória da corrente atinjam $1/e$ ou 0.368 vezes seu valor inicial.

O ensaio de curto circuito brusco é um ensaio que pode ser considerado violento e perigoso para o enrolamento de estator do gerador, principalmente se for realizado à plena tensão. Para realizá-lo em geradores idosos ou quando recomendado pelo fabricante é necessário fazer uma amarração das cabeças de bobinas para impedir a movimentação das bobinas.

4.7 Ensaio de Rejeição de Carga

O ensaio de rejeição de carga foi proposto inicialmente em [14] e é apresentado em [2] e [3] como um método adequado para determinação da maioria dos parâmetros de geradores síncronos. Ele não é perigoso para a máquina no sentido de danificá-la e consiste basicamente na abertura do disjuntor que conecta os terminais do gerador ao sistema de energia elétrica ou à carga (no caso de geradores isolados). O ensaio pode ser realizado à plena tensão e plena carga ou em cargas reduzidas. Os parâmetros são obtidos pela análise da envoltória da curva de tensão terminal média entre as três fases do gerador, como se viu no caso do ensaio de curto circuito trifásico brusco. Todos os parâmetros, exceto o momento de inércia, as resistências de enrolamentos de estator e de campo e a reatância de dispersão, podem ser determinados pelos diversos tipos de ensaio de rejeição de carga como será visto a seguir.

Para que o ensaio seja bem realizado ele deve ser iniciado pela abertura do disjuntor que conecta o gerador ao sistema de energia elétrica simultaneamente com o fechamento da turbina que aciona o gerador. O gerador pode estar na tensão nominal ou em tensão reduzida, porém recomenda-se realizar o ensaio à plena tensão.

Para evitar a ação do regulador de tensão sobre o comportamento transitório do gerador durante a rejeição de carga o mesmo deve estar em modo manual de tal maneira que a tensão de excitação seja mantida exatamente onde estava imediatamente antes da abertura do disjuntor. A excitatriz deve ser uma fonte de tensão e não de corrente.

Entretanto para a determinação dos diversos parâmetros do gerador síncrono há necessidade de realizar pelo menos dois entre três tipos de rejeição de carga, que são os seguintes: a) ensaio de rejeição de carga de eixo direto ou ensaio de eixo d , b) ensaio de rejeição de carga de eixo em quadratura ou de eixo q e c) ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário.

De acordo com [12] a determinação de parâmetros através do ensaio de rejeição de carga apresenta resultados compatíveis com os obtidos pelo ensaio de resposta em frequência, porém este último é ideal para máquinas de laboratório sendo mais complicado e mais caro de ser realizado na usina do que o ensaio de rejeição de carga. Além disso, com a resposta em frequência é mais difícil de obter parâmetros sob condições de saturação magnética.

O grande problema para realizar esse ensaio no campo é a manutenção da tensão de excitação constante durante o ensaio, principalmente em usinas totalmente automatizadas. Nas usinas automatizadas de tal modo que não se consegue desativar a automatização é difícil realizar esse tipo de ensaio.

Dessa forma esse ensaio deve ser realizado durante o comissionamento, antes da automatização, ou então realizar uma automatização tenha um modo manual completo de operar a máquina.

4.7.1 Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto

Para a realização dessa rejeição de carga o gerador deve estar conectado ao sistema com fator de potência nulo, ou seja, em carga totalmente reativa. Dessa maneira há na máquina somente a corrente de armadura de eixo direto e, conseqüentemente somente fluxo de armadura

de eixo direto como mostrado na figura 4.9. A máquina pode estar fornecendo potência reativa indutiva (não há efeito de saturação) ou potência reativa capacitiva (há efeito de saturação).

Nesse ensaio são determinados os parâmetros padronizados de eixo direto somente x_d , x'_d , x''_d , T'_{do} e T''_{do} . Portanto são somente parâmetros de eixo direto.

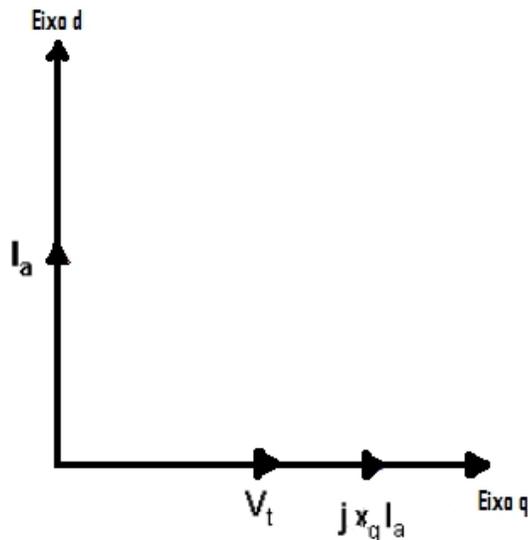


Figura 4.9 - Diagrama vetorial no ensaio de rejeição de carga no eixo direto

Quando o gerador for subitamente desconectado da carga e a turbina fechada, o valor eficaz da corrente elétrica de armadura (I_a) deve ser adquirido assim como também devem ser adquiridos os sinais das tensões terminais instantâneas das três fases. A média aritmética entre essas três tensões deve ser calculada ponto a ponto e a envoltória da média deve ser registrada em gráfico como mostrado nas figuras 4.10 e 4.11.

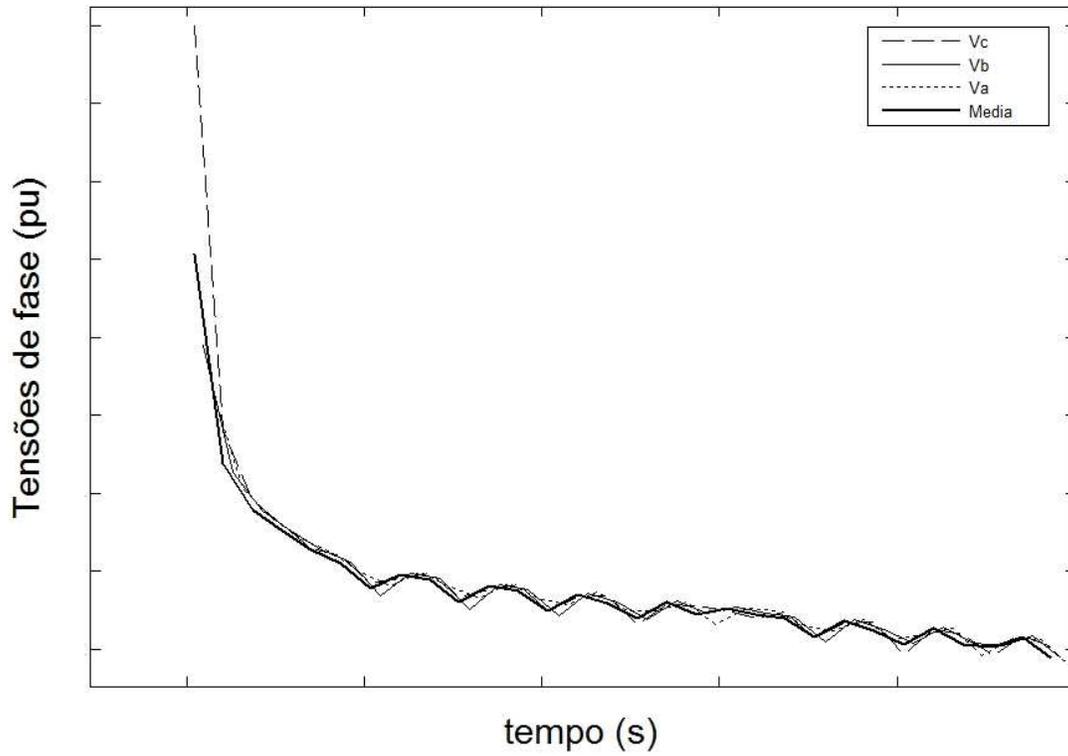


Figura 4.10 – Curvas de envoltórias das tensões da armadura das três fases e curva da tensão média durante a rejeição

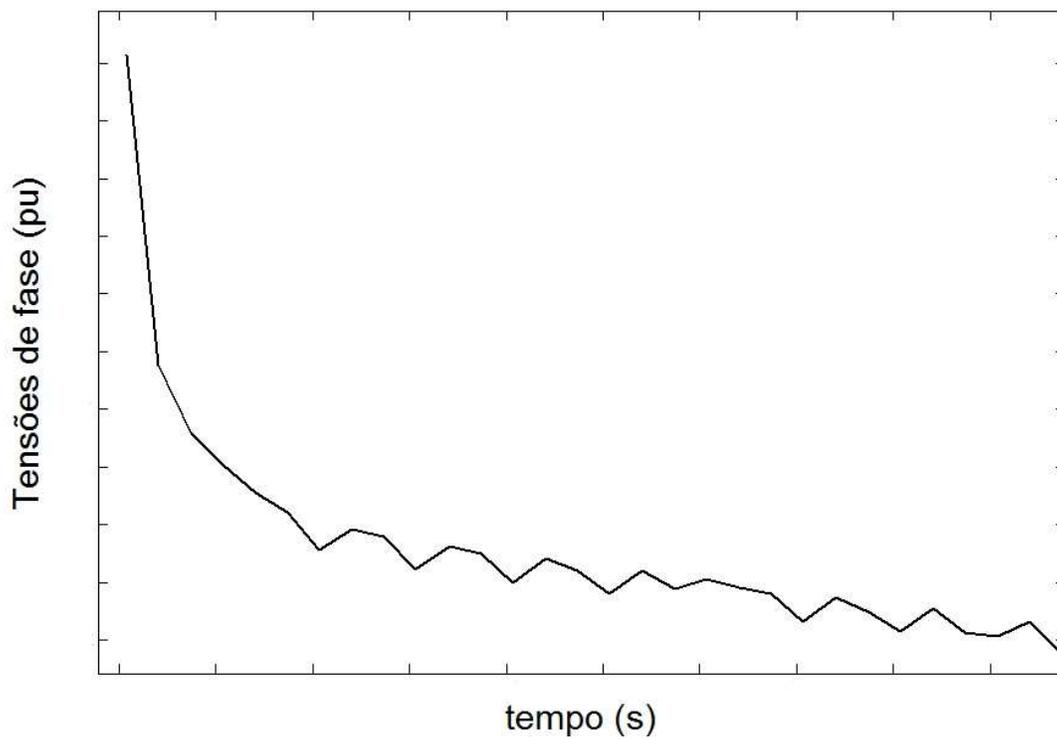


Figura 4.11 – Curva da média das envoltórias de tensão de fase da armadura

Todos os parâmetros no eixo direto anteriormente mencionados são determinados a partir da curva média de tensão de armadura mostrada na figura 4.11, que será chamada de tensão terminal v_t . Não é necessário utilizar a escala semilog neste ensaio.

O bloco Matlab/Simulink de gerador síncrono trabalha com as componentes de eixo direto e de eixo em quadratura de tal maneira que para que se tenha a amplitude da tensão nos terminais do estator deve-se calculá-la a partir dessas componentes como mostrado na equação (4.11). A figura 4.12 mostra a função v_t e a média das envoltórias. Vê-se que a diferença é muito pequena de modo que se pode trabalhar com qualquer uma delas. Neste caso foi escolhida a função v_t .

$$|v_t| = \sqrt{v_q^2 + v_d^2} \quad (4.11)$$

onde: v_q e v_d são as tensões nos eixos em quadratura e direto respectivamente.

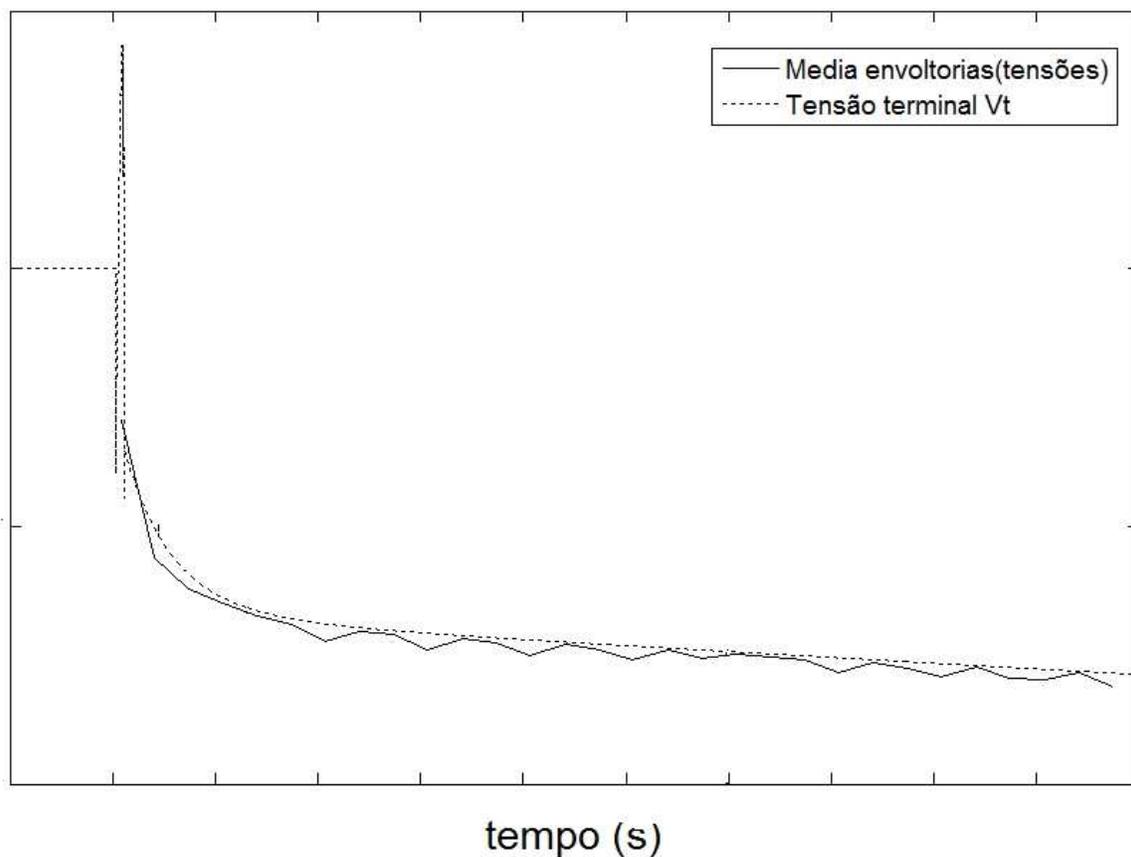


Figura 4.12 – Curva média envoltória e tensão terminal de armadura

A figura 4.13 mostra o decaimento da tensão terminal depois da rejeição de carga. Os valores de x_d , x'_d , e x''_d podem ser determinados através das expressões (4.12) como mostrado em [12] [14] [15].

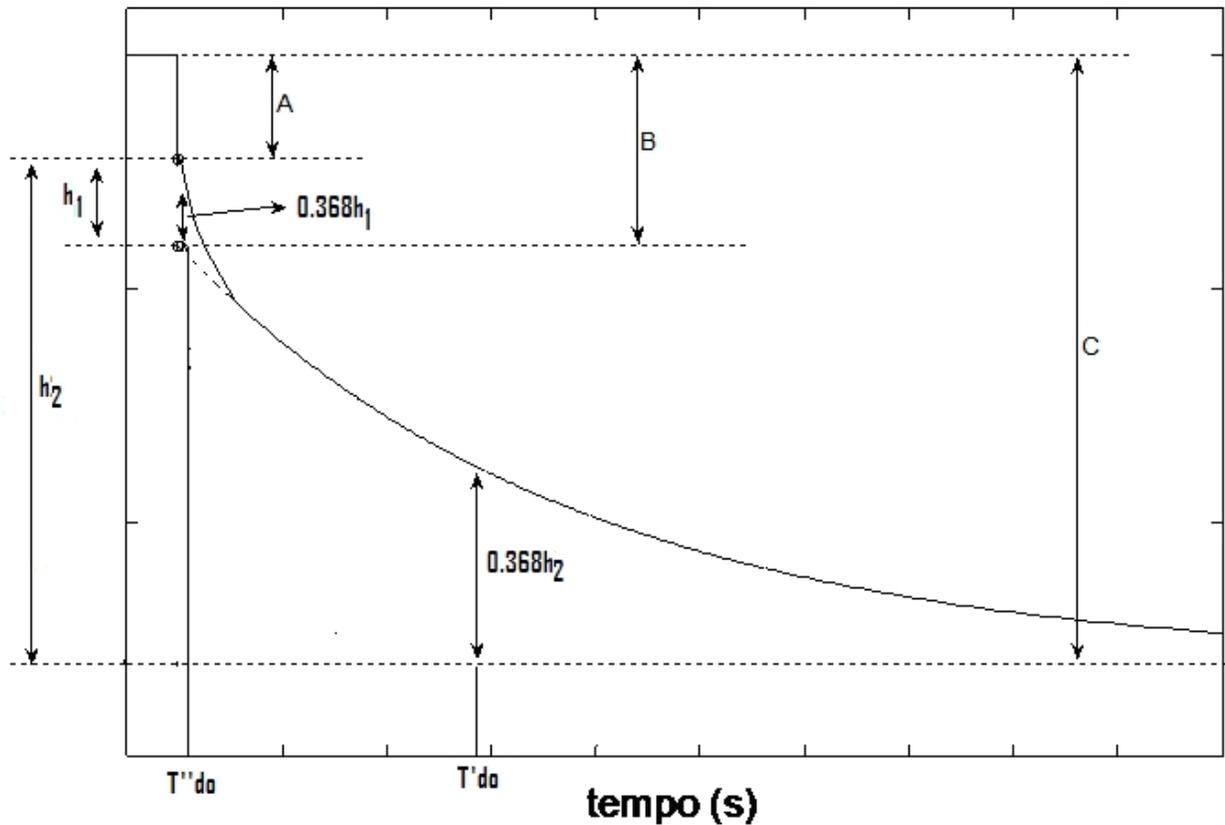


Figura 4.13 – Curva envoltória v_t mostrando A, B, C e constantes de tempo

A maneira de determinar os valores dos parâmetros é baseada numa metodologia gráfica apresentada em [14], [2] onde a tensão terminal da máquina, que apresenta decaimentos exponenciais, é tratada de modo a poderem-se determinar constantes de tempo transitória e subtransitória da mesma maneira que é feito no ensaio de curto-circuito brusco. Conforme [14] as reatâncias são calculadas pelas expressões a seguir:

$$\begin{aligned}
 x_d &= \frac{C}{i_o} \\
 x'_d &= \frac{B}{i_o} \\
 x''_d &= \frac{A}{i_o}
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

Onde i_o é a corrente medida no momento da rejeição, os valores de A , B e C são também mostrados na figura 4.13 assim como as constantes de tempo transitória e subtransitória de circuito aberto T'_{do} e T''_{do} também podem ser obtidas da mesma figura tendo em conta que estas constantes de tempo são os tempos requeridos para que as componentes transitória e subtransitória da tensão decresçam $1/e$ ou 0,368 vezes seu valor inicial.

A curva da corrente de campo durante a rejeição de carga pode também ser usada para obtenção desses parâmetros. Na figura 4.14 mostra-se a utilização desta curva para a obtenção de T'_{do} e T''_{do} , aproveitando o comportamento exponencial e a tendência da curva obtemos o valor das interseções com o eixo das ordenadas no momento que acontece a falta obtendo assim $h1e h2$ para depois obter T'_{do} e T''_{do} , que são os tempos para que as componentes transitória e subtransitória da corrente de campo atinjam $1/e$ ou 0,368 vezes seu valor inicial neste caso $h1e h2$.

O ensaio de rejeição de carga pode ser realizado em condições de saturação simplesmente sobreexcitando-se o gerador. Nesse caso a carga será indutiva, com o gerador sobreexcitado fornecendo reativos capacitivos. Após a rejeição de carga, a tensão crescerá ao contrário do que se obtém quando a carga é capacitiva como é o caso da rejeição de carga mostrada nas figuras neste tópico.

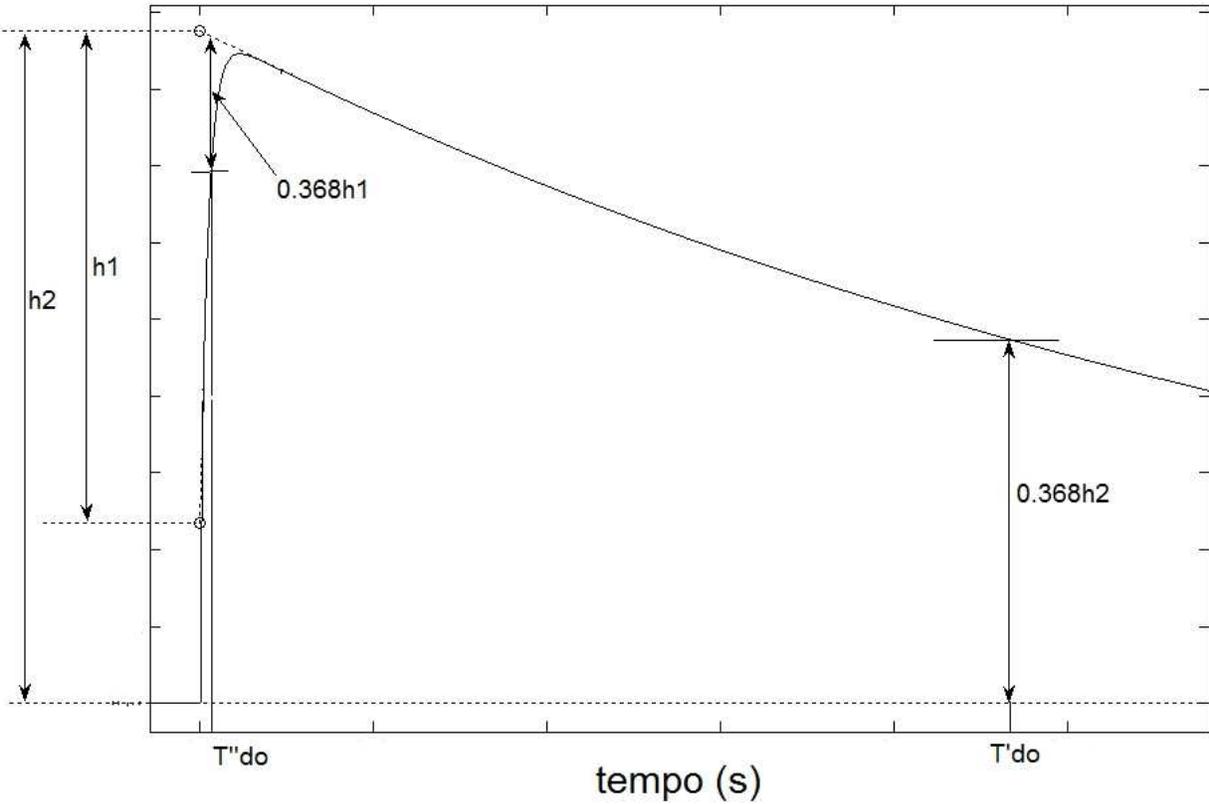


Figura 4.14 – Curva do campo i_{fd} durante a rejeição

4.7.2 Ensaio de rejeição de carga de eixo em quadratura

Para a determinação dos parâmetros de eixo em quadratura realiza-se o ensaio de rejeição de carga no eixo de quadratura. Para isto é desejável que a corrente de armadura tenha só a componente de eixo em quadratura, conforme mostra o diagrama vetorial da figura 4.15 e, portanto o fluxo de armadura terá também o sentido do eixo direto. Assim a rejeição é realizada quando o ângulo da corrente de armadura em relação à tensão terminal do gerador (θ) for igual ao ângulo de carga da máquina no instante da rejeição de carga (δ). A figura 4.16 mostra a variação da envoltória da tensão terminal após a rejeição de carga. Nesse ensaio são determinados somente os valores dos parâmetros x_q , x_q'' .

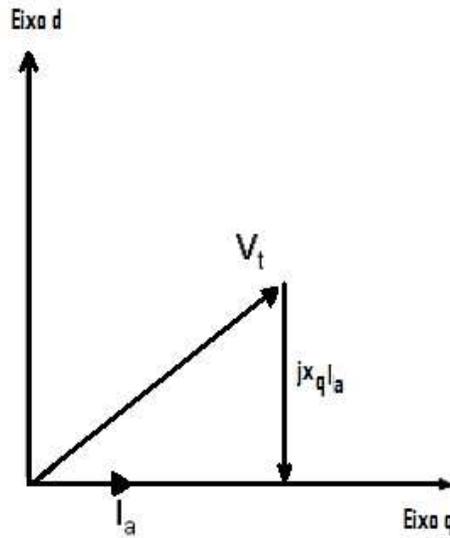


Figura 4.15 – Diagrama vetorial no instante da rejeição da carga no eixo q

De maneira análoga ao método anterior a média aritmética entre as três tensões de fase deve ser calculada ponto a ponto e a envoltória da média deve ser registrada em gráfico como mostrado na figura 4.16.

De acordo com [14] com os valores medidos de A, B, e C as expressões (4.13) e (4.14) podem ser utilizadas para o cálculo de x_q e x_q'' . Estas expressões são válidas para geradores síncronos de pólos lisos.

$$x_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2}}{iq_o} \quad (4.13)$$

$$x_q'' = \frac{(\sqrt{A^2 - C^2} - \sqrt{B^2 - C^2})}{iq_o} \quad (4.14)$$

Verificou-se neste trabalho que a expressão (4.14) não é válida para geradores síncronos de pólos salientes. Verificou-se também que o valor adequado para x_q'' é dado pela expressão (4.15).

$$x_q'' = \frac{(\sqrt{A^2 - C^2} - \sqrt{A^2 - B^2})}{iq_o} \quad (4.15)$$

As constantes de tempo de eixo em quadratura T'_{qo} , T''_{qo} não podem ser calculadas por este método assim como os parâmetros de eixo d .

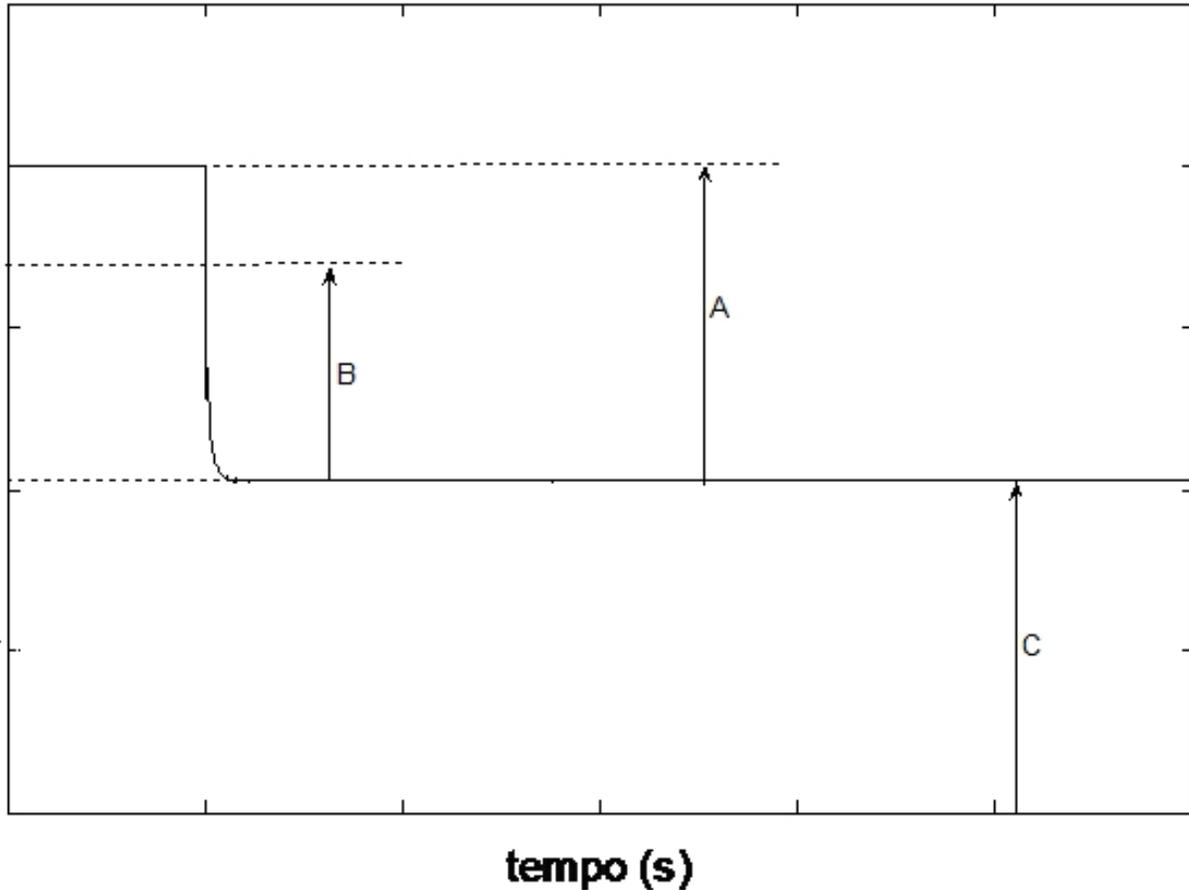


Figura 4.16 – Curva envoltória v_t com valores de A, B e C

4.7.3 Rejeição de Carga em Eixo Magnético de Armadura Arbitrário.

Para realizar a rejeição de carga em eixo magnético de armadura arbitrário a máquina síncrona é rapidamente chaveada para realizar a rejeição em qualquer instante e em qualquer condição de tensão terminal e de carga. A envoltória da tensão de armadura durante a rejeição de carga é obtida bem como o do ângulo de carga (δ) no instante da rejeição e o valor da envoltória da corrente de eixo q da armadura.

Para determinação dos parâmetros de eixo direto e de eixo em quadratura é necessário observar as equações de regime permanente do gerador na forma vetorial, abaixo:

$$\bar{v}_q = -R_s \bar{I}_q - \omega_e L_d \bar{I}_d + \bar{E}_{fd} \quad (4.16)$$

$$\bar{v}_d = -R_s \bar{I}_d + \omega_e L_q \bar{I}_q \quad (4.17)$$

A literatura mostra que é possível calcular as reatâncias de eixo q utilizando a expressão (4.17) fazendo $R_s \bar{I}_d = 0$ e procedendo como se vê abaixo:

$$\bar{v}_d = \omega_e L_q \bar{I}_q = x_q \bar{I}_q \quad (4.18)$$

$$|\bar{v}_d| = x_q |\bar{I}_q| \quad (4.19)$$

$$v_d = x_q i_q \quad (4.20)$$

$$v_t \text{sen} \delta = x_q i_q \quad (4.21)$$

$$x_q = \frac{v_t \text{sen} \delta}{i_q} = \frac{v_t \text{sen} \delta}{i_t \text{sen}(\delta + \phi)} \quad \text{com: } i_t = \sqrt{i_q^2 + i_d^2} \quad (4.22)$$

Utilizando o mesmo princípio tentou-se determinar x_d , de (4.16) fazendo $R_s \bar{I}_q = 0$ temos:

$$\bar{v}_q = -x_d \bar{I}_d + (\bar{x}_{md} \bar{I}_{fd})_q \cong -x_d \bar{I}_d + (\bar{x}_d \bar{I}_{fd})_q \quad (4.23)$$

$$v_q = v_t \cos \delta = \sqrt{x_d^2 i_d^2 + x_d^2 i_{fd}^2} = x_d \sqrt{i_d^2 + i_{fd}^2} \quad (4.24)$$

$$x_d = \frac{v_t \cos \delta}{\sqrt{(i_t \cos(\delta + \phi))^2 + i_{fd}^2}} \quad (4.25)$$

$i_{fd} = i_{fd}^r$ = Corrente de campo vista do lado do primário.

i_t = Corrente terminal de armadura

Desse modo podem-se obter as componentes de eixo direto e de eixo em quadratura das envoltórias das tensões $(v_t \text{Sen } \delta, v_t \text{ cos } \delta, i_{do}, i_{qo})$. A figura 4.17 mostra a variação de tensão obtida de $v_t \text{Sen } \delta$, onde a escala logarítmica foi usada para a tensão.

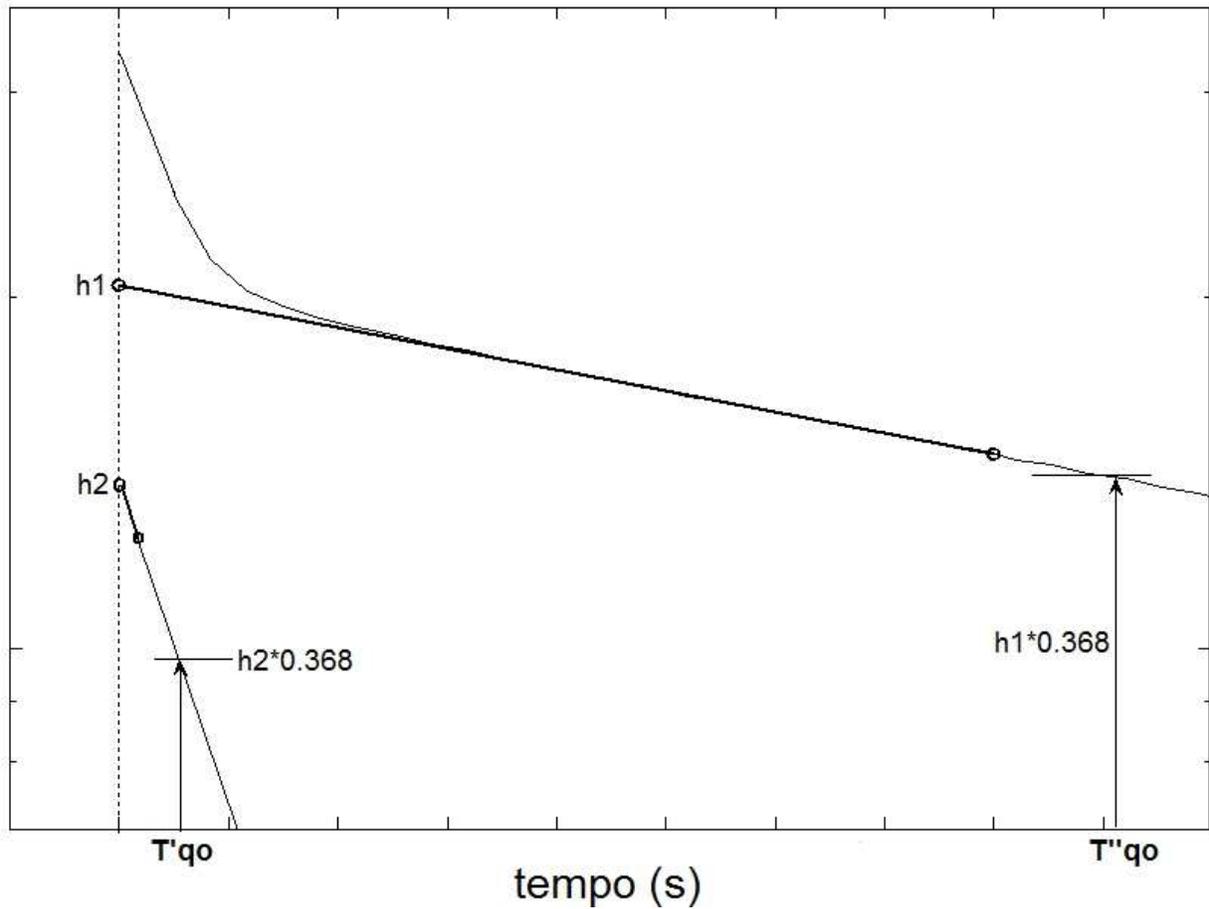


Figura 4.17 – Curva envoltória $v_t \text{Sen } \delta$ de rejeição no eixo arbitrário

Considerando as equações da máquina em regime permanente (4.22), pode-se mostrar que a reatância síncrona do eixo em quadratura pode ser obtida como:

$$x_q = v_t \frac{\text{Sen } \delta}{i_{qo}} \quad (4.26)$$

e as reatâncias, transitória e subtransitória do eixo em quadratura podem ser obtidas como:

$$x'_q = x_q - \frac{(v_t \text{sen} \delta)'_o}{i_{qo}} \quad (4.27)$$

$$x''_q = x'_q - \frac{(v_t \text{sen} \delta)''_o}{i_{qo}}$$

Nestas equações os termos $(v_t \text{Sen} \delta)'_o$ e $(v_a \text{Sen} \delta)''_o$ estão presentes. Estes são também mostrados na figura 4.17 e correspondem ao valor inicial da componente de eixo direto das tensões terminais, transitória e subtransitória (*h1 e h2*) respectivamente. As constantes de tempo, transitória e subtransitória (T'_{qo} , T''_{qo}) são mostradas e a forma de calculá-las é a mesma utilizada nos ensaios anteriores devido ao seu comportamento exponencial depois da rejeição.

Entretanto não foi possível calcular os parâmetros de eixo direto porque o procedimento mostrado a partir da equação (4.16) não produziu comportamento parecido com o tratamento da equação (4.17). Dessa maneira esse método só permite calcular parâmetros padronizados de eixo *q*.

A aquisição do ângulo de carga (δ) do gerador e do valor da corrente elétrica eficaz de armadura no instante da rejeição de carga bem como a envoltória da tensão terminal eficaz do gerador ao longo do tempo permite determinar esses valores exatamente no instante da abertura do disjuntor permitindo também o cálculo da corrente de eixo direto da armadura, da corrente de eixo em quadratura da armadura, da tensão terminal de eixo direto da armadura e da tensão terminal de eixo em quadratura da armadura.

No capítulo 5 será mostrado, com exemplos, que os cálculos dos parâmetros de eixo em quadratura apresentam valores adequados.

Capítulo 5

Resultados de Simulações de Ensaios para Determinação dos Parâmetros Operacionais de Geradores Síncronos

5.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se os resultados de simulações de ensaios realizados com um gerador síncrono de pólos salientes e com um gerador síncrono de pólos lisos para determinação dos seus parâmetros operacionais. Os parâmetros fundamentais ou reais desses geradores são conhecidos e constituem parte dos dados de entrada para simulação dos ensaios dos geradores usando o software Matlab/Simulink e sua biblioteca SimPowerSystems.

Os ensaios realizados foram os seguintes: a) ensaios para obtenção das características de circuito aberto e de curto-circuito para a determinação da reatância síncrona de eixo direto; b) ensaio para a determinação da reatância de Potier, que é uma aproximação da reatância de dispersão de enrolamento de estator; c) ensaio de rejeição de carga de eixo direto para determinação dos parâmetros padronizados de eixo direto; d) ensaio de rejeição de carga de eixo em quadratura para determinação de parâmetros padronizados de eixo em quadratura; e) ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário para determinação dos parâmetros de eixo em quadratura e f) ensaio de curto circuito brusco para determinação dos parâmetros padronizados de eixo direto.

Obtidos os parâmetros padronizados $(x'_d, x'_q, x''_d, x''_q, T'_{do}, T'_{qo}, T''_{do}, T''_{qo}, T'_d, T'_q, T''_d, T''_q)$, através dos ensaios acima mencionados, podem-se determinar os parâmetros fundamentais ou reais $(R_s, x_{ls}, R_{fd}, x_{lfd}, R_{kd}, x_{lkd}, R_{kq}, x_{lkq}, x_d, x_q, x_{md}, x_{mq})$, usando as equações (3.44) a (3.51) e (3.59) a (3.62).

5.2 Simulação Dinâmica da Operação do Gerador Síncrono Usando o Software Matlab/Simulink e sua Biblioteca SimPowerSystems

A biblioteca SimPowerSystems do software Matlab/Simulink contém blocos que permitem realizar simulações dinâmicas de sistemas de energia elétrica. Dentre eles, existem 5 diferentes blocos que permitem a simulação da dinâmica de máquinas síncronas. Neste trabalho foi utilizado o bloco “Synchronous machine *pu* standard” no qual os dados de entrada são, entre outros, os parâmetros padronizados da máquina síncrona em *pu*.

O modelo matemático dinâmico da máquina síncrona desse bloco é constituído das equações diferenciais mostradas no capítulo 2 que são as mesmas apresentadas em [4]. Há possibilidades de considerar ou não a saturação magnética. O modelo matemático da saturação magnética é o proposto também em [4] e a máquina síncrona pode funcionar como motor ou como gerador. Neste trabalho descreve-se o funcionamento do bloco para funcionar como gerador síncrono.

Os dados de entrada para o bloco são: a potência aparente nominal do gerador (em *kVA*), tensão nominal de linha (em *V*), frequência (em *Hz*) e corrente de campo nominal (em *A*), os parâmetros padronizados em *pu* ($x_d, x_q, x'_d, x'_q, x''_d, x''_q, T'_{do}, T'_{qo}, T''_{do}, T''_{qo}, T'_d, T''_d, T'_q, T''_q$), a resistência de enrolamento de estator por fase, o coeficiente de inércia (em segundos), o coeficiente de amortecimento (*pu*), o número de pólos e as condições iniciais em *pu* (ângulo de carga, correntes eficazes de armadura em módulo e ângulo e a tensão de campo).

Os parâmetros padronizados são calculados a partir dos valores dos parâmetros fundamentais através das equações que as relacionam (3.49) a (3.56). O diagrama de blocos de simulação usado nesse bloco do Matlab/Simulink é o visto na figura 5.1 a 5.3.

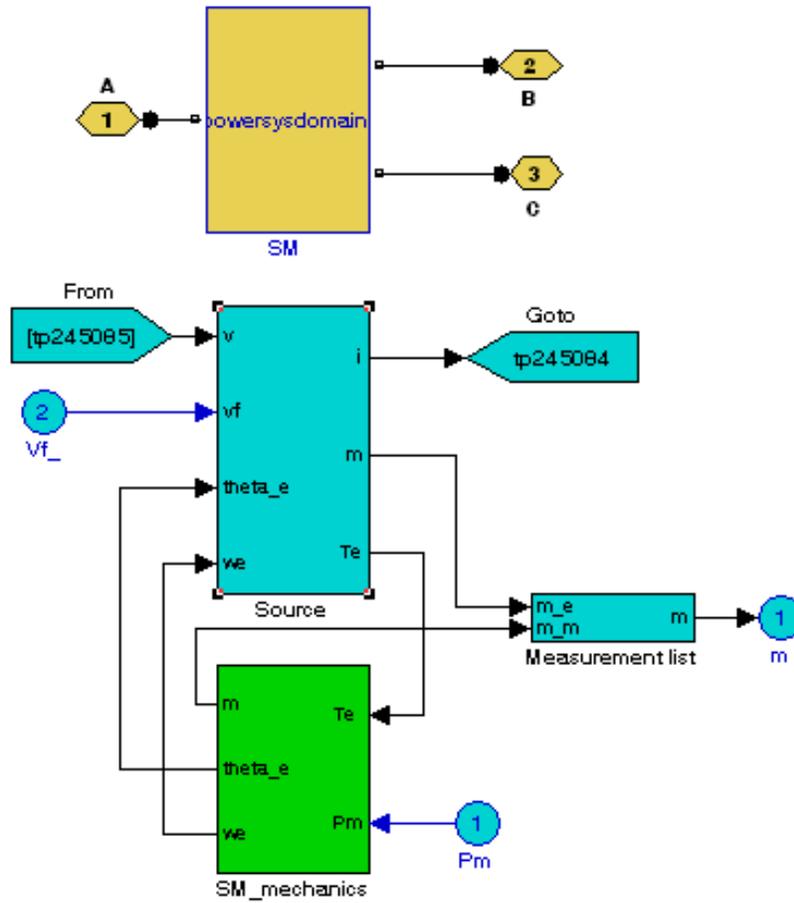


Figura 5.1 – Diagrama de blocos da máquina síncrona no SIMPOWER

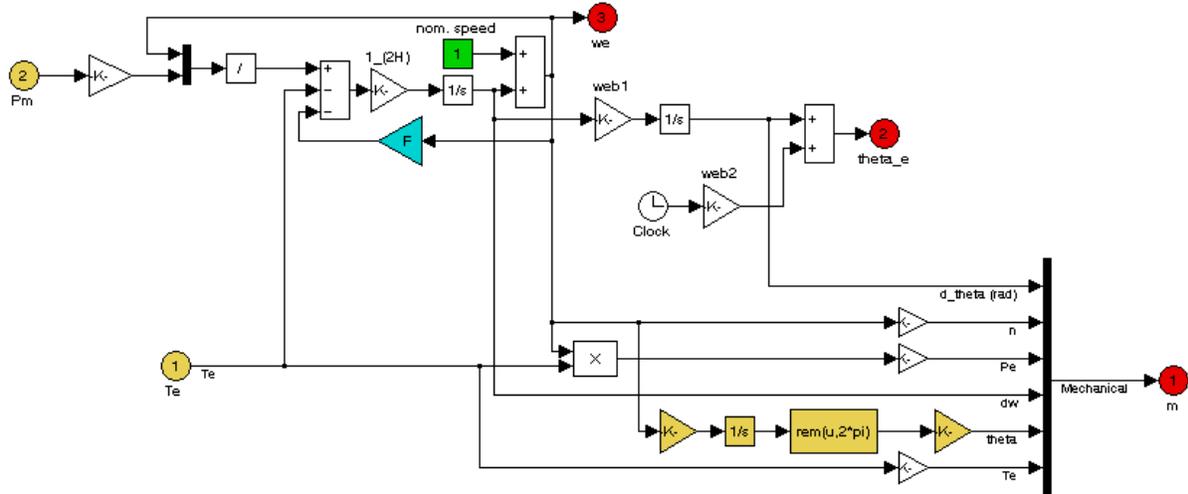


Figura 5.2 – Diagrama blocos do subsistema *SM_mechanics* que modela a parte mecânica da máquina síncrona

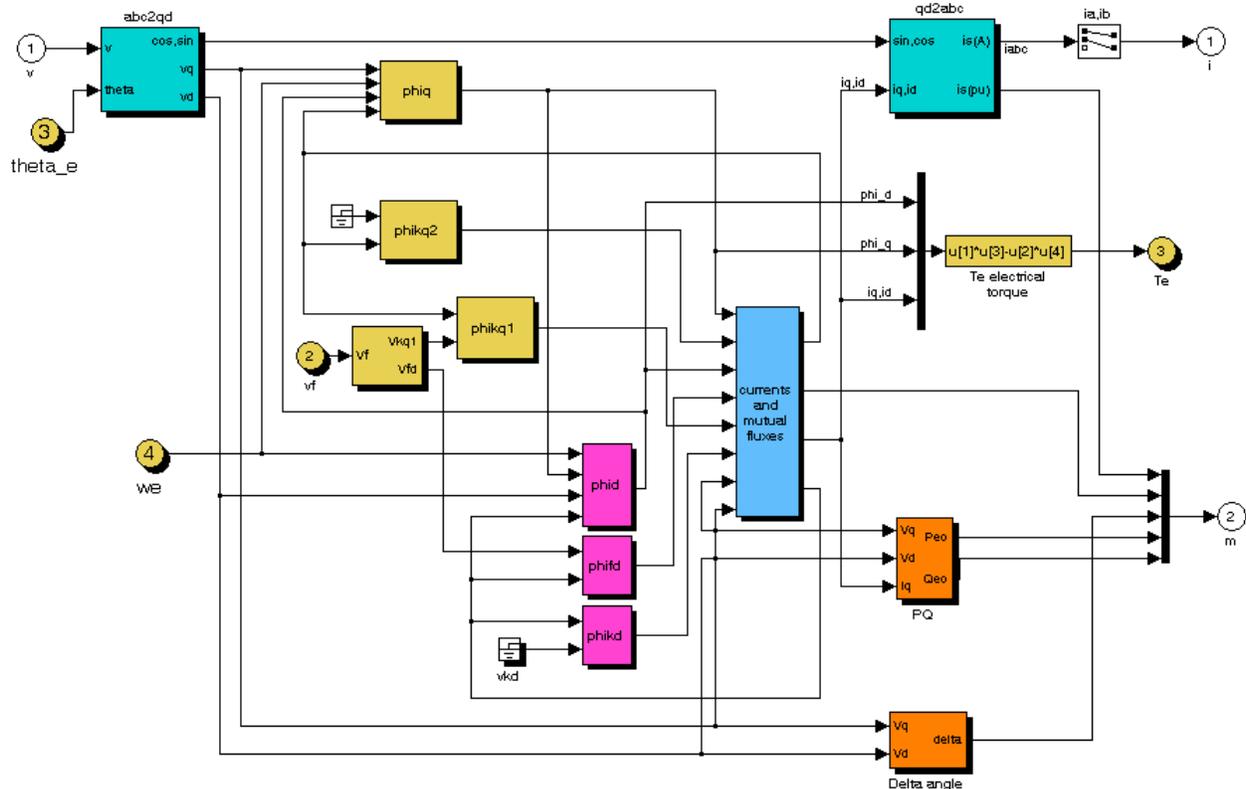


Figura 5.3 – Diagrama de blocos do subsistema *Source* da máquina síncrona

O método numérico a ser usado na simulação pode ser escolhido ao se configurar o bloco entre sete opções. Neste trabalho utilizou-se a opção *ode23tb* que inclui o método de integração Runge Kutta de 4ª. ordem.

As variáveis de entrada que podem ser controladas são a potência mecânica de saída do acionador (turbina ou motor) e a tensão de campo vista do lado do estator. O gerador pode estar conectado a um barramento infinito para o qual há um bloco na biblioteca *SimPowerSystems*, um sistema de energia elétrica que pode ser simulado através de um conjunto de blocos existentes também no *SimPowerSystems*, ou por uma carga isolada que pode ser representada por um bloco do *SimPowerSystems*.

Os dados de saída em unidades do sistema internacional de unidades são os seguintes: correntes elétricas instantâneas dos enrolamentos em coordenadas *dqo* e em coordenadas *abc*, correntes elétricas dos enrolamentos de campo e amortecedores, as envoltórias das tensões de fase dos enrolamentos, as envoltórias das tensões de fase *abc*, as tensões instantâneas em variáveis *dqo*, os fluxos de magnetização de eixos, direto e em quadratura, o ângulo do rotor (radianos), o ângulo de carga (em radianos), a velocidade angular, o torque eletromagnético

(N.m), as potências elétrica ativa e reativa. O diagrama de simulação utilizado neste trabalho é mostrado na figura 5.4.

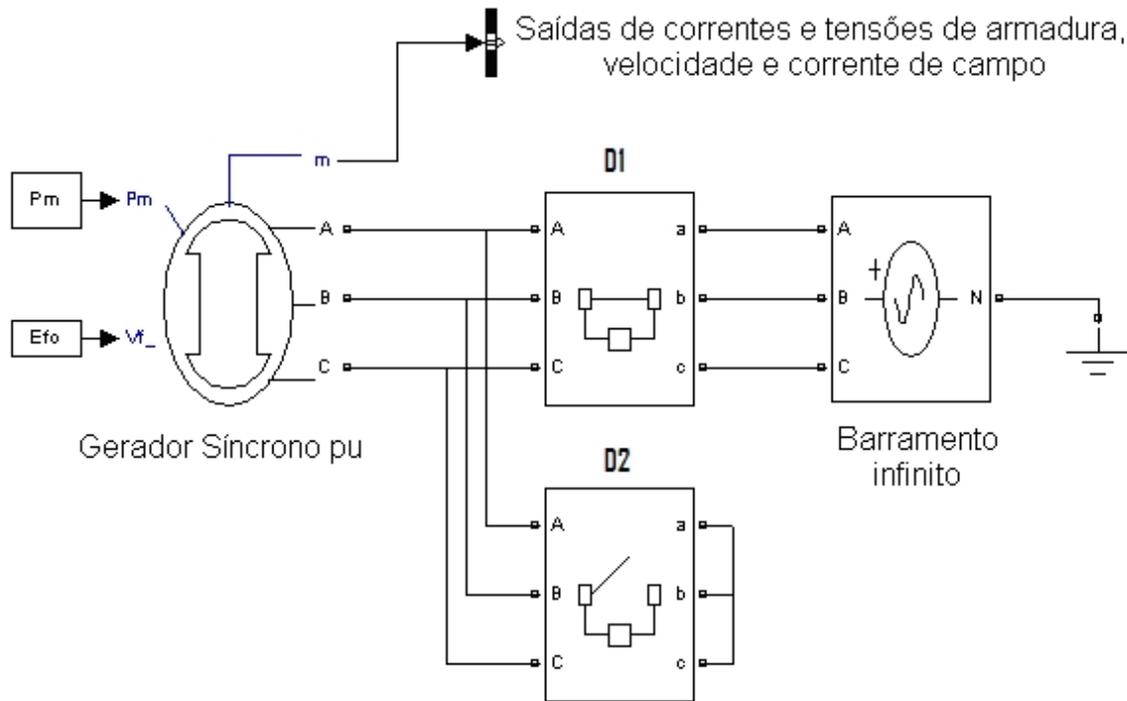


Figura 5.4 – Diagrama blocos usado nas simulações

Nesse diagrama a carga é representada por um barramento infinito cuja tensão terminal pode ser variada. O curto-circuito brusco nos terminais do gerador é feito pelo disjuntor D2 mostrado na figura 5.4. Neste trabalho foram utilizados os dados de dois geradores síncronos sendo que um deles é um gerador síncrono de pólos salientes real, que pertence a uma pequena central hidroelétrica de uma concessionária de energia elétrica, cujos dados de projeto foram fornecidos pelo seu fabricante. O outro é um gerador de pólos lisos típico, apresentado em [1].

5.3 Simulação de Ensaio Realizados com o Gerador de Pólos Salientes

O gerador síncrono de pólos salientes, aqui utilizado é um gerador síncrono de uma usina real brasileira que tem os dados de placa, de parâmetros padronizados calculados e de parâmetros reais mostrados na tabela 3.1.

5.3.1 Simulação dos Ensaio para a Obtenção da Reatância Síncrona de eixo Direto (x_d)

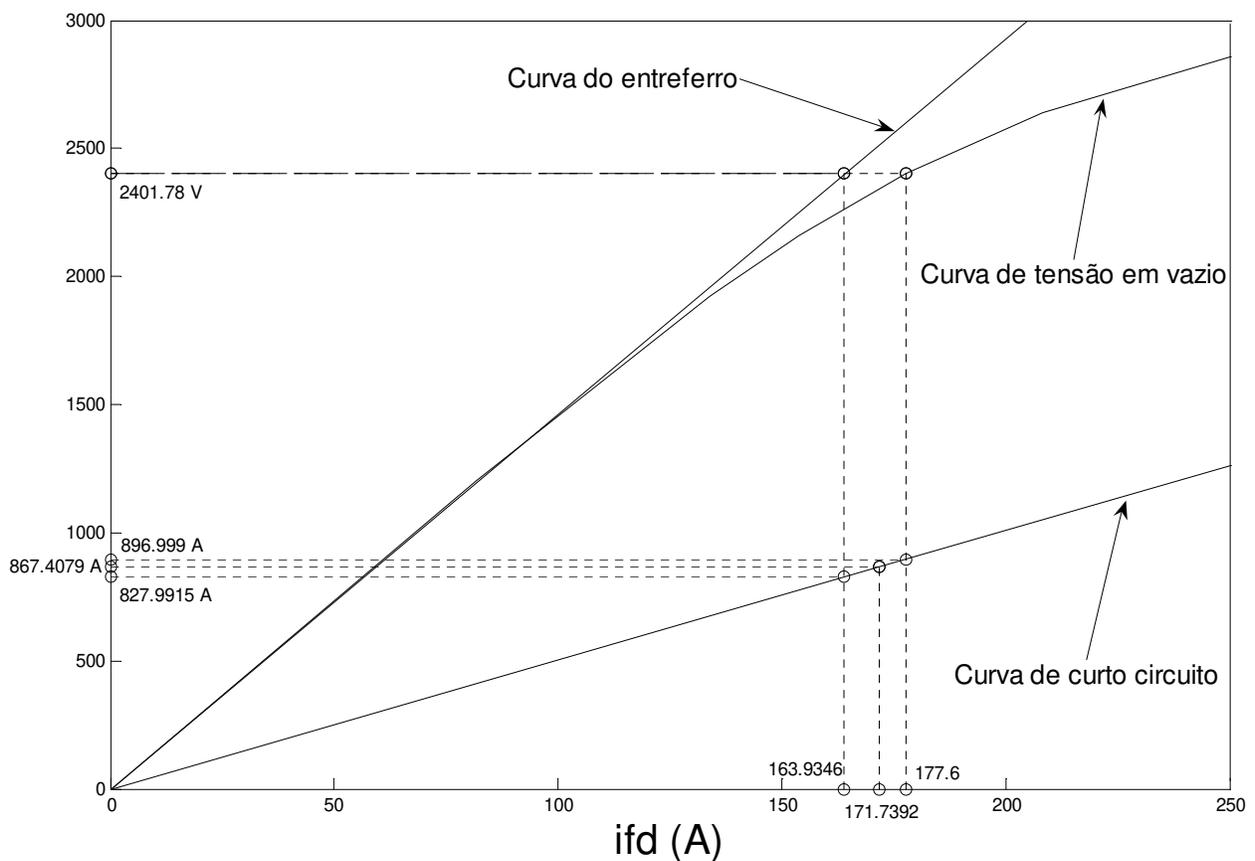


Figura 5.5 – Curvas características de tensão e corrente do gerador de pólos salientes

$$x_s = x_d = \frac{v_a}{i_{ans}} = \frac{2401,78}{827,9915} = 2,90073 \Omega$$

$$x_{ss} = x_{ds} = \frac{v_a}{i_{as}} = \frac{2401,78}{896,999} = 2,6775 \Omega$$

Com: $Z_b = 2,7689 \Omega$

$$x_s = x_d = \frac{x_s}{Z_b} = \frac{2,90073}{2,7689} = 1,04761 \Omega$$

$$x_{ss} = x_{ds} = \frac{x_{ss}}{Z_b} = \frac{2,6775}{2,7689} = 0,96701 \Omega$$

5.3.2 Simulação do Ensaio para a Determinação da Reatância de Potier (x_p)

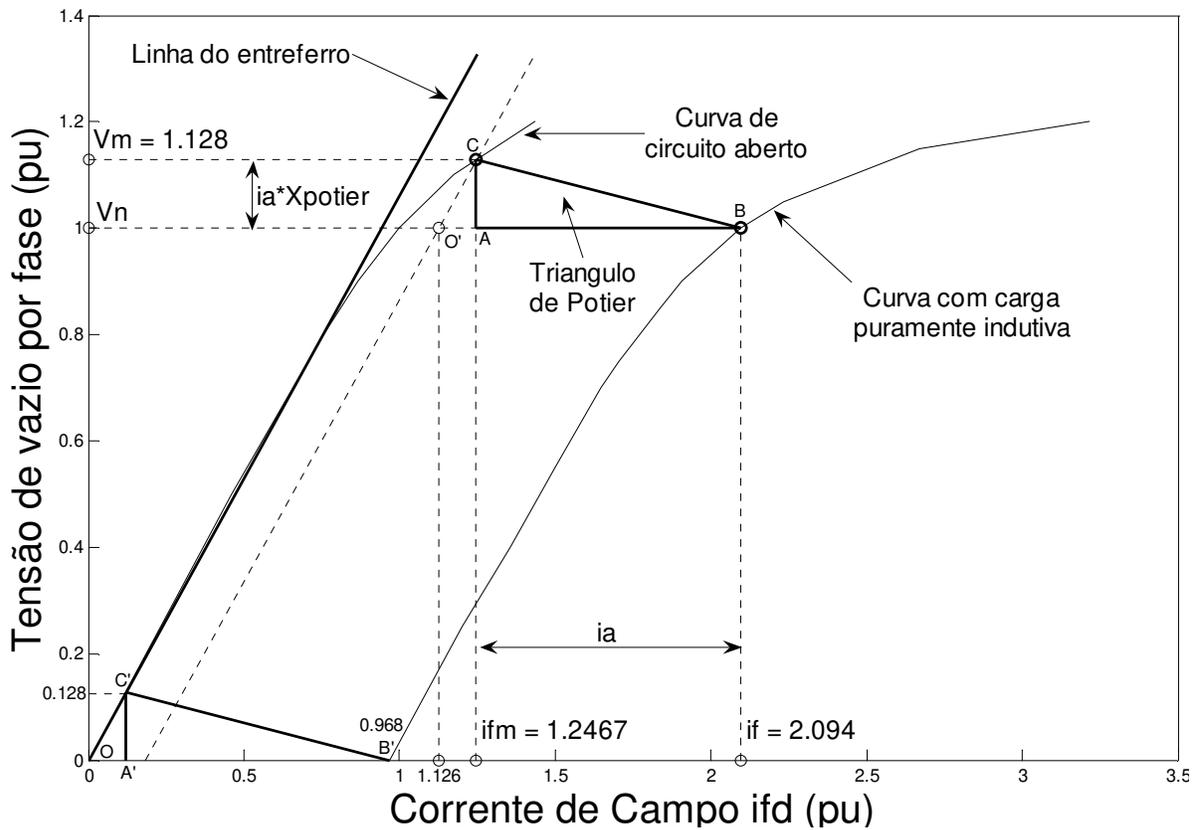


Figura 5.6 - Triângulo de Potier do hidrogerador

$$x_{potier} = \frac{v_m - v_a}{i_a} = \frac{v_m - v_a}{i_f - i_{fm}} = \frac{1,128 - 1}{2,094 - 1,2467} = 0,1511 pu$$

5.3.3 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo Direto Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

Condições de operação do gerador imediatamente antes da rejeição de carga:

$$\begin{array}{llll}
 T_{mech} = 0,02 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & P_o \cong 0 \text{ pu} & Q_o = -0,1163 \text{ pu} \\
 Vt_o = 1 \text{ pu} & Vq_o = 1 \text{ pu} & Vd_o \cong 0 \text{ pu} & v_f = 0,88 \text{ pu} \\
 it_o = 0,1163 \text{ pu} & iq_o \cong 0 \text{ pu} & id_o = -0,1163 \text{ pu} &
 \end{array}$$

Pela observação das figuras mostradas a seguir e usando as expressões obtidas no capítulo 4 pode se calcular os parâmetros padronizados abaixo:

$$x_d = \frac{C}{i_o} = \frac{1-0,9110}{0,1163} = 0,7653 \text{ pu}$$

$$x'_d = \frac{B}{i_o} = \frac{1-0,9642}{0,1163} = 0,3077 \text{ pu}$$

$$x''_d = \frac{A}{i_o} = \frac{1-0,9794}{0,1163} = 0,1768 \text{ pu}$$

$$T'_{do} = 2,9093 \text{ s}$$

$$T''_{do} = 0,0232 \text{ s}$$

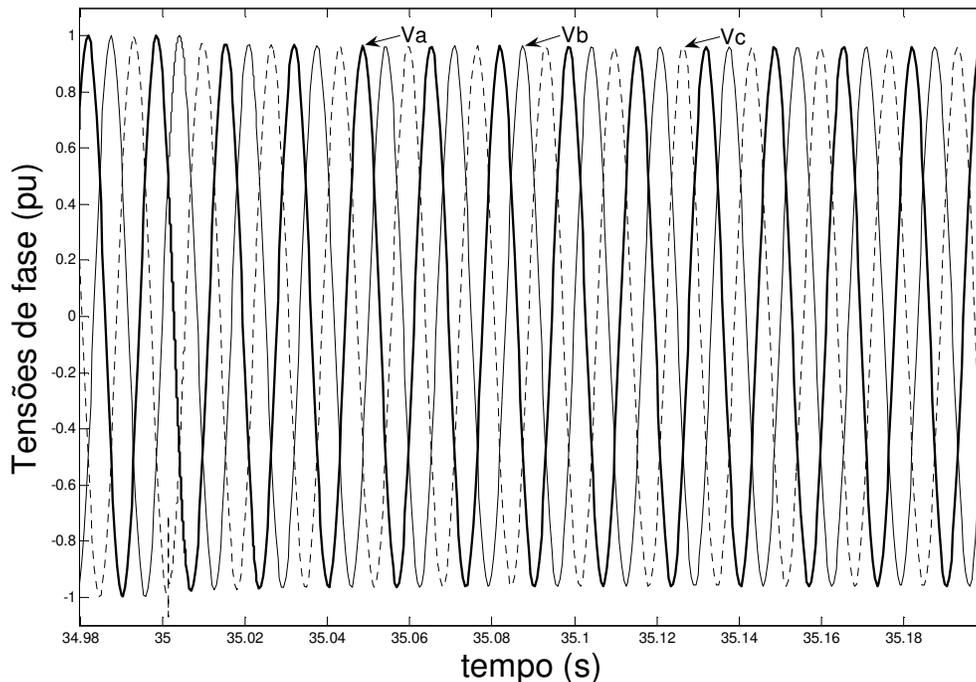


Figura 5.7 – Tensões de fase quando acontece a rejeição em $t = 35 \text{ s}$.

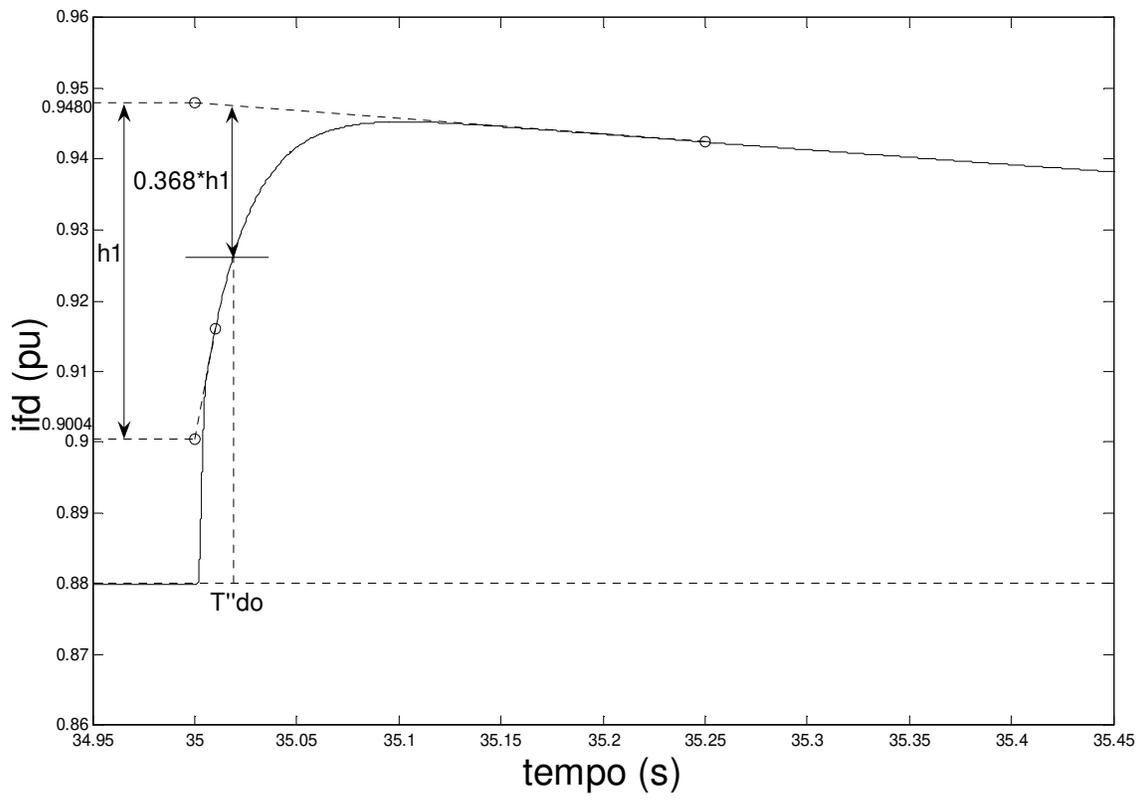
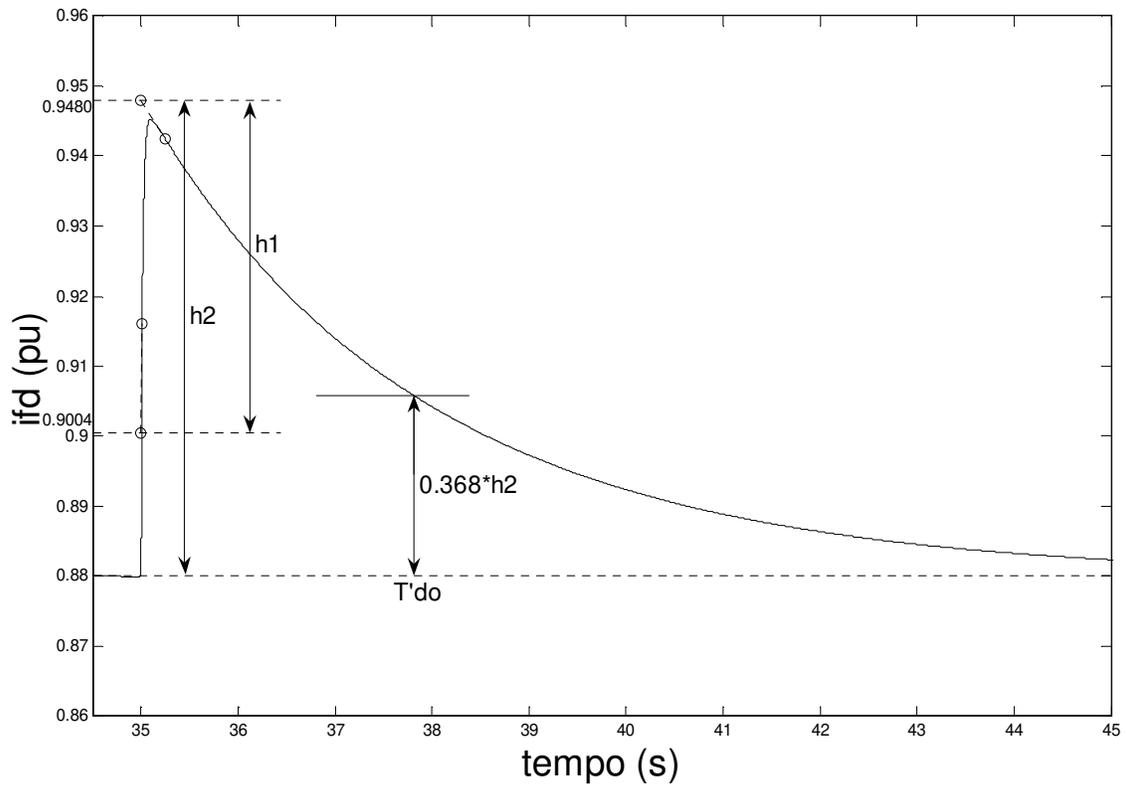


Figura 5.9 - Corrente de campo durante a rejeição

5.3.4 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo em Quadratura para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

Condições de operação do gerador imediatamente antes da rejeição de carga:

$$\begin{array}{lll} \delta_o \cong \phi_o \cong 26,05^\circ & T_{mech} = 0,648 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} \\ v_f = 0,87 \text{ pu} & P_o = 0,6249 \text{ pu} & Q_o = -0,3054 \text{ pu} \\ Vt_o = 1 \text{ pu} & it_o = iq_o = 0,6956 \text{ pu} & id_o = 0 \text{ pu} \end{array}$$

Pela observação das figuras mostradas a seguir e usando as expressões obtidas no capítulo 4 pode se calcular os parâmetros padronizados abaixo:

$$x_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2}}{iq_o} = \frac{\sqrt{1^2 - 0,9028^2}}{0,6956} = 0,6183 \text{ pu}$$

$$x_q'' = \frac{\sqrt{A^2 - C^2} - \sqrt{A^2 - B^2}}{iq_o} = \frac{\sqrt{1^2 - 0,9028^2} - \sqrt{1^2 - 0,9649^2}}{0,6956} = 0,2406 \text{ pu}$$

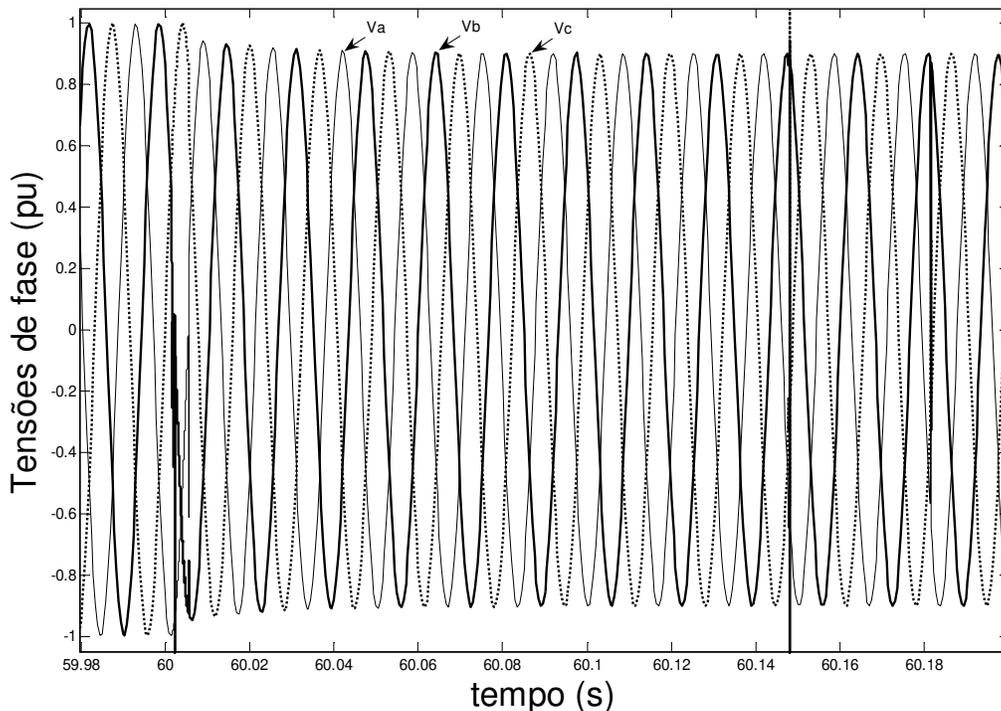


Figura 5.10 - Tensões de fase durante a rejeição

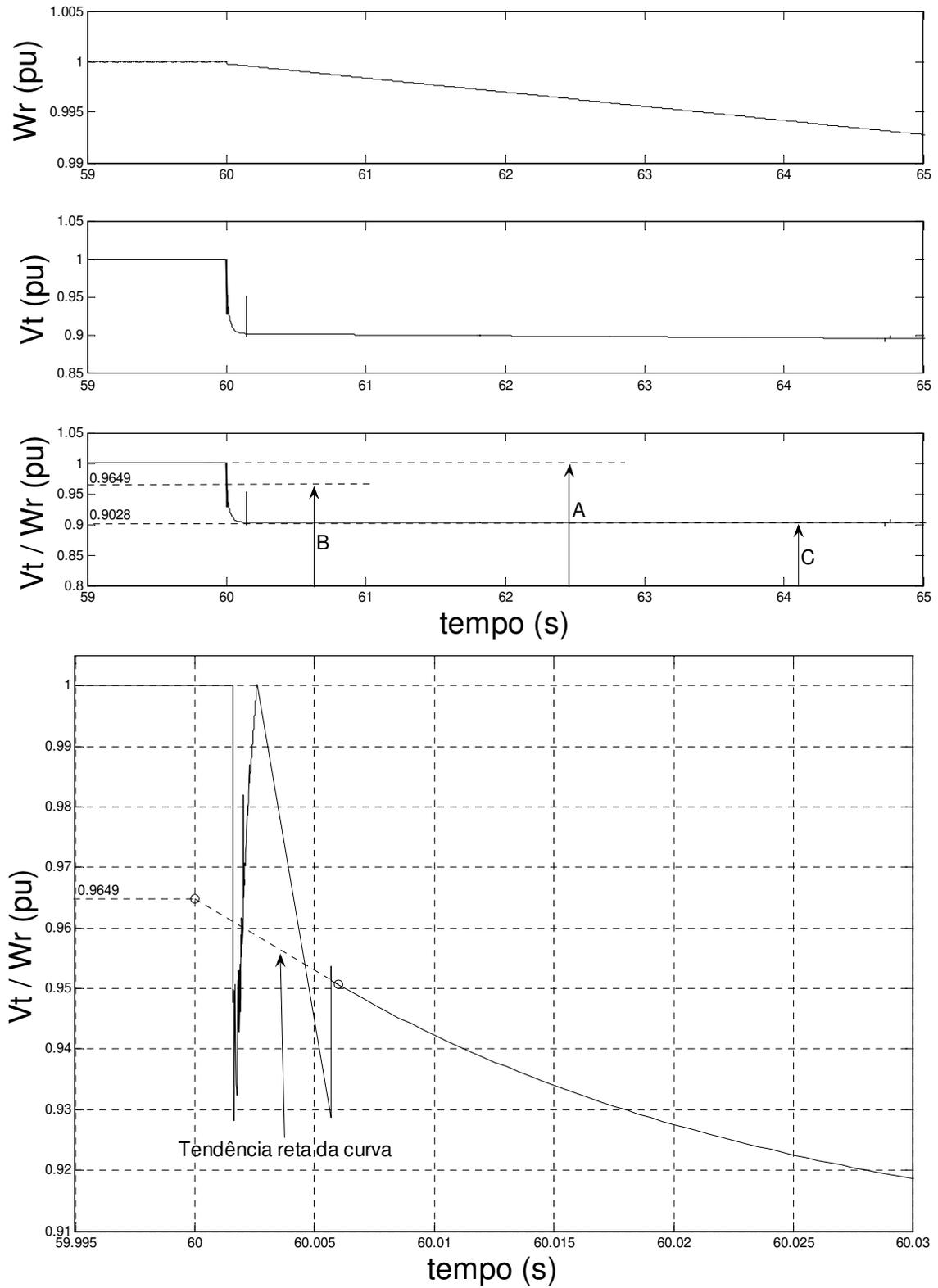


Figura 5.11 - Tensão terminal durante a rejeição

5.3.5 Simulação do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário para a determinação de parâmetros padronizados de eixo em quadratura Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

a) 100% de carga

Condições de operação do gerador imediatamente antes da rejeição de carga:

$$\begin{array}{lll}
 T_{mech} = 0,87 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & \delta_o = 21,6129^\circ \\
 v_f = 1,7315 \text{ pu} & P_o = 0,8437 \text{ pu} & Q_o = 0,5238 \text{ pu} \\
 it_o = 0,9931 \text{ pu} & iq_o = 0,5915 \text{ pu} & id_o = 0,7977 \text{ pu} \\
 Vt_o = 1 \text{ pu} & Vq_o = 0,9297 \text{ pu} & Vd_o = 0,3683 \text{ pu}
 \end{array}$$

Pela observação das figuras mostradas a seguir e usando as expressões obtidas no capítulo 4 pode se calcular os parâmetros padronizados abaixo:

$$x_q = \frac{(V_t \text{sen} \delta)_o}{i_{qo}} = \frac{0,3683}{0,5915} = 0,6227 \text{ pu}$$

$$x_q'' = x_q - \frac{(V_t \text{sen} \delta)_o''}{i_{qo}} = 0,6227 - \frac{0,2538}{0,5915} = 0,1936 \text{ pu}$$

$$T_{qo}'' = 0,0264 \text{ s}$$

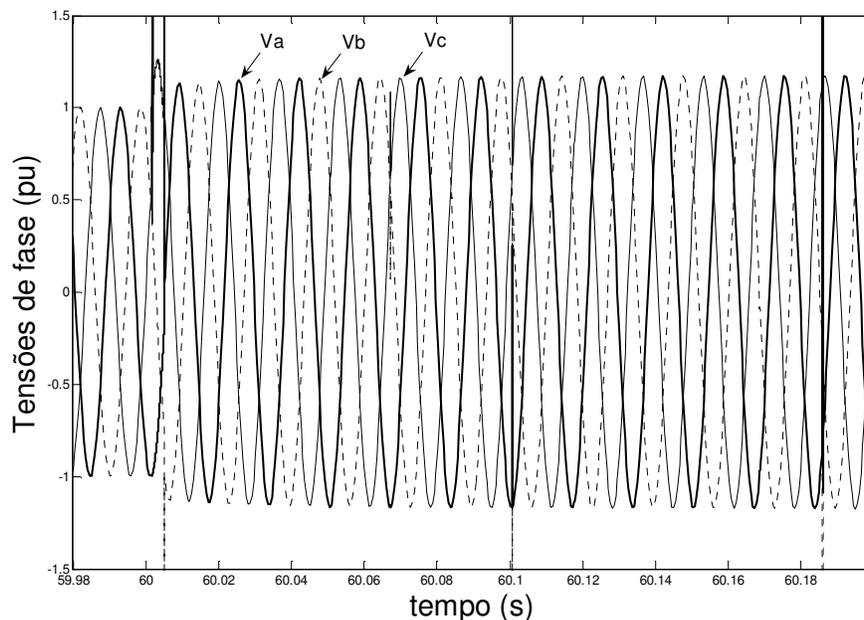


Figura 5.12 - Forma de onda das tensões durante a rejeição

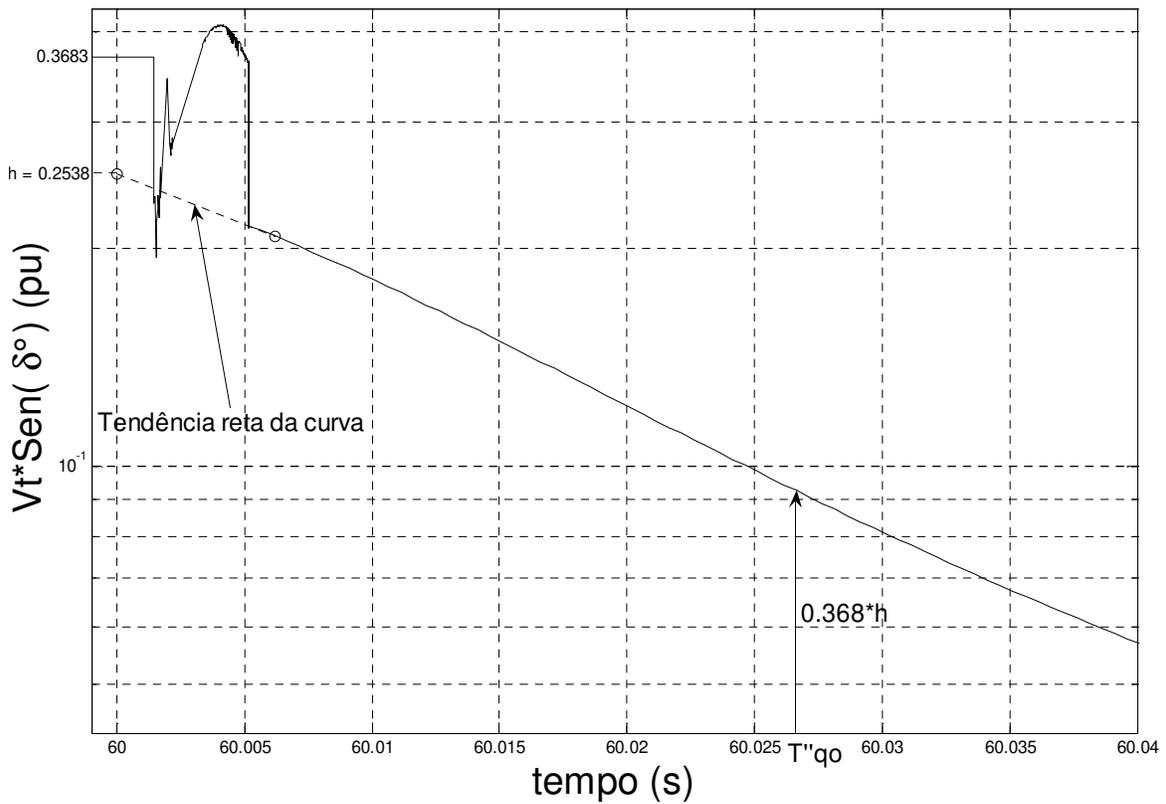
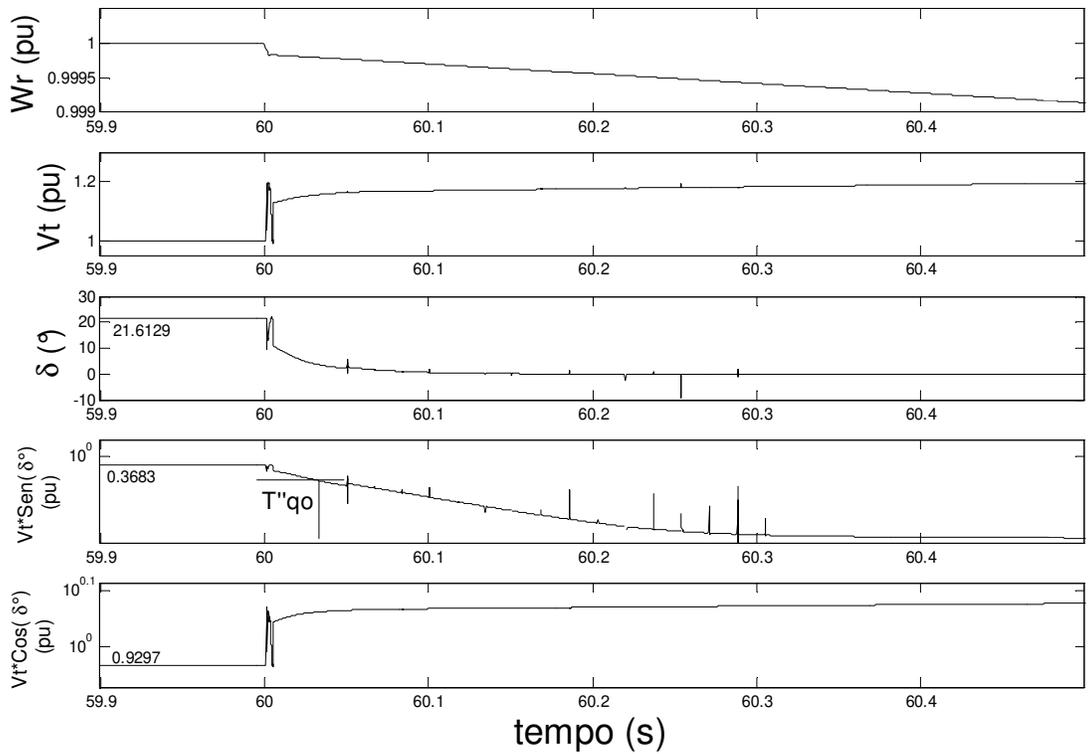


Figura 5.13 - Tensão terminal no eixo d , em escala semilog

b) Carga menor da nominal.

Condições de operação do gerador imediatamente antes da rejeição de carga:

$$\begin{array}{lll}
 T_{mech} = 0,36 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & \delta_o = 13,909^\circ \\
 v_f = 0,8363 \text{ pu} & P_o = 0,3390 \text{ pu} & Q_o = -0,21 \text{ pu} \\
 it_o = 0,3988 \text{ pu} & iq_o = 0,3795 \text{ pu} & id_o = -0,1224 \text{ pu} \\
 Vt_o = 1 \text{ pu} & Vq_o = 0,9707 \text{ pu} & Vd_o = 0,2404 \text{ pu}
 \end{array}$$

Pela observação das figuras mostradas a seguir e usando as expressões obtidas no capítulo 4 pode se calcular os parâmetros padronizados abaixo:

$$x_q = \frac{(V_t \text{sen} \delta)_o}{i_{qo}} = \frac{0,2404}{0,3795} = 0,6335 \text{ pu}$$

$$x_q'' = x_q - \frac{(V_t \text{sen} \delta)_o''}{i_{qo}} = 0,6335 - \frac{0,1616}{0,3795} = 0,2077 \text{ pu}$$

$$h = 0,1616 \text{ pu}$$

$$(V_t \text{sen} \delta)_{T_{qo}''} = 0,368(h) = 0,0595 \text{ pu}$$

$$T_{qo}'' = 0,0335 \text{ s}$$

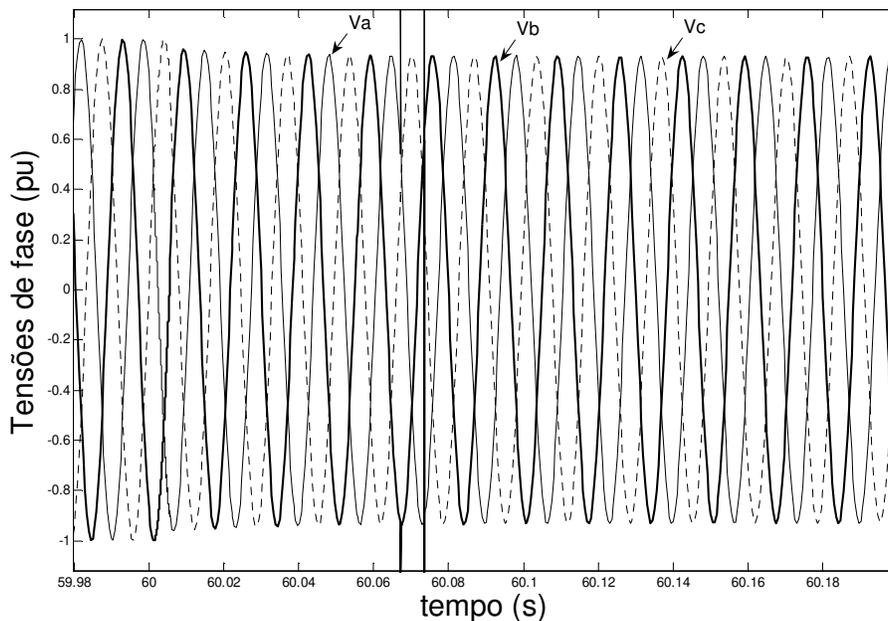


Figura 5.14 - Forma de onda das tensões durante a rejeição

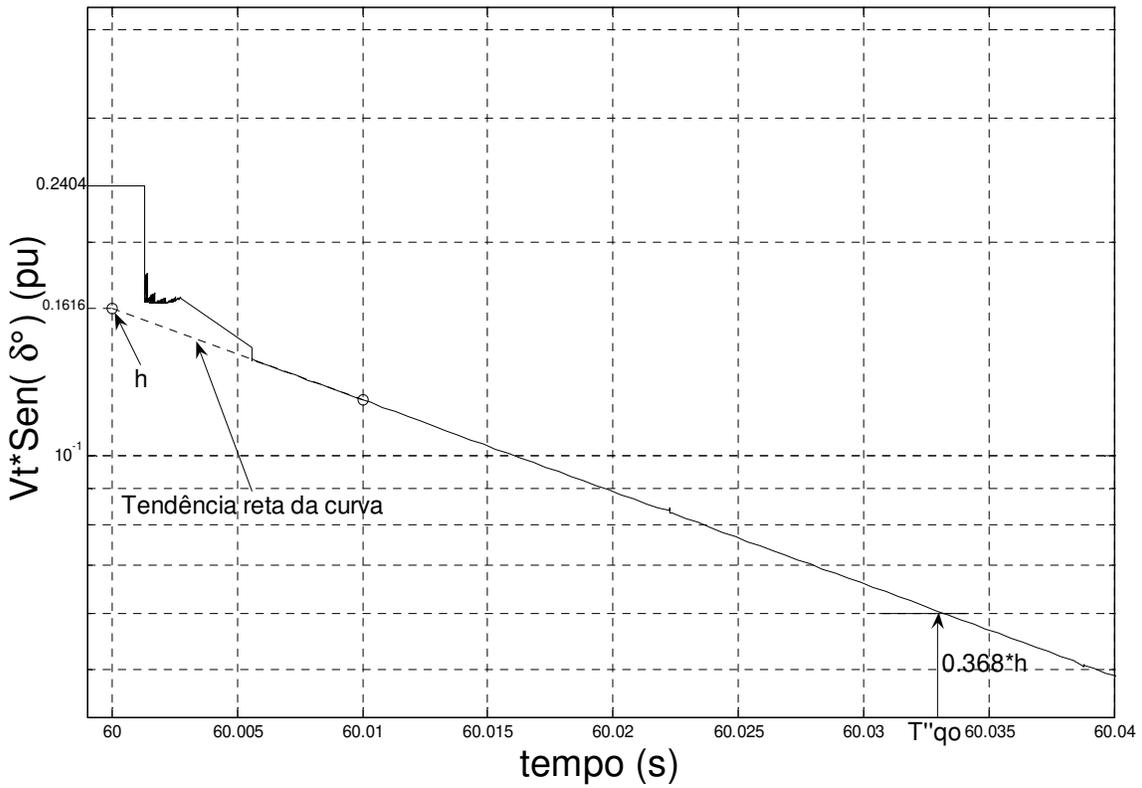
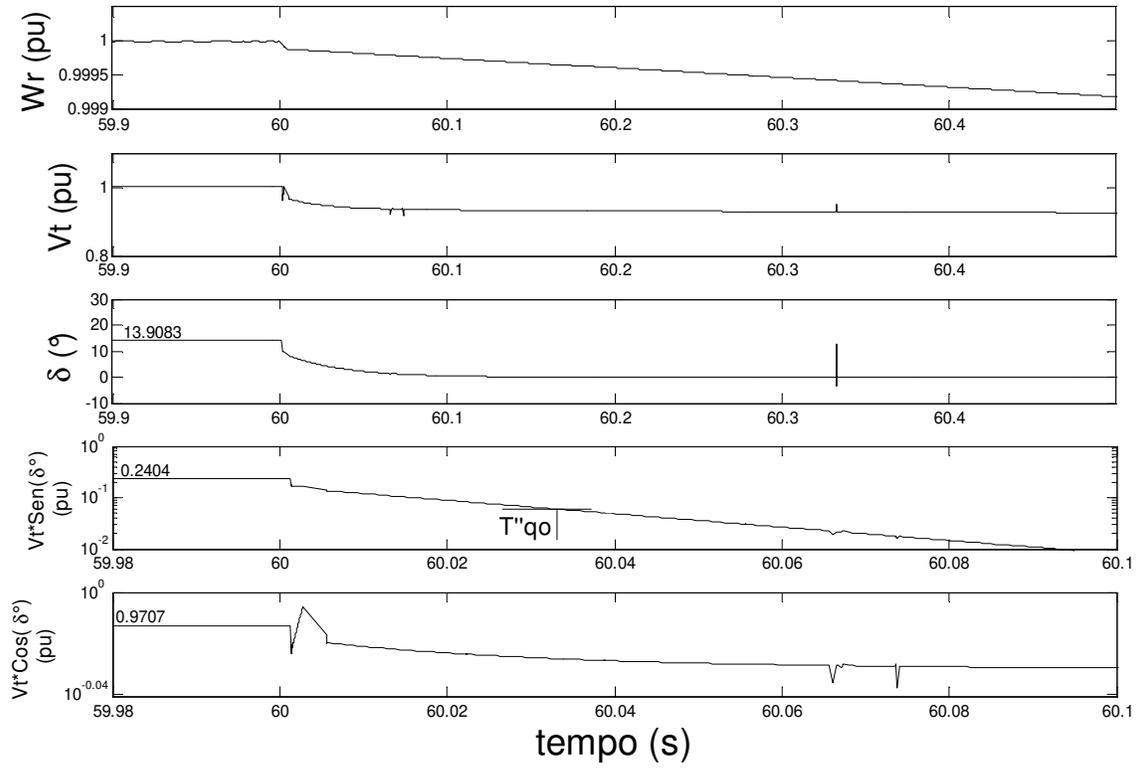


Figura 5.15 - Tensão terminal de eixo direto em escala semilog

5.3.6 Simulação do ensaio de curto-circuito brusco para a determinação dos parâmetros padronizados de eixo direto

Condições de operação do gerador imediatamente antes da rejeição de carga:

$$\begin{array}{llll}
 T_{mech} = 0,02 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & P_o = 0 \text{ pu} & Q_o = 0 \text{ pu} \\
 Vt_o = 0 \text{ pu} & Vq_o = 1 \text{ pu} & Vd_o = 0 \text{ pu} & v_f = 1 \text{ pu} \\
 it_o = 0 \text{ pu} & iq_o = 0 \text{ pu} & id_o = 0 \text{ pu} &
 \end{array}$$

Pela observação das figuras mostradas a seguir e usando as expressões obtidas no capítulo 4 pode se calcular os parâmetros padronizados abaixo:

$$\begin{aligned}
 x_d &= \frac{E_o}{i_{cc}} = \frac{1}{0,9533} = 1,0490 \text{ pu} \\
 x'_d &= \frac{E_o}{(i_{cc} + i'_{cc})} = \frac{1}{(0,9533 + 2,0497)} = 0,3330 \text{ pu} \\
 x''_d &= \frac{E_o}{(i_{cc} + i'_{cc} + i''_{cc})} = \frac{1}{(0,9533 + 2,0497 + 2,2488)} = 0,1904 \text{ pu} \\
 T'_d &= 1,1935 \text{ s} \\
 T''_d &= 0,0170 \text{ s}
 \end{aligned}$$

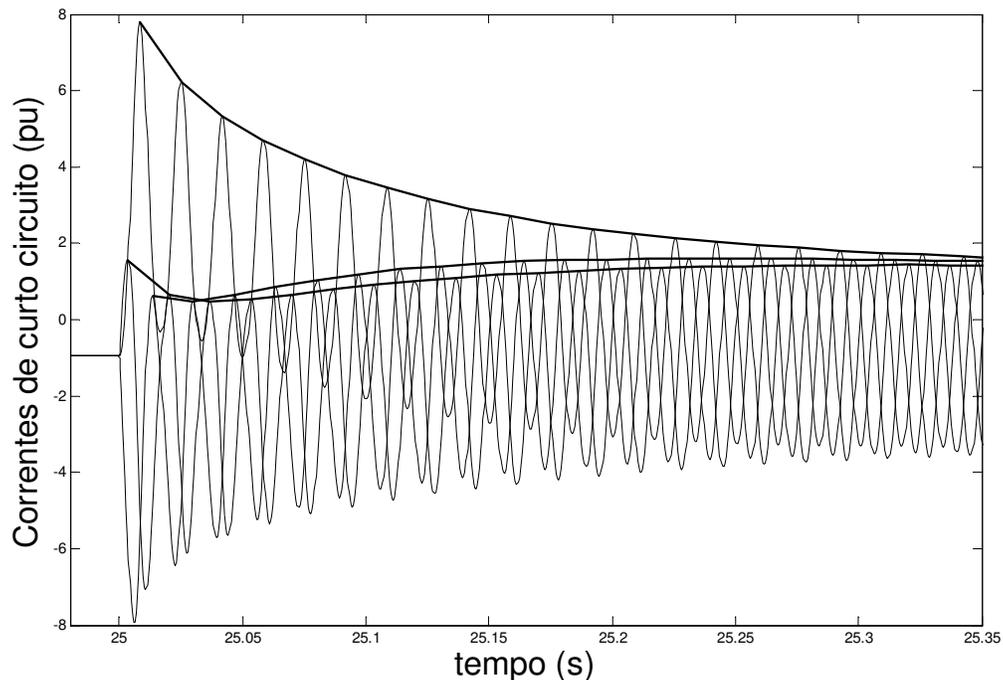


Figura 5.16 - Forma de onda das correntes durante o curto circuito

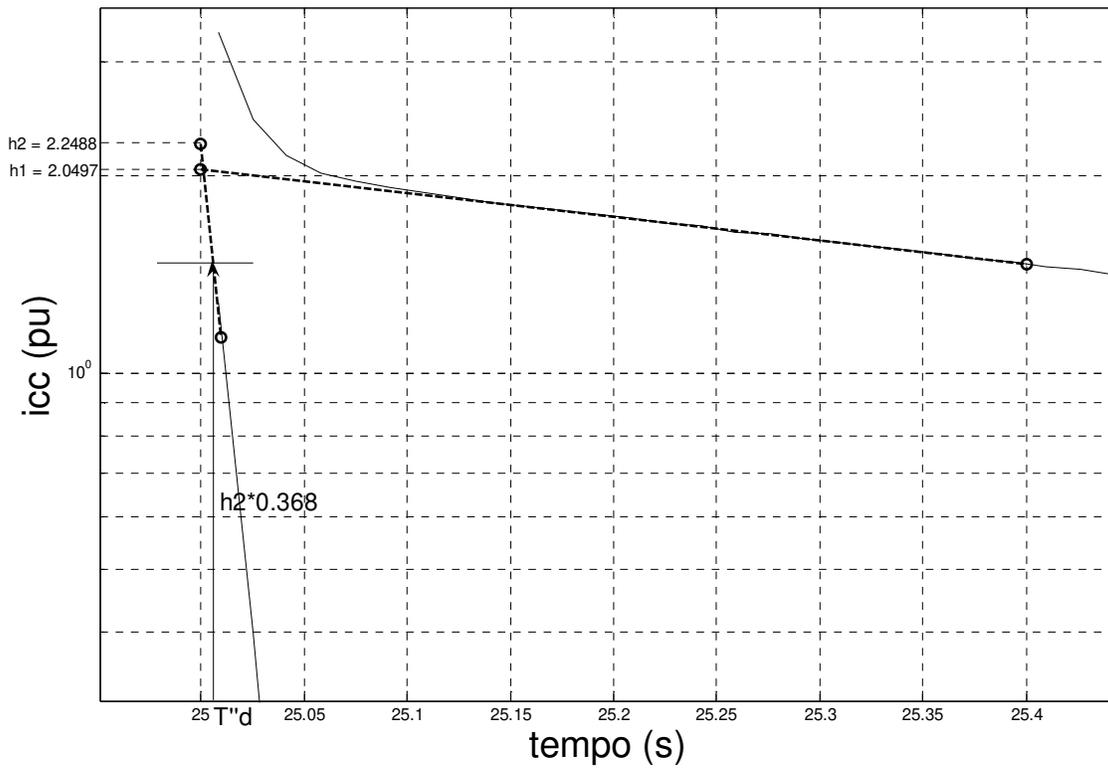
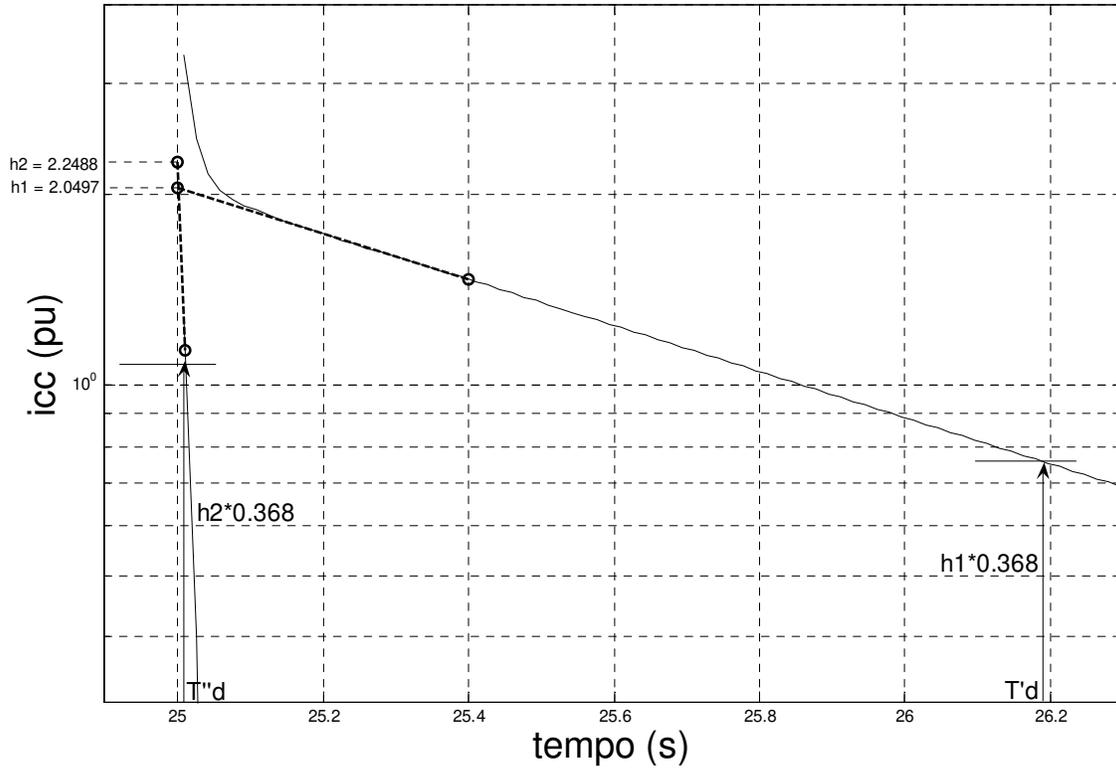


Figura 5.17 - Envoltória média das correntes em escala semilog

5.3.7 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo Direto sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

Condições de operação do gerador imediatamente antes da rejeição de carga:

$$\begin{array}{llll}
 T_{mech} = 0,02 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & P_o \cong 0 \text{ pu} & Q_o = -0,1239 \text{ pu} \\
 Vt_o = 1 \text{ pu} & Vq_o = 1 \text{ pu} & Vd_o \cong 0 \text{ pu} & v_f = 0,87 \text{ pu} \\
 it_o = 0,1239 \text{ pu} & iq_o \cong 0 \text{ pu} & id_o = -0,1239 \text{ pu} &
 \end{array}$$

Pela observação das figuras mostradas a seguir e usando as expressões obtidas no capítulo 4 pode se calcular os parâmetros padronizados abaixo:

$$\begin{aligned}
 x_d &= \frac{C}{i_o} = \frac{1-0,87}{0,1239} = 1,0492 \text{ pu} \\
 x_d' &= \frac{B}{i_o} = \frac{1-0,9592}{0,1239} = 0,3293 \text{ pu} \\
 x_d'' &= \frac{A}{i_o} = \frac{1-0,9778}{0,1239} = 0,1792 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$T'_{do} = 3,8008 \text{ s}$$

$$T''_{do} = 0,0245 \text{ s}$$

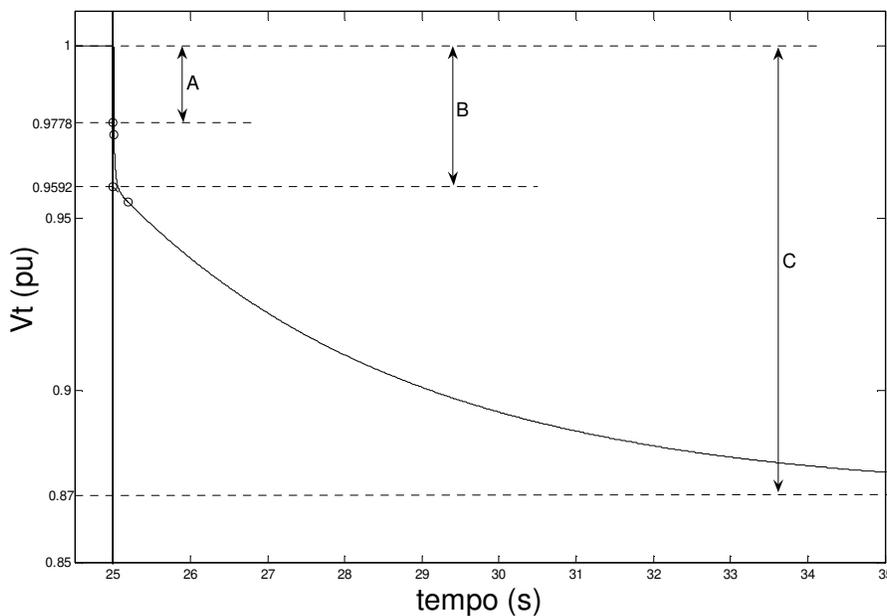


Figura 5.18 - Tensão terminal na rejeição

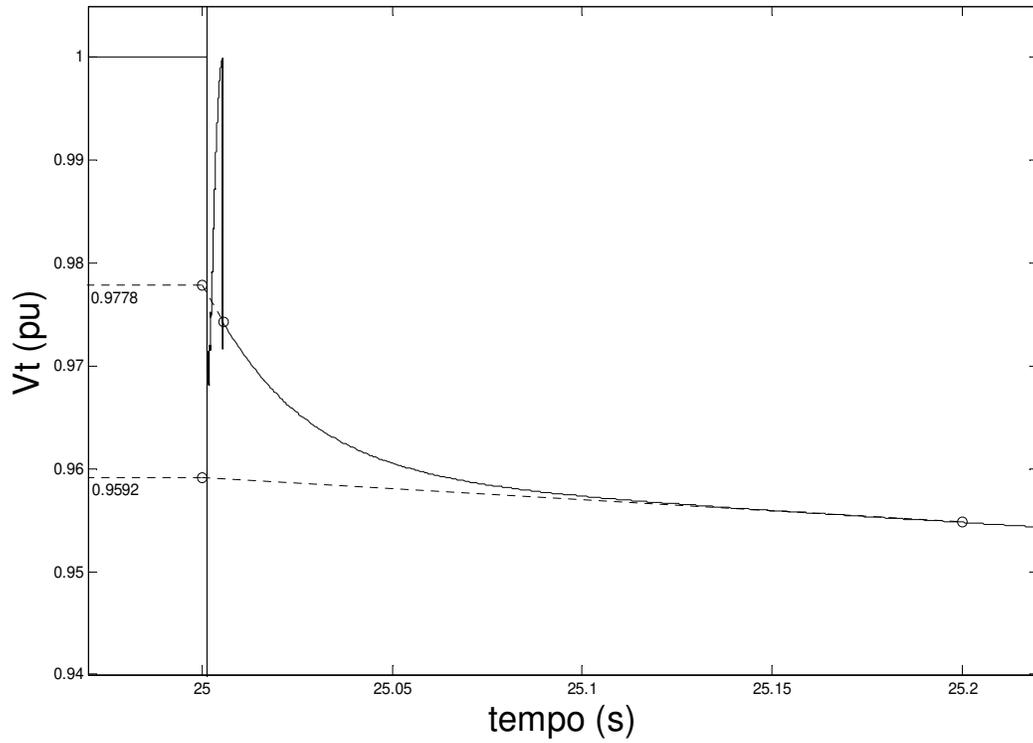


Figura 5.19 - Tensão terminal ampliado

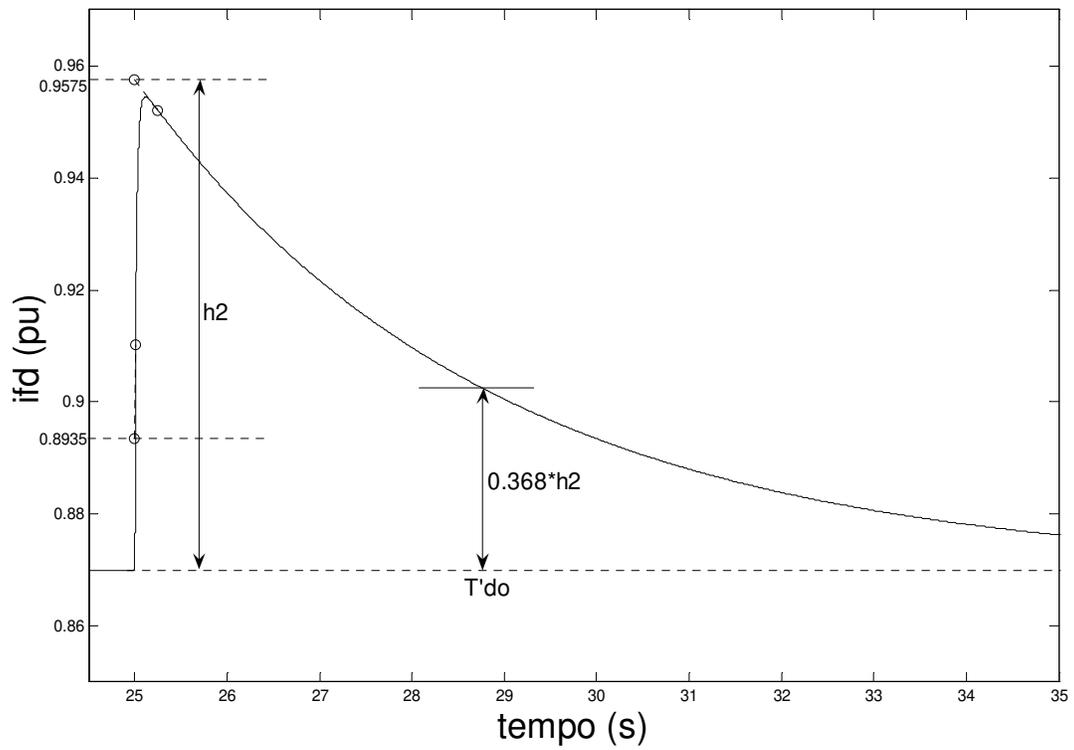


Figura 5.20 - Corrente de campo durante a rejeição para obtenção de constantes de tempo

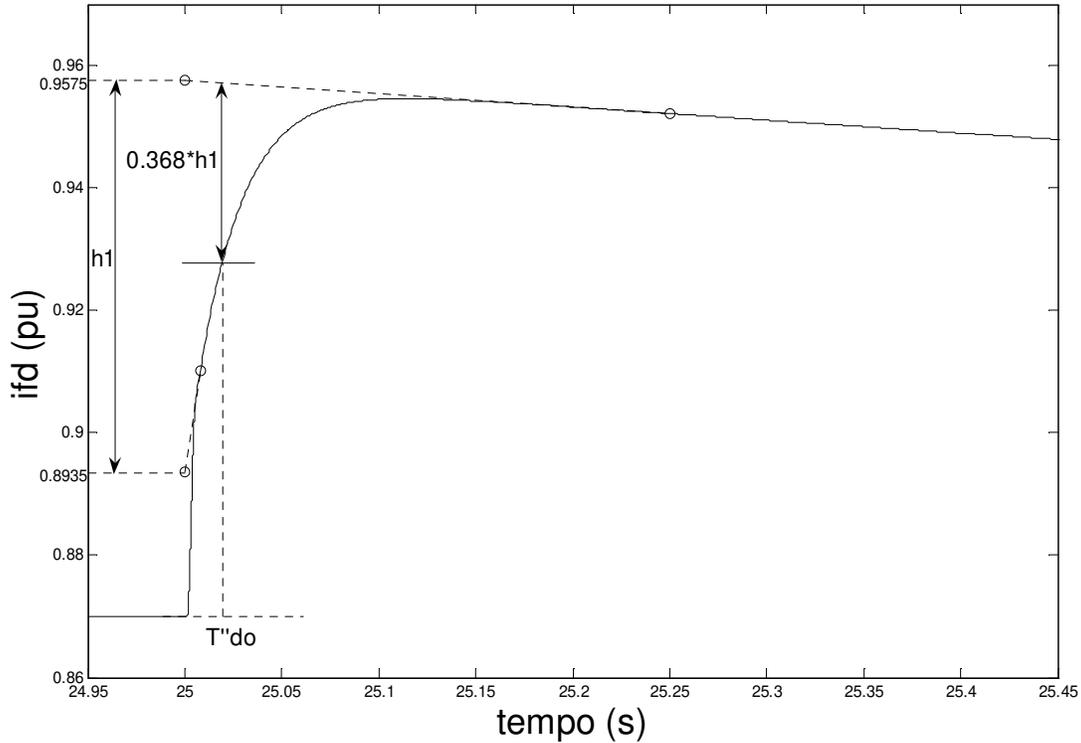


Figura 5.21 - Corrente de campo ampliada

5.3.8 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo em Quadratura para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura Sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

Condições de operação do gerador imediatamente antes da rejeição de carga:

$$\begin{array}{lll}
 \delta_o \cong \phi_o \cong 26,05^\circ & T_{mech} = 0,648 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} \\
 v_f = 0,9028 \text{ pu} & P_o = 0,6249 \text{ pu} & Q_o = -0,3055 \text{ pu} \\
 Vt_o = 1 \text{ pu} & it_o = iq_o = 0,6956 \text{ pu} & id_o = 0 \text{ pu}
 \end{array}$$

Pela observação das figuras mostradas a seguir e usando as expressões obtidas no capítulo 4 pode se calcular os parâmetros padronizados abaixo:

$$x_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2}}{iq_o} = \frac{\sqrt{1^2 - 0,9028^2}}{0,6956} = 0,6183 \text{ pu}$$

$$x_q'' = \frac{\sqrt{A^2 - C^2} - \sqrt{A^2 - B^2}}{iq_o} = \frac{\sqrt{1^2 - 0,9028^2} - \sqrt{1^2 - 0,9642^2}}{0,6956} = 0,2372 \text{ pu}$$

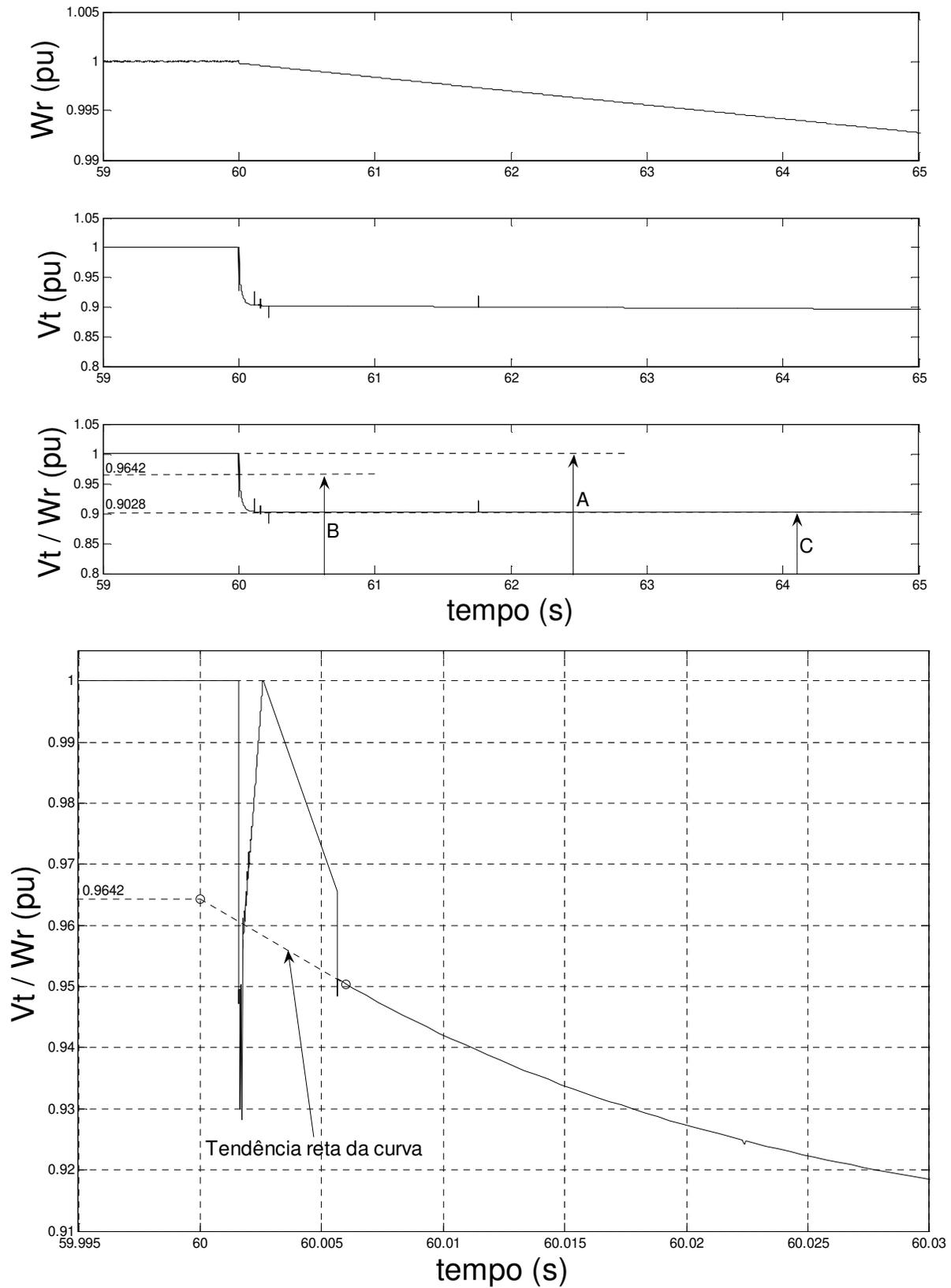


Figura 5.22 - Tensão terminal durante a rejeição em escala semilog

5.3.9 Simulação do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário para a determinação de parâmetros padronizados de eixo em quadratura sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

a) 100% de carga

Condições de operação do gerador imediatamente antes da rejeição de carga:

$$\begin{array}{lll}
 T_{mech} = 0,87 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & \delta_o = 21,619^\circ \\
 v_f = 1,7688 \text{ pu} & P_o = 0,8437 \text{ pu} & Q_o = 0,5222 \text{ pu} \\
 it_o = 0,9920 \text{ pu} & iq_o = 0,5918 \text{ pu} & id_o = 0,7961 \text{ pu} \\
 Vt_o = 1,0003 \text{ pu} & Vq_o = 0,9296 \text{ pu} & Vd_o = 0,3685 \text{ pu}
 \end{array}$$

Pela observação das figuras mostradas a seguir e usando as expressões obtidas no capítulo 4 pode se calcular os parâmetros padronizados abaixo:

$$x_q = \frac{(V_t \text{sen} \delta)_o}{i_{qo}} = \frac{0,3685}{0,5918} = 0,6227 \text{ pu}$$

$$x_q'' = x_q - \frac{(V_t \text{sen} \delta)''_o}{i_{qo}} = 0,6227 - \frac{0,2541}{0,5918} = 0,1933 \text{ pu}$$

$$h = 0,2541 \text{ pu}$$

$$(V_t \text{sen} \delta)_{T_{qo}''} = 0,368(h) = 0,0935 \text{ pu}$$

$$T_{qo}'' = 0,0328 \text{ s}$$

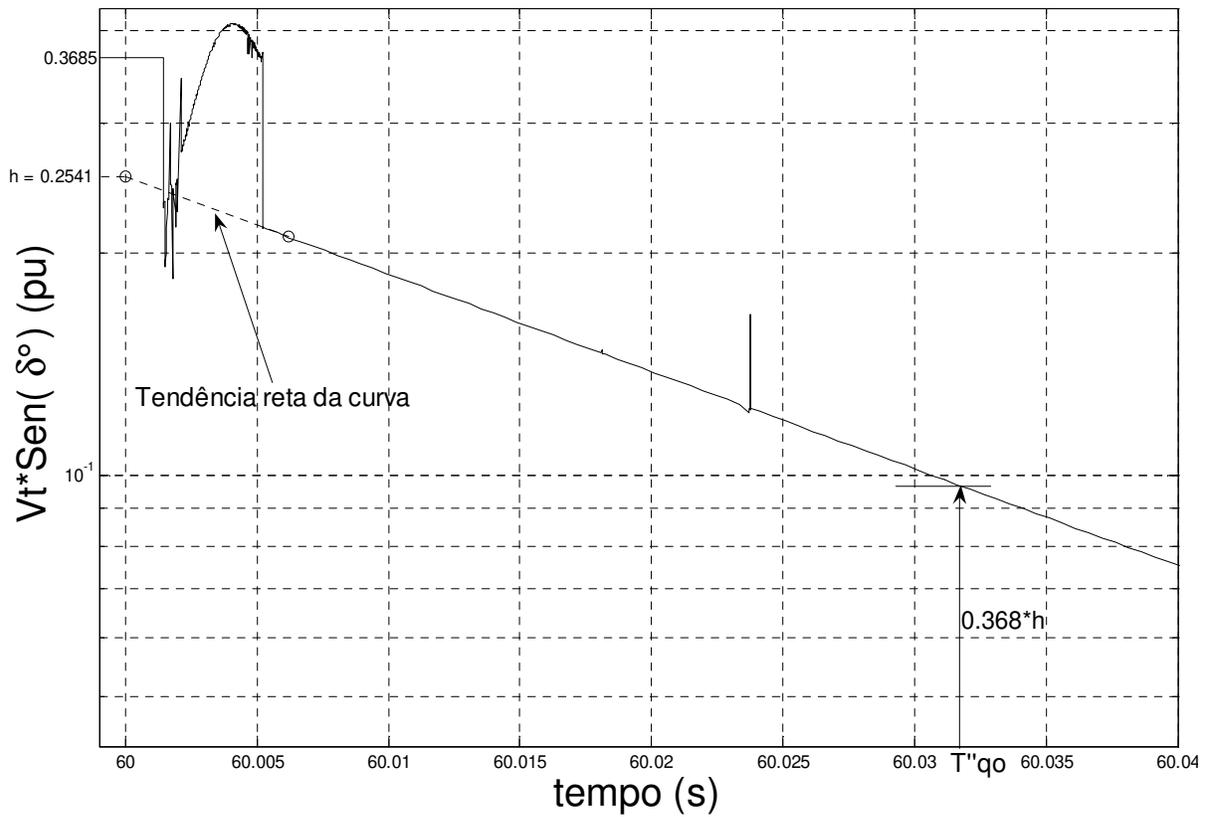
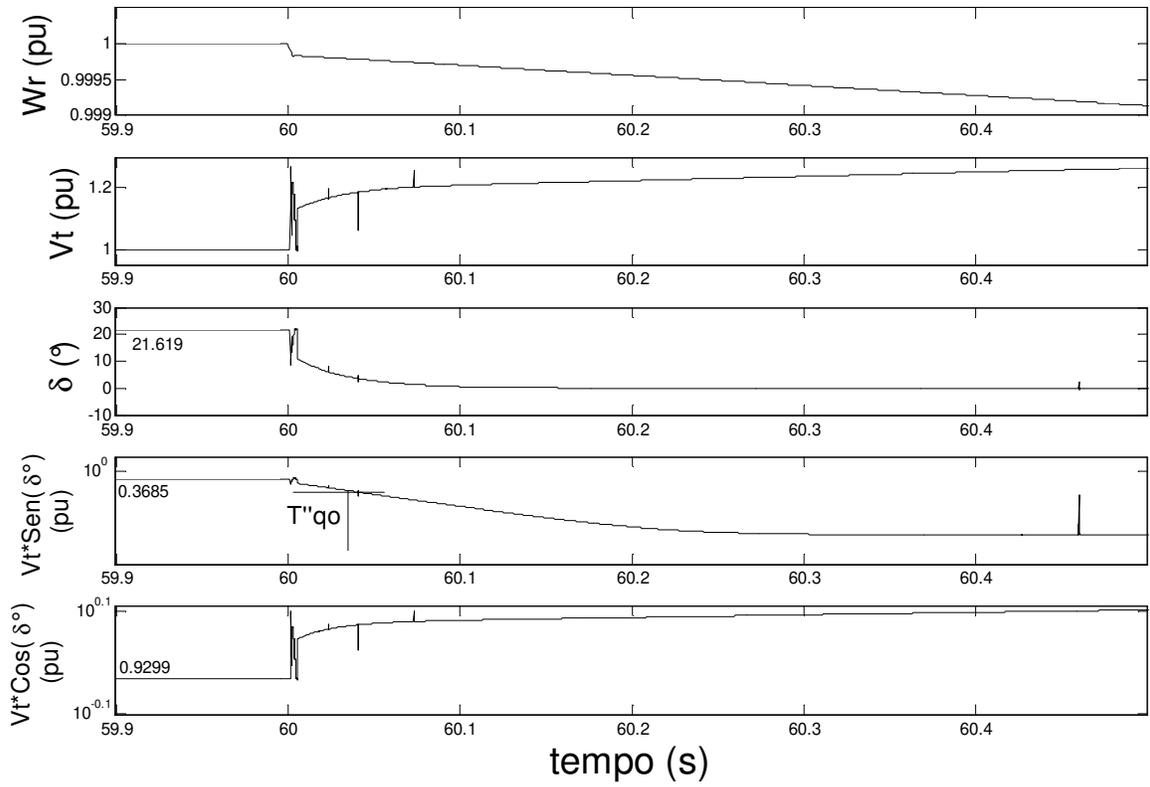


Figura 5.23 - Tensão terminal de eixo direto durante a rejeição em escala semilog.

b) Carga diferente a nominal

$$\begin{array}{lll}
 T_{mech} = 0,36 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & \delta_o = 13,909^\circ \\
 v_f = 0,8447 \text{ pu} & P_o = 0,3390 \text{ pu} & Q_o = -0,21 \text{ pu} \\
 i_{t_o} = 0,3988 \text{ pu} & i_{q_o} = 0,3795 \text{ pu} & i_{d_o} = -0,1224 \text{ pu} \\
 V_{t_o} = 1 \text{ pu} & V_{q_o} = 0,9707 \text{ pu} & V_{d_o} = 0,2404 \text{ pu}
 \end{array}$$

$$x_q = \frac{(V_t \text{sen} \delta)_o}{i_{q_o}} = \frac{0,2404}{0,3795} = 0,6335 \text{ pu}$$

$$x_q'' = x_q - \frac{(V_t \text{sen} \delta)''}{i_{q_o}} = 0,6335 - \frac{0,1615}{0,3795} = 0,2079 \text{ pu}$$

$$T_{q_o}'' = 0,0223 \text{ s}$$

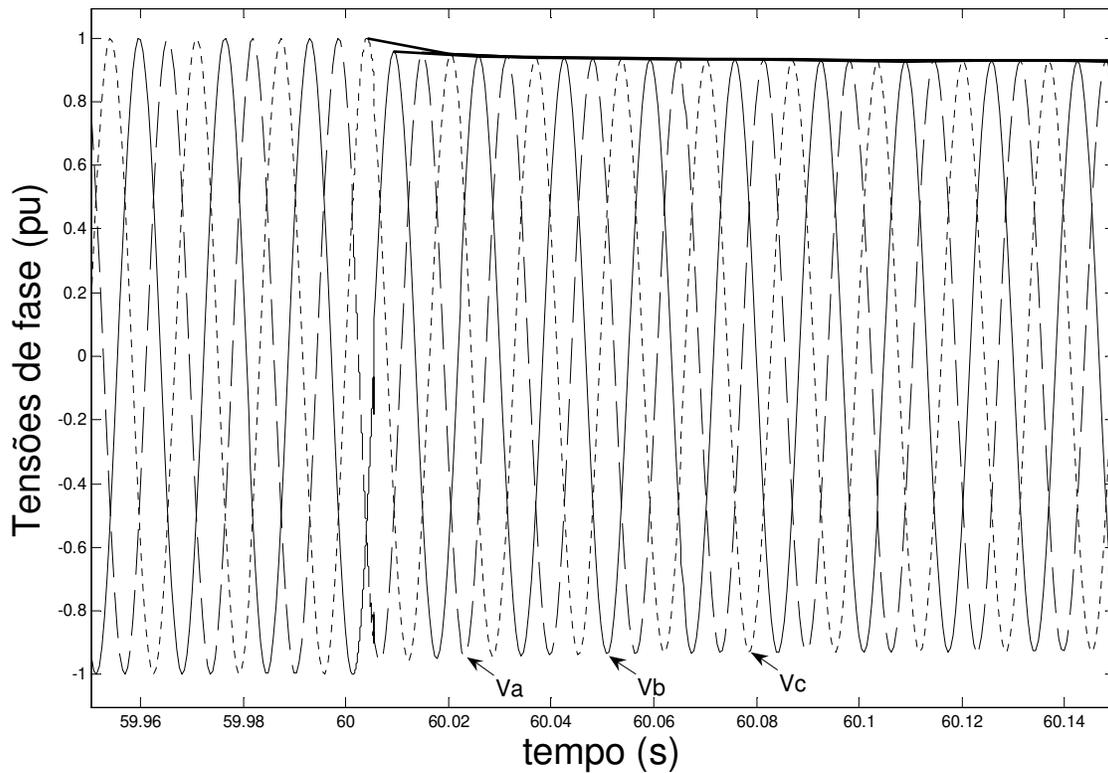


Figura 5.24 - Tensão terminal durante a rejeição

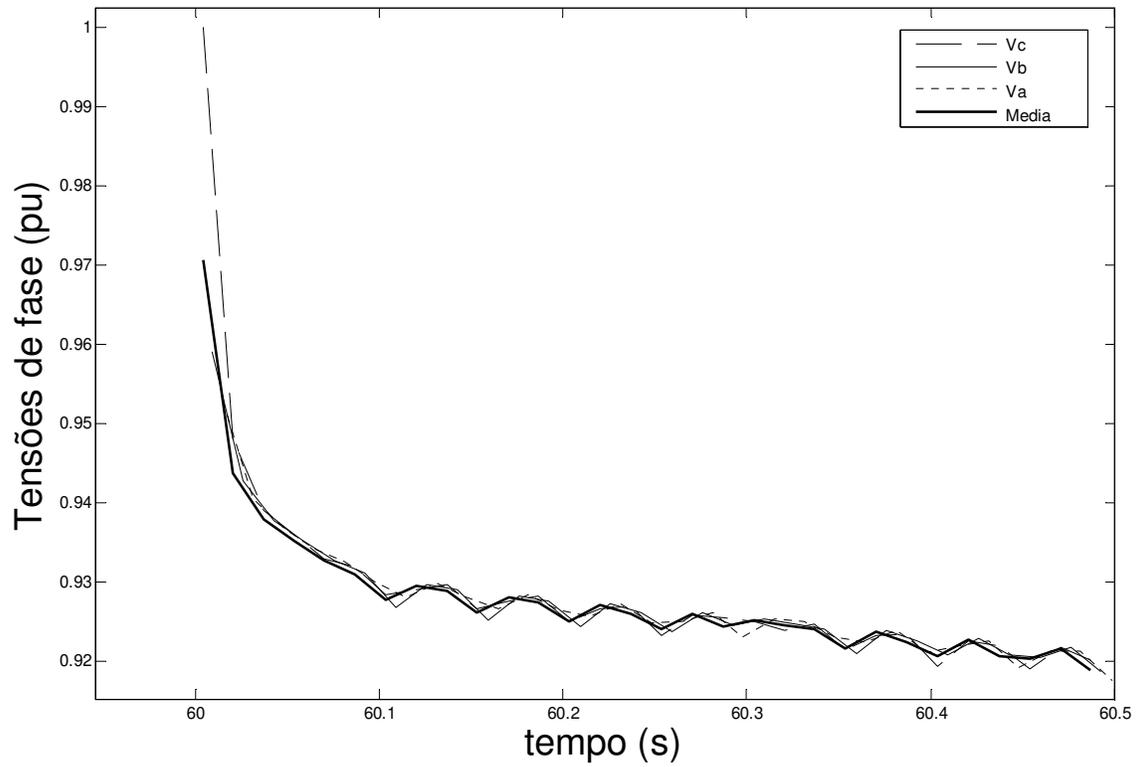


Figura 5.25 - Envoltórias das tensões de fase terminais e sua média aritmética.

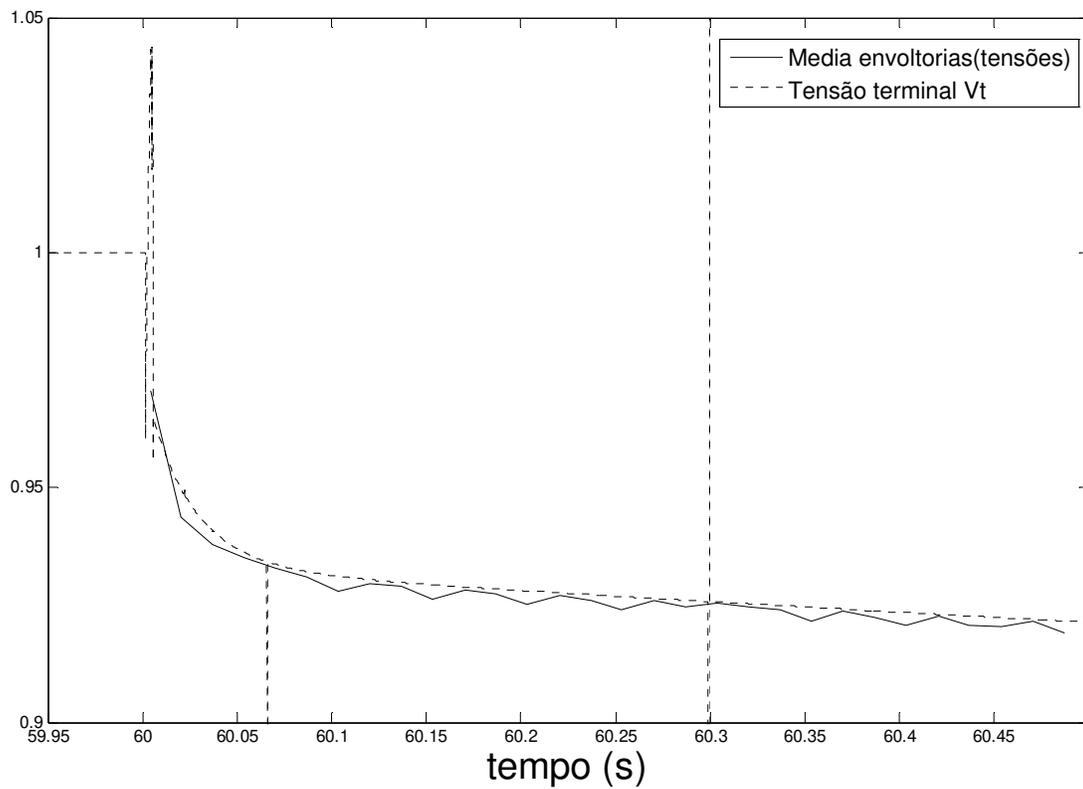


Figura 5.26 – Média das envoltórias das tensões terminais por fase e a tensão terminal medida.

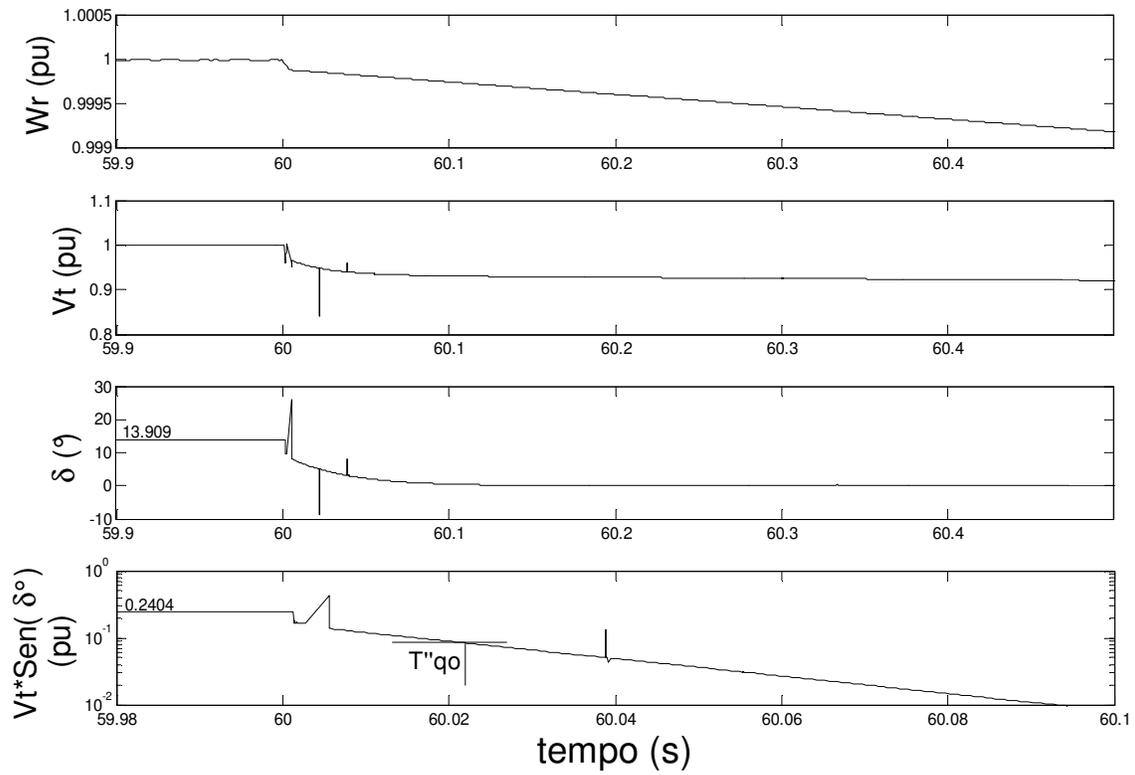


Figura 5.27 - Velocidade (W_r), tensão terminal (V_t), ângulo de carga (δ°).

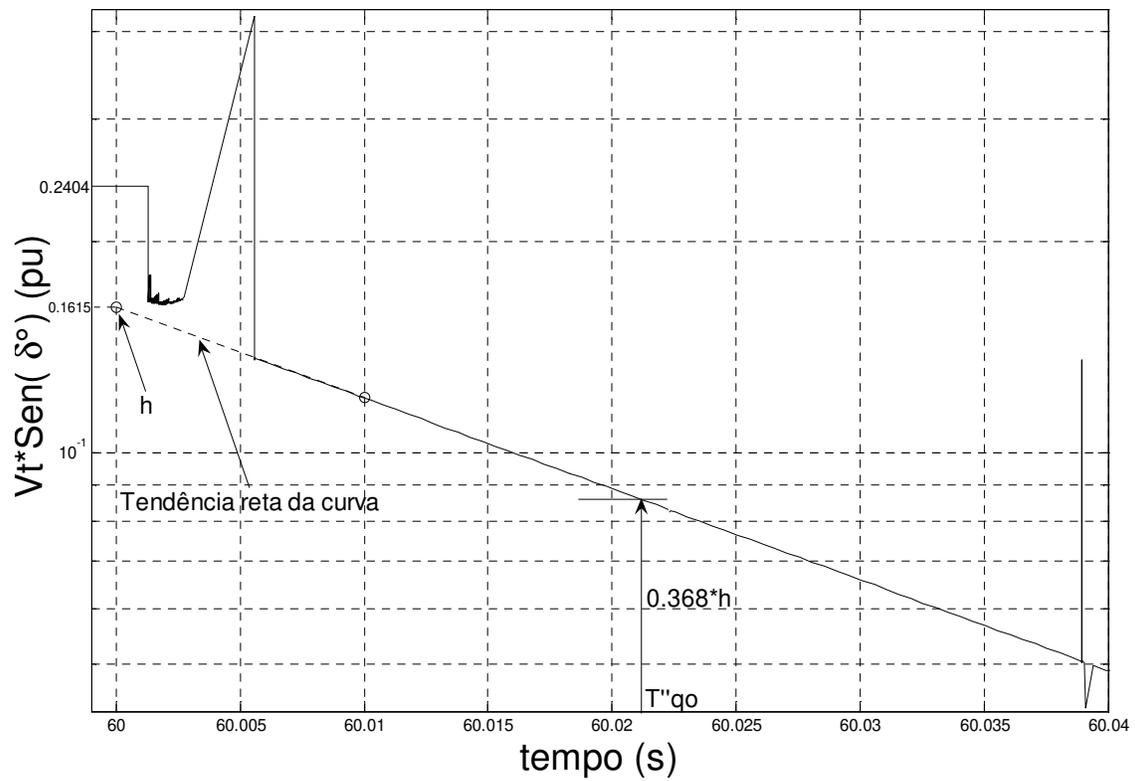


Figura 5.28 - Tensão terminal de eixo direto durante a rejeição em escala semilog.

5.4 Simulação de Ensaio Realizados com o Gerador de Pólos Lisos

O gerador síncrono de pólos lisos, aqui utilizado é um gerador síncrono típico apresentado na referência [1] que tem os dados de placa, de parâmetros padronizados e de parâmetros reais mostrados nas tabelas 3.3.

5.4.1 Simulação dos Ensaio para a Obtenção da Reatância Síncrona de Eixo Direto (x_d)

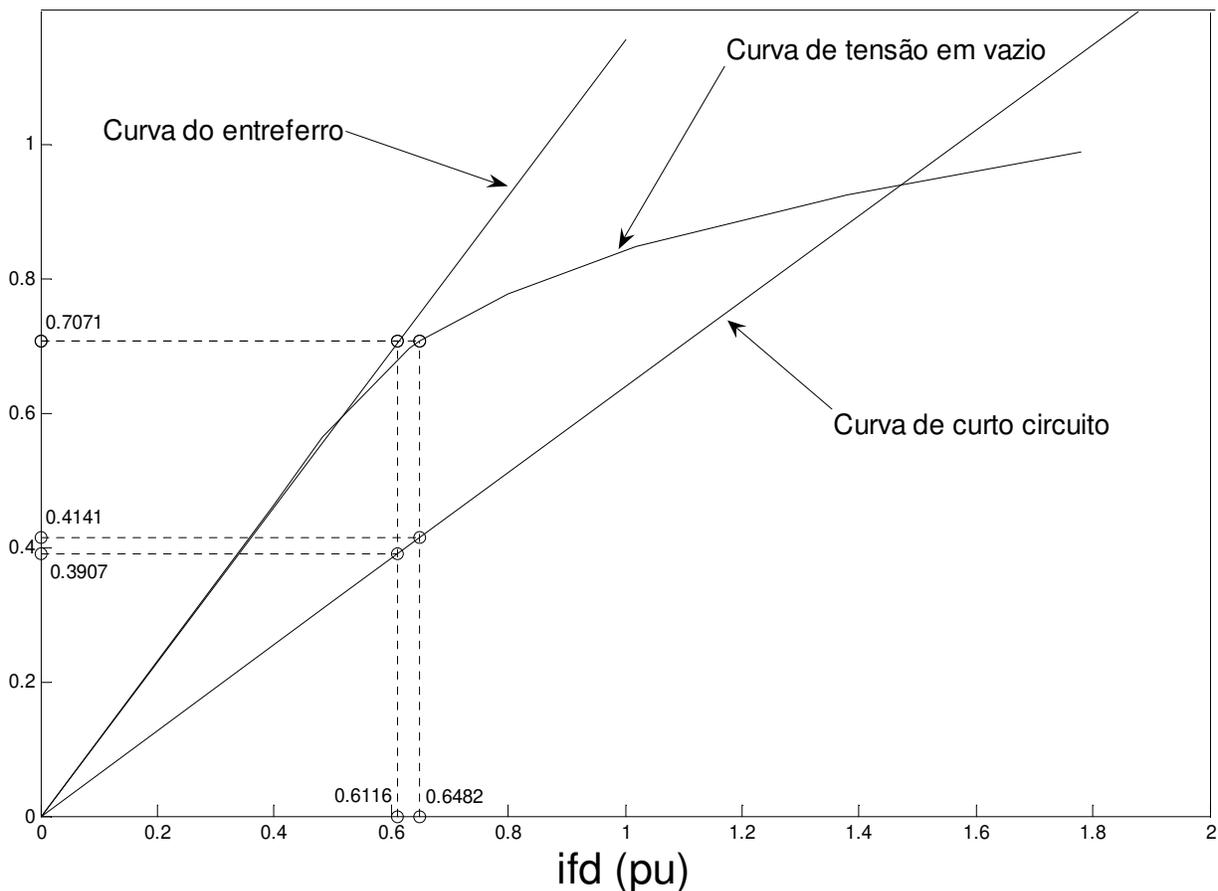


Figura 5.29 - Característica da tensão em vazio e da corrente em curto circuito.

$$x_s = x_d = \frac{v_a}{i_{ans}} = \frac{0,7071}{0,3907} = 1,8098 \text{ pu}$$

$$x_{ss} = x_{ds} = \frac{v_a}{i_{as}} = \frac{0,7071}{0,4141} = 1,7076 \text{ pu}$$

5.4.2 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo Direto Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

$$T_{mech} = 0,02 \text{ pu}$$

$$T_{dam} = 0,02 \text{ pu}$$

$$P_o \cong 0 \text{ pu}$$

$$Q_o = -0,01943 \text{ pu}$$

$$Vt_o = 1 \text{ pu}$$

$$Vq_o = 1 \text{ pu}$$

$$Vd_o \cong 0 \text{ pu}$$

$$v_f = 0,68 \text{ pu}$$

$$it_o = 0,01943 \text{ pu}$$

$$iq_o \cong 0 \text{ pu}$$

$$id_o = -0,01943 \text{ pu}$$

$$x_d = \frac{C}{it_o} = \frac{1-0,9778}{0,01943} = 1,1426 \text{ pu}$$

$$x'_d = \frac{B}{it_o} = \frac{1-0,9945}{0,01943} = 0,2831 \text{ pu}$$

$$x''_d = \frac{A}{it_o} = \frac{1-0,9958}{0,01943} = 0,2162 \text{ pu}$$

$$T'_{do} = 5,3883 \text{ s}$$

$$T''_{do} = 0,0297 \text{ s}$$

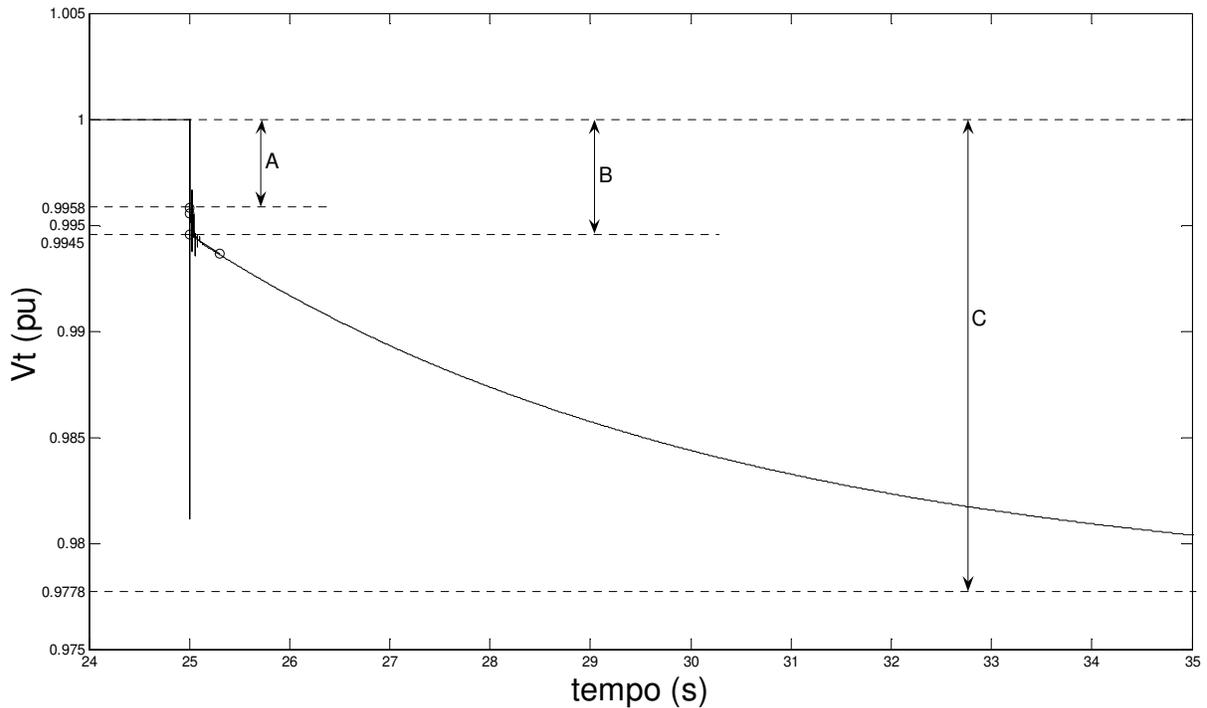


Figura 5.30 - Tensão terminal de eixo direto durante a rejeição.

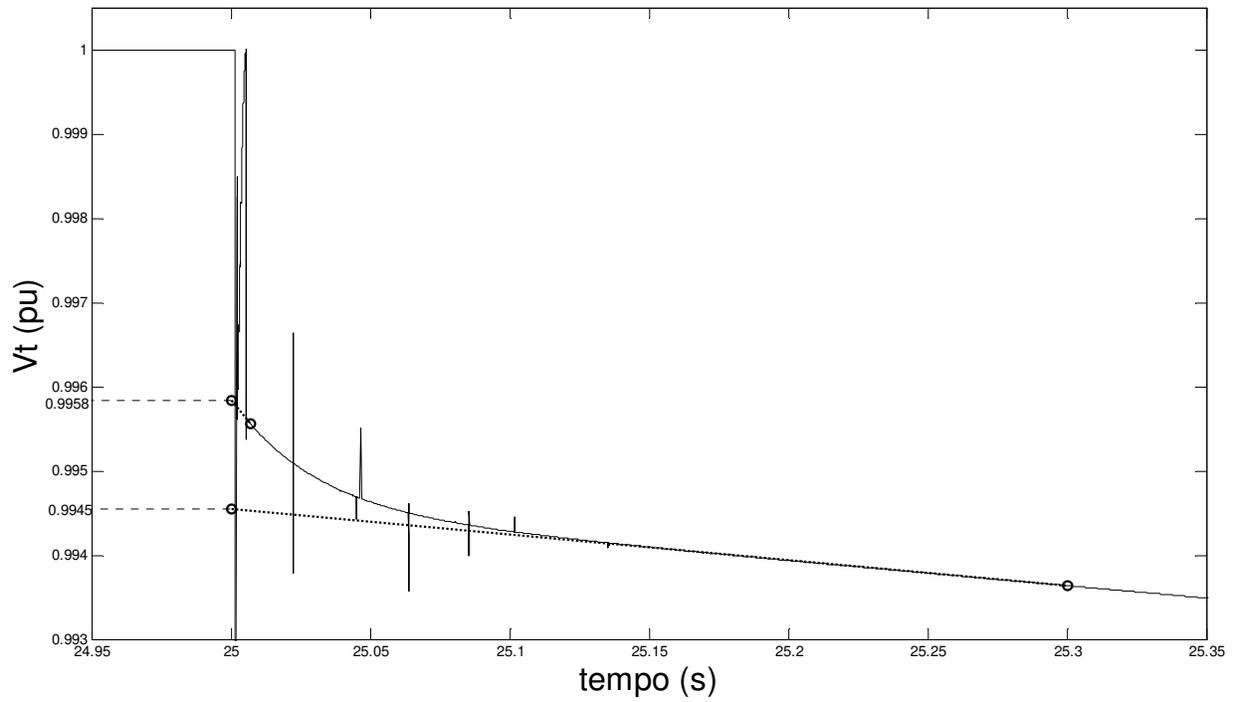


Figura 5.31 - Ampliação da Fig. 5.30

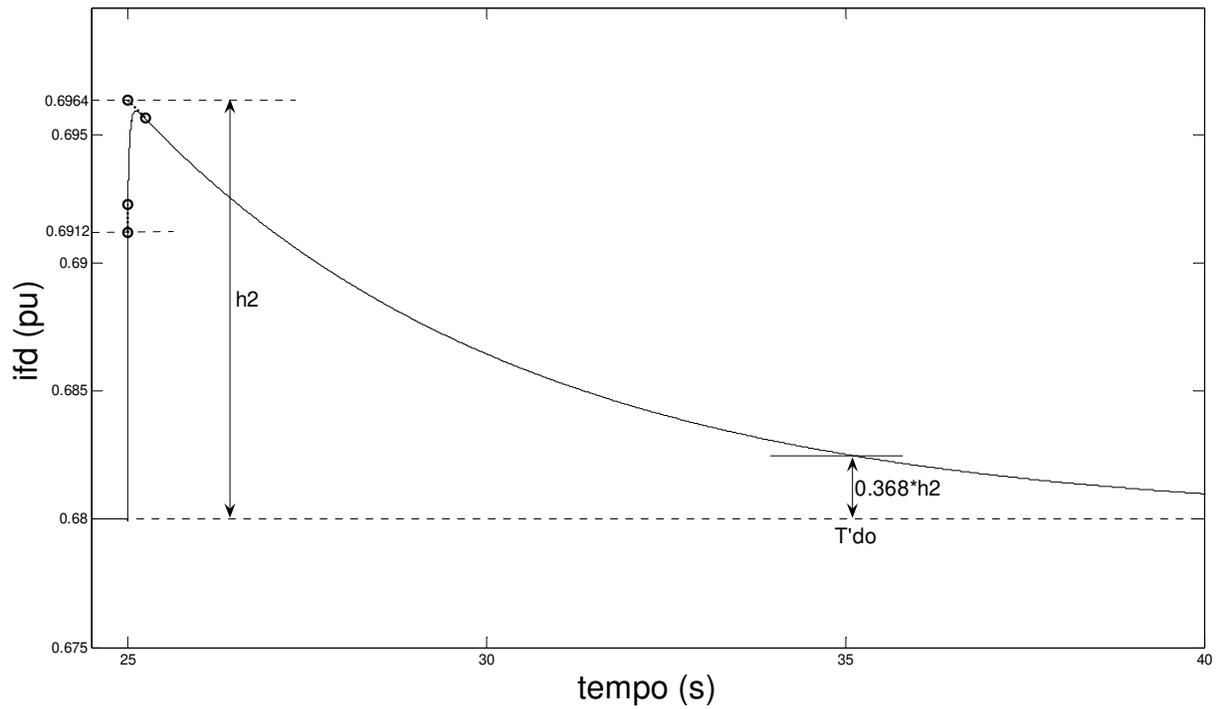


Figura 5.32 - Corrente de campo durante a rejeição.

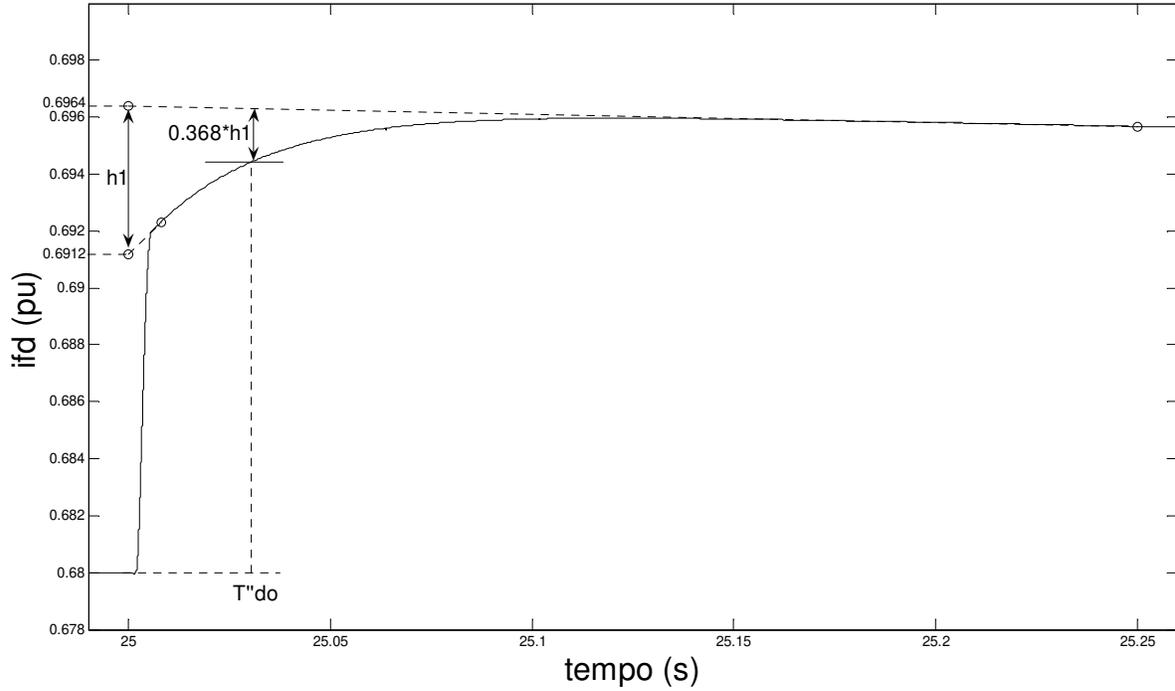


Figura 5.33 - Ampliação da Fig. 5.32.

5.4.3 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo em Quadratura para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

$$\begin{array}{lll}
 \delta_o \cong \phi_o \cong 30,94^\circ & T_{mech} = 0,3064 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} \\
 v_f = 0,6 \text{ pu} & P_o = 0,2861 \text{ pu} & Q_o = -0,1715 \text{ pu} \\
 Vt_o = 1 \text{ pu} & it_o = iq_o = 0,3335 \text{ pu} & id_o = 0 \text{ pu}
 \end{array}$$

$$x_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2}}{iq_o} = \frac{\sqrt{1^2 - 0,9012^2}}{0,3335} = 1,299 \text{ pu}$$

$$x_q'' = \frac{\sqrt{A^2 - C^2} - \sqrt{B^2 - C^2}}{iq_o} = \frac{\sqrt{1^2 - 0,9012^2} - \sqrt{0,9685^2 - 0,9012^2}}{0,3335} = 0,2359 \text{ pu}$$

$$Vt_{(T_{qo}'')} = 0,368(B) = 0,368(0,9685) = 0,3564 \text{ pu}$$

$$T_{qo}'' = \text{indefinido}$$

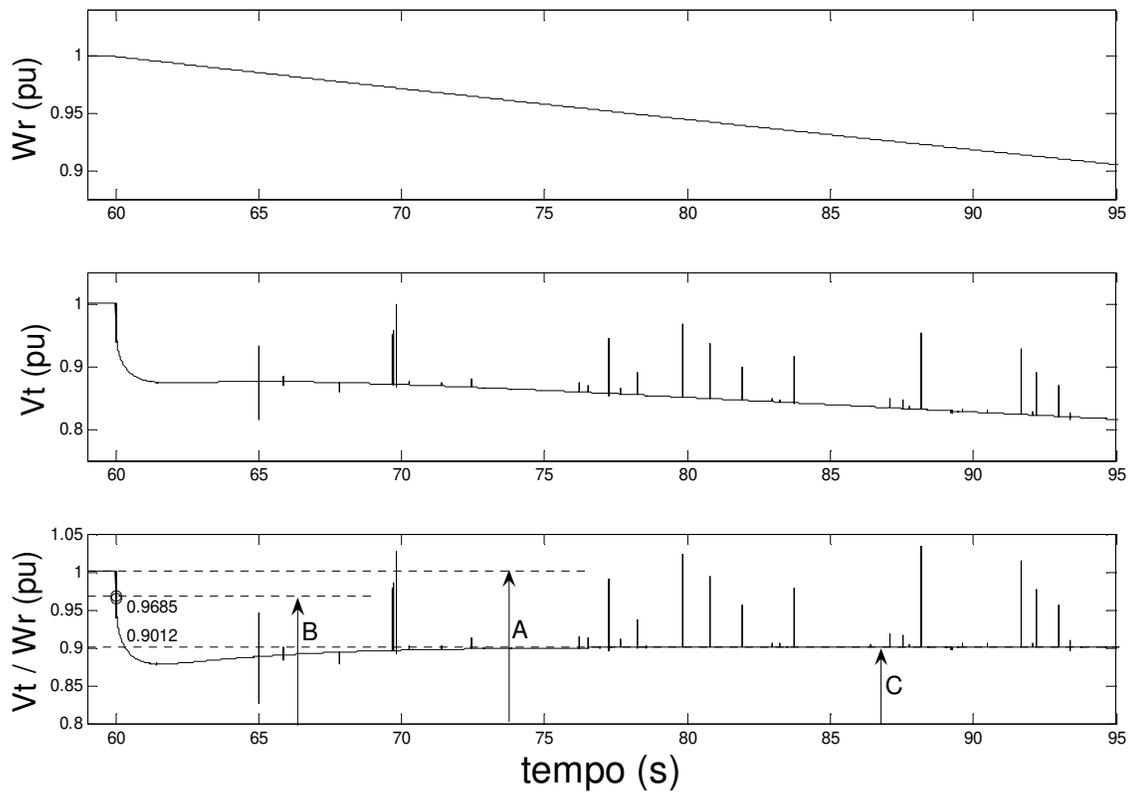


Figura 5.34 - Velocidade (W_r), tensão terminal (V_t) durante a rejeição.

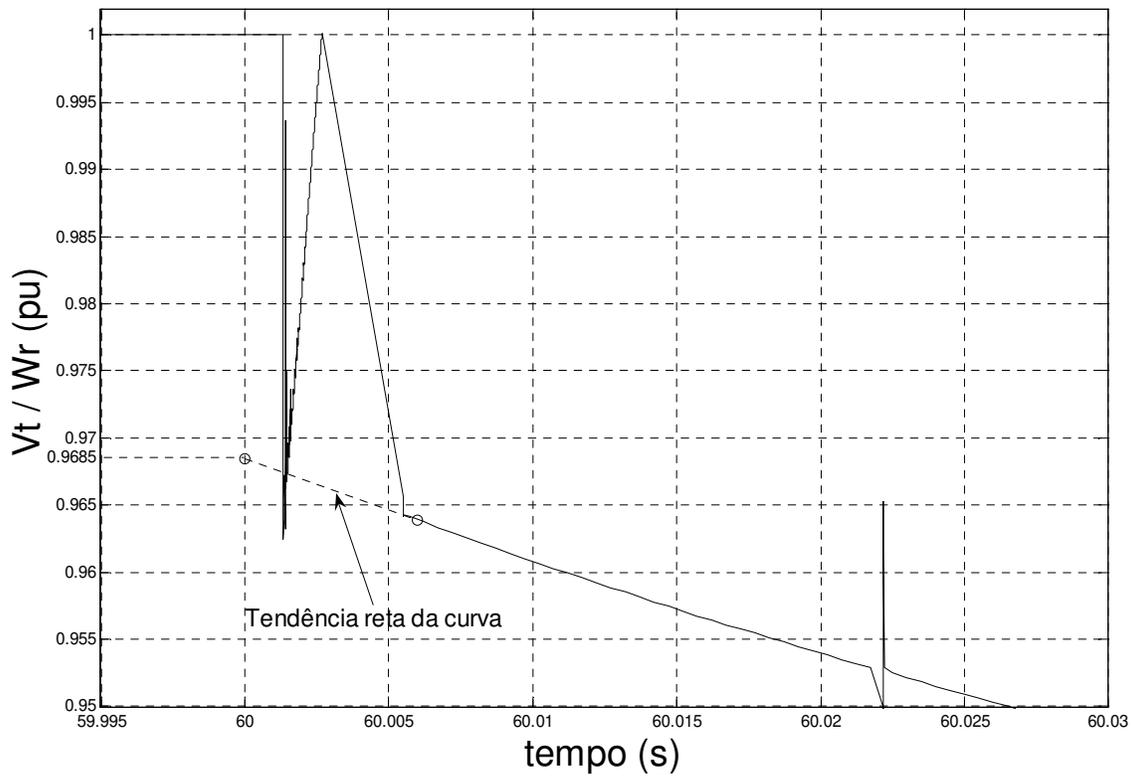


Figura 5.35 - Ampliação da Fig. 5.34 V_t/W_r

5.4.4 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Arbitrário para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura Incluindo o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

a) 100% de carga

$$\begin{array}{lll}
 T_{mech} = 0,92 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & \delta_o = 39,32^\circ \\
 v_f = 1,5516 \text{ pu} & P_o = 0,8970 \text{ pu} & Q_o = 0,4318 \text{ pu} \\
 i_{t_o} = 0,9955 \text{ pu} & i_{q_o} = 0,4203 \text{ pu} & i_{d_o} = 0,9025 \text{ pu} \\
 V_{t_o} = 1 \text{ pu} & V_{q_o} = 0,7736 \text{ pu} & V_{d_o} = 0,6337 \text{ pu}
 \end{array}$$

$$x_q = \frac{(V_t \text{sen} \delta)_o}{i_{q_o}} = \frac{0,6337}{0,4203} = 1,5077 \text{ pu}$$

$$x'_q = x_q - \frac{(V_t \text{sen} \delta)'_o}{i_{q_o}} = 1,5077 - \frac{0,4091}{0,4203} = 0,5343 \text{ pu}$$

$$x''_q = x_q - \frac{(V_t \text{sen} \delta)''_o}{i_{q_o}} = 0,5343 - \frac{0,1292}{0,4203} = 0,2269 \text{ pu}$$

$$h1 = 0,4091 \text{ pu} \quad (V_t \text{sen} \delta)_{T_{qo}'} = 0,368(h1) = 0,1505 \text{ pu} \quad T_{qo}' = 0,8924 \text{ s}$$

$$h2 = 0,1292 \text{ pu} \quad (V_t \text{sen} \delta)_{T_{qo}''} = 0,368(h2) = 0,0475 \text{ pu} \quad T_{qo}'' = 0,0390 \text{ s}$$

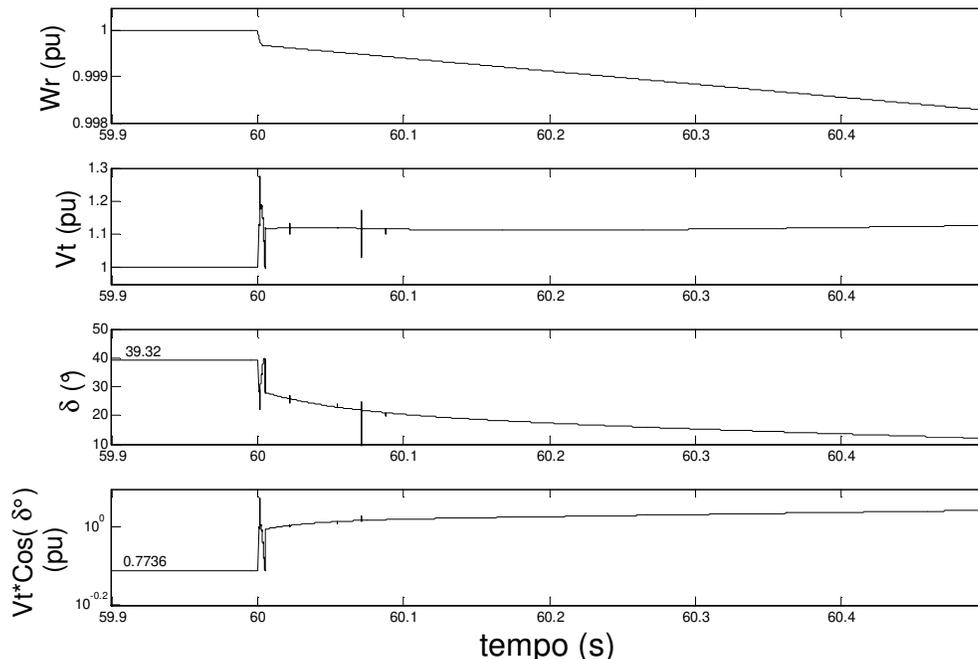


Figura 5.36 - Velocidade (W_r), tensão terminal (V_t), ângulo de carga (δ°) durante a rejeição.

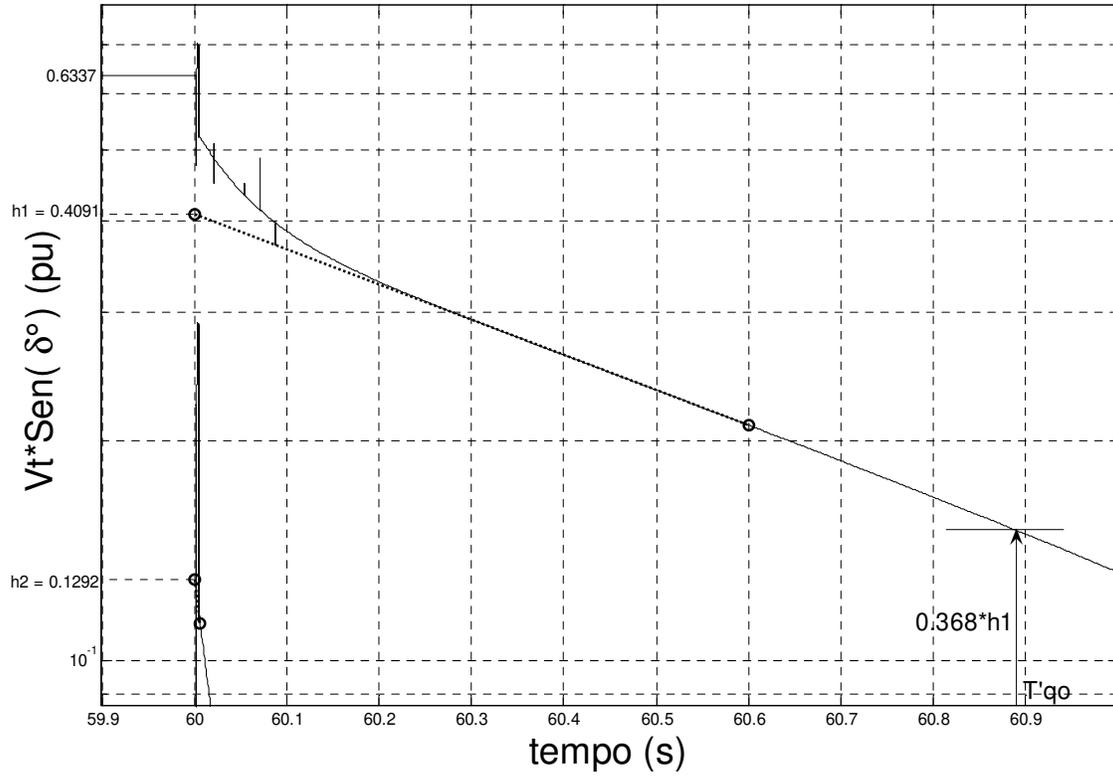


Figura 5.37 - Tensão terminal de eixo direto para cálculos na parte transitória.

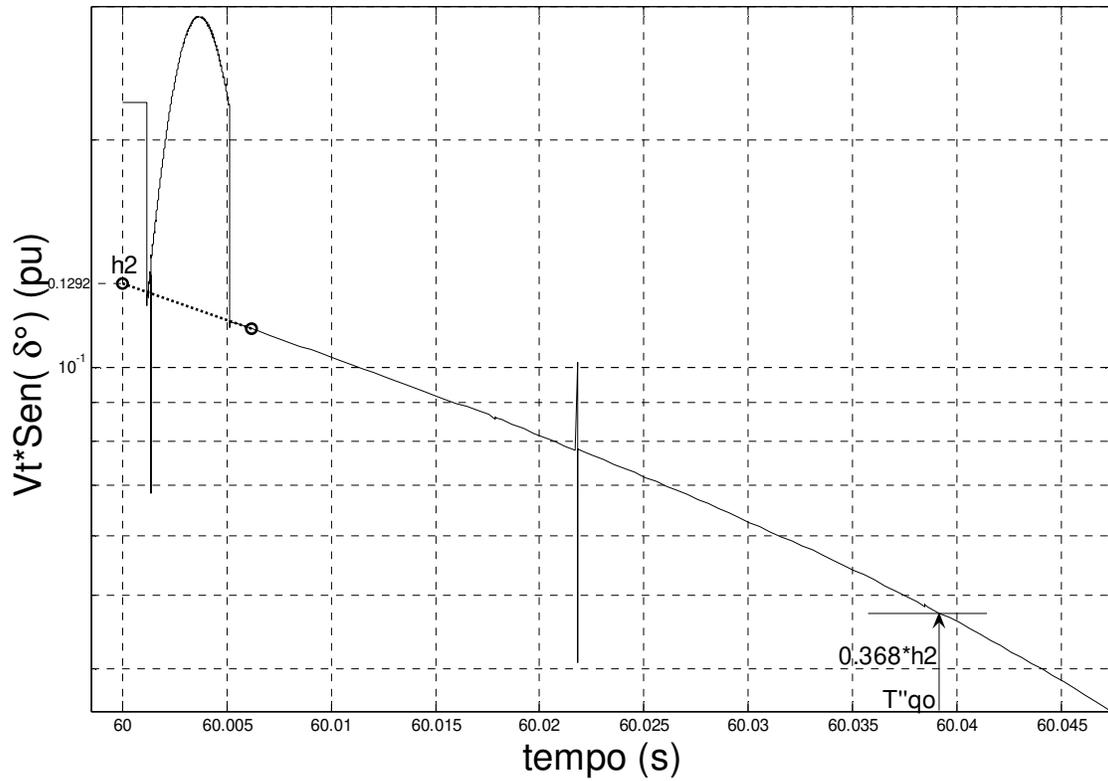


Figura 5.38 - Ampliação da Fig. 5.37 para cálculos na parte subtransitória.

b) Carga diferente a nominal

$$\begin{array}{lll}
 T_{mech} = 0,368 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & \delta_o = 22,95^\circ \\
 v_f = 0,9682 \text{ pu} & P_o = 0,3476 \text{ pu} & Q_o = 0,1646 \text{ pu} \\
 i_{t_o} = 0,3846 \text{ pu} & i_{q_o} = 0,2559 \text{ pu} & i_{d_o} = 0,2871 \text{ pu} \\
 V_{t_o} = 1 \text{ pu} & V_{q_o} = 0,9208 \text{ pu} & V_{d_o} = 0,3899 \text{ pu}
 \end{array}$$

$$x_q = \frac{(V_t \text{sen} \delta)_o}{i_{q_o}} = \frac{0,3899}{0,2559} = 1,5236 \text{ pu}$$

$$x'_q = x_q - \frac{(V_t \text{sen} \delta)'_o}{i_{q_o}} = 1,5236 - \frac{0,2529}{0,2559} = 0,5353 \text{ pu}$$

$$x''_q = x_q - \frac{(V_t \text{sen} \delta)''_o}{i_{q_o}} = 0,5353 - \frac{0,0796}{0,2559} = 0,2242 \text{ pu}$$

$$h1 = 0,2529 \text{ pu} \quad (V_t \text{sen} \delta)_{T_{qo}'} = 0,368(h1) = 0,0931 \text{ pu} \quad T_{qo}' = 0,9584 \text{ s}$$

$$h2 = 0,0796 \text{ pu} \quad (V_t \text{sen} \delta)_{T_{qo}''} = 0,368(h2) = 0,0293 \text{ pu} \quad T_{qo}'' = 0,0414 \text{ s}$$

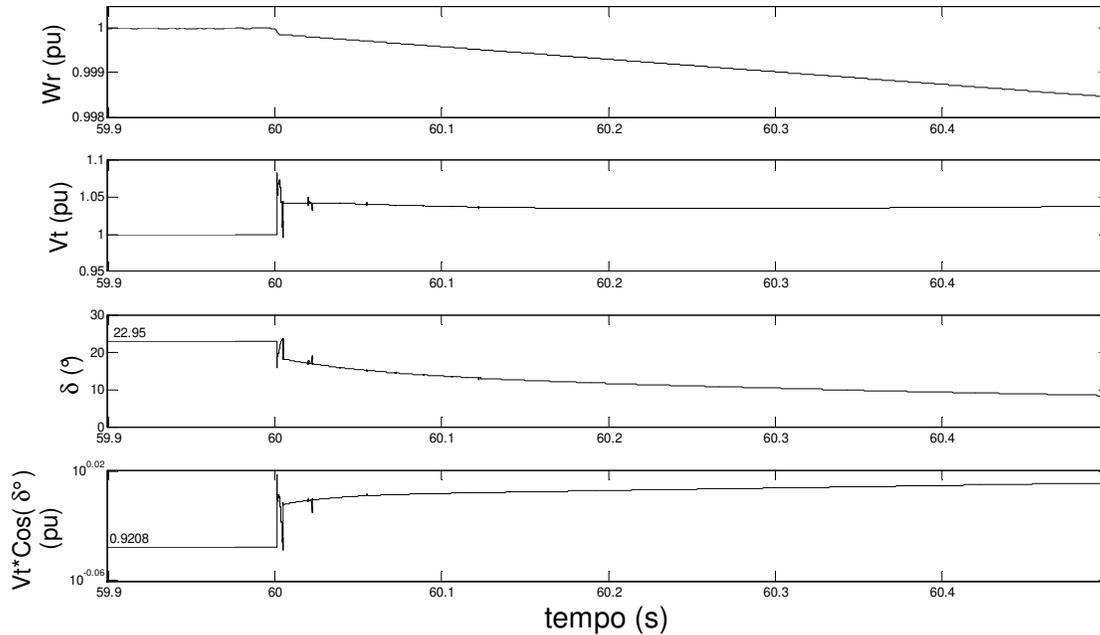


Figura 5.39 - Velocidade (W_r), tensão terminal (V_t), ângulo de carga (δ°) durante a rejeição.

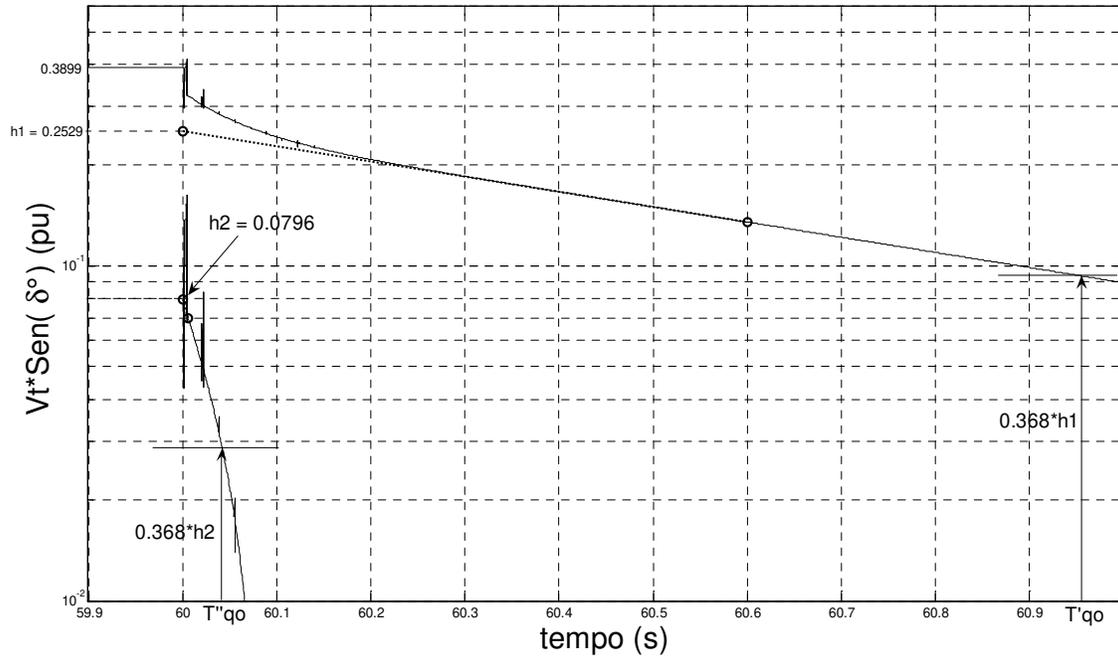


Figura 5.40 - Tensão terminal de eixo direto em escala semilog durante a rejeição.

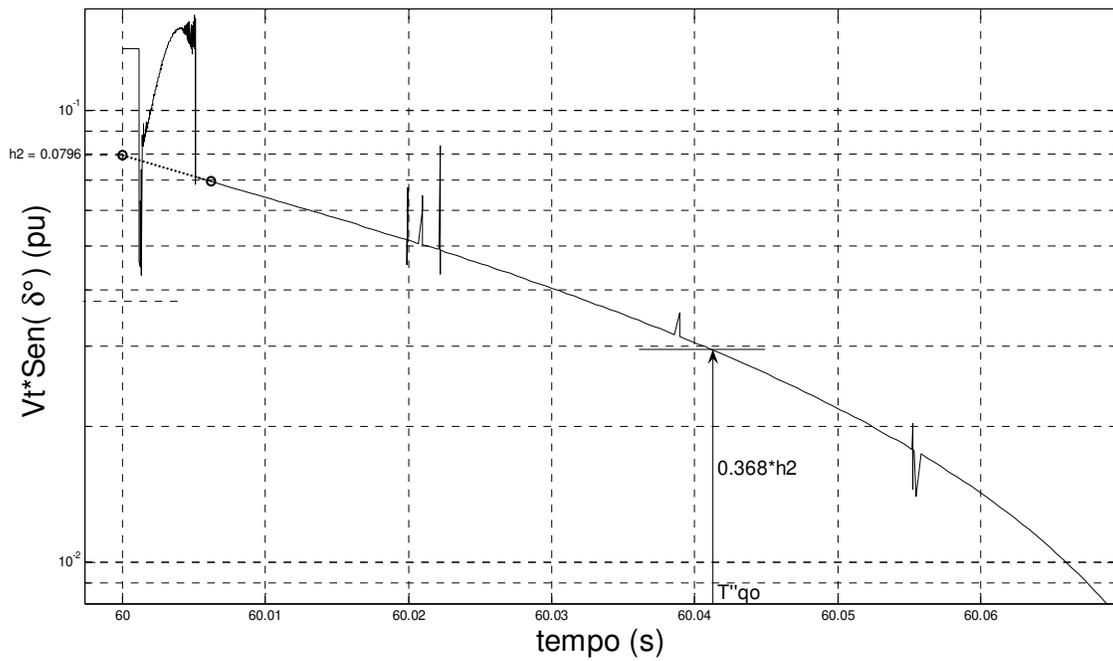


Figura 5.41 - Ampliação da parte subtransitória da tensão terminal da Fig. 5.40.

5.4.5 Simulação do Ensaio de Curto-Circuito Brusco para a Determinação dos Parâmetros Padronizados de Eixo Direto

$$\begin{array}{llll}
 T_{mech} = 0,02 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & P_o = 0 \text{ pu} & Q_o = 0 \text{ pu} \\
 Vt_o = 0 \text{ pu} & Vq_o = 1 \text{ pu} & Vd_o = 0 \text{ pu} & v_f = 1 \text{ pu} \\
 it_o = 0 \text{ pu} & iq_o = 0 \text{ pu} & id_o = 0 \text{ pu} &
 \end{array}$$

$$x_d = \frac{E_o}{i_{cc}} = \frac{1}{0,5525} = 1,8099 \text{ pu}$$

$$x'_d = \frac{E_o}{(i_{cc} + i'_{cc})} = \frac{1}{(0,5525 + 2,7704)} = 0,3009 \text{ pu}$$

$$x''_d = \frac{E_o}{(i_{cc} + i'_{cc} + i''_{cc})} = \frac{1}{(0,5525 + 2,7704 + 1,4421)} = 0,2099 \text{ pu}$$

$$T'_d = 1,3350 \text{ s}$$

$$T''_d = 0,0182 \text{ s}$$

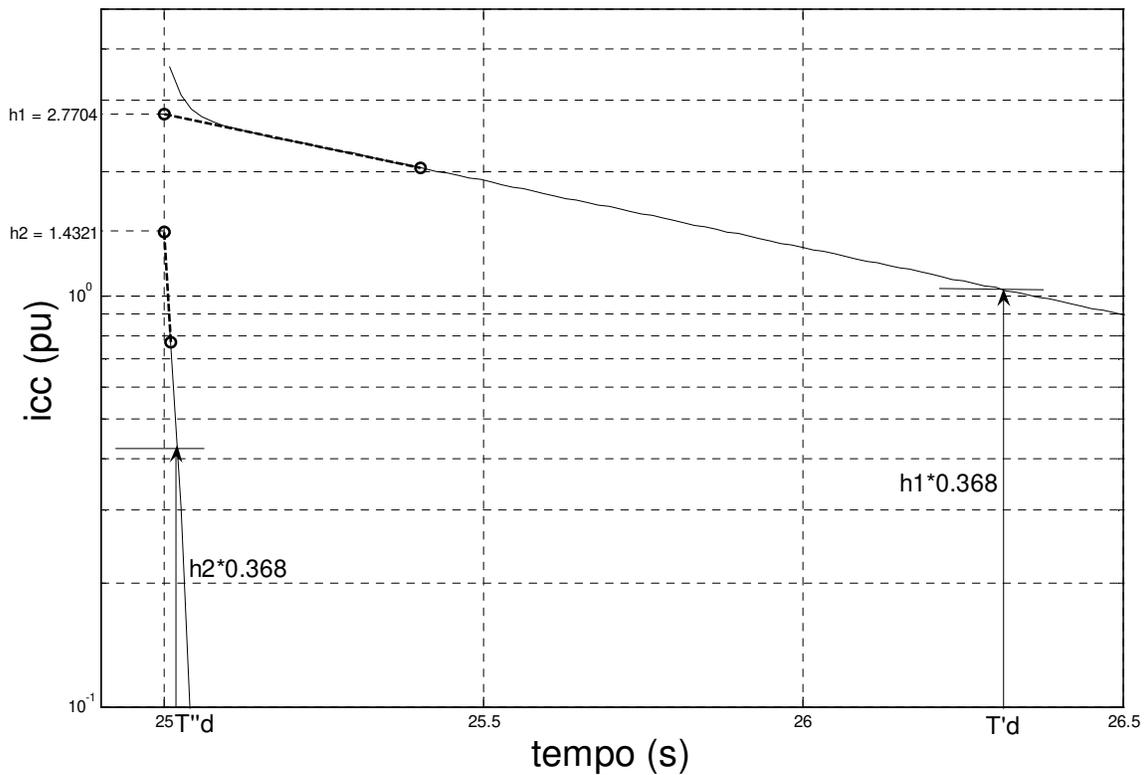


Figura 5.42 – Média das envoltórias das correntes de curto circuito em escala semilog.

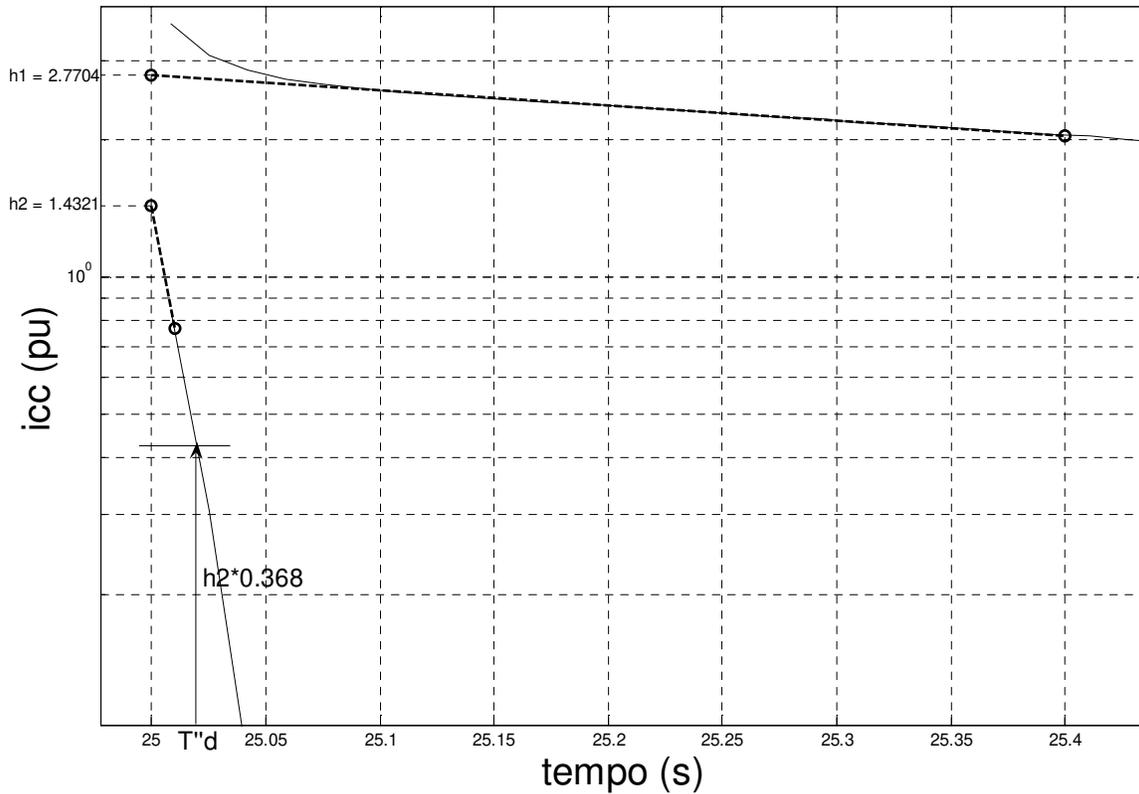


Figura 5.43 - Ampliação da Fig. 5.42.

5.4.6 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo Direto sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

$$T_{mech} = 0,02 \text{ pu}$$

$$T_{dam} = 0,02 \text{ pu}$$

$$P_o \cong 0 \text{ pu}$$

$$Q_o = -0,03315 \text{ pu}$$

$$Vt_o = 1 \text{ pu}$$

$$Vq_o = 1 \text{ pu}$$

$$Vd_o \cong 0 \text{ pu}$$

$$v_f = 0,94 \text{ pu}$$

$$it_o = 0,03315 \text{ pu}$$

$$iq_o \cong 0 \text{ pu}$$

$$id_o = -0,03315 \text{ pu}$$

$$x_d = \frac{C}{it_o} = \frac{1-0,94}{0,03315} = 1,8099 \text{ pu}$$

$$x'_d = \frac{B}{it_o} = \frac{1-0,9901}{0,03315} = 0,2986 \text{ pu}$$

$$x''_d = \frac{A}{it_o} = \frac{1-0,9926}{0,03315} = 0,2232 \text{ pu}$$

$$T'_{do} = 8,0688 \text{ s}$$

$$T''_{do} = 0,0309 \text{ s}$$

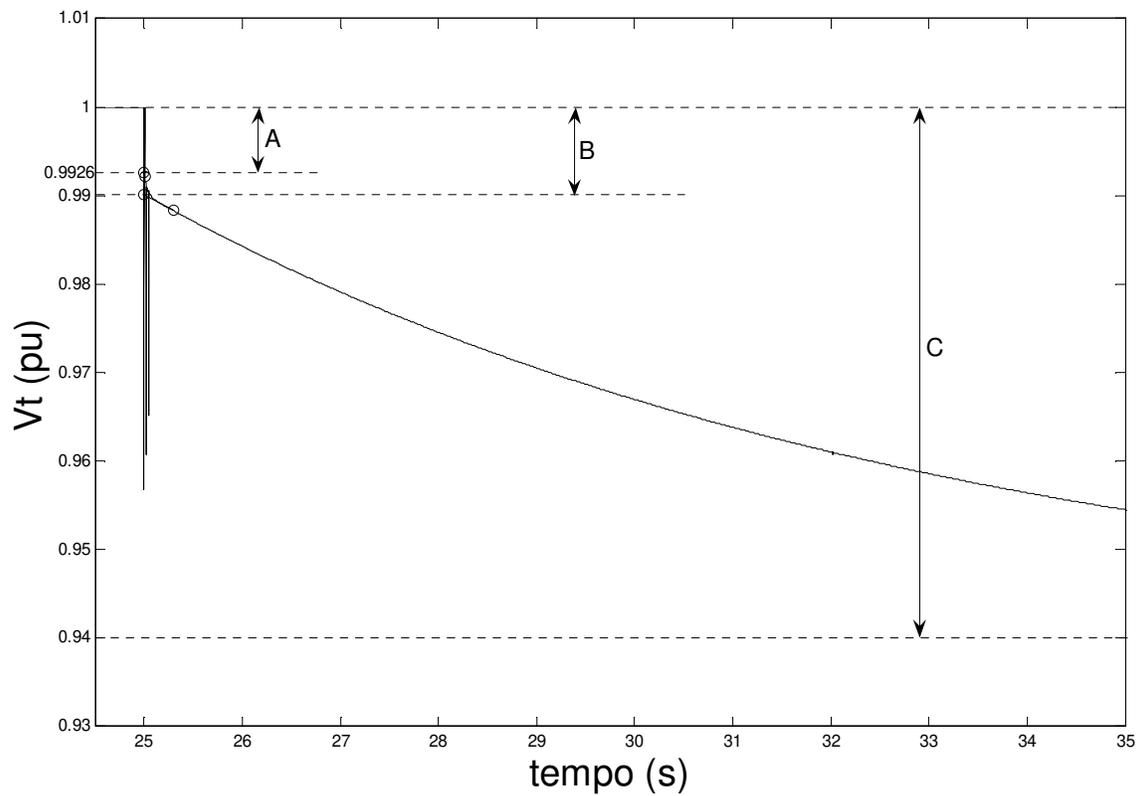


Figura 5.44 - Tensão terminal durante a rejeição.

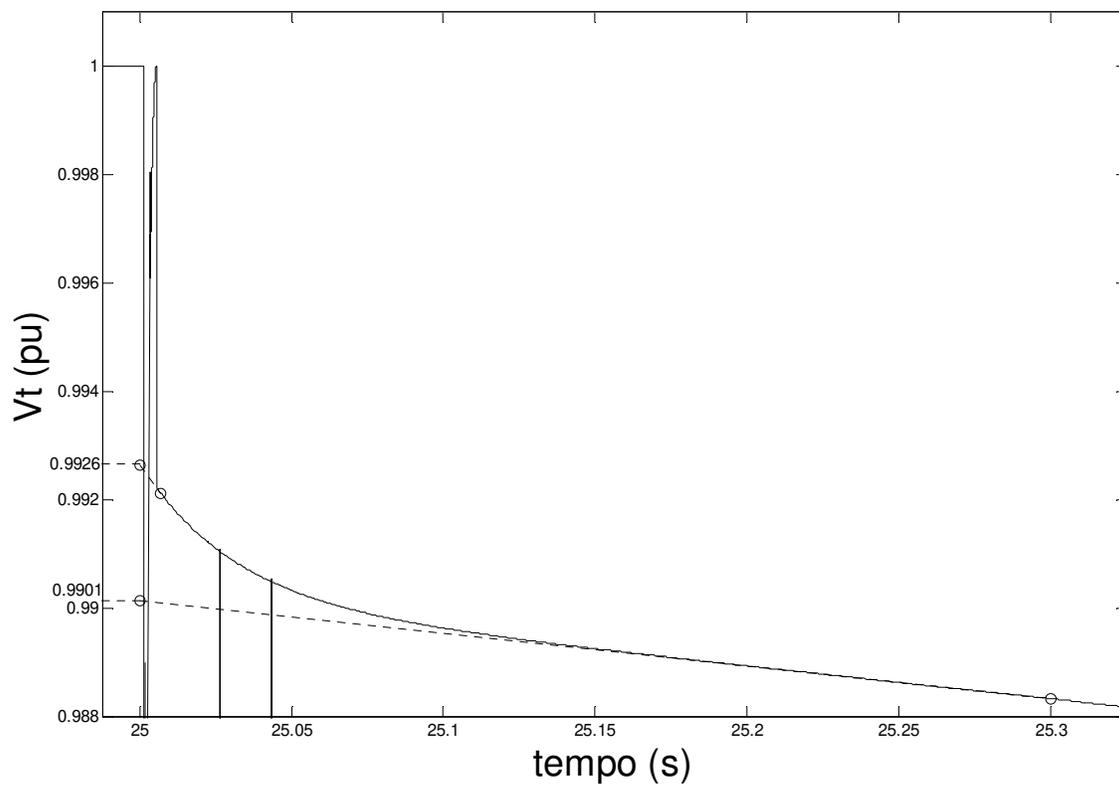


Figura 5.45 - Ampliação da Fig. 5.44.

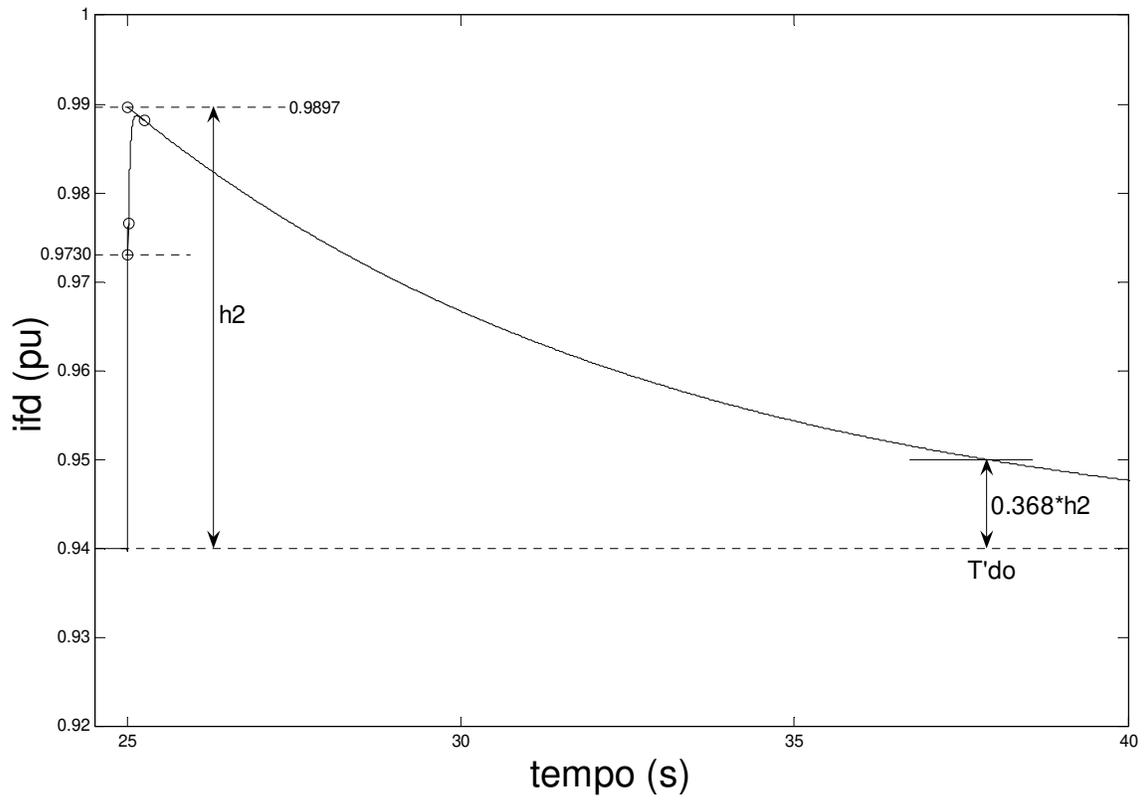


Figura 5.46 - Corrente de campo durante a rejeição.

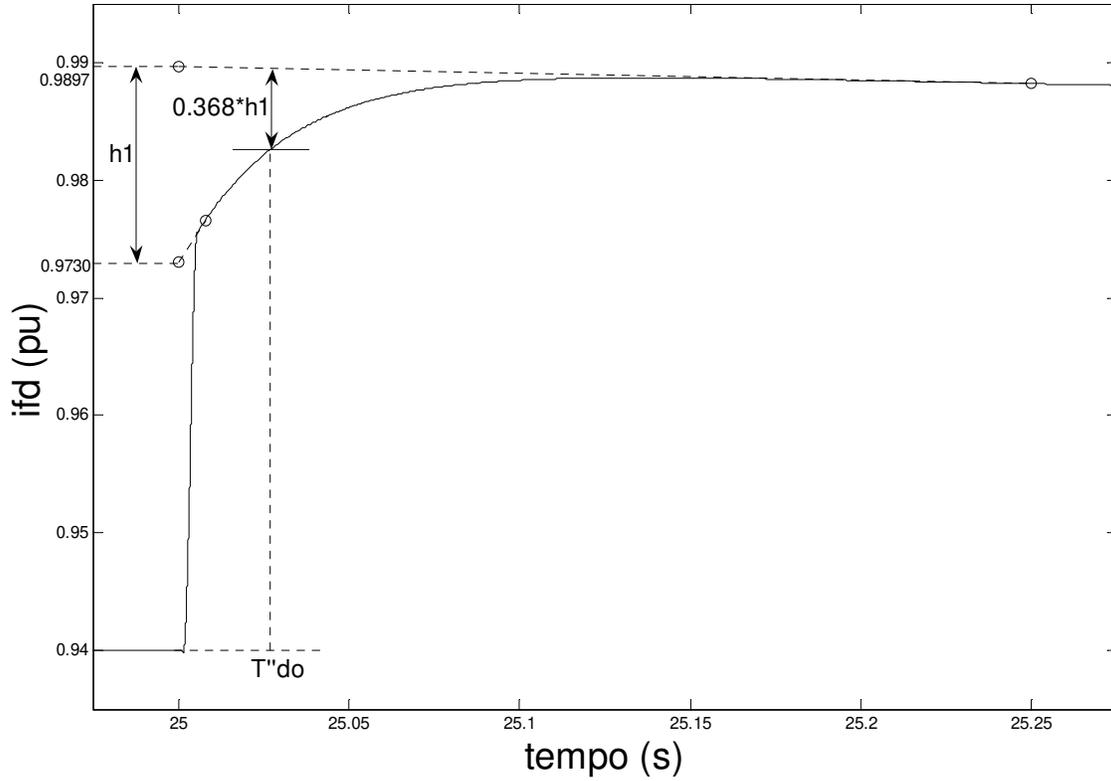


Figura 5.47 - Ampliação da Fig. 5.46.

5.4.7 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo em Quadratura para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

$$\begin{array}{lll} \delta_o \cong \phi_o \cong 29,64^\circ & T_{mech} = 0,2643 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} \\ v_f = 0,87 \text{ pu} & P_o = 0,2441 \text{ pu} & Q_o = -0,1389 \text{ pu} \\ Vt_o = 1 \text{ pu} & i_{t_o} = i_{q_o} = 0,2808 \text{ pu} & i_{d_o} = 0 \text{ pu} \end{array}$$

$$x_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2}}{i_{q_o}} = \frac{\sqrt{1^2 - 0,87^2}}{0,2808} = 1,7559 \text{ pu}$$

$$x_q'' = \frac{\sqrt{A^2 - C^2} - \sqrt{B^2 - C^2}}{i_{q_o}} = \frac{\sqrt{1^2 - 0,87^2} - \sqrt{0,9736^2 - 0,87^2}}{0,2808} = 0,1995 \text{ pu}$$

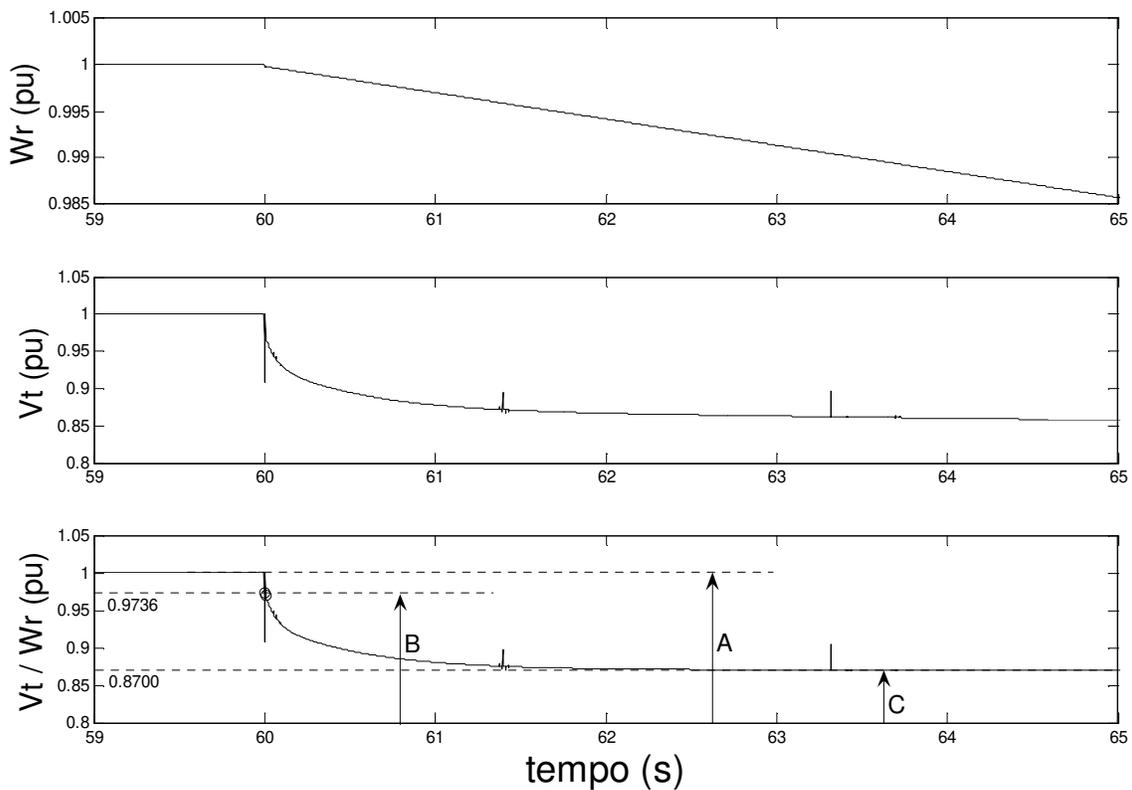


Figura 5.48 - Velocidade (Wr), tensão terminal (Vt), durante a rejeição.

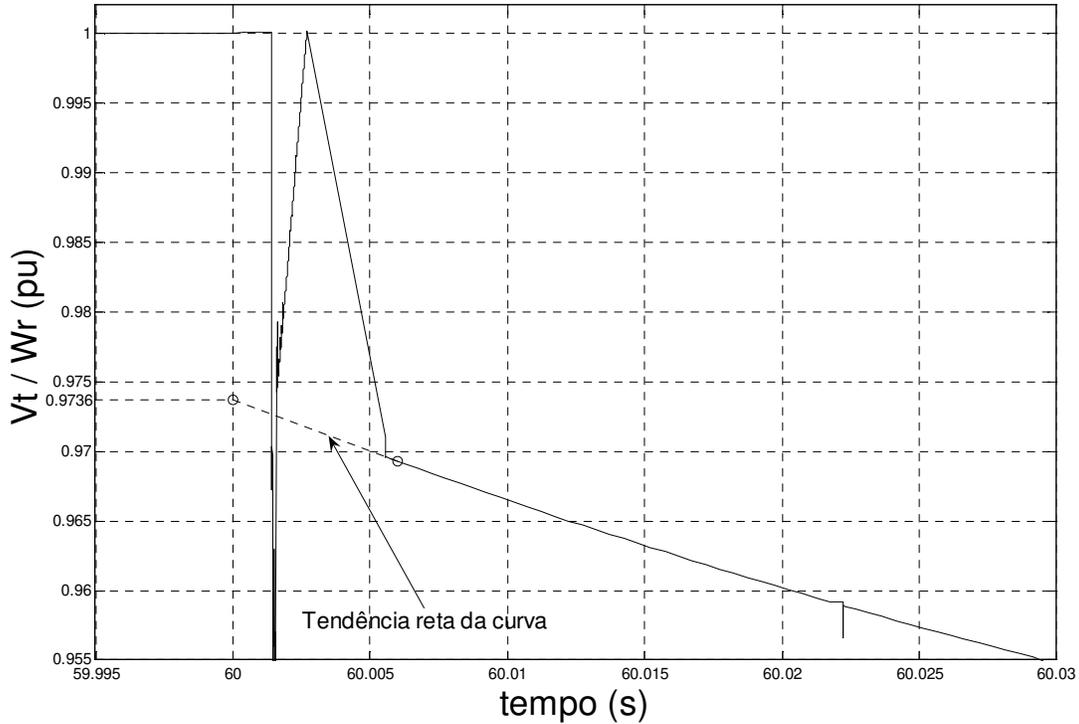


Figura 5.49 - Ampliação da parte V_t/W_r da Fig. 5.48, em escala semilog.

5.4.8 Simulação do Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Arbitrário para a Determinação de Parâmetros Padronizados de Eixo em Quadratura sem o Efeito da Saturação Magnética do Gerador

a) 100% de carga

$$\begin{array}{lll}
 T_{mech} = 0,92 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & \delta_o = 41,6413^\circ \\
 v_f = 2,4206 \text{ pu} & P_o = 0,8970 \text{ pu} & Q_o = 0,4386 \text{ pu} \\
 i_{t_o} = 0,9985 \text{ pu} & i_{q_o} = 0,3789 \text{ pu} & i_{d_o} = 0,9238 \text{ pu} \\
 V_{t_o} = 1 \text{ pu} & V_{q_o} = 0,7473 \text{ pu} & V_{d_o} = 0,6645 \text{ pu}
 \end{array}$$

$$x_q = \frac{(V_t \text{ sen } \delta)_o}{i_{q_o}} = \frac{0,6645}{0,3789} = 1,7538 \text{ pu}$$

$$x'_q = x_q - \frac{(V_t \text{ sen } \delta)'_o}{i_{q_o}} = 1,7538 - \frac{0,4571}{0,3789} = 0,5474 \text{ pu}$$

$$x''_q = x_q - \frac{(V_t \text{ sen } \delta)''_o}{i_{q_o}} = 0,5474 - \frac{0,1227}{0,3789} = 0,2236 \text{ pu}$$

$$h1 = 0,4571 \text{ pu} \quad (V_t \text{ sen } \delta)_{T_{q'o}} = 0,368(h1) = 0,1682 \text{ pu} \quad T_{q'o}' = 1,0745 \text{ s}$$

$$h2 = 0,1227 \text{ pu} \quad (V_t \text{ sen } \delta)_{T_{q'o}''} = 0,368(h2) = 0,0452 \text{ pu} \quad T_{q'o}'' = 0,0414 \text{ s}$$

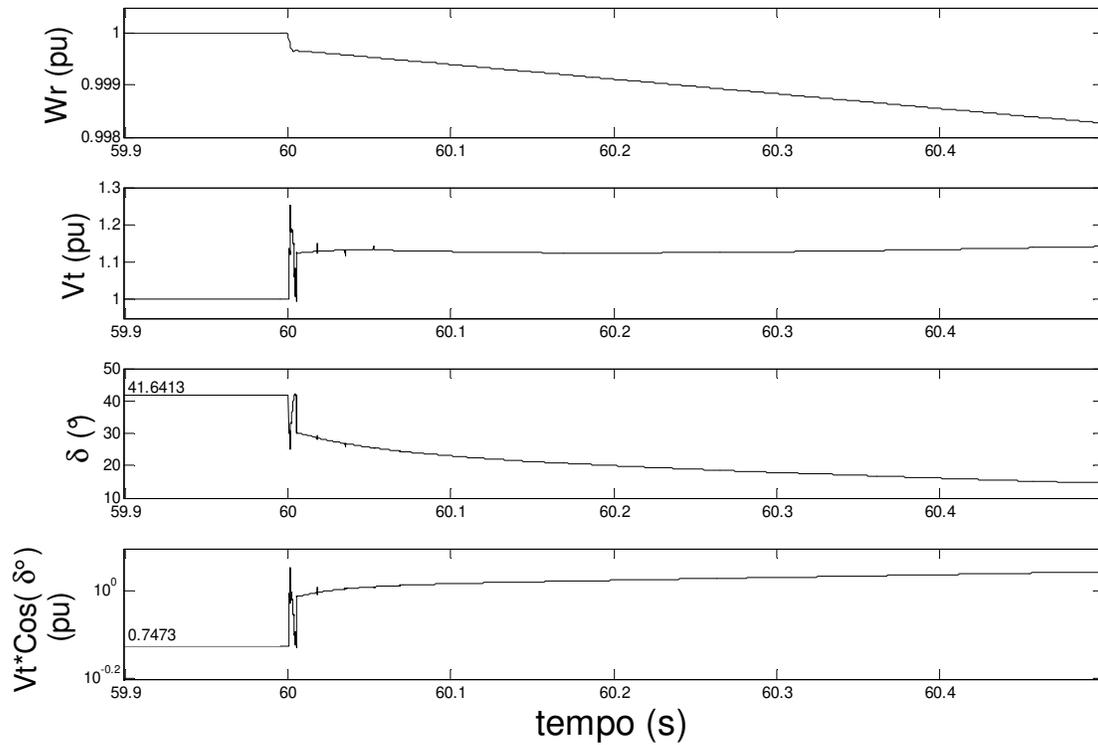


Figura 5.50 - Velocidade (W_r), tensão terminal (V_t), ângulo de carga (δ°) durante a rejeição.

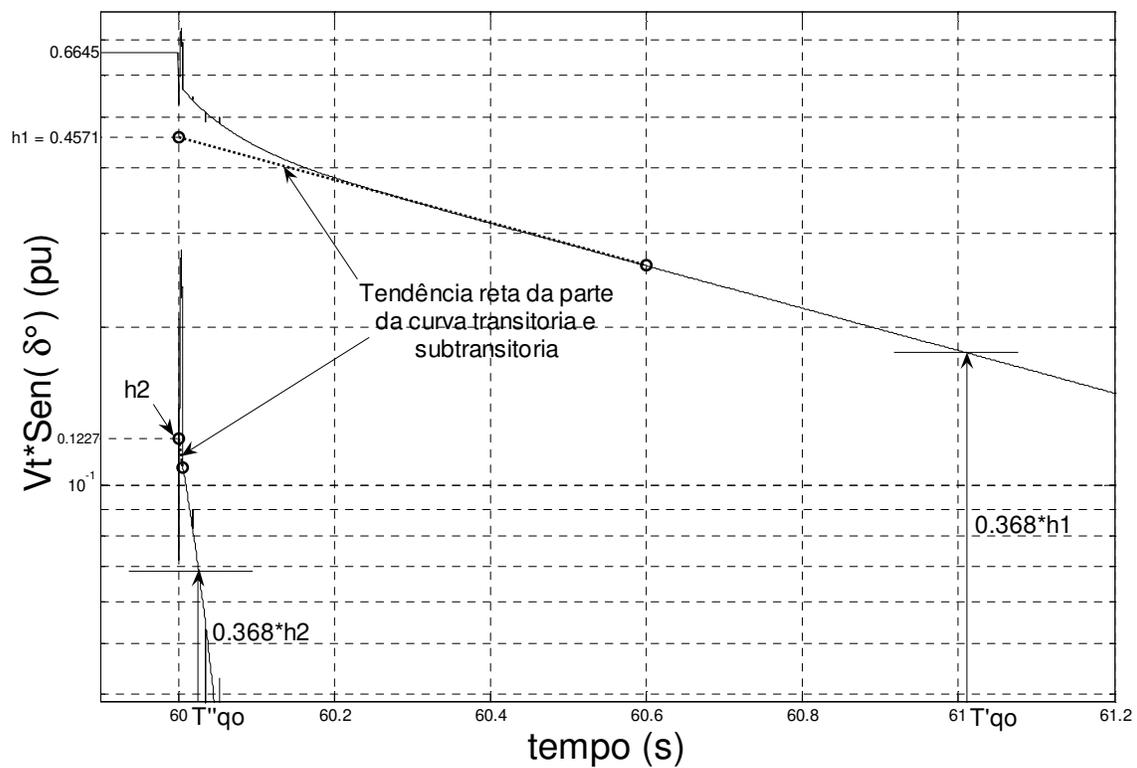


Figura 5.51 - Tensão terminal de eixo direto durante a rejeição em escala semilog.

b) Carga diferente a nominal

$$\begin{array}{lll}
 T_{mech} = 0,368 \text{ pu} & T_{dam} = 0,02 \text{ pu} & \delta_o = 40,7163^\circ \\
 v_f = 0,9440 \text{ pu} & P_o = 0,3476 \text{ pu} & Q_o = -0,1643 \text{ pu} \\
 i_{t_o} = 0,3844 \text{ pu} & i_{q_o} = 0,3706 \text{ pu} & i_{d_o} = 0,1022 \text{ pu} \\
 V_{t_o} = 1 \text{ pu} & V_{q_o} = 0,7579 \text{ pu} & V_{d_o} = 0,6523 \text{ pu}
 \end{array}$$

$$x_q = \frac{(V_t \text{sen} \delta)_o}{i_{q_o}} = \frac{0,6523}{0,3706} = 1,7601 \text{ pu}$$

$$x'_q = x_q - \frac{(V_t \text{sen} \delta)'_o}{i_{q_o}} = 1,7601 - \frac{0,4478}{0,3706} = 0,5518 \text{ pu}$$

$$x''_q = x_q - \frac{(V_t \text{sen} \delta)''_o}{i_{q_o}} = 0,5518 - \frac{0,1205}{0,3706} = 0,2266 \text{ pu}$$

$$h1 = 0,4478 \text{ pu} \quad (V_t \text{sen} \delta)_{T'_{q_o}} = 0,368(h1) = 0,1648 \text{ pu} \quad T'_{q_o} = 1,3106 \text{ s}$$

$$h2 = 0,1205 \text{ pu} \quad (V_t \text{sen} \delta)_{T''_{q_o}} = 0,368(h2) = 0,0443 \text{ pu} \quad T''_{q_o} = 0,0426 \text{ s}$$

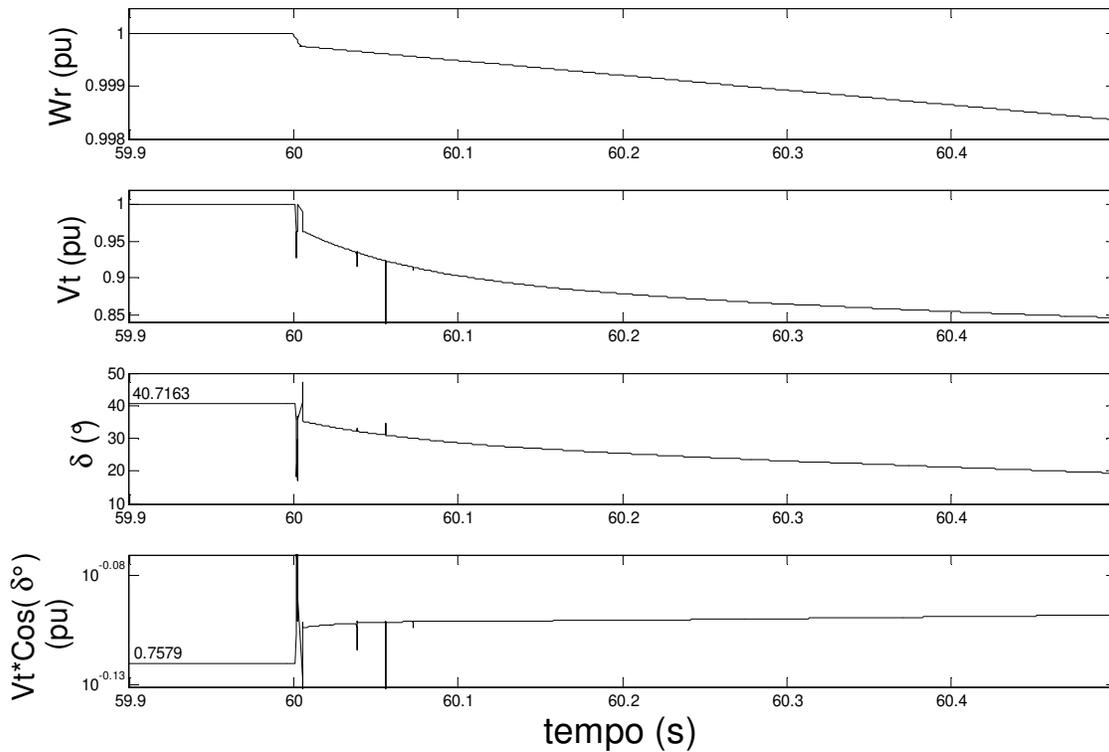


Figura 5.52 - Velocidade (W_r), tensão terminal (V_t), ângulo de carga (δ°) durante a rejeição.

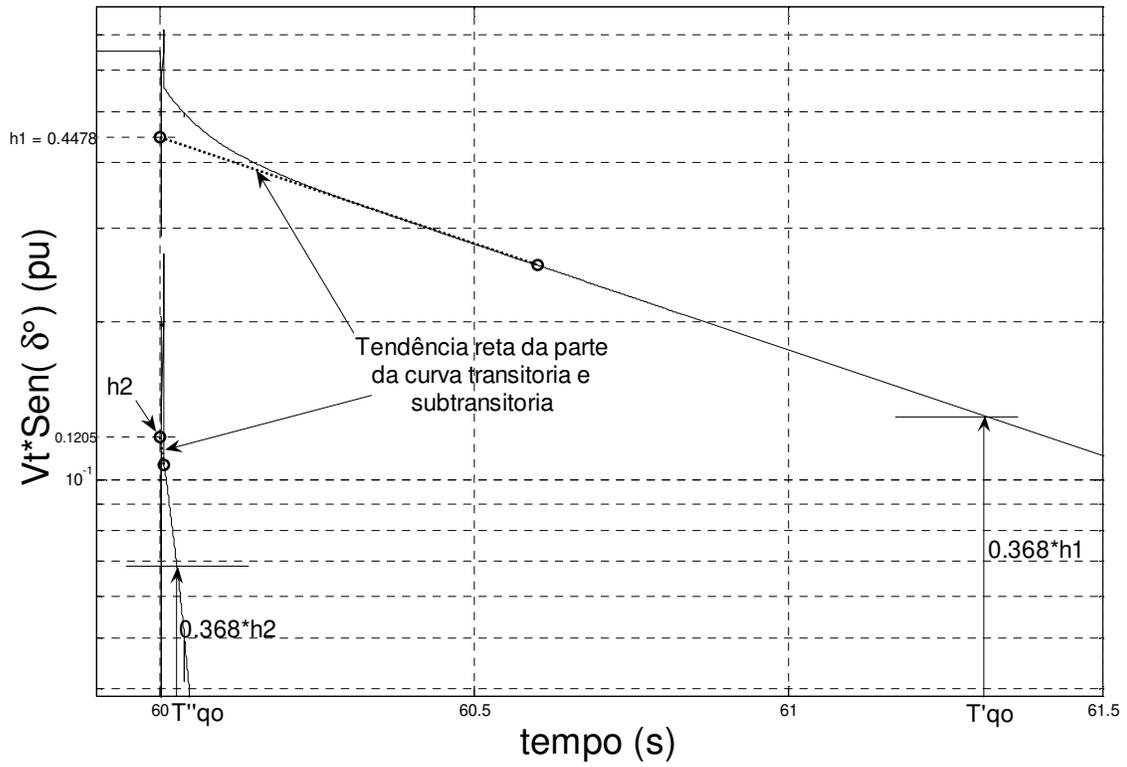


Figura 5.53 - Tensão terminal de eixo direto durante a rejeição em escala semilog.

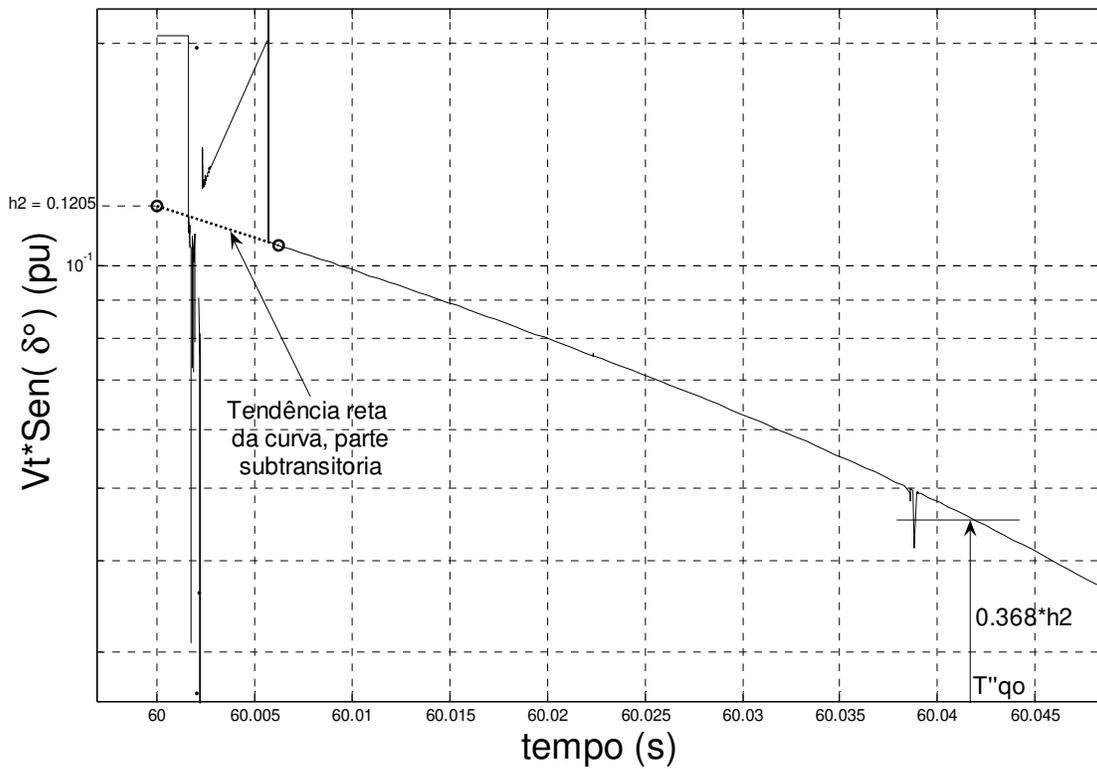


Figura 5.54 - Ampliação da parte subtransitória da Fig. 5.53.

5.5 Tabelas Comparativas de Resultados

Os valores dos parâmetros obtidos nos ensaios são comparados com os valores mostrados no capítulo 3 nas tabelas 5.1 a 5.4, a seguir:

Tabela 5.1 - Resultados das simulações do gerador de pólos salientes, sem saturação.

Reatâncias (pu) e constantes de tempo (s)		Curto circuito brusco	Rejeição de carga				Potier
			Eixo arbitrário		Eixo d	Eixo q	
			Menor a nominal	100%	Puramente reativa (capacitiva)	$\phi \cong \delta$	
x_d	Real				1,0490		
	Calculado	1,0490			1,0492		
x_q	Real				0,6313		
	Calculado		0,6335	0,6227		0,6183	
x'_d	Real				0,3320		
	Calculado	0,3330			0,3293		
x'_q	Real						
	Calculado						
x''_d	Real				0,2100		
	Calculado	0,1904			0,1792		
x''_q	Real				0,2496		
	Calculado		0,2079	0,1933		0,2372	
x_{ls}	Real				0,1235		
	Calculado					0,1511	
T'_{do}	Real				3,7724		
	Calculado				3,8008		
T''_{do}	Real				0,0286		
	Calculado				0,0245		
T'_d	Real				1,1939		
	Calculado	1,1935					
T''_d	Real				0,0189		
	Calculado	0,0170					
T'_{qo}	Real						
	Calculado						
T''_{qo}	Real				0,0334		
	Calculado		0,0223	0,0328			
T'_q	Real						
	Calculado						
T''_q	Real				0,0132		
	Calculado						

Tabela 5.2 - Resultados das simulações do gerador de pólos salientes, com saturação.

Reatâncias (pu) e constantes de tempo (s)	Curto circuito brusco	Rejeição de carga				Potier
		Eixo arbitrário		Eixo d	Eixo q	
		Menor a nominal	100%	Puramente reativa (capacitiva)	$\phi \cong \delta$	
x_d				0,7653		
x_q		0,6335	0,6227		0,6183	
x'_d				0,3077		
x'_q						
x''_d				0,1768		
x''_q		0,2077	0,1936		0,2406	
x_{ls}					0,1511	
T'_{do}				2,9093		
T''_{do}				0,0232		
T'_d						
T''_d						
T'_{qo}						
T''_{qo}		0,0335	0,0264			
T'_q						
T''_q						

Tabela 5.3 - Resultados das simulações do gerador de pólos lisos, sem saturação.

Reatâncias (pu) e constantes de tempo (s)		Curto Circuito brusco	Rejeição de carga				Potier
			Eixo arbitrário		Eixo d	Eixo q	
			Menor a nominal	100%	Puramente reativa (capacitiva)	$\phi \cong \delta$	
x_d	Real				1,8100		
	Calculado	1,8099			1,8099		
x_q	Real				1,7610		
	Calculado		1,7601	1,7538		1,7559	
x'_d	Real				0,3001		
	Calculado	0,3009			0,2986		
x'_q	Real				0,6501		
	Calculado		0,5518	0,5474			
x''_d	Real				0,2300		
	Calculado	0,2099			0,2232		
x''_q	Real				0,2500		
	Calculado		0,2266	0,2236		0,1995	
x_{ls}	Real				0,1500		
	Calculado						
T'_{do}	Real				8,0683		
	Calculado				8,0688		
T''_{do}	Real				0,0300		
	Calculado				0,0309		
T'_d	Real				1,3376		
	Calculado	1,3350					
T''_d	Real				0,0230		
	Calculado	0,0182					
T'_{qo}	Real				1,0011		
	Calculado		1,3106	1,0745			
T''_{qo}	Real				0,0700		
	Calculado		0,0426	0,0414			
T'_q	Real				0,3696		
	Calculado						
T''_q	Real				0,0269		
	Calculado						

Tabela 5.4 - Resultados das simulações do gerador de pólos lisos, com saturação.

Reatâncias (pu) e constantes de tempo (s)	Curto Circuito brusco	Rejeição de carga				Potier
		Eixo arbitrário		Eixo d	Eixo q	
		Menor a nominal	100%	Puramente reativa (capacitiva)	$\phi \cong \delta$	
x_d				1,1426		
x_q		1,5236	1,5077		1,2990	
x'_d				0,2831		
x'_q		0,5353	0,5343			
x''_d				0,2162		
x''_q		0,2242	0,2269		0,2359	
x_{ls}						
T'_{do}				5,3883		
T''_{do}				0,0297		
T'_d						
T''_d						
T'_{qo}		0,9584	0,8924			
T''_{qo}		0,0414	0,0390			
T'_q						
T''_q						

As tabelas 5.1 a 5.4 mostram os valores reais dos parâmetros padronizados (valores de entrada das simulações) e os valores dos parâmetros obtidos através das simulações. Pode-se verificar que os resultados obtidos são melhores para o gerador de pólos salientes sem a saturação magnética incluída no modelo, do que os obtidos com a saturação incluída.

5.6 Conclusões

Através dos resultados de ensaios discutidos neste capítulo pode-se concluir que a reatância síncrona de eixo direto (x_d) pode ser determinada usando-se as curvas características em vazio e em curto-circuito. O ensaio de Potier permite determinar a reatância de Potier que só pode produzir resultado aproximado para reatância de dispersão (x_{ls}). O ensaio de curto circuito

trifásico brusco permite determinar todos os parâmetros de eixo direto $x_d, x'_d, x''_d, T'_d, T''_d$ e indiretamente, através das relações 3.70 e 3.71, as constantes de tempo T'_{do}, T''_{do} . Entretanto, como ele é um ensaio perigoso para o gerador, principalmente para os geradores mais idosos não se recomenda a sua utilização.

Os parâmetros que podem ser determinados nos ensaios de rejeição de carga de eixo direto são os seguintes: $x_d, x'_d, x''_d, T'_{do}, T''_{do}$. No ensaio de rejeição de carga de eixo em quadratura só é possível determinar os valores de x_q, x''_q e no ensaio de rejeição de carga em eixo arbitrário, com medição do ângulo de carga do gerador, pode-se determinar: $x_q, x'_q, x''_q, T'_{qo}, T''_{qo}$.

Usando-se as relações 3.70 a 3.74 pode-se determinar as constantes de tempo de curto-circuito e identificar todos os parâmetros padronizados. Dessa forma conclui-se que a melhor maneira para identificar todos os parâmetros padronizados é realizar os ensaios de rejeição de carga de eixo direto e de rejeição de carga de eixo arbitrário. Este último exige o uso de encoder para medição de ângulo de carga ou de uma integração do sinal da velocidade do rotor para obtenção do ângulo de carga no instante da rejeição de carga. Conclui-se também que a rejeição parcial de carga apresenta resultados piores do que a rejeição total de carga.

Dessa maneira todos os parâmetros derivados $x_d, x'_d, x''_d, T'_{do}, T''_{do}, T'_{qo}, T''_{qo}, T'_d, T''_d, T'_q$ e T''_q , ficam perfeitamente determinados permitindo que, usando-se as equações (3.49) a (3.56) e (3.63) a (3.67) seja possível obter todos os parâmetros fundamentais que são:

$$\left(R_s, x_{ls}, R_{fd}, x_{lfd}, R_{kd}, x_{lkd}, R_{kq}, x_{lkq}, x_d, x_q, x_{md}, x_{mq} \right).$$

Observa-se que há um razoável grau de liberdade para a determinação dos parâmetros fundamentais, ou seja, há mais equações do que variáveis e que como os parâmetros padronizados são obtidos através de ensaios e, portanto, estão sujeitos a erros abre-se espaço para o uso de técnicas de identificação de parâmetros e de identificação de sistemas usando processos de otimização em operação ou fora de operação (on line ou off line) para, a partir de um conjunto de parâmetros obtidos em ensaios conseguir-se melhorá-los usando essas técnicas.

Verificou-se também que a introdução da curva de magnetização no modelo usado no SimPowerSystems conduz a resultados diferentes do que os obtidos sem a saturação.

Capítulo 6

Discussão, Conclusão e Sugestões para Novos Trabalhos

A determinação de parâmetros de geradores síncronos tem sido um tema importante em estudos onde a simulação da operação de geradores assume importância crescente. A crescente demanda por geração de energia tem feito os produtores de energia pensarem em reduzir o tempo de gerador parado para manutenção.

Desejam cada vez mais determinarem com precisão quando um gerador deverá entrar em manutenção de maneira a otimizar as paradas de operação. Para isso é necessário construir padrões e verificar a cada intervalo de tempo se o gerador permanece dentro desses padrões. Dessa forma o apelo por determinação cada vez mais precisa dos parâmetros de geradores tem assumido papel importante. Discute-se hoje como fazê-lo “on line” usando técnicas matemáticas que poderiam aqui serem chamadas de avançadas porém ainda não suficientemente testadas para tal.

Entretanto os métodos tradicionais não podem ser esquecidos porque eles são os únicos a fornecerem subsídios para se obter valores com bom intervalo de confiança quando nada se conhece a respeito dos parâmetros de um gerador. É nesse ponto que esse trabalho se baseou. Procurou-se, através de simulações dinâmicas perceber a dinâmica dos ensaios e, com ajuda do avanço da tecnologia de informática tratar os sinais de maneira a contribuir na melhora do processo de determinação dos parâmetros de um gerador síncrono.

Como uma grande maioria dos geradores em operação no Brasil e também no mundo já estão razoavelmente velhos pode ter acontecido dos parâmetros obtidos nos projetos ou nos ensaios de comissionamento terem sido perdidos. Isso acontece muito frequentemente com os

geradores de pequenas centrais antigas, porém há diversos casos de geradores de usinas grandes onde isso também acontece.

O trabalho de simulação realizado nesta pesquisa, através de simulações digitais, permite concluir que para realização dos ensaios destinados a determinar valores de parâmetros de geradores síncronos é necessário dispor de um sistema de aquisição de dados com sensores de corrente elétrica, de tensões e de velocidade e ângulo elétrico (encoder). É absolutamente necessário dispor-se dos dados em computador para que, com processamento através de mecanismos de aumento de imagem (zoom), seja possível determinar as tendências das curvas obtidas nos ensaios e com técnicas digitais de filtragem eliminar ruídos dos sinais obtidos.

O valor da indutância de dispersão do enrolamento de estator x_{ls} é muito importante na simulação da operação dinâmica dos geradores síncronos porque sendo as reatâncias de magnetização x_{md} e x_{mq} importantes na modelagem dinâmica do gerador, pois elas aparecem como reatâncias mútuas entre enrolamentos e como $x_{md} = x_d - x_{ls}$ e $x_{mq} = x_q - x_{ls}$, mesmo que x_d e x_q sejam determinados com precisão x_{md} e x_{mq} não terão precisão.

Infelizmente o ensaio de Potier não permite determinação precisa de x_{ls} de modo que os ensaios de rejeição de carga acabam sendo necessários para tal.

As publicações sobre os ensaios de rejeição de cargas não são muitas e nelas quase sempre os exemplos usados são de geradores síncronos de pólos lisos. Nesta pesquisa trabalhou-se também com um gerador síncrono de pólos salientes verificando-se que a expressão geral (4.12) sempre apresentada na literatura, [12] e outros, para o cálculo de reatância subtransitória de eixo em quadratura não se aplica a geradores síncronos de pólos salientes. Neste trabalho a equação (4.13) foi apresentada como alternativa para o cálculo de x_q'' . É importante lembrar que geradores de pólos salientes apresentam somente um transitório que na verdade é um subtransitório porque é muito rápido dada a forte presença da gaiola no rotor.

A conclusão a que se chegou neste trabalho é a de que os ensaios de rejeição total de carga de eixo direto e de eixo arbitrário, devidamente instrumentados, juntamente com a medição das resistências de enrolamento de estator por fase e de enrolamento de campo são suficientes para que se determine os valores de todos os parâmetros necessários para a simulação dinâmica tanto de geradores síncronos de pólos salientes como de pólos lisos.

O uso de métodos matemáticos de otimização associados aos de identificação de parâmetros de sistemas, talvez auxiliados por tratamentos usando padrões obtidos por técnicas de inteligência artificial, devem ser cada vez mais incentivados e aplicados nesta área de conhecimento.

A elaboração de softwares dedicados à aquisição e tratamento de dados para realização de ensaios como os estudados, porém de maneira “on line” em usinas totalmente automatizadas também devem ser incentivados.

Pretende-se, finalmente, elaborar um programa de computador mais dedicado para realizar simulações com geradores síncronos visando o estudo de determinação de parâmetros e de interação com o sistema de energia elétrica.

Referências Bibliográficas

- [1] P. Kundur (1994), Power system stability and control. USA: McGraw-Hill.
- [2] IEEE 115 (1995) - IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines Part I - Acceptance and Performance Testing Part II-Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis.
- [3] IEEE 1110 (2002), Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses
- [4] Krause, P.C., (NY 1986), Analysis of electric machinery, McGraw Hill Book Company.
- [5] Matlab User's Guide (version 6) (2000) and Matlab Optimization Toolbox User's Guide (version 3), The Mathworks Inc., Natick, MA: <http://www.mathworks.com>.
- [6] R.H. Park (1933), "Two-Reaction theory of synchronous machines – generalized method of analysis - part I, part II", AIEE Trans., vol. 48, pp. 716-727; Vol. 52, pp.352-355.
- [7] Peter W. Sauer, M. A. Pai (1998), Power System Dynamics and Stability. Prentice Hall.
- [8] Fitzgerald, A.E. (1971) Electric machinery : the processes, devices, and systems of electromechanical energy conversion. New York: McGraw-Hill.
- [9] I.M. Canay (June 1993), "Determination of model parameters of machines from the reactance operators $x_d(p)$, $x_q(p)$, (Evaluation for standstill frequency response tests)", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 8, no. 3, pp. 272-279.
- [10] Kimbark, E. W. (1995). Power System Stability, Vol. 3, IEEE Press.
- [11] Dynamic simulation of electric machinery using Matlab/Simulink. Chee-Mun Ong, Prentice Hall ptr 1997.
- [12] Peter Vas (1993). Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, Clarendon Press Oxford.
- [13] Elias Kyriakides, Gerald T. Heydt, Vijay Vittal (2004) "On-Line Estimation of Synchronous Generator Parameters Using a Damper Current Observer and a Graphic User Interface" - IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, no. 3.
- [14] F.P de Mello and J.R. Ribeiro, (July/Aug 1977) "Derivation of Synchronous machine parameters from tests", IEEE Trans. Power Appar. Syst., Vol. 96, pp. 1211-1218.
- [15] Edson da Costa Bortoni, José Antonio Jardini, (2002) "Identification of Synchronous Machine Parameters Using Load Rejection Test Data", IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 17, N°. 2. June.

Publicações Resultantes

- [1] J.C. Pequeña, E. Ruppert, M.T. Mendoza, “On the Synchronous Generator Parameters Determination Using Dynamic Simulations Based on IEEE Standards” IEEE-ICIT 2010, International Conference on Industrial Technology, 14 a 17 de Marzo de 2010, Viña del Mar - Valparaiso, Chile.
- [2] J.C. Pequeña, E. Ruppert, “Sobre Parâmetros e Simulação da Operação Dinâmica de Geradores Síncronos” VI SNCA Seminário Nacional de Controle e Automação Industrial, Elétrica e de Telecomunicações, 14 a 16 de outubro de 2009, Salvador, Brasil.
- [3] J.C. Pequeña, E. Ruppert, “On the Synchronous Generator Parameters Calculation Based on IEEE Standards Using Simulations Based on the Matlab/Simulink/Simpowersystems Software” CWIEME Chicago, INDUCTICA, International Conference for Inductive and Electromagnetic Components, Systems and Devices including Manufacturing and Processing, 13 a 15 de outubro de 2009, Chicago, U.S.A.