



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

**Estudo sobre determinação de parâmetros elétricos de geradores síncronos de polos salientes**

**Autor: Fernando Cardoso Fajoni**

Orientador: Ernesto Ruppert Filho

**Dissertação de mestrado** apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: **Energia Elétrica**.

**Banca Examinadora**

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

Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota (PUC/CAMPINAS)

Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari (FEEC/UNICAMP)

Campinas – SP  
12 de Agosto de 2010

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

F178e Fajoni, Fernando Cardoso  
Estudo sobre determinação de parâmetros elétricos de geradores síncronos de polos salientes / Fernando Cardoso Fajoni. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

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

1. Geradores elétricos. 2. Ensaios. 3. Curtos-circuitos. I. Ruppert, Ernesto. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Study about determination of electric parameters of synchronous generators of salient poles

Palavras-chave em Inglês: Electrical generators, Tests, Short circuits

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Alexandre de Assis Mota, Carlos Alberto Favarin Murari

Data da defesa: 12/08/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

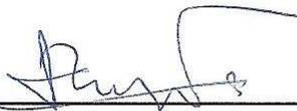
## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidato:** Fernando Cardoso Fajoni

**Data da Defesa:** 12 de agosto de 2010

**Título da Tese:** "Estudo sobre determinação de parâmetros elétricos de geradores síncronos de polos salientes"

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho (Presidente):



Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota:



Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari:





# Resumo

Os geradores síncronos são responsáveis por quase toda energia elétrica produzida no mundo. Devido à sua aplicação natural em aproveitamentos elétricos de baixa velocidade no mundo, os geradores síncronos de polos salientes são muito usados em aproveitamentos hidrelétricos, na conversão de energia em navios, em grupos motor gerador de emergência ou em geração local não interligada à rede elétrica. Atualmente são bastante utilizados em geração eólica. O seu intenso uso exige sempre simulações digitais da operação de sistemas elétricos onde eles se inserem. Para realizar simulações é necessário o conhecimento dos valores dos seus parâmetros elétricos. Este trabalho dedica-se à identificação dos parâmetros padronizados elétricos de um gerador síncrono de polos salientes (reatâncias e constantes de tempo) através dos ensaios de curto circuito trifásico instantâneo, de rejeição de carga de eixo direto e de eixo arbitrário e dos ensaios de resposta em frequência. Discussões são feitas a respeito dos métodos acima citados sob o aspecto de implementação e confiabilidade. São apresentadas algumas comparações entre desempenhos dos métodos e resultados de ensaios laboratoriais.

**Palavras-chave:** gerador síncrono, parâmetros padronizados, simulações, ensaios, curto circuito, rejeição de carga, resposta em frequência.



# Abstract

Synchronous generators are responsible for almost all electric energy produced in the world. Due to its natural application in electric energy generation of low speed type, salient poles synchronous generators are widely used in hydroelectric energy generation, in energy conversion in ships, emergency engine/generator groups or in local generation not linked to the electric system. Actually they are very used in aeolic generation. Its intense use always demands digital simulations of the electrical systems operation where they are connected to. To carry on simulations the knowledge of the values of its electrical parameters are necessary. This work dedicates to the identification of the electric standardized parameters of salient poles synchronous generators (reactances and time constants) through the sudden three-fase short circuit test, load rejection tests in direct and arbitrary axes and stand still frequency response tests. Discussions are made regarding the methods above mentioned under the aspect of implementation and reliability. Some comparisons are shown about the performances of the methods and experimental results from tests runned in the laboratory me shown.

**Keywords:** synchronous generator, standard parameters, simulation, short circuit test, load rejection test, frequency response.



# Agradecimentos

Gostaria de agradecer inicialmente ao meu amigo e orientador Ernesto Ruppert Filho, que teve disposição e paciência comigo durante todo esse tempo.

Agradeço a minha família que sempre esteve me apoiando com muito amor nos momentos mais difíceis e me ajudaram a obter a formação necessária para que esse trabalho fosse realizado.

Sou muito grato também a meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, enfrentando madrugadas enquanto escrevia a dissertação, orientando-me em momentos de dúvidas, ajudando nos experimentos laboratoriais, dando-me um apoio moral mesmo que seja pensamento positivo a distancia para que tudo desse certo e os amigos que compartilharam de horas de lazer e distração. Nem preciso citar quem são vocês!

Quero também agradecer aos funcionários da FEEC (Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação) e do CEMEQ (Centro de Manutenção de Equipamentos) que colaboraram para melhorar o andamento da dissertação.

Por último, agradeço a CAPES (Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) pelo essencial apoio financeiro durante a vigência do trabalho.



# Sumário

Lista de figuras .....	xiii
Lista de tabelas .....	xvii
Lista de símbolos .....	xix
Publicações resultantes .....	xxiii
Capítulo I .....	1
Introdução .....	1
I.1. Apresentação .....	1
I.2. Motivação para o estudo de determinação de parâmetros.....	2
I.3. Os parâmetros da modelagem matemática dinâmica de geradores síncronos .....	3
I.4. Estrutura do trabalho .....	5
Capítulo II.....	6
Modelagem matemática dinâmica e curvas características de regime permanente de geradores síncronos trifásicos de polos salientes .....	6
II.1. Introdução .....	6
II.2. Modelagem matemática dinâmica do gerador síncrono trifásico em variáveis abc	11
II.3. Modelagem matemática dinâmica do gerador síncrono trifásico em variáveis $dqo$ de um sistema girando na velocidade do rotor em unidades do sistema MKS .....	13
II.4. Parâmetros elétricos dos geradores síncronos.....	18
II.5. Modelagem matemática do gerador síncrono trifásico para estudos em regime permanente.....	21
Capítulo III .....	26
Determinação experimental de parâmetros elétricos de geradores síncronos .....	26
III.1. Introdução .....	26
III.2. Ensaio para a determinação da reatância síncrona de eixo direto .....	28
III.3. Ensaio de escorregamento .....	29
III.4. Ensaio de máxima corrente indutiva .....	33
III.5. Determinação experimental da curva característica de carga sob fator de potência indutivo nulo e determinação da reatância de Potier ( $X_p$ ).....	34
III.6. Ensaio para determinação de $X'd$ e $X''d$ através do ensaio de abertura da corrente de curto circuito de regime permanente .....	36
III.7. Ensaio de curto circuito trifásico brusco dos terminais de armadura .....	39
III.8. Ensaio de rejeição de carga .....	44
III.8.1 Ensaio de rejeição de carga de eixo direto .....	45
III.8.2 Ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário.....	50
III.9. Ensaio de resposta em frequência.....	53
Capítulo IV .....	58
Ensaio realizado em laboratório .....	58
IV.1. Introdução.....	58
IV.2. Ensaio para a determinação da reatância síncrona de eixo direto.....	59
IV.3. Ensaio de escorregamento .....	60
IV.4. Ensaio de máxima corrente indutiva .....	62
IV.5. Determinação da reatância de Potier ( $X_p$ ) .....	63
IV.6. Ensaio para determinação de $X'd$ e $X''d$ pela abertura da corrente de curto circuito de regime permanente dos terminais de enrolamentos de armadura.....	64

IV.7. Ensaio de curto circuito trifásico brusco dos terminais de enrolamentos de armadura .....	67
IV.8. Ensaio de rejeição de carga.....	75
IV.8.1 Ensaio de rejeição de carga de eixo direto .....	75
IV.8.2 Ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário.....	82
IV.9. Tabela dos valores de parâmetros obtidos em todos os ensaios.....	89
IV.10. Ensaio de resposta em frequência .....	89
4.10.1. Resposta em frequência da reatância operacional de eixo $d$ obtida com os parâmetros dos ensaios de curto circuito brusco. ....	91
4.10.2. Resposta em frequência da reatância operacional de eixo $d$ obtida com os parâmetros do ensaio de rejeição de carga de eixo $d$ .....	93
4.10.3. Resposta em frequência da reatância operacional de eixo $q$ obtida com os parâmetros dos ensaios de rejeição de carga em eixo arbitrário.....	96
IV.11. Considerações sobre os valores dos parâmetros obtidos nos diversos ensaios ...	98
IV.12 Fotos da bancada experimental .....	99
Capítulo V .....	101
Conclusões e sugestões para novos trabalhos .....	101
Referências Bibliográficas.....	104

## Lista de figuras

Figura 2.1 Esquema dos eixos magnéticos dos enrolamentos de um gerador síncrono...	8
Figura 2.2 Representação dos enrolamentos por circuitos elétricos equivalentes de uma máquina idealizada .....	10
Figura 2.3 Diagrama vetorial do gerador síncrono de polos salientes.....	22
Figura 3.1 Curvas necessárias para a determinação da reatância síncrona de eixo direto ( $X_d$ ).....	28
Figura 3.2 Curva característica do ensaio de escorregamento.....	32
Figura 3.3 Curva característica em carga puramente indutiva e triângulo de Potier.....	35
Figura 3.4 Diagrama de ligação do ensaio de abertura de curto circuito .....	36
Figura 3.5 Curva de tensão característica do ensaio de abertura de curto circuito trifásico .....	37
Figura 3.6 Envoltória e extrapolações do ensaio de abertura de curto circuito.....	38
Figura 3.7 Curva de correntes de curto circuito .....	41
Figura 3.8 Curva envoltória das correntes elétricas dos enrolamentos de armadura obtidas no ensaio de curto circuito trifásico brusco .....	41
Figura 3.9 Envoltória da corrente de curto circuito com as correspondentes extrapolações .....	42
Figura 3.10 Grandezas monitoradas durante a rejeição de carga capacitiva.....	45
Figura 3.11 Diagrama vetorial no ensaio de rejeição de carga de eixo direto.....	46
Figura 3.12 Rejeição de carga capacitiva de eixo direto .....	46
Figura 3.13 Média dos picos de tensões envoltórias do ensaio de rejeição de carga de eixo direto.....	47
Figura 3.14 Regime permanente, transitório, subtransitório e constantes de tempo da rejeição de carga de eixo direto .....	49
Figura 3.15 Tensões $V_a$ , $V_b$ , e $V_c$ do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário ....	50
Figura 3.16 Extrapolação dos regimes subtransitório, transitório, permanente e constantes de tempo do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário.....	51
Figura 3.17 Ligações dos terminais de estator para o posicionamento do rotor para alinhamento com o eixo direto .....	54
Figura 3.18 Esquema de ligação para ensaio de resposta em frequência de eixo d .....	55
Figura 3.19 Ligações dos terminais de estator para o posicionamento do rotor para alinhamento com o eixo em quadratura.....	56
Figura 4.1 Ensaio de circuito aberto e curto circuito .....	60
Figura 4.2 Curvas de tensão e corrente de armadura obtidas no ensaio de escorregamento .....	61
Figura 4.3 Tensão e corrente elétrica de enrolamento de armadura obtidos no ensaio de máxima corrente indutiva .....	62
Figura 4.4 Curvas para a obtenção da reatância de Potier.....	64
Figura 4.5 Curva de tensão do ensaio de abertura de curto circuito de regime permanente .....	65
Figura 4.6 Envoltória e extrapolações do ensaio de abertura de curto circuito.....	66
Figura 4.7 Curva de correntes de curto circuito brusco dos enrolamentos de armadura com 40 volts antes do instante de curto circuito.....	68
Figura 4.8 Medição e interpolação dos pontos do ensaio de curto circuito brusco.....	68

Figura 4.9 Interpolação e extrapolação dos pontos do ensaio de curto circuito .....	69
Figura 4.10 Comparação entre curva do ensaio de curto circuito e curva característica	70
Figura 4.11 Sobreposição da envoltória de curto circuito e curva característica .....	71
Figura 4.12 Curva de correntes de curto circuito com 132 volts eficazes.....	71
Figura 4.13 Medição e interpolação dos pontos do ensaio de curto circuito brusco com 132 volts eficazes.....	72
Figura 4.14 Interpolação e extrapolação dos pontos do ensaio de curto circuito.....	72
Figura 4.15 Comparação entre curva do ensaio de curto circuito e curva característica	74
Figura 4.16 Sobreposição da envoltória de curto circuito e aproximação da curva de corrente de curto circuito.....	74
Figura 4.17 Formas de onda das diversas grandezas durante a rejeição de carga de eixo direto.....	75
Figura 4.18 Formas de ondas das tensões do ensaio de rejeição de carga de eixo direto	76
Figura 4.19 Picos e envoltória das tensões do ensaio de rejeição de carga de eixo direto	77
Figura 4.20 Extrapolações dos regimes subtransitório e permanente .....	78
Figura 4.21 Ajuste dos parâmetros do ensaio de rejeição de carga de eixo direto.....	79
Figura 4.22 Interpolação e extrapolações do ensaio de rejeição de carga de eixo direto	80
Figura 4.23 Ângulo entre a tensão e corrente de fase do ensaio de rejeição de carga de eixo direto imediatamente antes da rejeição de carga .....	83
Figura 4.24 Formas de onda do momento de rejeição de carga de eixo arbitrário.....	85
Figura 4.25 Forma de onda das tensões de armadura durante a rejeição de carga de eixo arbitrário .....	86
Figura 4.26 Picos e envoltória das tensões terminais de estator do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário .....	86
Figura 4.27 Interpolação e extrapolações do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário .....	87
Figura 4.28 Diagrama de Bode para resposta em frequência de eixo direto .....	90
Figura 4.29 Diagrama de Bode para resposta em frequência de eixo em quadratura ....	90
Figura 4.30 Comparação entre a resposta em frequência de eixo direto do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo direto com parâmetros do ensaio de curto circuito em 40V (espectro de amplitudes).....	92
Figura 4.31 Comparação entre a resposta em frequência de eixo direto do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo direto com parâmetros do ensaio de curto circuito em 40V (espectro de fases) .....	92
Figura 4.32 Comparação entre a resposta em frequência de eixo direto do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo direto com parâmetros do ensaio de rejeição de carga em eixo direto (espectro de amplitudes)	94
Figura 4.33 Comparação entre a resposta em frequência de eixo direto do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo direto com parâmetros do ensaio de rejeição de carga de eixo direto (espectro de fases).....	94
Figura 4.34 Comparação entre curvas aproximadas características de ensaio de resposta em frequência de curto circuito e rejeição de carga de eixo direto. ....	96
Figura 4.35 Comparação entre a resposta em frequência de eixo em quadratura do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo em quadratura com parâmetros do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário (espectro de amplitudes) .....	97

Figura 4.36 Comparação entre a resposta em frequência de eixo em quadratura do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo em quadratura com parâmetros do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário (espectro de fases) .....	98
Figura 4.37 Bancada com equipamentos utilizados nos ensaios .....	100



## Lista de tabelas

Tabela 4.1 Tensões de fase de ensaio de circuito aberto .....	59
Tabela 4.2 Correntes de fase de ensaio de curto circuito .....	59
Tabela 4.3 Valores obtidos nos ensaios realizados .....	89



# Lista de símbolos

$\omega_m$  - Velocidade angular mecânica

$\omega_s$  - Velocidade angular elétrica

$f_s$  - Frequência elétrica

$P$  - Número de polos

$f_d$  - Enrolamento de campo

$k_d$  - Enrolamento amortecedor de eixo direto

$k_{q1}$  - Enrolamento amortecedor de eixo em quadratura 1

$k_{q2}$  - Enrolamento amortecedor de eixo em quadratura 2

$\theta_r$  - Ângulo do rotor

$\theta_v$  - Ângulo da tensão terminal do gerador síncrono

$\lambda_{af}$  - Fluxo produzido pela corrente que circula no enrolamento de campo

$\lambda, v$  e  $i$  - fluxos magnéticos concatenados com os enrolamentos  $f_d, k_d, k_{q1}$  e  $k_{q2}$

$p$  - Operador matemático de diferenciação ( $d/dt$ ) de uma função do tempo

$r_s$  - Resistência elétrica do enrolamento do estator por fase

$r_{fd}$  - Resistência elétrica do enrolamento de campo

$r_{kd}$  - Resistência elétrica do enrolamento amortecedor de eixo direto

$r_{kq1}$  - Resistência elétrica do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura 1

$r_{kq2}$  - Resistência elétrica do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura 2

$T_m$  - Torque do acionador mecânico do gerador síncrono

$T_{em}$  - Torque eletromagnético

$T_p$  - Torque de perdas que podem ser elétricas e mecânicas

$J$  - Momento de inércia das partes girantes do gerador

$P_m$  - Potência mecânica

$P_{at}$  - Perdas por atrito

$P_v$  - Perdas de ventilação

$P_{em}$  - Potência eletromagnética

$P_{pe}$  - Potência de perdas elétricas

$P_j$  - Perdas Joule

$P_{mag}$  - Perdas magnéticas

$P_h$  - Perdas por histerese

$P_f$  - Perdas de Foucault

$\delta$  - Ângulo de carga

$\psi$  - Forças eletromotrizes nos enrolamentos

$L_{ls}$  - Indutância de dispersão dos enrolamentos de estator

$L_{md}$  - Indutância de magnetização de eixo  $d$

$L_{mq}$  - Indutância de magnetização de eixo  $q$

$L_{fd}$  - Indutância de dispersão do enrolamento de campo

$L_{lkd}$  - Indutância de dispersão do enrolamento de amortecimento de eixo direto

$L_{lkq1}$  - Indutância de dispersão do enrolamento de amortecimento de eixo em quadratura 1

$L_{lkq2}$  - Indutância de dispersão do enrolamento de amortecimento de eixo em quadratura 2

$X_{ls}$  - Reatância de dispersão dos enrolamentos de estator

$X_{fd}$  - Reatância de dispersão do enrolamento de campo

$X_{lk}$  - Reatância de dispersão do enrolamento de amortecimento de eixo direto

$X_{lkq1}$  - Reatância de dispersão do enrolamento de amortecimento de eixo em quadratura 1

$X_{lkq2}$  - Reatância de dispersão do enrolamento de amortecimento de eixo em quadratura 2

$X_{md}$  - Reatância de magnetização de eixo direto

$X_{mq}$  - Reatância de magnetização de eixo em quadratura

$X_d$  - Reatância síncrona de eixo direto

$X_d'$  - Reatância transitória de eixo direto

$X_d''$  - Reatância subtransitória de eixo direto

$X_q$  - Reatância síncrona de eixo em quadratura

$X_q'$  - Reatância transitória de eixo em quadratura

$X_q''$  - Reatância subtransitória de eixo em quadratura

$\tau_d'$  - Constante de tempo transitória de curto circuito de eixo direto

$\tau_d''$  - Constante de tempo subtransitória de curto circuito de eixo direto

$\tau_{d0}'$  - Constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto

$\tau_{d0}''$  - Constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto

$\tau_q'$  - Constante de tempo transitória de curto circuito de eixo em quadratura  
 $\tau_q''$  - Constante de tempo subtransitória de curto circuito de eixo em quadratura  
 $\tau_{q0}'$  - Constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo em quadratura  
 $\tau_{q0}''$  - Constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo em quadratura  
 $X_{Potier}$  - Reatância de Potier  
 $S$  - Potência aparente do gerador síncrono  
 $V_a$  - Valor eficaz da tensão terminal do estator  
 $I_a$  - Valor eficaz da corrente de enrolamento de estator  
 $\text{fp}$  - Fator de potência do gerador síncrono  
 $E_a$  - Força eletromotriz parcial do gerador  
 $E'$  - Força eletromotriz do gerador  
 $\delta$  - Ângulo de carga do gerador síncrono



# **Publicações resultantes**

J.C. Pequeña, E. Ruppert, F. Fajoni. “A guide for Synchronous Generator Parameters Determination Using Dynamic Simulations Based on IEEE Standards” In: XIX International Conference on Electrical Machines – Rome, Italy – September 6-8, 2010.



# Capítulo I

## Introdução

### I.1. Apresentação

A desregulamentação do setor elétrico, que ocorreu praticamente no mundo todo, acentuou a necessidade de se concentrar esforços em estudos sobre os comportamentos estáticos e dinâmicos, tanto dos grandes sistemas interligados como dos sistemas de distribuição com geração distribuída e dos sistemas isolados ou fracamente ligados aos grandes sistemas.

Devido ao alto grau dos procedimentos de controle dos sistemas de energia elétrica, há necessidade de se realizar simulações computacionais, tanto estáticas quanto dinâmicas, dos sistemas de energia elétrica, tanto na fase de planejamento e projeto, na de construção e testes, assim como na de operação de curto, médio e longo prazo.

Diversos tipos de estudos são realizados, dentre os quais pode-se citar: análise de mercado, análise de fluxo de carga, fluxo de carga ótimo, despacho ótimo, planejamento da geração, planejamento da transmissão, planejamento da distribuição, análise de contingências (faltas e curto circuitos), estabilidade transitória, dinâmica e de regime permanente, estabilidade de tensão, dinâmica de máquinas elétricas (envolvendo operação de usinas, acionamento de grandes motores, controles, e outros).

Existem hoje no mercado excelentes aplicativos computacionais (*softwares*) de simulação de sistemas de energia elétrica de diversos tipos. Entre aqueles mais utilizados pela academia e também pela indústria estão ATP Draw, Matlab/Simulink/Simpowersystems, PSCAD, PSIM, Orcad, ANATEM, ANAREDE, EDSA Power Analytics, ETAP, Powersys, EasyPower e outros.

Além desses, muitos outros *softwares* estão à disposição no mercado, são usados por pesquisadores e por empresas concessionárias de energia elétrica e empresas consultoras do mundo todo e são produzidos por diversos desenvolvedores de *softwares* desse tipo no mundo.

Os *softwares* que trabalham com dinâmica de sistemas elétricos nada mais fazem do que resolver um conjunto de equações algébricas ou diferenciais ou ainda diferenciais e algébricas juntas que representam matematicamente o sistema de energia elétrica em questão. Cada componente do sistema é, em geral, modelado matematicamente como um circuito elétrico equivalente e equações diferenciais e algébricas são obtidas e resolvidas.

O uso de simulações computacionais para estudos de projeto, planejamento e operação de sistemas de energia elétrica está disseminado pelo mundo todo, de modo que os parâmetros, tanto elétricos como mecânicos, dos equipamentos envolvidos nos sistemas elétricos são de suma importância para a realização de tais simulações.

Os parâmetros que descrevem a parte elétrica dos dispositivos que fazem parte do sistema de energia elétrica são resistências elétricas, indutâncias e capacitâncias. Entretanto, em alguns casos, não linearidades aparecem, como é o caso de dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos, onde pode ocorrer saturação magnética no aço silício que conduz o fluxo magnético. Nesses casos os circuitos elétricos são não lineares e a curva de magnetização do material deve aparecer neles de alguma maneira.

## **I.2. Motivação para o estudo de determinação de parâmetros**

Em recente relatório de pesquisa financiada pelo EPRI nos Estados Unidos, denominado “Power Plant modeling and parameter derivation for power systems studies” [15] fica muito clara a preocupação com a realização de ensaios em geradores síncronos de usinas e validação de modelos matemáticos para estudos de dinâmica de sistemas de energia elétrica.

A identificação dos parâmetros dos equipamentos, notadamente os equipamentos de usinas como geradores síncronos, turbinas, transformadores, reguladores de tensão e de velocidade, é fortemente contemplada nesse relatório.

Os geradores síncronos são muito usados na geração de energia elétrica devido às suas características de ótima regulação de tensão e frequência. Além disso, eles são robustos e eficientes, apresentando altos rendimentos. Geradores síncronos de grande porte apresentam rendimentos superiores a 98%.

Os modelos e ensaios de geradores síncronos são assuntos antigos na área de sistemas de energia elétrica. Desde cerca de 1920, pesquisadores como Blondel, Doherty, Nickle, Park, Kron, passando, mais tarde também por Concórdia, Kimbark, Adkins, Canay, deMello, Hannet, Coultres, Dougherty, Venikov, Kundur, Shackshaft e outros, preocuparam-se com a modelagem matemática dinâmica de geradores síncronos e com maneiras de determinar os parâmetros dos geradores necessários para representar matematicamente os sistemas de energia elétrica, integrando os modelos matemáticos.

O objetivo daquele trabalho relatado pelo EPRI foi o de discutir as maiores objeções de proprietários de usinas aos ensaios para a validação da modelagem matemática que são duas: o custo do tempo do gerador parado e o risco de danos a ele.

Os resultados apresentados foram procedimentos propostos para minimizar o risco e o tempo de execução desses ensaios, concentrando esforços no sentido de determinar os parâmetros principais necessários para serem identificados para tal fim.

O envolvimento do EPRI em ensaios de geradores síncronos data dos anos de 1980 e se estende até os dias de hoje, assim também como o do IEEE, que editou a primeira norma em 1987 a respeito do assunto, que é a IEEE Std 115.

A IEEE Std 115 foi reformulada e reeditada em 1995 e, recentemente, em 2009, foi encerrado um processo de nova revisão cuja publicação ocorreu, oficialmente, em 2010.

Os objetivos dessa norma são dois e relacionam-se com os geradores síncronos e com a determinação de seus parâmetros. Ela está dividida em duas partes: A parte 1 trata dos “Testes de desempenho e de aceitação” e a parte 2 trata dos “Procedimentos de ensaios e determinação de parâmetros para análises dinâmicas”.

Trata-se de uma norma bastante extensa que cobre bem os assuntos dos quais ela trata, porém de difícil compreensão para quem não tem uma boa vivência no assunto.

### **I.3. Os parâmetros da modelagem matemática dinâmica de geradores síncronos**

Este trabalho foi dedicado a estudar os diversos métodos para a determinação dos parâmetros de geradores síncronos de polos salientes. Os parâmetros fundamentais dos geradores síncronos são as resistências elétricas, as reatâncias de dispersão de cada

enrolamento do gerador e as reatâncias mútuas entre os diversos enrolamentos. Estes parâmetros são de difícil determinação, porém é possível determinar, através de ensaios específicos, os parâmetros padronizados, que são as reatâncias síncronas e as reatâncias transitórias e subtransitórias de eixo direto e de eixo em quadratura, bem como as constantes de tempo transitórias e subtransitórias de eixo direto e de eixo em quadratura, além das resistências elétricas dos enrolamentos de estator e de campo.

Os parâmetros padronizados são funções dos parâmetros fundamentais de modo que o conhecimento dos primeiros permite determinar os segundos.

Há diversos métodos na literatura que podem ser utilizados para determinar os parâmetros padronizados de um gerador síncrono. Todos são discutidos na IEEE Std 115 e eles são: o método das curvas características de circuito aberto e de curto circuito para determinação da reatância síncrona de eixo direto; o ensaio de escorregamento para a determinação das reatâncias síncronas de eixo direto e de eixo em quadratura; o ensaio de máxima corrente indutiva para determinar a reatância síncrona de eixo em quadratura e o método da abertura de curto circuito permanente na armadura que permite determinar as reatâncias transitória e subtransitória de eixo direto.

Os métodos anteriores permitem a determinação de poucos parâmetros enquanto que outros métodos dinâmicos permitem determinar uma quantidade maior de parâmetros. O método do curto circuito brusco trifásico dos terminais de enrolamento de estator permite determinar todos os parâmetros de eixo direto, que são as reatâncias síncrona, transitória de eixo direto, subtransitória de eixo direto bem como as constantes de tempo de curto circuito de eixo direto.

O método da rejeição de carga de eixo direto permite determinar os mesmos parâmetros de eixo direto já mencionados no ensaio de curto circuito trifásico brusco. O ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário permite determinar os parâmetros de eixo em quadratura.

Outro ensaio utilizado é o ensaio de resposta em frequência que, permite determinar todos os parâmetros do gerador.

## **I.4. Estrutura do trabalho**

Neste trabalho foram estudados todos os métodos acima discutidos. O método da resposta em frequência não foi aplicado para determinar parâmetros, porém foi usado para verificação dos parâmetros determinados nos outros ensaios. Utilizou-se um gerador síncrono de 2 kVA, 230 V, 60 Hz, 1800 rpm, fator de potência unitário para realização dos ensaios.

No capítulo II discute-se a modelagem tradicional do gerador síncrono determinando-se as diversas relações entre os parâmetros fundamentais e os padronizados. Além disso, discute-se as equações que representam o gerador em regime permanente e em regime transitório.

No capítulo III discute-se a metodologia de todos os ensaios com detalhes e referências e, no capítulo IV apresentam-se os resultados de ensaios obtidos em laboratório bem como as comparações dos resultados com o método de resposta em frequência. No capítulo V são discutidos os resultados obtidos e oferecidas sugestões para novos estudos.

## Capítulo II

# Modelagem matemática dinâmica e curvas características de regime permanente de geradores síncronos trifásicos de polos salientes

### II.1. Introdução

Os geradores síncronos trifásicos são responsáveis por quase toda a energia elétrica gerada no mundo, pelo motivo de terem maior rendimento que as outras máquinas, por produzirem tensão terminal de frequência constante e, portanto, não precisam de conversores eletrônicos em seus terminais para correção de frequência, como ocorre nos geradores de indução, que é a máquina que mais se aproxima das características da máquina síncrona, sendo o seu concorrente mais próximo.

Os geradores síncronos trifásicos podem ser classificados como geradores de polos lisos ou polos salientes. Os geradores de polos lisos podem ter 2 ou 4 polos e sua velocidade angular é alta (3600 e 1800 rpm respectivamente, em 60 Hz). Já os geradores de 4 ou mais polos são de polos salientes, operam em velocidade menor do que 1800 rpm e são comumente utilizados em usinas hidrelétricas.

Os geradores síncronos trifásicos de dois polos são de rotor cilíndrico ou de polos lisos. Há geradores de quatro polos que também são de polos lisos.

O gerador síncrono trifásico de polos salientes, produz tensões trifásicas, senoidais balanceadas defasadas de 120 graus elétricos uma da outra devido às suas características construtivas de três enrolamentos distribuídos trifasicamente no estator, ou seja, seus eixos magnéticos são defasados de 120 graus entre si. Esses enrolamentos conduzem correntes elétricas alternadas senoidais de frequência igual a do sistema elétrico em que estiverem conectados, conseqüentemente, haverá produção de um campo magnético girante ao longo de seu entreferro.

O gerador síncrono tem três enrolamentos no rotor, o principal deles é denominado enrolamento de campo, que tem a finalidade de gerar um campo magnético com corrente contínua e, com o movimento de rotação do rotor, produzirá uma variação do fluxo magnético nas bobinas da armadura, gerando assim Forças eletromotrizes (fem) nesses

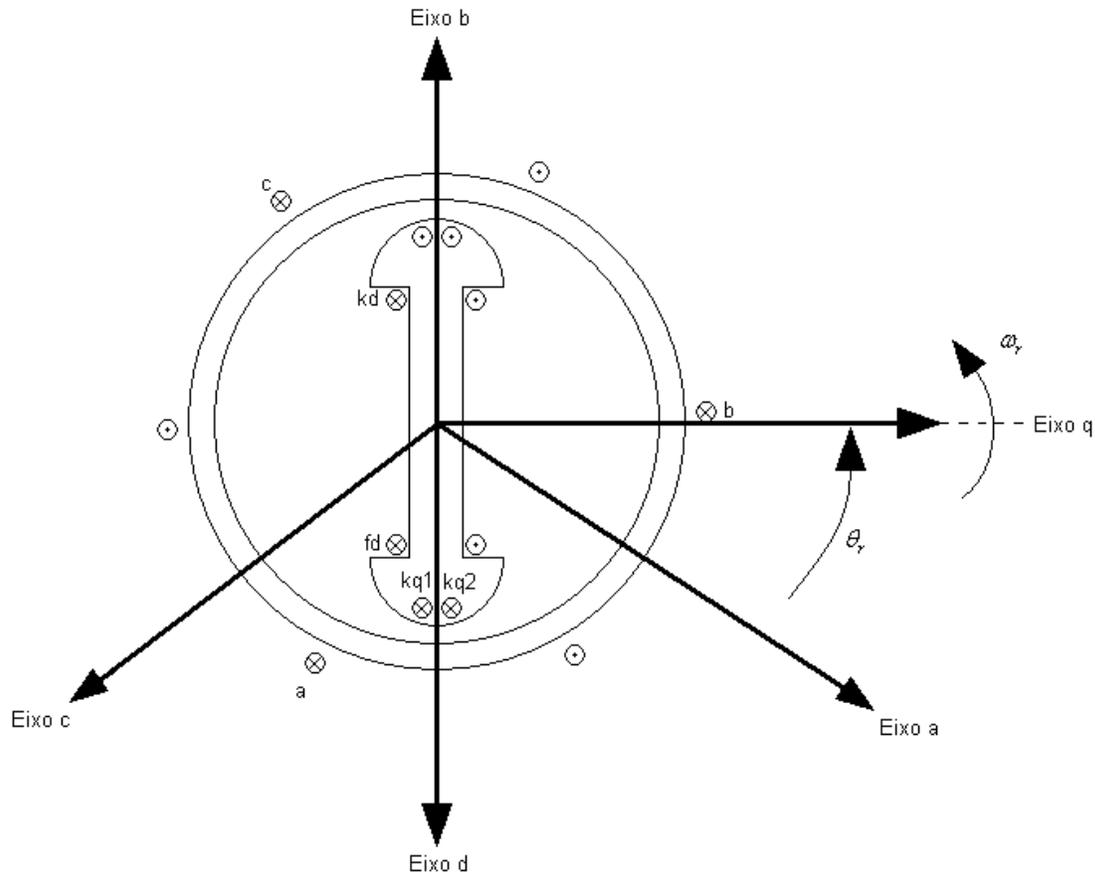
enrolamentos. Os outros dois enrolamentos são denominados enrolamentos amortecedores, esses enrolamento tem a principal função de amortecer oscilações eletromecânicas no eixo do gerador síncrono. Em geradores síncronos de polos salientes são barras de cobre curto circuitadas montadas em ranhuras feitas nas faces dos polos formando uma gaiola semelhante às dos rotores da máquina de indução. Já nas geradores síncronos de polos lisos não há a presença física do enrolamento de amortecimento, mas o próprio rotor sólido do gerador síncrono atua como enrolamento amortecedor, pois, como sua velocidade é alta, correntes elétricas são produzidas em sua superfície devido a um efeito pelicular

O gerador síncrono utilizado neste trabalho é uma máquina síncrona de quatro polos com alimentação de corrente contínua no enrolamento de campo. Quando o rotor é movimentado com velocidade mecânica  $\omega_m$  devido à corrente contínua aplicada em seu enrolamento, ele produz um campo magnético girante no entreferro do gerador síncrono. Esse campo girante induz correntes elétricas trifásicas defasadas 120 graus entre si nos enrolamentos de armadura com frequência elétrica  $f$ , (velocidade angular elétrica  $\omega_s = 2\pi f_s$ ) e se forma um campo magnético girante no entreferro na velocidade angular elétrica  $\omega_s$ . Para que haja conversão eletromecânica de energia o princípio fundamental da conversão eletromecânica de energia [12] deve ser satisfeito e ambas as velocidades angulares, devem ter o mesmo valor. Dessa maneira a velocidade angular mecânica síncrona de giro do rotor,  $\omega_m$ , de um gerador síncrono em regime permanente deverá ter o valor  $\omega_m = (2/P)\omega_s$ , onde  $P$  é o número de polos do gerador.

Dáí a denominação de gerador síncrono, ou seja, máquina de corrente alternada trifásica cujo rotor gira na velocidade síncrona com a frequência da tensão dos enrolamentos de estator.

A figura 2.1 representa o gerador síncrono com seus enrolamentos de armadura, campo e amortecimento. O enrolamento trifásico de armadura é representado pelas letras  $a$ ,  $b$  e  $c$  e seus eixos magnéticos são defasados 120 graus entre si. O enrolamento de campo é representado por  $fd$  e seu eixo magnético direto pela letra  $d$ . Os enrolamentos  $kd$  e  $kq$  são os enrolamentos amortecedores de eixo direto e eixo em quadratura, e tem eixos magnéticos  $d$  coincidente com o eixo magnético direto do enrolamento de campo e eixo  $q$  coincidente com o eixo em quadratura com o enrolamento de campo.

Dependendo do tipo construtivo de gerador síncrono pode haver mais de um enrolamento amortecedor tanto de eixo  $d$  como de eixo  $q$  [13]. Os geradores síncronos de polos salientes, como os hidrogeradores, são representados normalmente por apenas um enrolamento amortecedor de eixo  $d$  e um de eixo  $q$  enquanto que turbogeradores em geral precisam de dois ou mais enrolamentos amortecedores para representar o seu rotor sólido [1].



**Figura 2. 1** Esquema dos eixos magnéticos dos enrolamentos de um gerador síncrono

Devido às características construtivas dos geradores síncronos de polos salientes, que apresentam variações de entreferro ao longo de toda a circunferência do rotor, é necessário usar-se um sistema de referência constituído de dois eixos ortogonais denominados eixo direto (eixo  $d$ ) e eixo em quadratura (eixo  $q$ ) para modelá-lo matematicamente.

Esse sistema é chamado de sistema  $dq0$ , sendo o “0” representativo de uma sequência zero de tensões, correntes elétricas ou fluxos concatenados quando houver desbalanceamento de fases no sistema trifásico de fms produzidas no enrolamento do estator.

Esse sistema pode estar referenciado à uma velocidade qualquer ao longo do rotor do gerador, velocidade do rotor, velocidade síncrona ou pode ser estacionário. Para o estudo de máquinas elétricas síncronas, costuma-se colocar o sistema  $dq0$  fixo no rotor [13].

Como referência de origem da contagem do deslocamento do rotor, é sempre tomado o eixo geométrico da fase a do enrolamento de estator, que coincide com o valor máximo de força eletromotriz do enrolamento de estator. No rotor, para máquinas de polos salientes, é denominado eixo direto ou eixo  $d$  o eixo magnético coincidente com o eixo geométrico dos polos (norte e sul) da máquina síncrona. O eixo em quadratura (eixo  $q$ ) forma um ângulo de 90 graus elétricos com o eixo direto. O enrolamento trifásico de armadura é formado por três enrolamentos monofásicos defasados de 120 graus entre si, é representado pelas letras a, b e c, e pode, através de uma transformação matemática chamada  $abc$  para  $dq0$  que será detalhada mais a frente, ser projetado sobre os eixo  $d$  e  $q$ .

O esquema de ligação dos enrolamentos de armadura pode ser em estrela ou em delta e deverá fornecer energia elétrica para um sistema de energia elétrica trifásico ou alimentar uma carga trifásica isolada.

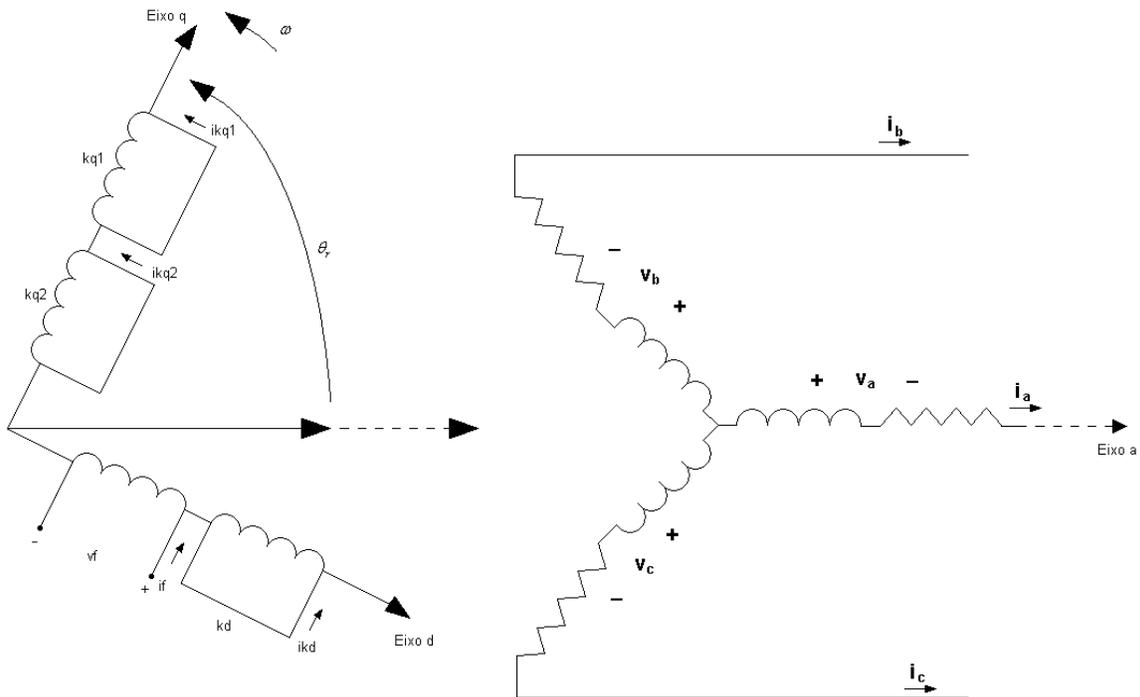
A relutância de entreferro ao longo da sapata polar pode ser descrita como uma função aproximadamente senoidal em função do ângulo do rotor, pois, devido às características construtivas das sapatas polares dos geradores síncronos, que tem o comprimento do entreferro variando de forma proporcional ao inverso do seno do ângulo do rotor ( $\theta_r$ ) correspondente ao ponto considerado.

Por isso num gerador síncrono de polos 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. As tensões internas de enrolamento de estator, que são as três forças eletromotrizes pulsantes induzidas nos enrolamentos trifásicos do estator, ocorrem pela variação desse fluxo magnético girante gerado pelo rotor no entreferro, que tem variação senoidal com o ângulo do rotor. A soma algébrica das forças eletromotrizes pulsantes, na

velocidade síncrona, produzirá uma onda viajante (girante) ao longo do entreferro de força eletromotriz total.

A força eletromotriz se dá pelo fluxo concatenado do enrolamento de campo com o enrolamento de cada fase do estator e se dá de acordo com a Lei de Lenz, por  $d\lambda_{af} / dt$ , onde  $\lambda_{af}$  é o fluxo produzido pelo circuito do campo, circuito esse que é representado por  $f$ . Essa força eletromotriz é senoidal e se orienta na direção e sentido do eixo em quadratura, representada por um vetor espacial, como mostrado na figura 2.2 [12].

Os eixos magnéticos dos campos magnéticos induzidos nas fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  dos enrolamentos de estator também estão representados nessa figura.



**Figura 2. 2 Representação dos enrolamentos por circuitos elétricos equivalentes de uma máquina idealizada**

Para a modelagem matemática dinâmica do gerador síncrono de polos salientes ou de polos lisos, pode-se utilizar a seguinte quantidade de equações: duas equações diferenciais que representam os dois circuitos elétricos de estator nos eixos direto ( $d$ ) e em quadratura ( $q$ ) do sistema de referência e por três ou mais equações diferenciais que descrevem os circuitos elétricos que representam os enrolamentos de rotor segundo os eixos  $d$  e  $q$  [1], [2], [3] [4] e [6].

Esse número de equações mudará de acordo com o número de enrolamentos amortecedores que forem considerados. Também há equações mecânicas de conservação de energia que serão vistas mais à frente.

Devido à sua construção, os geradores síncronos de polos salientes são geralmente descritos por dois enrolamentos de amortecimento, sendo um de eixo direto ( $kd$ ) e outro de eixo em quadratura ( $kq$ ). Já os geradores síncronos de polos lisos podem ser descritos por um enrolamento amortecedor de eixo direto ( $kd$ ) e até dois enrolamentos de eixo em quadratura ( $kq1$  e  $kq2$ ). Fisicamente, só existe um enrolamento amortecedor real nesse gerador síncrono, mas devido aos efeitos causados por sua geometria e os fluxos magnéticos produzidos, eles precisam ser descritos por mais de um enrolamento.

## II.2. Modelagem matemática dinâmica do gerador síncrono trifásico em variáveis abc

Na figura 2.1 tem-se o sistema de eixos abc que são os eixos dos enrolamentos das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  do enrolamento trifásico de estator. Para cada fase desse enrolamento pode-se escrever as equações diferenciais que representam os circuitos elétricos de cada um dos enrolamentos das fases. O mesmo pode ser feito para os enrolamentos de campo e amortecedores referentes aos eixos  $d$  e  $q$ . Disso resultam as equações diferenciais (2.1) a (2.7) vistas a seguir. A letra  $p$ , nessas equações, representa o operador matemático de diferenciação ( $d/dt$ ) de uma função do tempo.

Essas equações estão escritas de maneira genérica de modo a representar um gerador síncrono com dois enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura, conforme se vê em [4].

$$v_a = -r_s i_a + p \lambda_a \quad (0.1)$$

$$v_b = -r_s i_b + p \lambda_b \quad (0.2)$$

$$v_c = -r_s i_c + p \lambda_c \quad (0.3)$$

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + p \lambda_{fd} \quad (0.4)$$

$$v_{kd} = r_{kd} i_{kd} + p \lambda_{kd} \quad (0.5)$$

$$v_{kq1} = r_{kq1} i_{kq1} + p \lambda_{kq1} \quad (0.6)$$

$$v_{kq2} = r_{kq2} i_{kq2} + p \lambda_{kq2} \quad (0.7)$$

Adotou-se a simbologia (*fd*) para o enrolamento de campo e (*kd*) e (*kq*) para os enrolamentos amortecedores de eixo direto e de eixo em quadratura. Adotou-se a convenção de gerador síncrono com a corrente elétrica saindo dos terminais dos enrolamentos de estator. Isso explica os sinais negativos nas correntes elétricas de estator.

Nas equações acima  $\lambda$ ,  $v$  e  $i$  representam, respectivamente, os fluxos magnéticos concatenados com os enrolamentos. As letras *a, b, c* representam as fases do enrolamento trifásico do estator e os índices *fd*, *kd*, *kq1* e *kq2* representam, respectivamente, o enrolamento de campo, o enrolamento amortecedor de eixo direto e os enrolamentos amortecedores de eixo em quadratura 1 e 2, respectivamente. Os símbolos  $r_s$ ,  $r_{fd}$ ,  $r_{kd}$ ,  $r_{kq1}$  e  $r_{kq2}$  representam as resistências elétricas de cada um dos enrolamentos. No caso dos enrolamentos de estator  $r_s$  é a resistência elétrica por fase.

As equações (2.1) a (2.7) formam o conjunto de equações da parte elétrica do gerador síncrono. Para completar o equacionamento do gerador síncrono é necessário acrescentar as equações eletromecânicas do mesmo que são as escritas a seguir (2.8) e (2.9).

$$p\theta_r = \frac{2}{P} \omega_r \quad (0.8)$$

$$\frac{2J}{P} p\omega_r = T_m - T_e - T_p \quad (0.9)$$

Nestas equações  $\theta_r$  é o ângulo mecânico entre os eixos de quadratura (*q*) do rotor e da fase (*a*) do enrolamento do estator,  $P$  é o número de polos do gerador síncrono,  $\omega_r$  é a velocidade angular elétrica do rotor,  $T_m$  é o torque do acionador mecânico do gerador síncrono (turbina em geral),  $T_e$  é o torque eletromagnético do gerador síncrono produzido pela conversão eletromecânica de energia,  $T_p$  é o torque de perdas que podem ser elétricas e mecânicas e  $J$  é o momento de inércia das partes girantes do gerador síncrono e do acionador mecânico do gerador síncrono.

### II.3. Modelagem matemática dinâmica do gerador síncrono trifásico em variáveis $dqo$ de um sistema girando na velocidade do rotor em unidades do sistema MKS

Usando a matriz de transformação de Park [4], vista em (2.10) e em (2.11), pode-se transformar as variáveis  $a, b, c$  do sistema trifásico para variáveis  $d, q, o$  de eixos ortogonais com componente de sequência zero representada por variável com índice  $o$ . Nessa transformação  $\theta_r$  é o ângulo elétrico entre os eixos ( $q$ ) e ( $a$ ).

$$T_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \text{sen}(\theta_r) & \text{sen}(\theta_r - 2\pi/3) & \text{sen}(\theta_r + 2\pi/3) \\ \text{cos}(\theta_r) & \text{cos}(\theta_r - 2\pi/3) & \text{cos}(\theta_r + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (0.10)$$

$$T_{dq0}^{-1} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\theta_r) & \text{cos}(\theta_r) & 1 \\ \text{sen}(\theta_r - 2\pi/3) & \text{cos}(\theta_r - 2\pi/3) & 1 \\ \text{sen}(\theta_r + 2\pi/3) & \text{cos}(\theta_r + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (0.11)$$

Escrevendo as equações (2.1) a (2.3) na forma vetorial tem-se as equações (2.12) a 2.16)

$$\underline{v}_{abc} = [v_a \quad v_b \quad v_c]^t \quad (0.12)$$

$$\underline{i}_{abc} = [i_a \quad i_b \quad i_c]^t \quad (0.13)$$

$$\underline{\lambda}_{abc} = [\lambda_a \quad \lambda_b \quad \lambda_c]^t \quad (0.14)$$

$$R_s = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (0.15)$$

$$\underline{v}_{abc} = R_s \underline{i}_{abc} + p \underline{\lambda}_{abc} \quad (0.16)$$

Obtêm-se as equações dos enrolamentos de estator no sistema  $dqo$  fazendo-se a transformação mostrada de (2.17) a (2.22).

$$T_{dq0} \underline{v}_{abc} = T_{dq0} (R_s \underline{i}_{abc}) + T_{dq0} (p \underline{\lambda}_{abc}) \quad (0.17)$$

$$\underline{v}_{dq0} = R_s \underline{i}_{dq0} + T_{dq0} p (T_{dq0}^{-1} \underline{\lambda}_{dq0}) \quad (0.18)$$

$$\underline{v}_{dq0} = \begin{bmatrix} v_d & v_q & v_0 \end{bmatrix}^t \quad (0.19)$$

$$\underline{i}_{dq0} = \begin{bmatrix} i_d & i_q & i_0 \end{bmatrix}^t \quad (0.20)$$

$$\underline{\lambda}_{dq0} = \begin{bmatrix} \lambda_d & \lambda_q & \lambda_0 \end{bmatrix}^t \quad (0.21)$$

$$T_{dq0} p(T_{dq0}^{-1} \underline{\lambda}_{dq0}) = \begin{bmatrix} -w_r \lambda_q + p \lambda_d \\ w_r \lambda_d + p \lambda_q \\ p \lambda_0 \end{bmatrix} \quad (0.22)$$

Dessa forma as equações (2.1) a (2.9) se transformam nas equações equivalentes nos eixos  $dq0$  que são as numeradas de (2.23) a (2.31).

$$v_d = -r_s i_d - w_r \lambda_q + p \lambda_d \quad (0.23)$$

$$v_q = -r_s i_q + w_r \lambda_d + p \lambda_q \quad (0.24)$$

$$v_0 = -r_s i_0 + p \lambda_0 \quad (0.25)$$

$$v_{fd} = r_{fd} i_{fd} + p \lambda_{fd} \quad (0.26)$$

$$v_{kd} = r_{kd} i_{kd} + p \lambda_{kd} \quad (0.27)$$

$$v_{kq1} = r_{kq1} i_{kq1} + p \lambda_{kq1} \quad (0.28)$$

$$v_{kq2} = r_{kq2} i_{kq2} + p \lambda_{kq2} \quad (0.29)$$

$$p \theta_r = \frac{2}{P} w_r \quad (0.30)$$

$$\frac{2J}{P} p w_r = T_m - T_e - T_p \quad (0.31)$$

Através de um balanço energético do gerador síncrono pode-se obter uma expressão matemática para o torque eletromagnético  $T_e$ .

No gerador síncrono a potência de entrada é a mecânica  $P_m$  fornecida pelo acionador mecânico (turbina). Subtraindo-se das perdas mecânicas ( $P_m$ ), as perdas por atrito ( $P_{at}$ ) e de ventilação ( $P_v$ ), chega-se à potência eletromagnética  $P_{em}$ . Subtraindo-se da potência eletromagnética  $P_{em}$  a potência de perdas elétricas  $P_{pe}$ , constituída das perdas Joule  $P_j$  nos condutores do gerador síncrono, das perdas magnéticas  $P_{mag}$  no núcleo magnético do gerador síncrono que, por sua vez, são constituídas pelas perdas por histerese  $P_h$  e por correntes parasitas ou de Foucault  $P_f$  e de outras perdas menores como as perdas por correntes parasitas nos condutores, as perdas devido aos desvios de fluxos magnéticos nas cabeças das bobinas, as perdas magnéticas nas extremidades do pacote magnético, que são

pequenas em relação às demais perdas e que são denominadas perdas adicionais e que serão aqui representadas por  $P_{ad}$ , é possível obter a potência elétrica de saída do gerador síncrono  $P_e$ , como se vê a seguir.

$$\begin{aligned}
 P_{em} &= P_m - P_{at} - P_v \\
 P_e &= P_{em} - P_{pe} \\
 P_{pe} &= P_J + P_{mag} + P_{ad} \\
 P_{mag} &= P_h + P_f
 \end{aligned}
 \tag{0.32}$$

Observa-se que o conhecimento da potência eletromagnética  $P_{em}$  é de extrema importância no balanço energético do gerador síncrono. A diferença entre a potência eletromagnética e a potência elétrica gerada  $P_e$  são as perdas elétricas. Das perdas elétricas, as perdas por efeito Joule  $P_J$  podem ser calculadas e medidas com bastante precisão.

As perdas magnéticas e as perdas adicionais são de difícil medição ou mesmo de avaliação. Em [4] há uma extensiva dedução da expressão da potência eletromagnética  $P_{em}$  como também do torque eletromagnético  $T_{em}$  que não será feita aqui. Apresenta-se a equação (2.32) do torque eletromagnético que deve fazer parte do conjunto de equações visto acima (2.23) a (2.31).

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_q i_q - \lambda_d i_d)
 \tag{0.33}$$

O conjunto de equações (2.26) a (2.31), juntamente com a equação (2.33) forma o conjunto de equações diferenciais que devem ser resolvidas para simular a dinâmica de um gerador síncrono.

O ângulo de carga do gerador síncrono é dado pela equação (2.34).

$$\delta = \frac{P}{2} \theta_r - \theta_v
 \tag{0.34}$$

Deve-se observar que  $\delta$  é chamado ângulo de carga do gerador síncrono. Ele é o ângulo elétrico que o vetor que representa a força eletromotriz do gerador síncrono ou tensão interna do gerador síncrono faz com o vetor da tensão terminal do gerador síncrono. O ângulo  $\theta_v$  é o ângulo da tensão terminal do gerador síncrono, ou seja, é o argumento da tensão do gerador síncrono no instante  $t = 0$  como se vê na equação (2.35).

$$v = V_{\max} \cos(\omega_s t + \theta_v) \quad (0.35)$$

A maneira mais adequada de se escrever esse conjunto de equações do ponto de vista de aplicação de um método numérico para resolver o conjunto de equações diferenciais digitalmente é a que se vê nas equações de (2.36) a (2.44). Como os enrolamentos amortecedores estão curto circuitados as tensões  $v_{kd}$ ,  $v_{kq1}$  e  $v_{kq2}$  são nulas, entretanto elas, assim mesmo, estão representadas nas equações acima que podem ser escritas na forma que se vê abaixo.

$$p\lambda_d = r_s i_d + w_r \lambda_q + v_d \quad (0.36)$$

$$p\lambda_q = r_s i_q - w_r \lambda_d + v_q \quad (0.37)$$

$$p\lambda_0 = r_s i_0 + v_0 \quad (0.38)$$

$$p\lambda_{fd} = r_{fd} i_{fd} + v_{fd} \quad (0.39)$$

$$p\lambda_{kd} = r_{kd} i_{kd} + v_{kd} \quad (0.40)$$

$$p\lambda_{kq1} = r_{kq1} i_{kq1} + v_{kq1} \quad (0.41)$$

$$p\lambda_{kq2} = r_{kq2} i_{kq2} + v_{kq2} \quad (0.42)$$

$$p\delta = \omega_r - \omega_s \quad (0.43)$$

$$J \frac{2}{P} p\omega_r = T_m + \frac{3P}{4} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) - T_p \quad (0.44)$$

Os fluxos magnéticos concatenados com os enrolamentos, denotados por  $\lambda$  nas equações acima escritas podem ser escritos em termos das indutâncias dos enrolamentos [4] como se vê abaixo:

$$\lambda_d = (L_{ls} + L_{md}) i_d + L_{md} i_{fd} + L_{md} i_{kd} \quad (0.45)$$

$$\lambda_q = -(L_{ls} + L_{mq}) i_q + L_{mq} i_{kq1} + L_{mq} i_{kq2} \quad (0.46)$$

$$\lambda_{fd} = -L_{md} i_d + (L_{lfd} + L_{md}) i_{fd} + L_{md} i_{kd} \quad (0.47)$$

$$\lambda_{kd} = -L_{md} i_d + L_{md} i_{fd} + (L_{lkd} + L_{md}) i_{kd} \quad (0.48)$$

$$\lambda_{kq1} = -L_{mq} i_q + (L_{lkq} + L_{mq}) i_{kq1} + L_{mq} i_{kq2} \quad (0.49)$$

$$\lambda_{kq2} = -L_{mq} i_q + L_{mq} i_{kq1} + (L_{lkq2} + L_{mq}) i_{kq2} \quad (0.50)$$

Para colocar nessas equações as reatâncias dos enrolamentos em lugar das indutâncias, os fluxos concatenados se transformam em fluxos concatenados por segundo ou forças eletromotrizes nos enrolamentos que serão representados por  $\psi = \omega_s \lambda$  sendo  $\omega_s$  a velocidade síncrona elétrica. As equações (2.45) a (2.50) podem ser escritas como se vê de (2.51) a (2.56).

$$\psi_d = -(X_{ls} + X_{md})i_d + X_{md}i_{fd} + X_{md}i_{kd} \quad (0.51)$$

$$\psi_q = -(X_{ls} + X_{mq})i_q + X_{mq}i_{kq1} + X_{mq}i_{kq2} \quad (0.52)$$

$$\psi_{fd} = -X_{md}i_d + (X_{lfd} + X_{md})i_{fd} + X_{md}i_{kd} \quad (0.53)$$

$$\psi_{kd} = -X_{md}i_d + X_{md}i_{fd} + (X_{lkd} + X_{md})i_{kd} \quad (0.54)$$

$$\psi_{kq1} = -X_{mq}i_q + (X_{lkq1} + X_{mq})i_{kq1} + X_{mq}i_{kq2} \quad (0.55)$$

$$\psi_{kq2} = -X_{mq}i_q + X_{mq}i_{kq1} + (X_{lkq2} + X_{mq})i_{kq2} \quad (0.56)$$

Nas equações vistas acima  $L_{ls}$  e  $X_{ls}$  são, respectivamente, as indutâncias de dispersão de enrolamentos de estator e as reatâncias de dispersão dos enrolamentos de estator, Assim também  $L_{lfd}$  e  $X_{lfd}$ ,  $L_{lkd}$  e  $X_{lkd}$ ,  $L_{lkq1}$  e  $X_{lkq1}$ ,  $L_{lkq2}$  e  $X_{lkq2}$  são, respectivamente, as indutâncias de dispersão e as reatâncias de dispersão dos enrolamentos dos respectivos enrolamentos representados pelos subíndices que nelas aparecem, enquanto que  $L_{md}$  e  $L_{mq}$  são, respectivamente, as indutâncias de magnetização de eixo  $d$  e de eixo  $q$  entre os diversos enrolamentos de eixos  $d$  e  $q$ .

Dessa forma as equações (2.36) a (2.44) transformam-se no conjunto de equações (2.57) a (2.65) que são as equações do modelo dinâmico linear completo do gerador síncrono em variáveis  $dqo$ . Esse sistema é utilizado para todos os tipos de estudos dinâmicos de geradores síncronos e é o modelo que está embutido em diversos softwares de simulação de sistemas de energia elétrica disponíveis no mercado como na plataforma Matlab/Simulink/Simpowersystems para simulação da operação de geradores síncronos, que será usada neste trabalho. Desse modo o estudo desse modelo é muito importante para o uso dos diversos softwares para realização de simulações dinâmicas.

$$p\psi_d = r_s i_d - \omega_r \psi_q + v_d \quad (0.57)$$

$$p\psi_q = r_s i_q - \omega_r \psi_d + v_q \quad (0.58)$$

$$p\psi_0 = r_s i_0 + v_0 \quad (0.59)$$

$$p\psi_{fd} = -r_{fd} i_{fd} + v_{fd} \quad (0.60)$$

$$p\psi_{kd} = -r_{kd} i_{kd} + v_{kd} \quad (0.61)$$

$$p\psi_{kq1} = -r_{kq1} i_{kq1} + v_{kq1} \quad (0.62)$$

$$p\psi_{kq2} = -r_{kq2} i_{kq2} + v_{kq2} \quad (0.63)$$

$$p\delta = \omega_r - \omega_s \quad (0.64)$$

$$J \frac{2}{P} p\omega_r = T_m + \frac{3P}{4\omega_s} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) - T_p \quad (0.65)$$

Observa-se nessas equações que os parâmetros elétricos necessários para se realizar análises de geradores síncronos são: as resistências elétricas, as indutâncias de dispersão e as indutâncias mútuas dos enrolamentos ou suas respectivas reatâncias.

A determinação das resistências elétricas dos enrolamentos amortecedores e das reatâncias ou das indutâncias dos diversos enrolamentos constituem um problema de identificação de parâmetros de razoável complexidade que será tratado nesta dissertação.

## II.4. Parâmetros elétricos dos geradores síncronos

No tópico anterior mencionou-se que para se realizar simulações da operação do gerador síncrono em regime permanente ou transitório, os parâmetros elétricos do gerador síncrono precisam ser conhecidos. Entretanto, as resistências elétricas dos enrolamentos amortecedores e as reatâncias dos diversos enrolamentos não são determinadas através de ensaios. Esses parâmetros são denominados parâmetros fundamentais do gerador síncrono. Os parâmetros que são determinados em ensaios são os parâmetros padronizados (standard) que são funções dos parâmetros fundamentais. Os parâmetros padronizados podem ser determinados realizando-se diversos tipos de ensaios com o gerador síncrono como será visto no decorrer deste trabalho.

Em [1], [4] e [11] são mostrados métodos de determinar os parâmetros padronizados que 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 de circuito aberto e de curto circuito ( $\tau'_d$  e  $\tau'_q$ ) e as constantes de tempo subtransitórias de circuito aberto e de curto circuito ( $\tau''_d$  e  $\tau''_q$ ). Para um hidrogerador, que tem apenas um enrolamento amortecedor no rotor, esses parâmetros padronizados em função dos parâmetros fundamentais são dados pelas seguintes expressões [1], [4], [11].

$$X_d = X_{ls} + X_{md} \quad (0.66)$$

$$X_q = X_{ls} + X_{mq} \quad (0.67)$$

$$X'_d = X_{ls} + \frac{X_{md} X_{lfd}}{X_{md} + X_{lfd}} = X_d - \frac{X_{md}^2}{X_{fd}} \quad (0.68)$$

$$X_{fd} = X_{md} + X_{lfd} \quad (0.69)$$

$$X'_q = X_{ls} + \frac{X_{mq} X_{lkq}}{X_{mq} + X_{lkq}} = X_q - \frac{X_{mq}^2}{X_{kq}} \quad (0.70)$$

$$X_{kq} = X_{mq} + X_{lkq} \quad (0.71)$$

$$X''_d = X_{ls} + \frac{X_{md} X_{lfd} X_{lkd}}{X_{lfd} X_{lkd} + X_{md} X_{lkd} + X_{md} X_{lfd}} \quad (0.72)$$

$$X''_q = X_{ls} + \frac{X_{mq} X_{lkq}}{X_{mq} + X_{lkq}} \quad (0.73)$$

$$\tau'_{d0} = \frac{X_{fd}}{\omega_s r_{fd}} \quad (0.74)$$

$$\tau'_{q0} = \frac{X_{kq}}{\omega_s r_{kq}} \quad (0.75)$$

$$\tau''_{d0} = \frac{1}{\omega_s r_{kd}} \left( X_{lkd} + \frac{X_{md} X_{lfd}}{X_{md} + X_{lfd}} \right) \quad (0.76)$$

$$\tau''_{q0} = \frac{1}{\omega_s r_{kq}} \left( X_{lkq} + \frac{X_{mq} X_{lkq}}{X_{mq} + X_{lkq}} \right) \quad (0.77)$$

$$\tau'_d = \frac{1}{\omega_s r_{fd}} \left( X_{lfd} + \frac{X_{md} X_{ls}}{X_{md} + X_{ls}} \right) \quad (0.78)$$

$$\tau''_d = \frac{1}{\omega_s r_{kd}} \left( X_{lkd} + \frac{X_{md} X_{ls} X_{lfd}}{X_{md} X_{ls} + X_{mq} X'_{lfd} + X_{ls} X'_{lfd}} \right) \quad (0.79)$$

$$\tau''_q = \frac{1}{\omega_s r_{kq}} \left( X_{lkq} + \frac{X_{mq} X_{ls}}{X_{mq} + X_{ls}} \right) \quad (0.80)$$

Observa-se que a constante de tempo transitória de eixo q não aparece entre as expressões acima. Isso ocorre devido ao fato das resistências elétricas do enrolamento amortecedor de eixo q de hidrogeradores serem bem maiores do que as resistências elétricas d eixo d, ficando, dessa forma, os regimes transitórios e subtransitórios de eixo confundidos e se transformando em apenas uma constante de tempo. Há publicações onde, ao invés de  $\tau_q''$  aparece  $\tau_q'$  com a mesma expressão de  $\tau_q''$  de (2.75). Isso ocorre apenas por questão de preferência de se chamar comportamento transitório ou subtransitário quando eles são únicos.

Em [1] e [11] mostra-se que, considerando-se que as resistências elétricas dos enrolamentos amortecedores tanto de eixo d como de eixo q são bem maiores do que a resistência elétrica do enrolamento de campo (múltiplos de 10 vezes mais) pode-se realizar algumas simplificações entre as equações acima e chegar aos seguintes resultados como visto em [11].

$$\frac{\tau_d'}{\tau_{d0}'} = \frac{X_d'}{X_d} \quad (0.81)$$

$$\frac{\tau_d''}{\tau_{d0}''} = \frac{X_d''}{X_d'} \quad (0.82)$$

$$\frac{\tau_q''}{\tau_{q0}''} = \frac{X_q''}{X_q} \quad (0.83)$$

Como os parâmetros padronizados ( $X_d, X_q, X_d', X_q', X_d'', X_q'', \tau_d', \tau_q', \tau_d''$  e  $\tau_q''$ ) são funções dos parâmetros fundamentais ( $r_s, r_{fd}, r_{kd}, r_{kq1}, r_{kq2}, X_{ls}, X_{lfd}, X_{lkd}, X_{lkq1}, X_{lkq2}, X_{md}$  e  $X_{mq}$ ), identificando-se os primeiros através de ensaios pode-se obter (os segundos), caso seja necessário. O aplicativo Matlab/Simulink/Simpowersystems para simulação da operação de geradores síncronos permite, como entrada de dados do gerador síncrono, tanto os parâmetros fundamentais como os padronizados.

Em [1] e [11] foram obtidas as seguintes expressões para as reatâncias operacionais do gerador síncrono de polos salientes que serão usadas nos ensaios de resposta em frequência.

$$X_d(s) = X_d \frac{(1 + s\tau'_d)(1 + s\tau''_d)}{(1 + s\tau'_{do})(1 + s\tau''_{do})} \quad (0.84)$$

$$X_q(s) = X_q \frac{(1 + s\tau'_q)}{(1 + s\tau''_{qo})} \quad (0.85)$$

## II.5. Modelagem matemática do gerador síncrono trifásico para estudos em regime permanente

Para estudos do gerador síncrono em regime permanente, usando a modelagem matemática linear, usam-se as equações algébricas abaixo, obtidas das equações dinâmicas mostradas acima quando as dinâmicas de todos os enrolamentos são desprezadas.

$$S = \sqrt{3}V_a I_a \quad (0.86)$$

$$I_a = \frac{S}{\sqrt{3}V_a}, \text{fp} = \cos \theta \quad (0.87)$$

$$\dot{E}_a = \dot{V}_a + (R_s + jX_q) I_a = \dot{E}_a \angle \delta \quad (0.88)$$

$$I_d = -\sqrt{2}I_a \text{sen}(\theta - \delta) \quad (0.89)$$

$$E' = \sqrt{2}E_a + (X_d - X_q) I_d \quad (0.90)$$

$$I_d = \frac{E'}{X_{md}} \quad (0.91)$$

Para o gerador síncrono em vazio ( $I_a = 0$ ) pode-se escrever

$$I_a = 0 \quad (0.92)$$

$$\dot{E}_a = \dot{V}_a \quad (0.93)$$

$$E' = \sqrt{2}E_a = \sqrt{2}V_a \quad (0.94)$$

$$I_c = \frac{\sqrt{2}V_a}{X_{md}} \Rightarrow X_{md} = \frac{\sqrt{2}V_a}{I_c} \quad (0.95)$$

Nessas equações:  $S$  é a potência aparente do gerador síncrono,  $V_a$  é o valor eficaz da tensão terminal do estator,  $I_a$  é o valor eficaz da corrente de enrolamento de estator,  $\text{fp}$  é o fator de potência do gerador síncrono,  $E_a$  é a força eletromotriz parcial do gerador,  $\delta$  é o ângulo de carga do gerador síncrono e  $E'$  é a força eletromotriz do gerador. Observa-se que são usados apenas os parâmetros  $r_s$ ,  $X_d$ ,  $X_q$ ,  $X_{md}$  e  $rfd$  para estudos de regime permanente. A

partir das equações (84) a (89) pode-se obter um diagrama vetorial que mostra a operação do gerador síncrono em regime permanente como se vê na figura 2.3

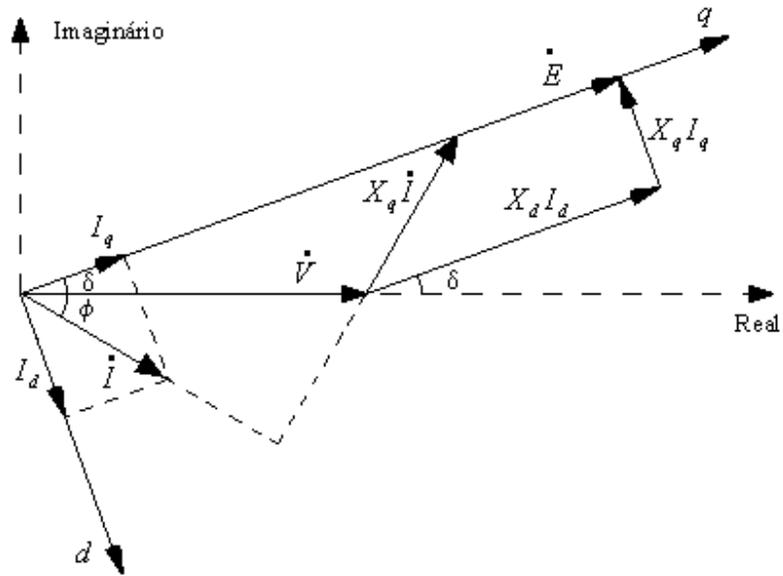


Figura 2.3 Diagrama vetorial do gerador síncrono de polos salientes

Para as potências ativa e reativa envolvidas, pode-se escrever:

$$E = V \cos \delta + X_d I_d \rightarrow I_d = \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \quad (0.96)$$

$$V \sin \delta = X_q I_q \rightarrow I_q = \frac{V \sin \delta}{X_q} \quad (0.97)$$

$$V \cos \delta = E - X_d I_d \quad (0.98)$$

$$V \sin \delta = X_q I_q$$

$$\dot{I} = (I_d \sin \delta + I_q \cos \delta) + j(-I_d \cos \delta + I_q \sin \delta) \quad (0.99)$$

$$S = V \dot{I}^* = V(I_d \sin \delta + I_q \cos \delta) - j(-I_d \cos \delta + I_q \sin \delta) = P + jQ \quad (0.100)$$

$$P = V(I_d \sin \delta + I_q \cos \delta) = V \left( \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \sin \delta + \frac{V \sin \delta}{X_q} \cos \delta \right)$$

$$P = \frac{VE}{X_d} \sin \delta + V^2 \sin \delta \cos \delta \left( -\frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right)$$

$$P = \frac{VE}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\delta \quad (0.101)$$

$$Q = -V(-I_d \cos \delta + I_q \sin \delta) = V \frac{E - V \cos \delta}{X_d} \cos \delta - \frac{V^2 \sin \delta}{X_q} \sin \delta \quad (0.102)$$

$$Q = \frac{VE}{X_d} \cos \delta - \left( \frac{V^2}{X_d} \cos^2 \delta + \frac{V^2}{X_q} \sin^2 \delta \right) \quad (0.103)$$

Alternativamente pode-se escrever:

$$P = \frac{VE}{X_d} \sin \delta + V \frac{V \sin \delta}{X_q} \times \frac{X_d - X_q}{X_d} \cos \delta = \frac{V}{X_d} [E \sin \delta + I_q (X_d - X_q) \cos \delta] \quad (0.104)$$

$$\begin{aligned} Q &= \frac{V}{X_d} \left( E \cos \delta - V \cos \delta \cos \delta + \frac{V}{X_q} X_d \sin \delta \sin \delta \right) = \\ &= \frac{V}{X_d} \left[ E \cos \delta - (E - X_d I_d) \cos \delta + \frac{V}{X_q} (X_q I_q) \sin \delta \right] \\ Q &= \frac{V}{X_q} (X_d I_d \cos \delta - X_q I_q \sin \delta) \end{aligned} \quad (0.105)$$

A seguir apresentam-se exemplos de cálculo de condições de regime permanente em cargas nominais e em vazio para dois geradores síncronos de polos salientes com as seguintes características nominais:

Gerador síncrono 1 (Laboratório): 2 kVA, 230 V, 60 Hz, 1800 rpm, fp = 1,  $r_s = 1,38 \Omega$ ,  $X_d = 34,83 \Omega$ ,  $X_q = 20,60 \Omega$ ,  $X_{ls} = 2,7 \Omega$  e  $rfd = 265 \Omega$ .

$$I_a = \frac{S_a}{\sqrt{3}V_a} = \frac{2000}{\sqrt{3} \times 230} = 5,02 \text{ A}$$

$$\dot{I}_a = 5,02 \angle 0^\circ$$

$$\dot{E}_a = \dot{V}_a + (R_a + jX_q) \dot{I}_a = \frac{230}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + (1,38 + j20,60) 5,02 \angle 0^\circ$$

$$= 132,79 + (1,38 + j20,60) 5,02 \angle 0^\circ = 173,824 \angle 30,507^\circ \text{ V}$$

$$\delta = 30,507^\circ$$

$$I_d = I_a \sin(\phi + \delta) = 5,02 \times \sin(0 + 36,507^\circ) = 2,987 \text{ A}$$

$$E = E_a + (X_d - X_q)I_d = 173,824 + (34,83 - 20,60) \times 2,987 = 216,329 \text{ V}$$

$$I'_c = \frac{\sqrt{2}E}{X_{md}} = \frac{\sqrt{2} \times 216,329}{34,83 - 2,7} = 9,522 \text{ A (Vista do estator)}$$

$$I_c = 0,6 \text{ A (Vista do rotor)}$$

$$\frac{I'_c}{I_c} = \frac{9,522}{0,6} = 15,87$$

Vazio:

$$I_a = 0$$

$$E_a = V_a = 230,00 \text{ V}$$

$$E' = \sqrt{2}V_a = 325,26 \text{ V}$$

$$I'_{cv} = \frac{\sqrt{2}V_a}{X_{md}} = \frac{325,269}{32,13} = 10,124 \text{ A}$$

$$I_{cv} = 177,5 \text{ A}$$

$$\frac{I'_{cv}}{I_v} = \frac{1623,098}{177,6} = 9,139$$

Gerador síncrono 2: 6250 kVA, 4160 V, 60 Hz, 10 polos (360 rpm), fator de potência 0,85 em operação indutiva (sobrecitado), corrente de campo nominal de 315 A, com os seguintes parâmetros de regime permanente:  $r_s = 0,0176 \ \Omega$ ,  $X_d = 2,905 \ \Omega$ ,  $X_q = 1,748 \ \Omega$ ,  $X_{md} = 2,563 \ \Omega$  e  $rfd = 0,00231 \ \Omega$ . Este gerador está instalado na UHE Jaguari da CPFL e serve como exemplo de um hidrogerador em serviço [11].

Gerador operando em condições de plena carga:

$$I_a = \frac{S_a}{\sqrt{3}V_a} = \frac{6250 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 4160} = 867,413 \text{ A}$$

$$\dot{I}_a = 867,413 \angle -31,788^\circ$$

$$\dot{E}_a = \dot{V}_a + (R_a + jX_q)\dot{I}_a = \frac{4160}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + (0,0176 + j1,748)867,413 \angle -31,788^\circ =$$

$$= 3459,308 \angle 21,730^\circ \text{ A}$$

$$\delta = 21,730^\circ$$

$$I_d = -I_a \text{sen}(\phi - \delta) = -867,413 \times \text{sen}(-31,778 - 21,724) = 697,443 \text{ A}$$

$$E = E_a + (X_d - X_q)I_d = 3458,80 + (2,905 - 1,748) \times 986,250 = 4266,249V$$

$$I_f = \frac{\sqrt{2}E}{X_{md}} = \frac{\sqrt{2} \times 4266,249}{(2,905 - 0,341)} = 2354,033A \quad (\text{corrente de campo vista do lado do enrolamento de estator})$$

A corrente de campo nas condições nominais deste gerador síncrono é  $I_{frotor} = 315,00A$ . Desse modo a “relação de transformação” entre estator e rotor em carga nominal pode ser escrita como:

$$\frac{I_{festator}}{I_{frotor}} = \frac{2354,033}{315,00} = 7,473$$

Gerador operando em vazio:

$$I_a = 0$$

$$E' = E_a = V_a = 2401,777V$$

$$I_{festator} = \frac{\sqrt{2}V_a}{X_{md}} = \frac{4160}{2,563} = 1623,098A$$

A corrente de campo em vazio do gerador é:  $I_{frotor} = 177,5A$

$$\frac{I_{festator}}{I_{frotor}} = \frac{1623,098}{177,6} = 9,139$$

Até o momento procurou-se deixar claro quais são os parâmetros a serem determinados através de ensaios: são os parâmetros padronizados ( $X_d, X_q, X'_d, X'_q, X''_d, X''_q, \tau'_{d0}, \tau'_{q0}, \tau''_{d0}, \tau''_{q0}, \tau'_d, \tau'_q, \tau''_d$  e  $\tau''_q$ ). A partir do capítulo III mostra-se como determina-los.

## Capítulo III

### Determinação experimental de parâmetros elétricos de geradores síncronos

#### III.1. Introdução

Como visto no capítulo II os parâmetros elétricos dos geradores síncronos se dividem em dois tipos principais: os parâmetros fundamentais ( $r_s, r_{fd}, r_{kd}, r_{kq1}, r_{kq2}, X_{ls}, X_{lfd}, X_{lkd}, X_{lkq1}, X_{lkq2}, X_{md}$  e  $X_{mq}$ ) e os parâmetros padronizados ( $X_d, X_q, X'_d, X'_q, X''_d, X''_q, \tau'_{d0}, \tau'_{q0}, \tau''_{d0}, \tau''_{q0}, \tau'_d, \tau'_q, \tau''_d$  e  $\tau''_q$ ). Os parâmetros padronizados são funções dos parâmetros fundamentais [1, 11] e são os primeiros a serem determinados através de diversos ensaios e métodos descritos na literatura.

A partir do conhecimento dos valores dos parâmetros padronizados e dos resultados de medições de resistências elétricas de enrolamentos de estator e de campo é possível determinar, usando as equações mostradas no capítulo II [11] todos os parâmetros fundamentais.

Existe uma série de ensaios que permitem determinar alguns valores de parâmetros padronizados, que são mencionados a seguir.

Através das curvas características de circuito aberto e de curto circuito do gerador pode-se determinar a reatância síncrona de eixo direto não saturada ( $X_{dns}$  ou  $X_d$ ) e a reatância síncrona de eixo direto saturada ( $X_{ds}$ ).

O ensaio de escorregamento permite determinar tanto a reatância síncrona de eixo direto ( $X_d$ ) como a de eixo em quadratura ( $X_q$ ). O ensaio de máxima corrente indutiva permite a determinação da reatância síncrona de eixo em quadratura ( $X_q$ ).

O ensaio de medição de reatância de Potier [6, 9] permite determinar a reatância de dispersão dos enrolamentos de estator ( $X_{ls}$ ) de forma aproximada.

Esses parâmetros ( $X_d, X_q$  e  $X_{ls}$ ), juntamente com as resistências elétricas dos enrolamentos de estator ( $r_s$ ) e de campo ( $r_{fd}$ ), que podem ser medidas com multímetro ou através do uso de voltímetro e amperímetro, formam o conjunto de parâmetros elétricos necessários e suficientes para caracterizarem o gerador em regime permanente.

Os demais parâmetros ( $X'_d, X'_q, X''_d, X''_q, \tau'_{do}, \tau'_{qo}, \tau''_{do}, \tau''_{qo}, \tau'_d, \tau'_q, \tau''_d$  e  $\tau''_q$ ), juntamente com os anteriores são parâmetros necessários para descrever o comportamento do gerador síncrono em regime transitório.

Os principais métodos conhecidos para determinar esses parâmetros são: o método baseado no ensaio de curto circuito trifásico brusco dos terminais de enrolamentos de armadura, o método baseado no ensaio de rejeição de carga do gerador e o método da resposta em frequência.

O método do ensaio de curto circuito trifásico brusco dos terminais de enrolamentos de armadura permite determinar todas as reatâncias de eixo direto ( $X_d, X'_d$  e  $X''_d$ ) bem como todas as constantes de tempo de curto circuito de eixo direto ( $\tau'_d$  e  $\tau''_d$ ). Trata-se de um método bastante consagrado e descrito em diversos livros e artigos [2]. Apesar de importante, o ensaio de curto circuito trifásico brusco é um ensaio perigoso para o enrolamento de estator do gerador, principalmente para geradores que já operam há longo tempo, cujas amarrações de bobinas estão mais desgastadas, podendo sofrer algum dano e se romperem.

O método da rejeição de carga compreende três tipos de ensaios de rejeições de carga: a) o ensaio de rejeição de carga de eixo direto permite determinar os seguintes parâmetros ( $X_d, X'_d, X''_d, \tau'_{do}$ , e  $\tau''_{do}$ ); b) o ensaio de rejeição de carga de eixo em quadratura somente permite determinar ( $X_q, X'_q, \tau'_{qo}$ , e  $\tau''_{qo}$ ); c) o ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário permite determinar também os parâmetros ( $X_q, X'_q, X''_q, \tau'_{qo}$  e  $\tau''_{qo}$ ). Os ensaios de rejeição de carga de eixo q apresentam algumas dificuldades de execução que serão ainda discutidas neste trabalho.

Dessa forma verifica-se que, teoricamente, todos os ensaios de rejeição de carga permitem determinar todas as reatâncias tanto de eixo direto como de eixo em quadratura e as constantes de tempo de circuito aberto. As constantes de tempo de curto circuito ( $\tau'_d$  e  $\tau''_d$ ) podem ser determinadas usando-se as relações (2.81) a (2.83).

Resumidamente tem-se o seguinte panorama: o ensaio de curto circuito permite determinar todas as reatâncias de eixo direto e as constantes de tempo de curto circuito de eixo direto. Entretanto é um ensaio que se evita de realizar por ser perigoso para o enrolamento de estator.

Os ensaios de rejeição de carga permitem determinar todos os parâmetros elétricos exceto as constantes de tempo de curto circuito que são determinadas usando as equações (2.81) a (2.83) com grande aproximação.

Dessa maneira os parâmetros padronizados, teoricamente, ficam todos determinados. O método de resposta em frequência que teoricamente permite determinar todos os parâmetros é discutido parcialmente neste trabalho.

A seguir apresenta-se os procedimentos de ensaios para determinação dos parâmetros de um gerador síncrono de polos salientes conforme descrito acima.

### III.2. Ensaio para a determinação da reatância síncrona de eixo direto

A determinação da reatância síncrona de eixo direto ( $X_d$ ) pode, entre outras maneiras, ser feita usando as curvas característica de circuito aberto e característica de curto circuito, conforme se vê na figura 3.1. Através dessas curvas pode-se obter os valores das reatâncias síncronas de eixo direto não saturada ( $X_{dns}$ ) e saturada ( $X_{ds}$ ).

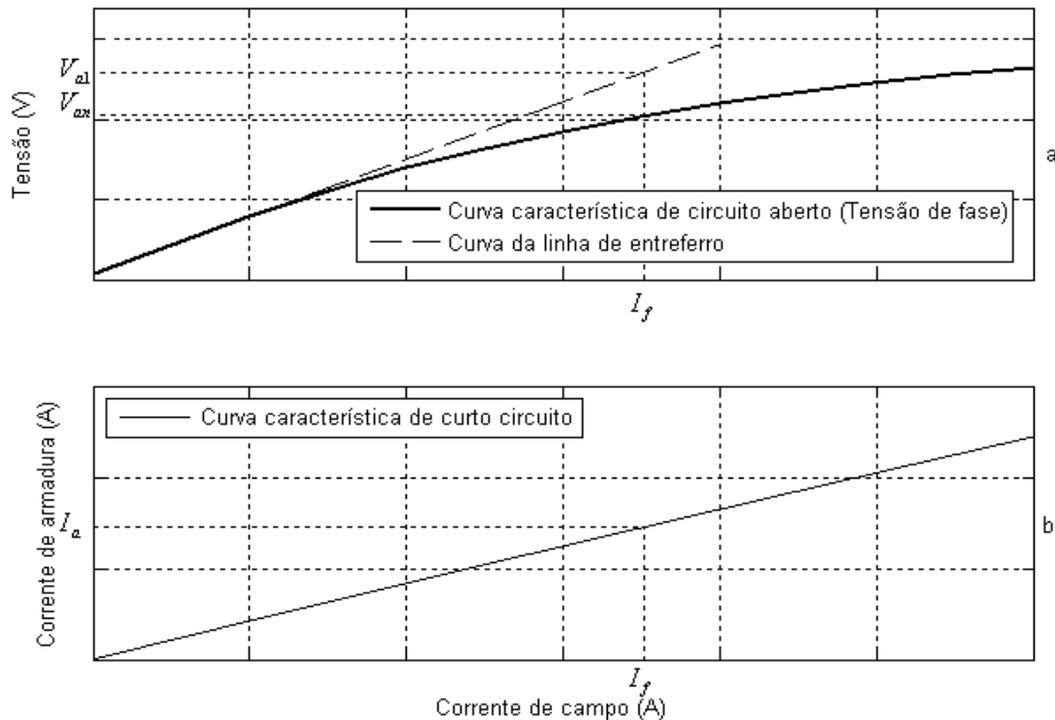


Figura 3.1 Curvas necessárias para a determinação da reatância síncrona de eixo direto ( $X_d$ )

Para qualquer valor de corrente de campo, por exemplo,  $I_f$ , obtém-se a tensão  $V_{a1}$  sobre a reta de entreferro e a corrente de armadura  $I_a$  na curva característica de curto circuito. A reatância síncrona de eixo direto não saturada é dada pela expressão (3.1) abaixo.

$$X_{ds} = X_d = \frac{V_{a1}}{I_a} \quad (0.106)$$

A tensão  $V_{a1}$  é uma tensão de fase que corresponde à média aritmética das três tensões de fase do gerador em vazio.

O valor da reatância é aproximado porque o efeito da resistência elétrica do enrolamento de estator é desprezado nesse cálculo. Entretanto, como ela é, em geral, muito pequena em comparação com o valor obtido de  $X_d$ , o erro não é grande (da ordem de 1%).

A reatância síncrona de eixo direto saturada pode ser obtida também das curvas já mencionadas como se vê na figura 3.1. Para o valor da tensão nominal  $V_{an}$  utiliza-se a corrente de campo  $I_f$  e a corrente de armadura  $I_a$ . A reatância síncrona de eixo direto saturada é dada por (3.2).

$$X_{ds} = \frac{V_{an}}{I_a} \quad (0.107)$$

A maioria dos livros escritos sobre máquinas síncronas e sobre geradores síncronos apresenta este ensaio.

### III.3. Ensaio de escorregamento

A determinação da reatância síncrona de eixo em quadratura ( $X_q$ ) pode ser feita através do ensaio de escorregamento. Através desse ensaio é possível também determinar o valor da reatância síncrona de eixo direto ( $X_d$ ).

O ensaio é realizado acionando-se o gerador síncrono a uma velocidade bem próxima da sua velocidade síncrona com os terminais do circuito de excitação de campo abertos. Os terminais de enrolamentos de armadura devem ser ligados a uma fonte trifásica de tensão

variável. Devem ser feitas medições das correntes e tensões dos enrolamentos de armadura para a determinação dos parâmetros  $X_d$  e  $X_q$ . A metodologia consiste no seguinte:

O gerador síncrono deve ser acionado até uma velocidade próxima da síncrona por meio de um motor de velocidade ajustável. Um motor que funciona bem para este caso de ensaio feito em laboratório com gerador de pequeno porte é o motor de corrente contínua. No caso de gerador de uma usina o acionamento deve ser feito com a própria turbina.

A sequência de fases do gerador em estudo deve estar no mesmo sentido que a sequência de fases da fonte trifásica externa auxiliar. Neste caso foi utilizado um variac trifásico ligado à rede elétrica como fonte de tensão, e verificou-se a sequência de fases do gerador. Tanto a fonte de tensão trifásica como o gerador síncrono sob ensaio devem ter a mesma sequência de fases.

Após a verificação da sequência de fases do gerador, inicia-se o ensaio: aciona-se o gerador síncrono em velocidade próxima da síncrona com os terminais de campo abertos. Deve-se adquirir dados de correntes e de tensão nas três fases e no enrolamento de campo em aberto durante o ensaio e obter os gráficos conforme figura 3.2.

Para a medição das tensões e correntes neste ensaio e em todos os outros que serão relatados em sequência, recomenda-se fortemente utilizar um sistema de aquisição de dados e um software para tratamento dos dados e construção de gráficos. Um osciloscópio pode também ser útil. A utilização de voltímetros ou amperímetros também é possível, porém há uma maior dificuldade de leitura e registro dos dados.

Com o gerador síncrono em estudo girando em velocidade próxima da síncrona, aplica-se tensão reduzida em seus enrolamentos de armadura e observa-se a tensão induzida nos terminais do enrolamento de campo.

Se esta tensão permanecer nula, significa que o gerador síncrono está em sincronismo com a fonte auxiliar, devendo então o executor do ensaio forçar o gerador a sair do sincronismo diminuindo ou aumentando a velocidade do motor de acionamento.

Se a velocidade do gerador síncrono em estudo estiver fora de sincronismo a tensão induzida no enrolamento de campo irá se comportar como mostrado no gráfico da figura 3.2a e, tensão e corrente de enrolamentos de armadura comportar-se-ão de acordo com os gráficos da figura 3.2b e 3.2c, respectivamente. Em outras palavras, o campo girante do estator e a velocidade do rotor terão de ser diferentes.

Nessas condições verifica-se a tensão induzida no enrolamento de campo e as tensões e correntes de enrolamento de armadura obtidas pelo sistema de aquisição de dados. A tensão induzida no campo será alternada com frequência igual à diferença entre a síncrona e a do rotor. Essa frequência é pequena e, portanto o período da tensão induzida no campo será longo.

A corrente de armadura tem frequência síncrona, ou seja, da fonte auxiliar. A amplitude dessa corrente será constante no caso do gerador síncrono de polos lisos que tem entreferro constante. Nos geradores síncronos de polos salientes essa corrente apresentará variação de amplitude conforme o ângulo do rotor  $\theta_r$  ficando modulada pela variação do entreferro. Quando o entreferro for mínimo tem-se a reatância  $X_d$  e quando o entreferro for máximo tem-se a reatância  $X_q$ .

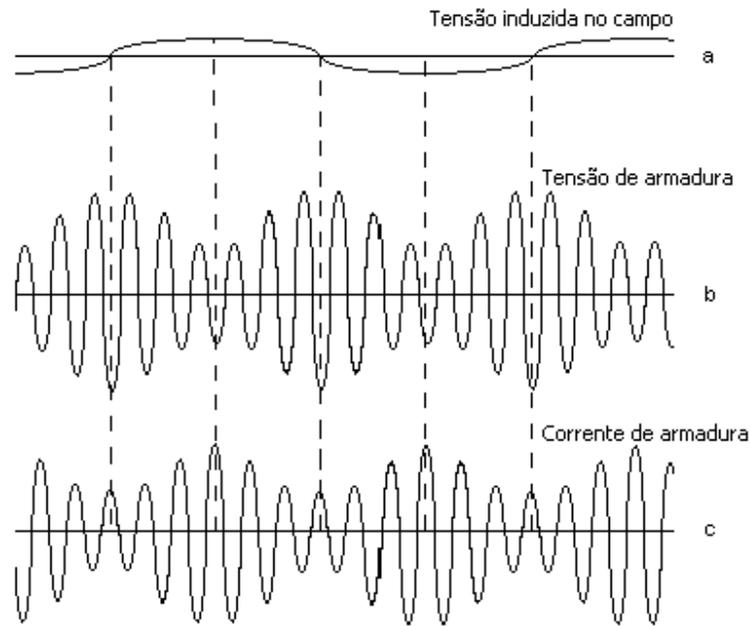
Nos momentos em que a tensão induzida no campo se tornar nula, a tensão na armadura será máxima e a corrente de armadura será mínima, isto significa que a gerador síncrono está passando pelo seu valor máximo de reatância, ou seja,  $X_d$ .

Nos momentos em que a tensão induzida no campo for máxima, tanto para o semiciclo positivo como negativo, a tensão na armadura será mínima e a corrente de armadura será máxima, isto significa que a gerador síncrono está passando pelo seu ponto de valor mínimo de reatância, ou seja,  $X_q$ .

Dessa forma as equações para determinação de  $X_d$  e  $X_q$  ficam da seguinte forma [9]:

$$x_d = \frac{V_{a \max}}{I_{a \min}} \quad (0.108)$$

$$x_q = \frac{V_{a \min}}{I_{a \max}} \quad (0.109)$$



**Figura 3. 2 Curva característica do ensaio de escorregamento**

As dificuldades de execução do método são as seguintes: a) a diferença de velocidade entre o rotor e o campo girante na armadura deve ser bem pequena para que o resultado seja bem perceptível, principalmente se o ensaio for realizado com voltímetros e amperímetros. Quando a diferença de frequência for muito pequena a chance de sincronismo é grande anulando o ensaio, b) o método funciona bem com tensões baixas nos enrolamentos de armadura, pois se forem utilizadas tensões altas o gerador síncrono entrará em sincronismo com a fonte externa, no caso presente utiliza-se um variac para conexão do gerador à rede elétrica.

Essa segunda dificuldade limita o ensaio à determinação de parâmetros não saturados somente e também pode trazer dificuldades provenientes da modulação da corrente na armadura, devido ao magnetismo remanescente no indutor do gerador síncrono.

### III.4. Ensaio de máxima corrente indutiva

A determinação da reatância síncrona de eixo em quadratura  $X_q$  pode ser feita pelo método da máxima corrente indutiva que consiste das seguintes etapas [9]: a) acionamento do gerador síncrono como motor síncrono em vazio adquirindo os sinais de tensão e corrente de um dos enrolamentos de fase da armadura do mesmo, b) desexcitação do gerador síncrono, que funciona como motor, gradativamente até a corrente de campo se anule e o gerador síncrono passe a funcionar como um motor de relutância, c) por intermédio de uma chave reversível, realiza-se uma inversão das ligações entre o enrolamento de campo e a excitatriz invertendo a polaridade da tensão de campo. Em seguida, aumenta-se gradativamente a corrente invertida de excitação. Com esta operação, o estado de magnetização dos polos vai se tornando cada vez menos intenso e o ângulo  $\theta_r$  do rotor é gradativamente aumentado até que o rotor do gerador síncrono sofre um brusco reajuste de posição (diz-se na literatura que o gerador “pula polos”), relativamente à direção do vetor da corrente de armadura. A partir desse instante e após algumas oscilações em torno de uma nova condição de equilíbrio estável, o gerador síncrono reassume o regime permanente, com o rotor girando a cerca de  $180^\circ$  de atraso em relação às condições iniciais da experiência.

Deve-se atentar ao voltímetro e ao amperímetro do circuito de armadura, principalmente ao amperímetro, cuja leitura aumenta à medida que o ângulo  $\theta_r$  se aproxima dos  $90^\circ$ . Essa posição de  $90^\circ$  corresponde à máxima leitura no amperímetro e isto ocorre nos instantes iniciais do já mencionado reajuste de posição do rotor.

Quando realizado com um sistema de aquisição de dados a reatância de eixo em quadratura é obtida dividindo-se o valor de pico da tensão de fase de armadura no instante do pico máximo da corrente de armadura. Ajustando-se valores altos de tensão determinam-se valores saturados de  $X_q$ .

A reatância  $X_q$  é dada pela expressão (3.5).

$$X_q = \frac{V}{I_{m\acute{a}x}} = \frac{\textit{tens\~ao aplicada por fase da armadura}}{\textit{m\~axima corrente absorvida pela armadura}} \quad (0.110)$$

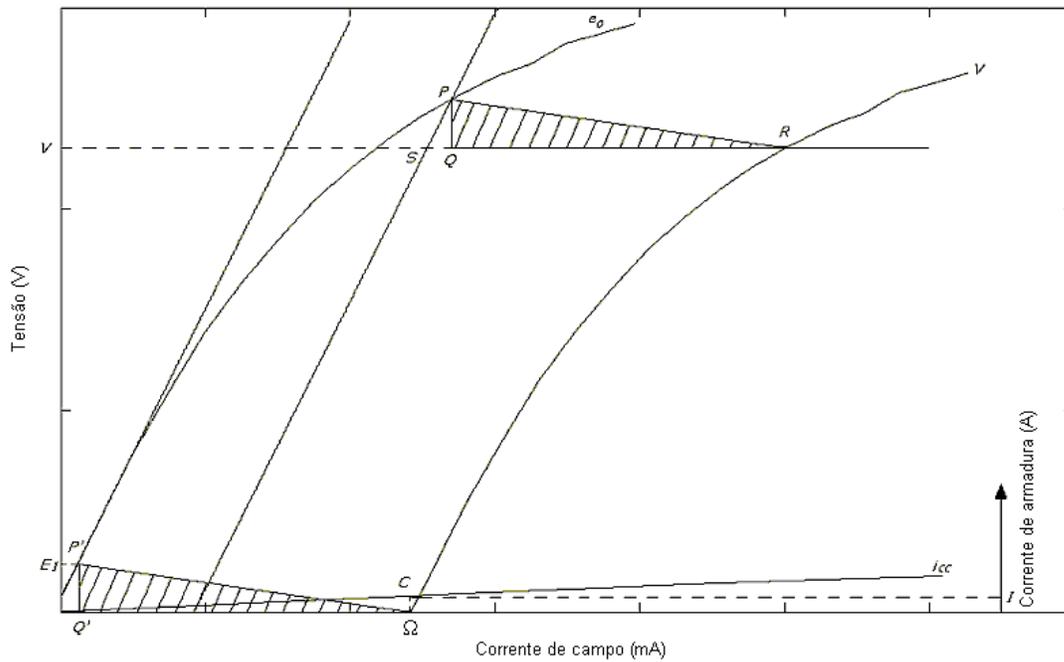
### III.5. Determinação experimental da curva característica de carga sob fator de potência indutivo nulo e determinação da reatância de Potier ( $X_p$ )

Para construir a curva característica de carga sob fator de potência indutivo nulo, que é uma curva que relaciona a tensão de enrolamento de armadura com a corrente de campo, deve-se manter a gerador síncrono operando em velocidade síncrona e com carga indutiva de fator de potência zero. A carga pode ser um motor síncrono em vazio subexcitado ou um motor de indução rodando em vazio, que se aproximam bem de uma carga indutiva com fator de potência nulo. O ideal seria utilizar um bom indutor ou mesmo a rede elétrica excitando-se convenientemente o gerador síncrono para ter fator de potência indutivo nulo, o que é uma tarefa não muito simples.

Entretanto, como mostrado em [9], pode-se traçar a curva característica em carga sob fator de potência nulo  $\Omega_v$  determinando-se somente dois de seus pontos: um ponto  $R$  equivalente a uma dada tensão de armadura  $V$  e a uma dada corrente de armadura  $I$ , ambas próximas do valor nominal das do gerador síncrono, obtido em ensaio com o gerador síncrono alimentando uma carga indutiva de fator de potência nulo e o outro ponto, inicial da curva, denominado ponto  $\Omega$ , que é obtido a partir da curva característica de curto circuito para a mesma corrente de armadura  $I$  acima mencionada. Além disso a curva característica a vazio do gerador síncrono é necessária.

A construção da curva característica em carga com fator de potência zero (curva  $\Omega_v$ ) é realizada da seguinte maneira: a) marca-se o ponto  $R$  no gráfico com coordenadas ( $I$ ,  $V$ ) acima mencionadas obtidas em ensaio, b) entra-se com o valor  $I$  anterior de corrente de carga do gerador síncrono na curva característica de curto-circuito obtendo-se a abscissa correspondente ao ponto  $\Omega$  da curva característica de carga indutiva pura. c) pelo ponto  $R$  traça-se uma reta paralela ao eixo das abscissas e sobre esta reta marca-se o ponto  $S$  tal que  $RS = O\Omega$ , d) pelo ponto  $S$  traça-se uma reta paralela ao trecho linear  $Oe_0$  da curva característica em vazio, definindo-se o ponto  $P$  sobre a curva  $Oe_0$ , e) pelo ponto  $P$  baixa-se uma perpendicular a  $SR$ , obtendo-se o ponto  $Q$ , como se vê na figura 3.3, f) a curva característica em carga indutiva de corrente  $I$  com fator de potência indutivo nulo (porque assim são os pontos  $R$  e  $\Omega$ ) é obtida deslocando o triângulo de Potier ( $PQR$ ) mantendo o ponto  $P$  sobre a curva característica em vazio e o lado  $QR$  paralelo ao eixo das abscissas. O

vértice R descreve a curva característica em carga indutiva de corrente  $I$  com fator de potência indutivo zero.



**Figura 3.3** Curva característica em carga puramente indutiva e triângulo de Potier

Para determinar a reatância de Potier utiliza-se a equação (3.6).

$$x_{Potier} = \frac{PQ}{I} \cong x_{Is} \quad (0.111)$$

$I$  é a corrente de armadura em  $C$  que foi utilizada para construir a curva característica em carga indutiva com fator de potência nulo. A reatância de dispersão do gerador síncrono  $X_{Is}$  é aproximadamente igual à reatância de Potier para geradores de polos lisos. Para geradores síncronos de polos salientes ela pode chegar a uma diferença de até 20% da reatância de Potier para menos. Como os valores de reatância de dispersão de enrolamentos de geradores são da ordem de até 0,2 pu não se comete erro grande ao considerar  $X_{Is} \cong X_p$ . Para geradores de polos salientes pode-se adotar o seguinte  $X_p = X_{Is} + 0,02 pu$  [14].

### III.6. Ensaio para determinação de $X'_d$ e $X''_d$ através do ensaio de abertura da corrente de curto circuito de regime permanente

Este ensaio permite determinar as reatâncias transitória e subtransitória de eixo direto de geradores síncronos ( $X'_d$  e  $X''_d$ ). Para realizá-lo o gerador síncrono deve estar operando em velocidade nominal, com os terminais de enrolamentos de armadura curto circuitados como mostrado na figura 3.4 e a sua corrente de campo deve ser suficiente para levar a gerador síncrono à tensão nominal quando seus terminais de armadura estiverem abertos.

Quando essa condição for atingida, os terminais de enrolamentos de estator são abertos repentinamente pela chave trifásica  $S$  e a tensão de armadura é adquirida pelo sistema de aquisição de dados como se vê na figura 3.5.

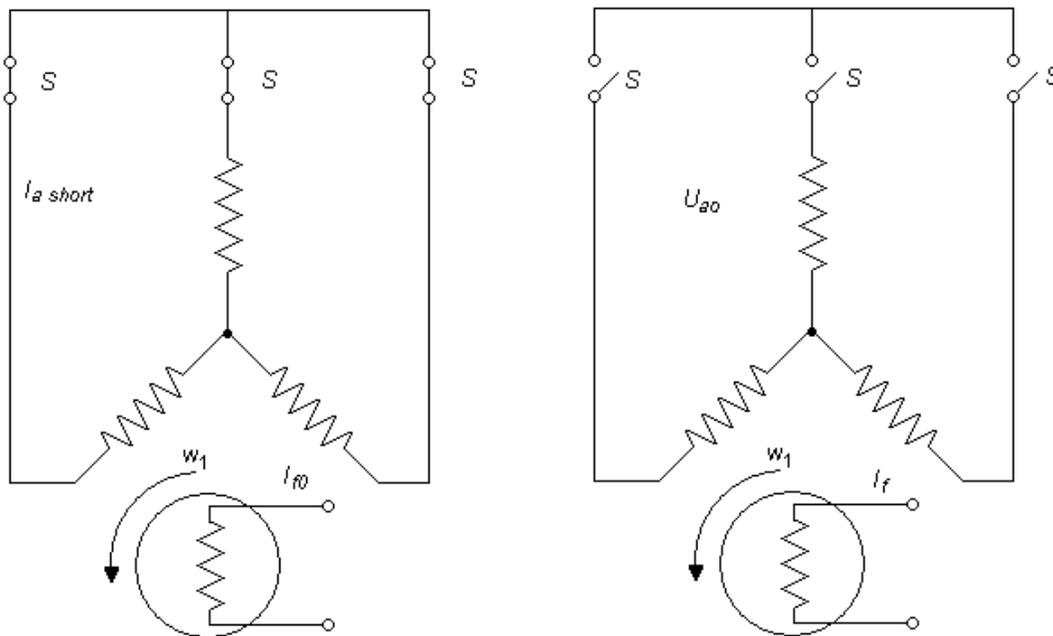
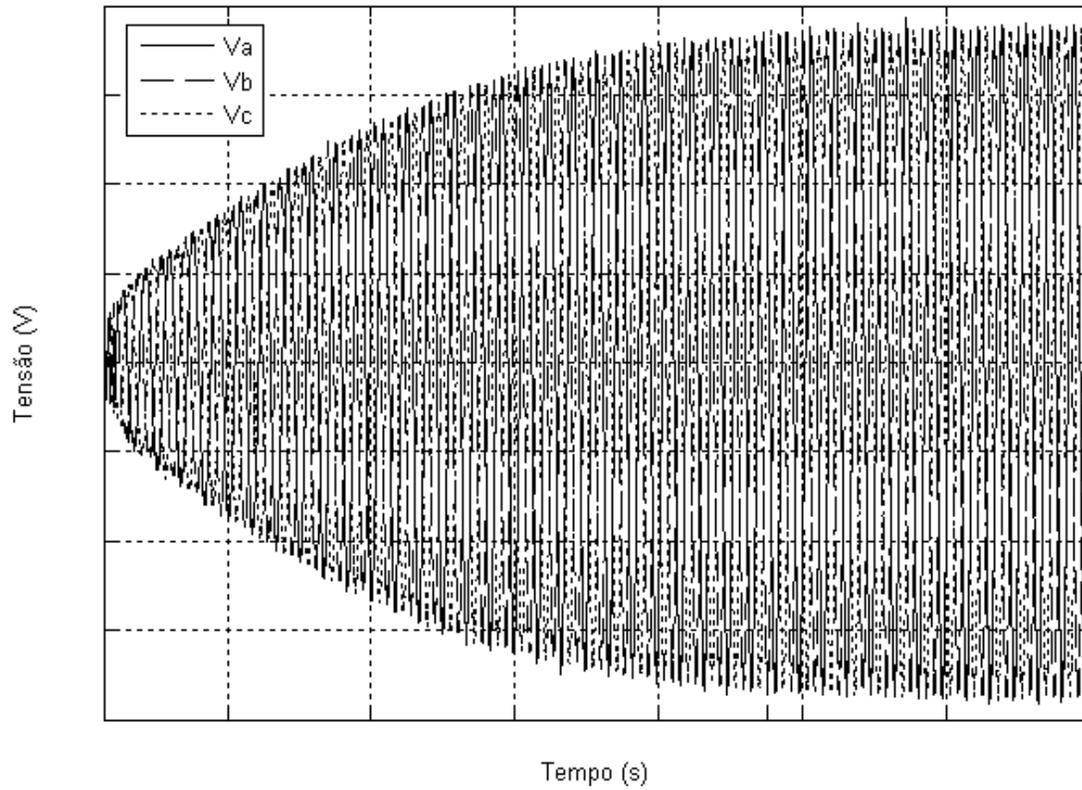


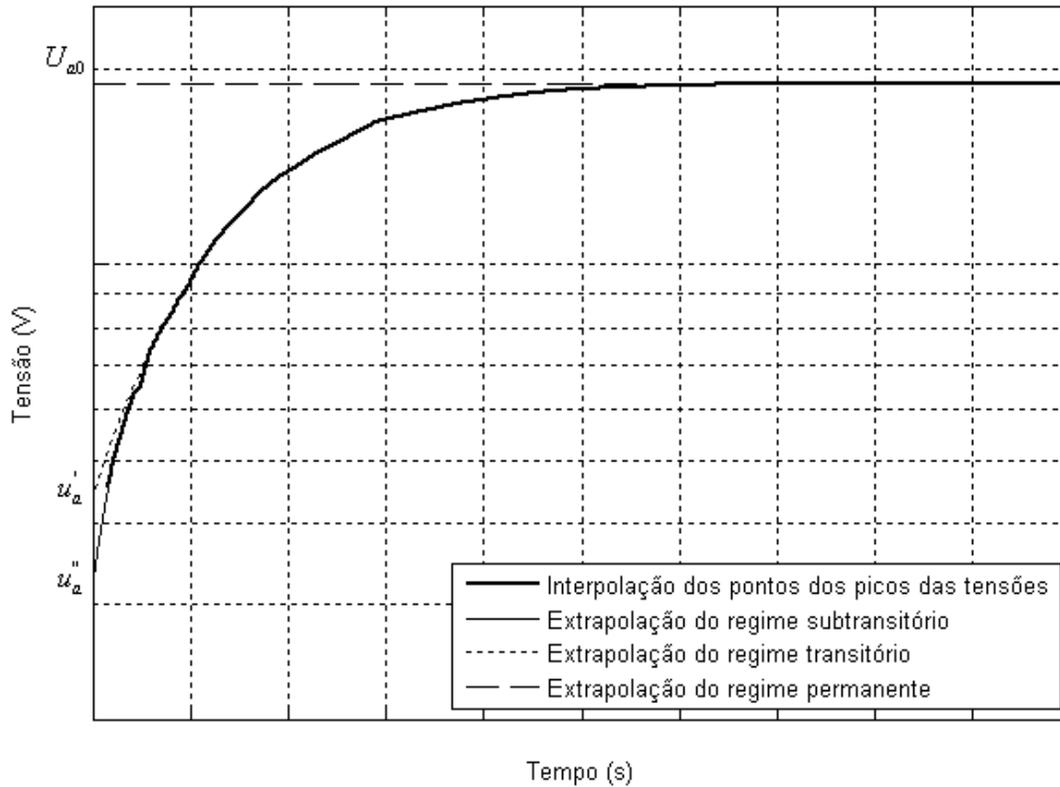
Figura 3. 4 Diagrama de ligação do ensaio de abertura de curto circuito

Através da figura 3.5 traça-se a envoltória dos picos das tensões colocando-a em escala logarítmica. A envoltória é composta de três diferentes funções: a primeira é uma reta que caracteriza o regime permanente da tensão nos terminais do gerador, a segunda é uma função exponencial sobre o valor de regime permanente, denominado regime transitório e a terceira é uma exponencial sobre a exponencial de regime transitório que caracteriza o regime subtransitório.



**Figura 3. 5 Curva de tensão característica do ensaio de abertura de curto circuito trifásico**

A Figura 3.6 mostra as extrapolações dos regimes subtransitório, transitório e permanente da curva de abertura de curto circuito ( $u''_a$ ,  $u'_a$  e  $U_{a0}$ ).



**Figura 3. 6 Envoltória e extrapolações do ensaio de abertura de curto circuito**

Para o cálculo das reatâncias de eixo direto, transitória de eixo direto e subtransitória de eixo direto do gerador síncrono utilizam-se as expressões (3.7) a (3.9).

$$X_d'' = \frac{u_a''}{I_{acc}} \quad (0.112)$$

$$X_d' = \frac{u_a'}{I_{acc}} \quad (0.113)$$

$$X_d = \frac{U_{a0}}{I_{acc}} \quad (0.114)$$

Nessas equações  $I_{acc}$  é a corrente de armadura no momento anterior à abertura da chave  $S$  e  $U_{a0}$ ,  $u_a'$  e  $u_a''$  são as tensões obtidas por extrapolações das tendências das exponenciais que caracterizam os regimes transitório e subtransitário da curva de tensão nos terminais do gerador síncrono.

### III.7. Ensaio de curto circuito trifásico brusco dos terminais de armadura

O ensaio de curto circuito trifásico brusco dos enrolamentos de armadura é um dos ensaios utilizados para obtenção de parâmetros de eixo direto do gerador síncrono. Durante mais de cinquenta anos ele tem sido usado para essa finalidade.

Para realizá-lo o gerador deve ser acionado na velocidade síncrona e estar com os terminais dos enrolamentos de estator em circuito aberto, portanto sem carga. O gerador deve estar girando na velocidade síncrona e excitado de modo a se ter alguma tensão nos seus terminais de armadura quando então eles serão instantaneamente curto circuitados.

Devido ao curto circuito trifásico as correntes de armadura de curto circuito trifásico resultante manterão o fluxo magnético de entreferro nos valores que eles tinham no momento do curto circuito. Também imediatamente após o curto circuito trifásico brusco o gerador deverá ainda estar girando na velocidade síncrona.

Durante o ensaio de curto trifásico brusco as correntes elétricas de armadura e de campo devem ser adquiridas usando-se um sistema de aquisição e tratamento de dados. Através desse sistema é possível adquirir valores instantâneos das correntes, construir gráficos e tratá-los. Pode-se produzir softwares para analisar os dados e calcular os valores dos parâmetros.

O ensaio de curto circuito trifásico brusco pode ser realizado em vários níveis de tensão com o objetivo de também estudar o efeito da saturação sobre os valores dos parâmetros. Nesse ensaio pode-se determinar somente os parâmetros padronizados de eixo direto que são a reatância síncrona de eixo direto ( $X_d$ ), a reatância transitória de eixo direto ( $X'_d$ ), a reatância subtransitória de eixo direto ( $X''_d$ ), a constante de tempo transitória de eixo direto ( $\tau'_d$ ) e a constante de tempo subtransitória de eixo direto ( $\tau''_d$ ) os quais já foram discutidos nos capítulos anteriores.

É importante lembrar que tanto as constantes de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto ( $\tau'_{do}$ ) como a subtransitória ( $\tau''_{do}$ ) não são possíveis de serem determinadas, assim como todos os parâmetros de eixo em quadratura também não podem ser determinados por esse ensaio.

Como o gerador está sem carga antes do curto circuito só há corrente elétrica no enrolamento de campo. A partir do instante do curto circuito haverá correntes induzidas nos enrolamentos de armadura que tentam manter o fluxo magnético no entreferro

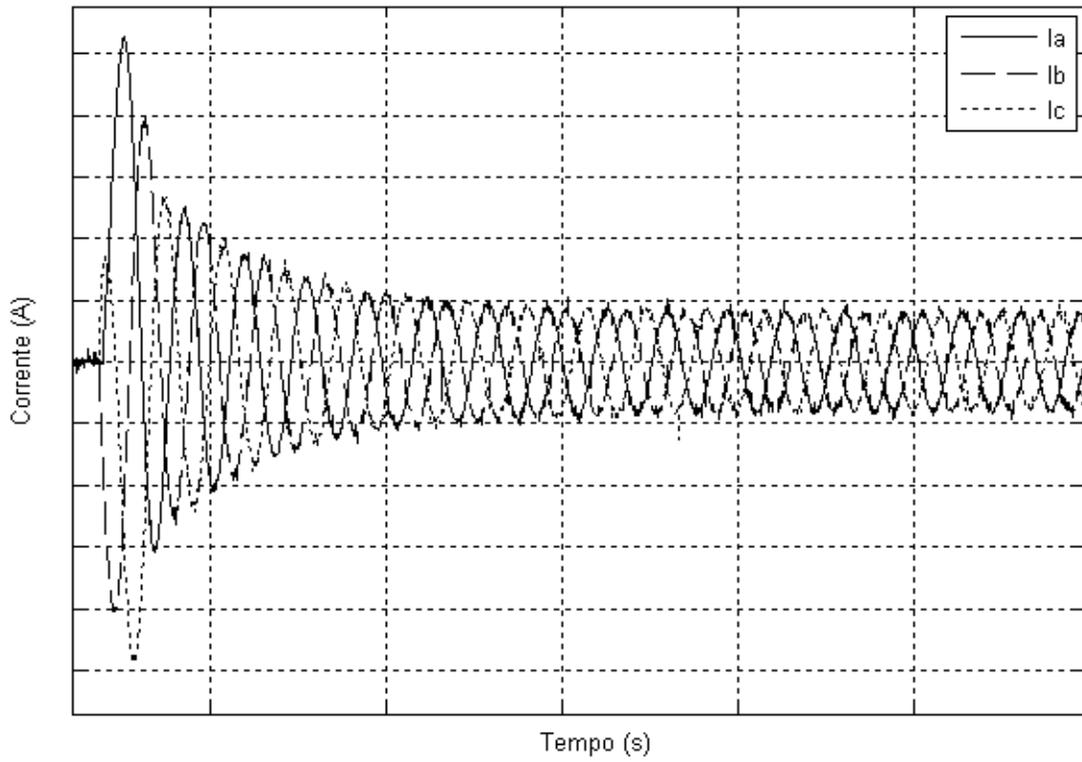
constante. Em razão desse esforço essas correntes são elevadas no instante do curto circuito diminuindo rapidamente durante os primeiros ciclos e em seguida diminuindo mais lentamente até atingir o regime permanente em curto circuito.

O primeiro intervalo de decaimento da corrente elétrica de armadura (muito rápido) é denominado período subtransitório do curto-circuito, o intervalo de tempo seguinte é denominado período transitório e, finalmente quando o valor de pico da corrente elétrica de curto circuito se estabiliza num valor final tem-se o regime estacionário de curto circuito ou curto circuito permanente.

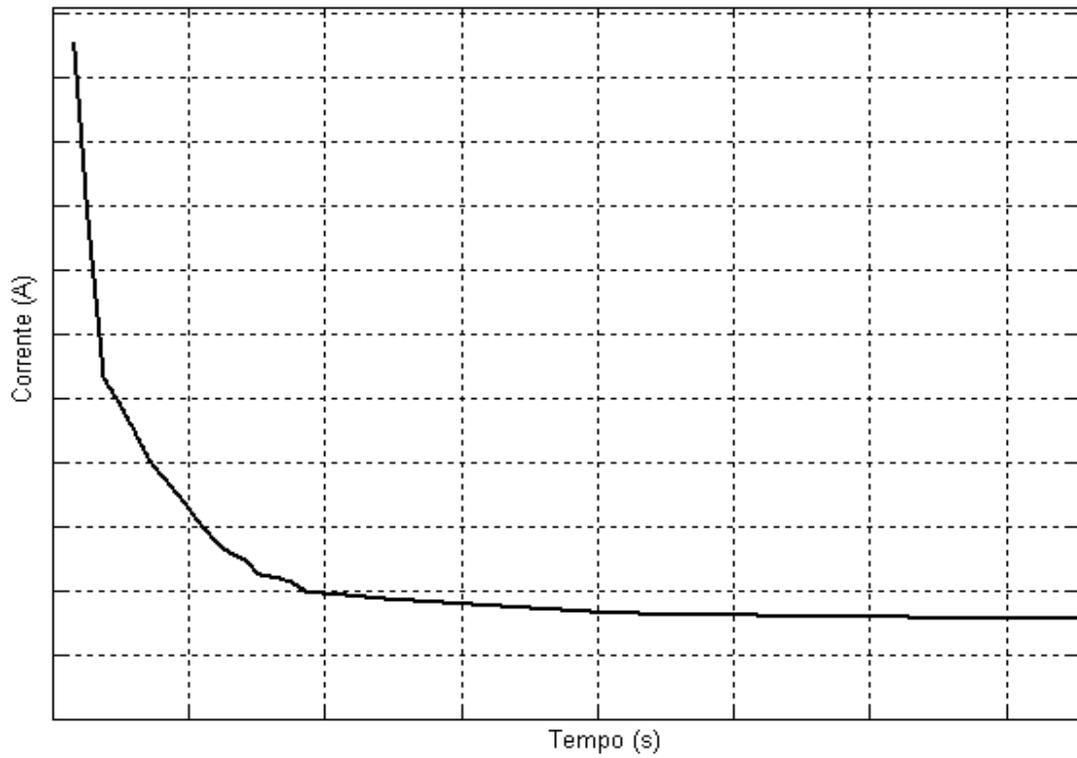
Se, em seguida, o curto circuito for desfeito a corrente de armadura desaparece, aparecendo uma tensão em vazio nos terminais de armadura enquanto o gerador permanecer excitado. Ao se retirar a excitação essa tensão diminui para um valor nulo ou quase nulo dependente do magnetismo residual da gerador síncrono.

Ao longo dos anos verificou-se que a envoltória da curva da corrente elétrica de curto circuito era composta da seguinte maneira: a) em regime permanente ela é senoidal na frequência elétrica síncrona que resulta da velocidade síncrona mantida no eixo do gerador. A sua envoltória é uma reta horizontal ao longo do tempo de amplitude com valor igual ao valor de pico da corrente de curto circuito de regime permanente, b) no período transitório, imediatamente anterior ao regime permanente, ela tem forma de senoide amortecida com envoltória que segue uma função exponencial sobre o valor de regime permanente com constante de tempo transitória de eixo direto ( $\tau'_d$ ), c) no período subtransitório ela é uma nova senoide amortecida com envoltória que segue uma função exponencial sobre a envoltória da corrente do regime transitório anterior com constante de tempo subtransitória de eixo direto ( $\tau''_d$ ).

A figura 3.7 mostra as correntes de curto circuito brusco das fases de um gerador síncrono ao longo do tempo. A figura 3.8 mostra a curva da média das envoltórias das correntes de curto circuito das três fases do gerador. Nessas figuras as exponenciais acima citadas podem ser identificadas.

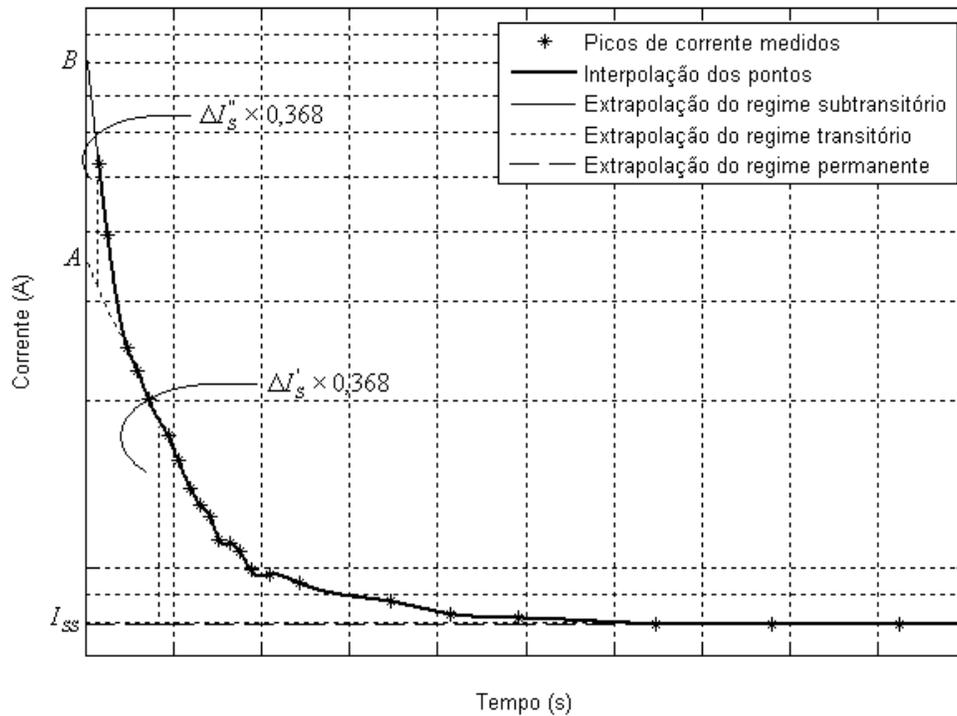


**Figura 3. 7 Curva de correntes de curto circuito**



**Figura 3. 8 Curva envoltória das correntes elétricas dos enrolamentos de armadura obtidas no ensaio de curto circuito trifásico brusco**

A curva envoltória das correntes elétricas de curto circuito brusco nos terminais de armadura obtida do ensaio de curto circuito brusco é uma composição de três curvas, sendo: uma reta que corresponde ao regime permanente e duas exponenciais que correspondem à uma exponencial do regime transitório sobre a reta de regime permanente e à outra exponencial do regime subtransitório sobre a exponencial do regime transitório que podem ser vistas na figura 3.9 e cujas equações são (3.10 a 3.12) a seguir:



**Figura 3.9** Envoltória da corrente de curto circuito com as correspondentes extrapolações

A figura 3.9 mostra a curva das envoltórias da corrente de curto circuito brusco dos terminais de enrolamentos de estator em escala logarítmica, as extrapolações dos regimes subtransitório, transitório e permanente e também os pontos  $A$ ,  $B$  e  $I_{ss}$ , importantes para a determinação de parâmetros.

Para encontrar os valores das constantes de tempo subtransitória e transitória encontra-se o instante em que o espaçamento entre a curva média do curto circuito e suas extrapolações tem o valor de  $0,368\Delta t_s''$  para o caso de  $\tau''$ . Para o caso de  $\tau'$ , encontra-se o instante em que o espaçamento entre a curva média do curto circuito e suas extrapolações

tem o valor de  $0,368\Delta i_s''$ , onde  $\Delta i_s''$  e  $\Delta i_s'$  são as diferenças entre as ordenadas dos pontos B e A, e a diferença dos pontos A e  $I_{ss}$ , respectivamente.

A partir da figura 3.9 observa-se que a corrente transitória tem um valor inicial de  $I_d' = U/X_d' - U/X_d$  (que decai com a constante de tempo  $\tau_d'$ ) e a componente de corrente subtransitória tem um valor inicial de  $I_d'' = U/X_d'' - U/X_d'$ . Então a corrente de curto circuito brusco dos terminais de enrolamentos de estator comportar-se-á de acordo com as expressões:

$$i_s = I_{ss} + \Delta i_s' + \Delta i_s'' \quad (0.115)$$

$$i_s = I_{ss} + I_d' e^{-t/T_d'} + I_d'' e^{-t/T_d''} \quad (0.116)$$

$$i_s = I_{ss} + (U/X_d' - U/X_s) e^{-t/T_d'} + (U/X_d'' - U/X_d') e^{-t/T_d''} \quad (0.117)$$

Para o cálculo de  $X_d$  utiliza-se o valor da corrente do regime permanente  $I_{ss}$  e  $U$  (figura 3.9) onde  $I_{ss}$  corresponde ao valor de regime permanente das correntes de curto circuito de todas as fases e  $U$  corresponde à tensão de fase inicial dos terminais dos enrolamentos de armadura antes do curto circuito. Em seguida deve-se decompor as curvas de corrente de curto circuito trifásico brusco para encontrar os valores de  $X_d'$  e  $X_d''$ .

Para decompor essas curvas, é necessário subtrair o regime permanente da curva e aplicar escala logarítmica. Ao aplicar escala logarítmica, a exponencial do regime transitório se transforma em uma reta e traçando uma tendência dessa reta, ao cruzar o eixo das ordenadas obtêm-se o valor “A” de corrente que é usado para se realizar o cálculo de  $X_d'$ .

Para o cálculo de  $X_d''$  traça-se a tendência da curva de regime sub-transitório e ao cruzar o eixo das ordenadas encontra-se “B” e utiliza-se esse valores obtidos nas expressões (3.13) a (3.15).

$$X_d = \frac{U}{I_{ss}} \quad (0.118)$$

$$X_d' = \frac{U}{A} \quad (0.119)$$

$$X_d'' = \frac{U}{B} \quad (0.120)$$

### III.8. Ensaio de rejeição de carga

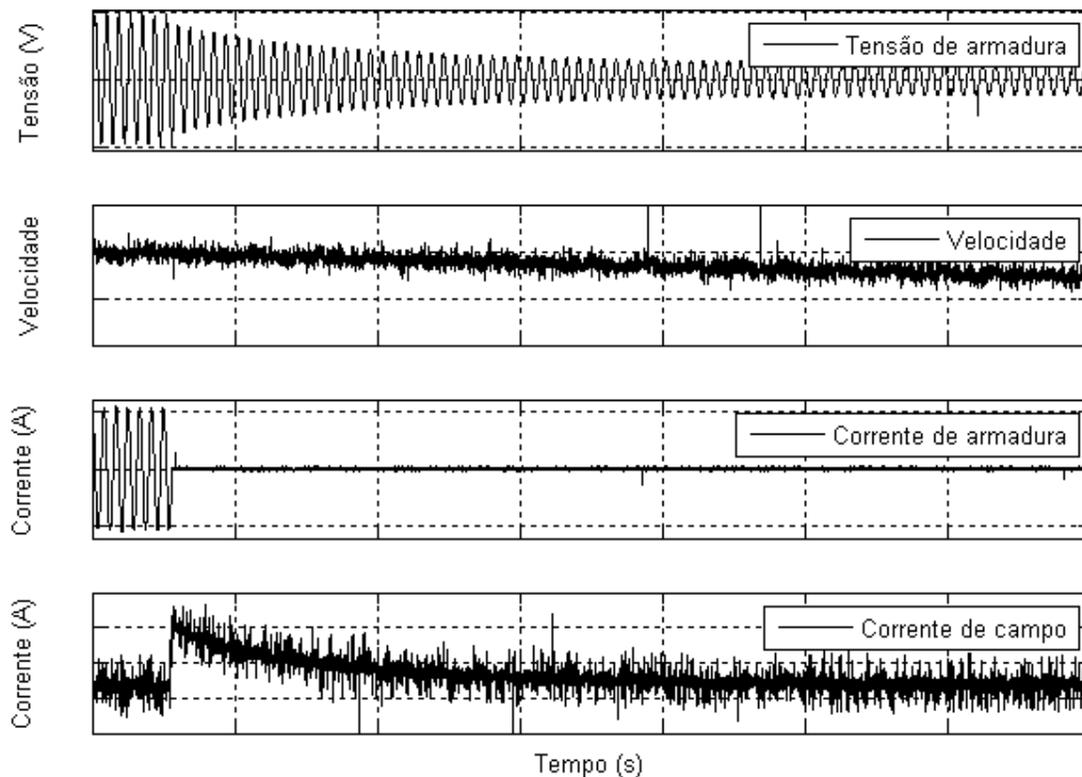
Outra metodologia para identificação de parâmetros de geradores síncronos são os ensaios de rejeição de carga. Através de rejeições de carga em situações específicas de operação, os parâmetros de eixo direto e de eixo em quadratura podem ser obtidos [8].

O ensaio consiste em basicamente abrir o disjuntor que conecta os terminais do gerador ao sistema de energia elétrica ou à carga, portanto não oferece riscos de danos ao gerador síncrono. Obtêm-se os parâmetros pela análise da envoltória da curva de tensão terminal média entre as três fases do gerador e pode-se determinar todos os parâmetros elétricos padronizados do gerador síncrono, as resistências de enrolamento do estator e de campo e a reatância de dispersão.

Para a realização correta do ensaio, deve-se abrir o disjuntor que conecta o gerador à carga ou sistema elétrico e retirar a turbina que aciona o gerador simultaneamente. O gerador pode estar na tensão nominal ou em tensão reduzida, porém, recomenda-se realizar o ensaio à plena tensão.

Durante o ensaio de rejeição de carga deve-se tomar cuidado em desabilitar o regulador de tensão e a automação do gerador síncrono de tal maneira que a tensão de excitação seja mantida exatamente onde estava imediatamente antes da abertura do disjuntor. Para isso, o ensaio deve ser realizado durante o comissionamento, antes da automação, ou então realizar uma automatização que tenha um modo manual completo de operar a gerador síncrono.

A figura 3.10 mostra o gráfico da tensão de armadura, velocidade do rotor, corrente de armadura e corrente de campo do gerador síncrono no momento da rejeição de carga capacitiva (tensão cai após a rejeição de carga). Observe que no momento da rejeição de carga a tensão de armadura começa a decair juntamente com a velocidade do rotor, pois a turbina que impulsiona o conjunto é “desligada” no mesmo momento da rejeição, por esse motivo, deve-se dividir o valor da tensão pelo valor da velocidade em p.u para manter a relação de transformação de tensão do gerador. A corrente de armadura no momento da rejeição vai a zero e a corrente de campo também tem o seu transitório de amortecimento.



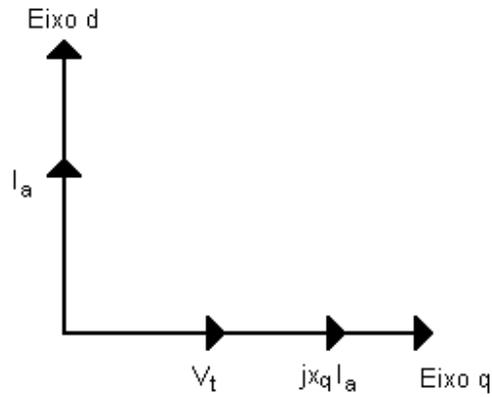
**Figura 3. 10 Grandezas monitoradas durante a rejeição de carga capacitiva**

Para a determinação dos vários parâmetros do gerador síncrono, é necessário realizar pelo menos dois de três ensaios de rejeição de carga que são: a) ensaio de rejeição de carga de eixo direto b) ensaio de rejeição de carga de eixo em quadratura; c) ensaio de rejeição de carga em eixo arbitrário.

### III.8.1 Ensaio de rejeição de carga de eixo direto

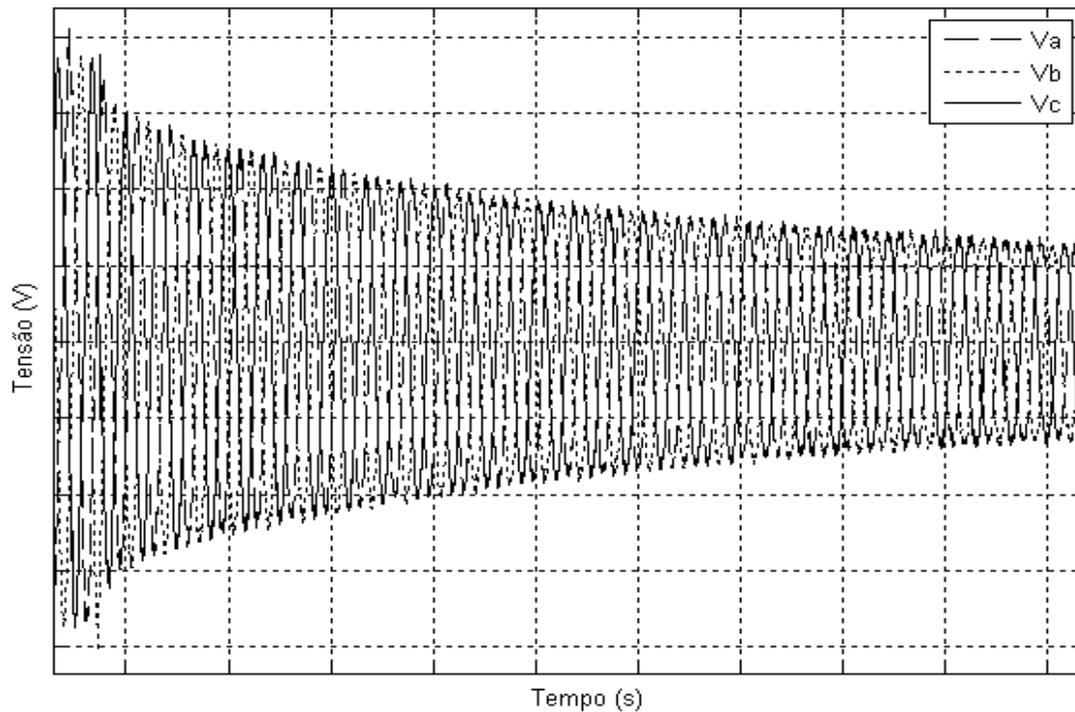
Para realização desse ensaio, é necessário que o gerador síncrono esteja operando com fator de potência nulo podendo este ser capacitivo ou indutivo, ou seja com a corrente de armadura adiantada em relação à tensão de armadura de noventa graus (capacitivo) ou atrasada de noventa graus (indutivo). Deste modo, no gerador síncrono haverá somente corrente de armadura no eixo direto e, conseqüentemente somente fluxo de armadura no eixo direto, como mostrado na figura 3.11.

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

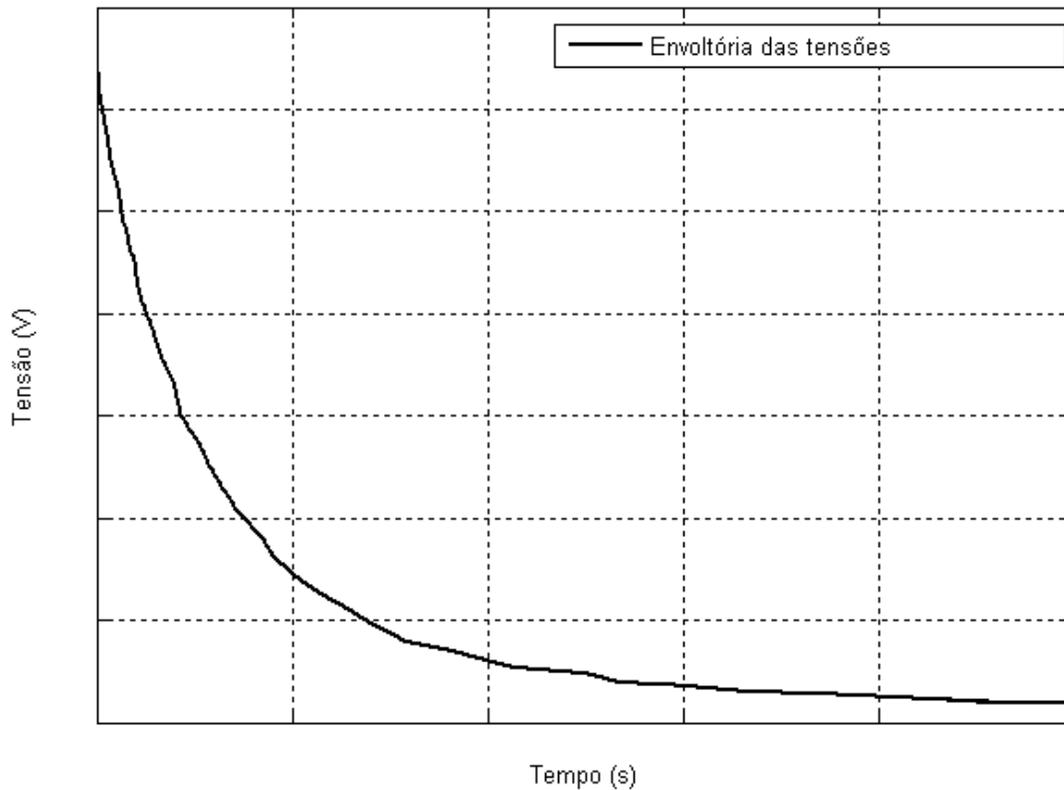


**Figura 3. 11 Diagrama vetorial no ensaio de rejeição de carga de eixo direto**

Durante o ensaio devem ser adquiridas as formas de onda das tensões na carga. A forma de onda das tensões para o ensaio de rejeição de carga no eixo direto com carga capacitiva é representada na figura 3.12, deve-se construir as envoltórias das curvas das tensões e traçar a curva da média aritmética entre essas três tensões como mostrado na figura 3.13. Os valores das correntes elétricas de armadura no momento anterior à abertura do disjuntor e da velocidade do rotor devem ser adquiridos também.



**Figura 3. 12 Rejeição de carga capacitiva de eixo direto**



**Figura 3. 13 Média dos picos de tensões envoltórias do ensaio de rejeição de carga de eixo direto**

Após traçar a média das envoltórias deve-se identificar os regimes permanente, transitório e subtransitório da curva de rejeição. O regime permanente é a projeção da curva quando a tensão se estabiliza após a rejeição, lembrando que o valor de tensão deve ser dividido pelo valor da velocidade do rotor em p.u.

Para o regime subtransitório deve-se fazer a extrapolação do início da curva de rejeição até ela atingir o eixo das ordenadas, onde se marca o ponto  $e''_a$  e então encontrar o valor de  $A$ , que é a diferença entre a tensão anterior à rejeição de carga ( $e_a$ ) e o ponto  $e''_a$ . Para o regime transitório deve-se desprezar os primeiros ciclos da rejeição de carga e traçar uma tendência até esta cruzar o eixo das ordenadas, encontrando o ponto  $e'_a$ , e fazer a diferença de tensão com o ponto  $e_a$ , encontrando assim o valor de  $B$ . O valor de  $C$  é a diferença entre a tensão anterior à rejeição  $e_a$  e o valor de tensão de regime permanente  $e_a(\infty)$ .

Deve-se observar aqui que, no caso do ensaio de rejeição de carga não é possível aproximar a envoltória por uma soma das exponenciais dos regimes transitório e

subtransitório com o regime permanente como é no caso do curto circuito. Kamwa e outros em 2008 [10] publicaram um artigo onde obtém uma aproximação matemática para a curva de rejeição de carga porém ela não se aplica aqui.

Como mostrado em [6] é possível determinar os valores de  $x_d$ ,  $x_d'$  e  $x_d''$  com as expressões (3.16) a (3.18)

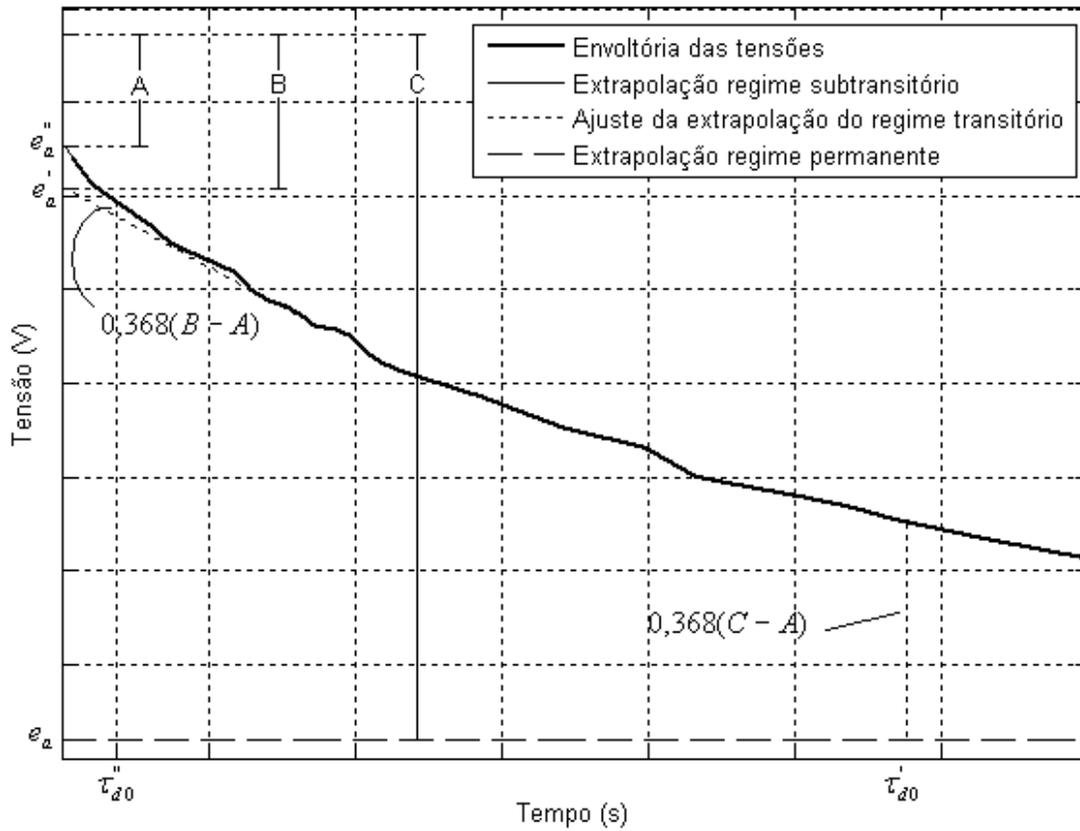
$$x_d = \frac{C}{i_{sd0}} \quad (0.121)$$

$$x_d' = \frac{B}{i_{sd0}} \quad (0.122)$$

$$x_d'' = \frac{A}{i_{sd0}} \quad (0.123)$$

Nessas expressões  $i_{sd0}$  é a corrente medida no momento da rejeição de carga e os valores de  $A$ ,  $B$  e  $C$  são também mostrados na figura 3.14.

Para identificação das constantes de tempo  $\tau_{d0}'$  e  $\tau_{d0}''$ , deve-se utilizar do método gráfico em que o instante em que o espaçamento entre a curva média das tensões e a extrapolação do regime transitório tem o valor de  $0,368(B - A)$ , obtém-se o valor de  $\tau_{d0}''$ , e o instante em que o espaçamento entre a curva média das tensões e a extrapolação do regime permanente tem o valor de  $0,368(C - A)$ , obtém-se o valor de  $\tau_{d0}'$ .



**Figura 3. 14 Regime permanente, transitório, subtransitário e constantes de tempo da rejeição de carga de eixo direto**

As seguintes expressões aproximadas permitem obter as constantes de tempo de curto circuito a partir das constantes de tempo de circuito aberto e até fazer uma relação entre os parâmetros obtidos nos ensaios de curto circuito e ensaio de rejeição de carga.

$$\tau_d' = \frac{X_d'}{X_d} \tau_{d0}' \quad (0.124)$$

$$\tau_d'' = \frac{X_d''}{X_d'} \tau_{d0}'' \quad (0.125)$$

### III.8.2 Ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário

Para realização do ensaio de rejeição de carga em eixo arbitrário, deve-se desconectar a carga do gerador síncrono subitamente quando sua corrente de armadura tiver componentes de eixo direto e eixo em quadratura. O ensaio de rejeição de eixo em quadratura exige que gerador síncrono esteja em condição de carga tal que o ângulo de carga  $\delta$  seja igual ao ângulo da corrente elétrica, condição essa difícil de se conseguir. Por essa razão a rejeição de carga de eixo q não é utilizada.

Na rejeição de carga de eixo arbitrário a tensão terminal de armadura e o ângulo de carga  $\delta$  devem ser monitorados (ou calculado para o caso do ângulo) no momento anterior à rejeição da carga para que se possa separar as componentes de eixo direto e eixo em quadratura da tensão terminal de armadura e das correntes elétricas de armadura ( $e_a \sin \delta$ ,  $e_a \cos \delta$ ,  $i_{sdo}$ ,  $i_{sq0}$ ). Na figura 3.15, observa-se a forma de onda das tensões Va, Vb e Vc no momento da rejeição e o seu decaimento ao longo do tempo.

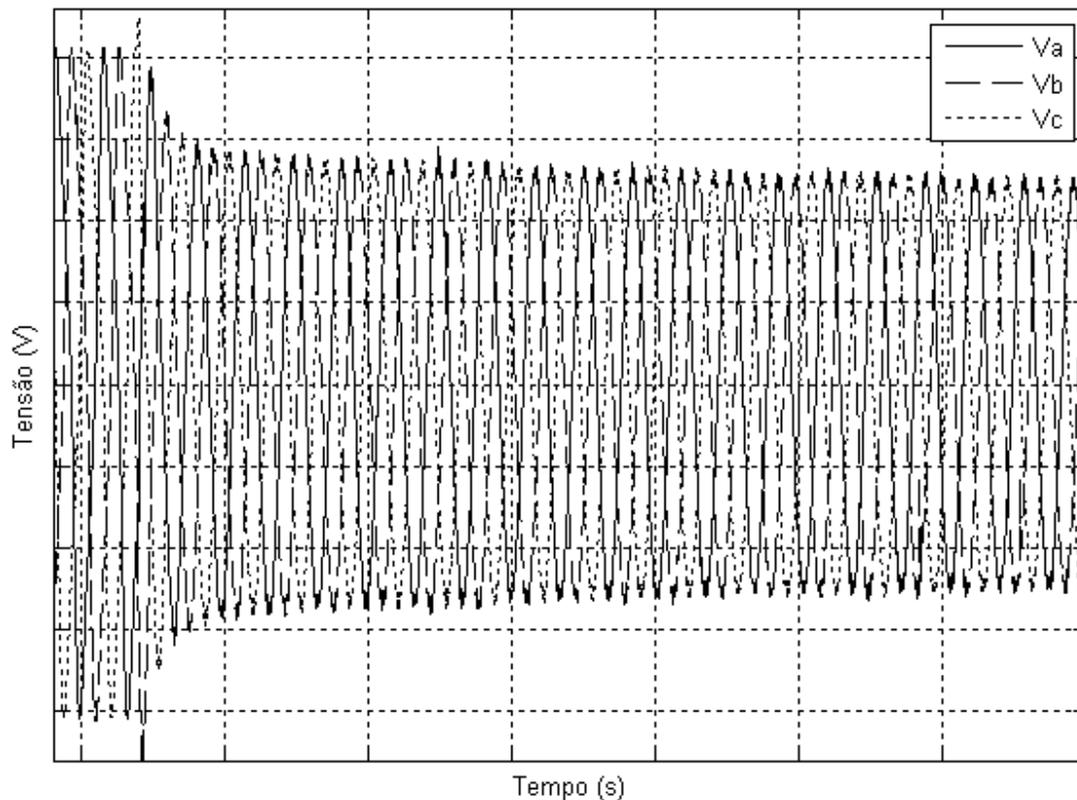
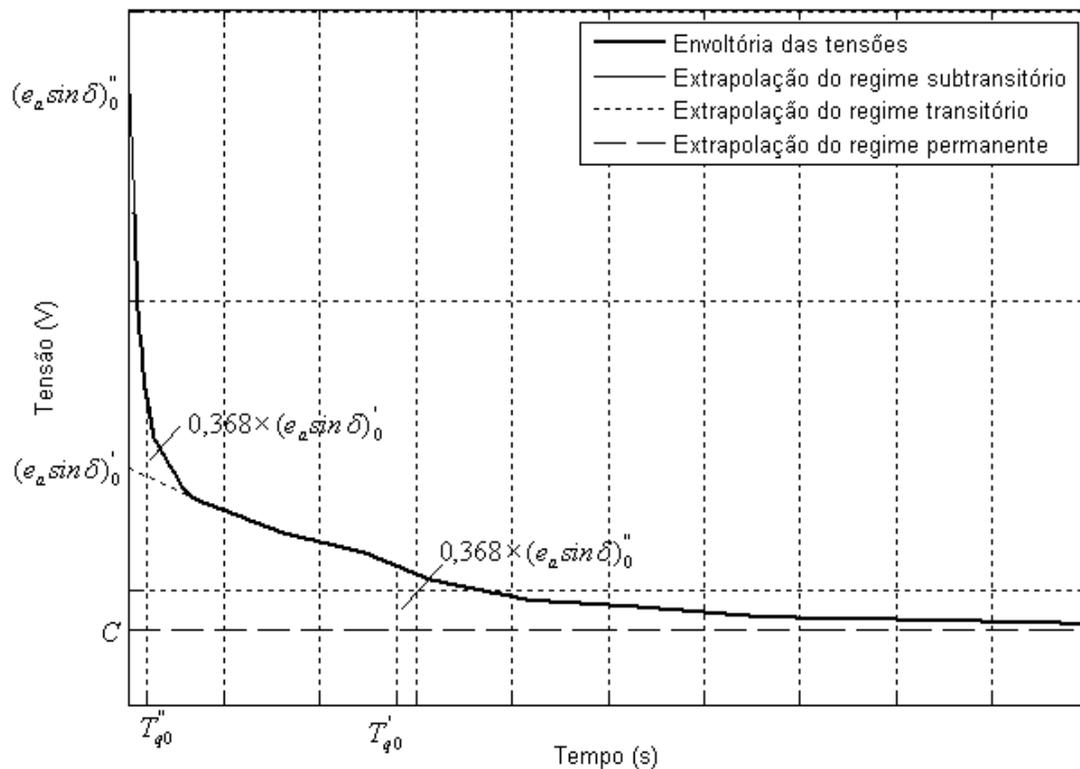


Figura 3. 15 Tensões Va, Vb, e Vc do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário

A partir dos pontos de tensão adquiridos traça-se a envoltória dos picos das tensões interpolando esses pontos. Em seguida, traça-se o gráfico dessas tensões em escala logarítmica no eixo das ordenadas (figura 3.16) e se extrapola os regimes subtransitório (início da curva), transitório e permanente para obter os valores de  $e_a \sin \delta''$  e  $e_a \sin \delta'$ . O regime transitório para esse ensaio é de fácil identificação, pois a curva tem comportamento de exponenciais sobrepostas.

Após se encontrar os valores de  $e_a \sin \delta''$  e  $e_a \sin \delta'$  e o ponto C, que é o valor do regime permanente, estima-se o valor das constantes de tempo  $T_{q0}''$  e  $T_{q0}'$  encontrando o momento em que a variação de tensão entre as extrapolações tem o valor de  $0,368 \times \Delta e_a$  de acordo com a figura 3.16.



**Figura 3. 16 Extrapolação dos regimes subtransitório, transitório, permanente e constantes de tempo do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário**

No ensaio de rejeição de eixo arbitrário, os parâmetros de eixo em quadratura obtidos devem ser interpretados de maneira diferenciada quando se trata do estudo de uma gerador síncrono de polos salientes, pois esse tipo de gerador síncrono é representado por somente

um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura, então, só se consegue calcular a reatância  $X_d'$ , que será considerada como  $X_d''$ .

Para o gerador síncrono de polos lisos calcula-se os parâmetros normalmente.

O cálculo das reatâncias de eixo em quadratura no ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário se dá pelas expressões:

$$X_q = e_a \sin \delta / i_{sq0} \quad (0.126)$$

$$X_q' = X_q - (e_a \sin \delta)'_0 / i_{sq0} \quad (0.127)$$

$$X_q'' = X_q' - (e_a \sin \delta)''_0 / i_{sq0} \quad (0.128)$$

Onde:  $i_{sq0} = I_a \cos(\theta - \delta)$  e  $e_a$  é a tensão de armadura no momento anterior à rejeição.

Através da expressão 3.24 calcula-se o ângulo  $\delta$  que é o ângulo de  $\dot{E}_a$ :

$$\dot{E}_a = \dot{V} + (R_s + jX_q) \dot{I}_a \quad (0.129)$$

As constantes de tempo de circuito aberto podem ser calculadas através da curva de rejeição de carga da figura 3.16 como lá se vê.

### III.9. Ensaio de resposta em frequência

A finalidade deste ensaio é a de, a partir das curvas de resposta em frequência do gerador síncrono parado (totalmente desligado da carga e sem acionamento mecânico), obter as curvas de amplitude e de fase de resposta em frequência para diversas situações de conexões do estator e do campo do gerador. Com essas curvas, usando um processo de ajuste de curvas, determinam-se as constantes de tempo transitórias e subtransitórias de eixo direto e de eixo em quadratura em circuito aberto e em curto circuito. Para a obtenção de curvas de resposta em frequência de eixos direto (d) e em quadratura (q) é necessário produzir-se o fluxo magnético no entreferro alinhado ora com o eixo d, ora com o eixo q.

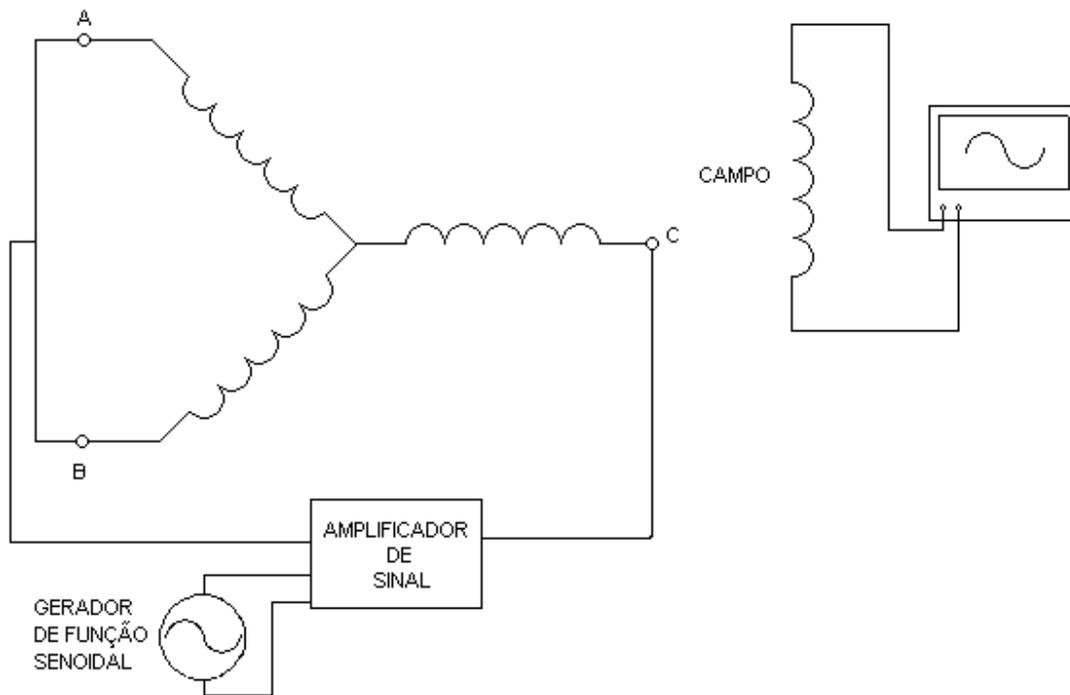
Para realização desses ensaios é necessário dispor-se de um gerador de frequência, de um amplificador, um sistema de aquisição de dados, acesso total aos terminais de fases e de campo junto ao gerador e possibilidades de rodar o rotor vagarosamente para a procura das posições de eixo d e de eixo q.

Neste ensaio obtém-se as seguintes curvas de resposta em frequência:

#### III.9.1. Impedância operacional de eixo direto

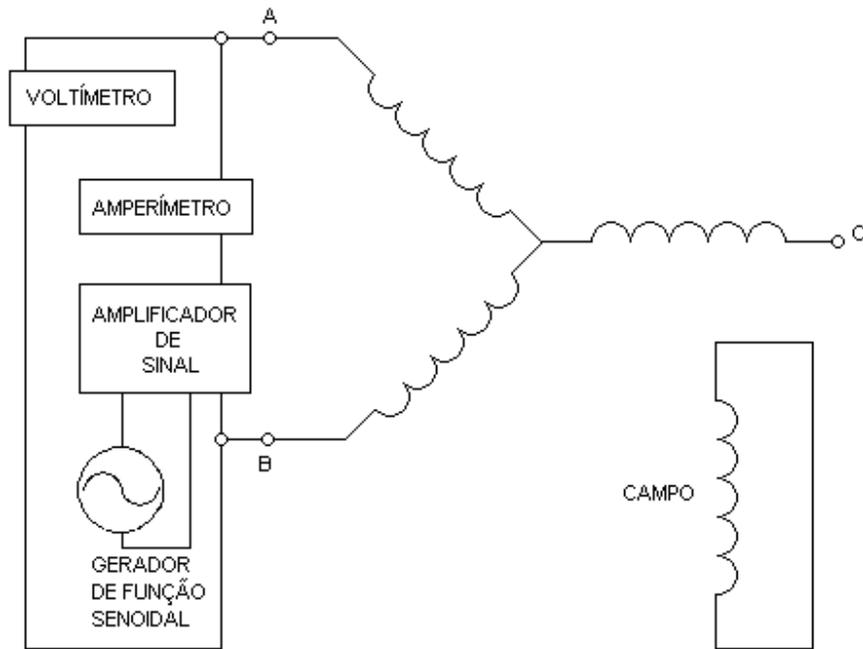
$$Z_d(s) = - \left. \frac{V_d(s)}{I_d(s)} \right|_{V_f=0} \quad (0.130)$$

Para obter a função de transferência  $Z_d(s)$  o gerador deverá estar com o rotor na posição de eixo direto. Para colocar o rotor alinhado com o eixo direto, deve-se fazer a ligação dos enrolamentos de estator de acordo com a figura 3.17, aplicando uma tensão senoidal variando de 0 Hz até cerca de 200Hz nos terminais entre a fase AB e C [2]. O circuito de campo deve permanecer em aberto e a tensão nele induzida deve ser adquirida ou lida com um osciloscópio. O rotor deve ser girado lentamente até que a tensão induzida no circuito de campo seja nula.



**Figura 3. 17 Ligações dos terminais de estator para o posicionamento do rotor para alinhamento com o eixo direto**

Aplica-se tensão senoidal de frequência variável de  $1 \times 10^{-3}$  até cerca de 200 Hz, usando um gerador de sinais juntamente com um amplificador de sinal, ao estator do gerador, ligado conforme mostrado no esquema da figura 3.18. O enrolamento de campo deve estar curto circuitado.



**Figura 3. 18** Esquema de ligação para ensaio de resposta em frequência de eixo d

Usando a equação (3.25) pode-se obter a indutância operacional  $L_d(s)$  como se vê em (3.26).

$$L_d(s) = \frac{1}{s} (Z_d(s) - r_s) \quad (0.131)$$

$$Z_d(j\omega) = r_s + j\omega L_d(j\omega) = r_s + jX_d(j\omega) \quad (0.132)$$

$$X_d(j\omega) = \frac{Z_d(j\omega) - r_s}{j} \quad (0.133)$$

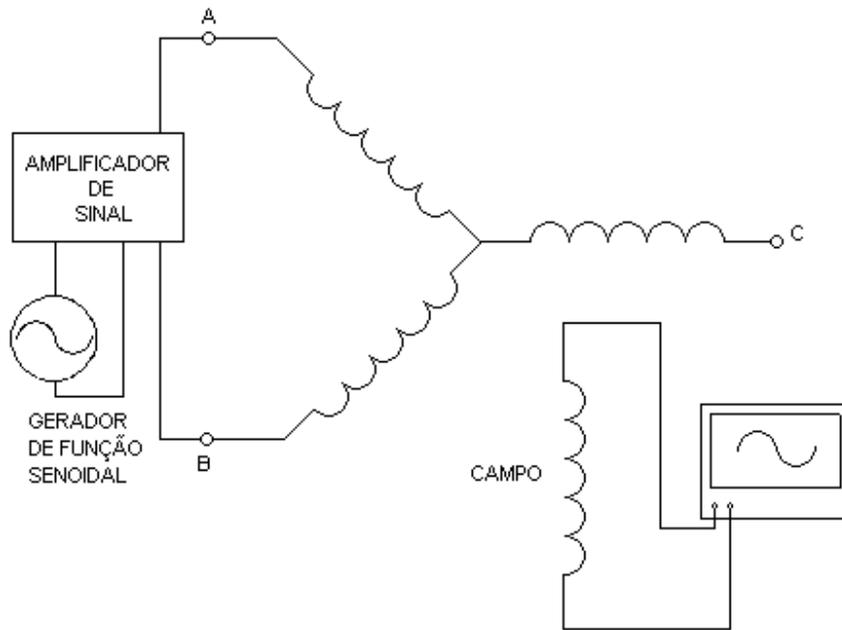
A resistência elétrica de estator  $r_s$  não depende da frequência e é a resistência elétrica por fase do enrolamento de estator e vale  $Z_d(j0)$ .

### III.9.2. Impedância operacional de eixo em quadratura

$$Z_q(s) = - \left. \frac{V_q(s)}{Iq(s)} \right|_{V_f=0} = r_s + sL_q(s) \quad (0.134)$$

Para obter essa função de transferência o gerador deverá estar com o rotor na posição de eixo em quadratura. Para colocar o rotor alinhado com o eixo em quadratura deve-se

fazer a ligação dos enrolamentos de estator de acordo com a figura 3.19 aplicando uma tensão senoidal de aproximadamente 100 Hz nos terminais entre as fases A e B [2]. O circuito de campo deve permanecer em aberto e a tensão nele induzida deve ser adquirida ou lida com um osciloscópio. O rotor deve ser girado lentamente até que a tensão induzida no circuito de campo seja nula.



**Figura 3. 19** Ligações dos terminais de estator para o posicionamento do rotor para alinhamento com o eixo em quadratura

Aplica-se tensão senoidal de frequência variável de  $1 \times 10^{-3}$  a cerca de 200 Hz usando um gerador de sinais juntamente com um amplificador de sinal ao estator do gerador ligado conforme mostrado no esquema da figura 3.19. O enrolamento de campo deverá estar curto circuitado.

Usando a equação (3.29) pode-se obter a indutância operacional  $L_q(s)$  como se vê em (3.30):

$$L_q(s) = \frac{1}{s} (Z_q(s) - r_s) \quad (0.135)$$

### III.9.3. Função $sG(s)$

$$sG(s) = \left. \frac{I_{fd}(s)}{I_d(s)} \right|_{V_f=0} \quad (0.136)$$

As curvas de resposta em frequência  $sG(s)$  devem ser construídas juntamente com a curva de impedância de eixo direto. Resultado equivalente obtém-se construindo a curva da função  $G(s)$ . Essa curva pode ser obtida juntamente com a curva do item III.9.1. Para isso é necessário adquirir além de tensão e corrente de enrolamento de estator, também a corrente de campo variando-se a frequência do gerador de sinais de 0,001 Hz até cerca de 200 Hz.

A norma [2] prevê também a obtenção de outras funções de transferência em relação ao campo do gerador síncrono, porém essas funções não serão objeto deste trabalho.

No capítulo IV são mostrados os espectros de  $X_d(j\omega)$  e de  $X_q(j\omega)$  obtidos em ensaio realizado no Laboratório de Máquinas Elétricas.

# Capítulo IV

## Ensaio realizados em laboratório

### IV.1. Introdução

Foram realizados diversos ensaios no Laboratório de Máquinas Elétricas da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP usando um grupo motor-gerador didático fabricado pela empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda, composto por uma máquina de corrente contínua de 2 kW, 220V, 1800 rpm, um gerador síncrono de 2 kVA, 230 V, 60 Hz, 4 polos, conversores eletrônicos para controle da máquina de corrente contínua e para excitação do gerador.

A máquina de corrente contínua foi usada como motor para acionar mecanicamente o gerador como se fosse uma turbina. Através do controle da tensão de armadura e da tensão de campo dessa máquina, foi possível produzir o torque necessário para acionar o gerador síncrono nas diversas condições desejadas, controlando a sua velocidade ou conectando-o em paralelo com a rede elétrica, conforme necessário.

A tensão terminal do gerador síncrono, quando necessário, foi controlada através do sistema de excitação.

Foram realizados os seguintes ensaios: ensaios para a determinação da reatância síncrona de eixo direto, ensaio de escorregamento, ensaio de máxima corrente indutiva, ensaio para determinação da reatância de Potier ( $X_p$ ), ensaio para determinação das reatâncias transitória e subtransitória de eixo direto  $X'_d$  e  $X''_d$  através da abertura da corrente de curto circuito permanente nos terminais de armadura do gerador síncrono, ensaio de curto circuito trifásico brusco dos terminais de enrolamentos de armadura, ensaios de rejeição de carga (de eixo direto e de eixo arbitrário) e ensaio de resposta em frequência. Esses ensaios são a seguir descritos e os seus resultados são também mostrados.

É importante mencionar que todos os dados referentes aos ensaios realizados e aos gráficos apresentados a seguir foram obtidos e tratados com um sistema de aquisição de dados fabricado pela empresa Lynx Tecnologia e também com o uso de ferramentas disponíveis no aplicativo computacional Matlab. Entre as ferramentas disponíveis está a

que permite posicionar o cursor sobre pontos dos gráficos em análise para a obtenção dos valores das respectivas abscissas e ordenadas dos referidos pontos.

Essa ferramenta evita a obtenção visual de cada ponto necessário para a realização de cálculos, pela simples observação do gráfico, o que introduz grandes erros nos processos de identificação de parâmetros.

## IV.2. Ensaio para a determinação da reatância síncrona de eixo direto

Para a determinação da reatância síncrona de eixo direto foram realizados os ensaios para obtenção das curvas de características em vazio e em curto circuito do gerador síncrono mencionado no item IV.1, conforme descrito no capítulo III.

A tabela 4.1 mostra os valores de tensões de fase ( $V_a$ ) medidos nos terminais do gerador síncrono no ensaio de circuito aberto, em função da corrente de campo ( $I_f$ ).

Tabela 4.1. Tensões de fase de ensaio de circuito aberto

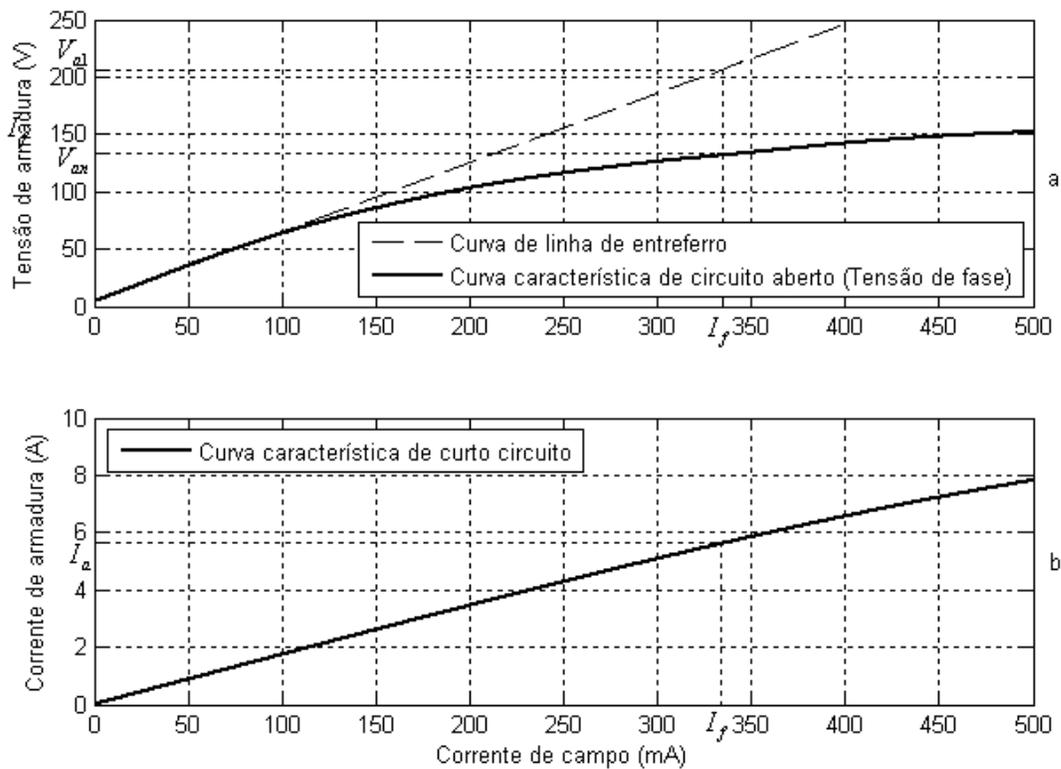
$V_a(V)$	4,5	19,6	35,4	50,1	63,5	85,4	103	116	126	134	142	148	152
$I_f(mA)$	0	25	50	75	100	150	200	250	300	350	400	450	500

A tabela 4.2 mostra os valores de corrente elétrica nos enrolamentos de armadura ( $I_a$ ) obtidos no ensaio de curto circuito, em função da corrente de campo ( $I_f$ ).

Tabela 4.2. Correntes de fase de ensaio de curto circuito

$I_a(A)$	0	1,74	3,45	5,08	6,56
$I_f(mA)$	0	100	200	300	400

Com os valores das tabelas 4.1 e 4.2 traçou-se os gráficos que mostram as curvas características de circuito aberto ( $V_a \times I_f$ ) e de curto circuito ( $I_a \times I_f$ ).



**Figura 4. 1 Ensaios de circuito aberto e curto circuito**

A partir dos gráficos, os valores das reatâncias síncronas de eixo direto saturada ( $X_{ds}$ ) e não saturada ( $X_{dns}$ ) do gerador síncrono ensaiado são obtidos.

$$X_{ds} = \frac{V_{a2}}{I_a} = \frac{132}{5,6} = 23,57\Omega$$

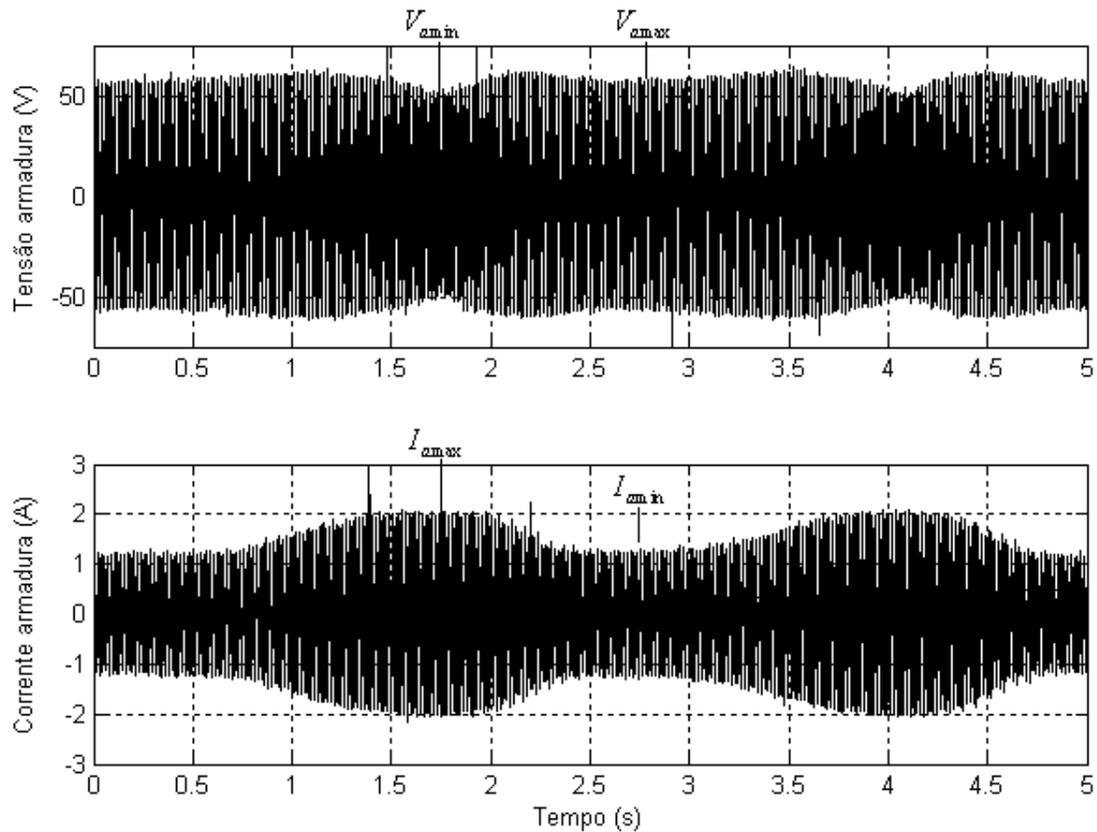
$$X_{dns} = X_d = \frac{V_{a1}}{I_a} = \frac{208}{5,6} = 37,14\Omega$$

### IV.3. Ensaio de escorregamento

No ensaio de escorregamento foram determinadas as reatâncias não saturadas de eixo direto e de eixo em quadratura.

Para esse ensaio utilizou-se uma tensão de fase eficaz média próxima de 40 volts para evitar a saturação do gerador e, também pelo fato do gerador síncrono tender a atingir o sincronismo com tensões maiores, uma vez que, nesse ensaio a velocidade do rotor deve permanecer inferior à velocidade síncrona (escorregamento) durante todo o ensaio.

Os gráficos de tensão e de corrente de enrolamento de armadura em função do tempo, obtidos no ensaio de escorregamento, são mostrados na figura 4.2.



**Figura 4. 2** Curvas de tensão e corrente de armadura obtidas no ensaio de escorregamento

Para a reatância de eixo direto  $X_{dns}$  obtém-se:

$$V_{a \max} = 56,13V$$

$$I_{a \min} = 1,3A$$

$$X_{dns} = \frac{V_{a \max}}{I_{a \min}} = \frac{56,13}{1,3} = 43,17\Omega$$

Para a reatância de eixo em quadratura  $X_{qns}$  obtém-se:

$$V_{a \min} = 43,62V$$

$$I_{a \max} = 2,122A$$

$$X_{qns} = \frac{V_{a \min}}{I_{a \max}} = \frac{43,62}{2,122} = 20,56\Omega$$

#### IV.4. Ensaio de máxima corrente indutiva

O ensaio de máxima corrente indutiva pode ser realizado usando-se apenas voltímetro e amperímetro, porém, para maior precisão, ele foi aqui realizado com um sistema de aquisição de dados obtendo-se as formas de onda da tensão e da corrente de enrolamento de armadura (figura 4.3). O gerador síncrono foi acionado como motor em sua tensão nominal, a corrente de excitação (de campo) foi diminuída, invertida e aumentada novamente.

Quando a corrente de armadura atingiu o seu valor máximo ( $I_{max}$ ), o valor da tensão ( $V$ ) é obtido. Obteve-se os resultados vistos na figura 4.3.

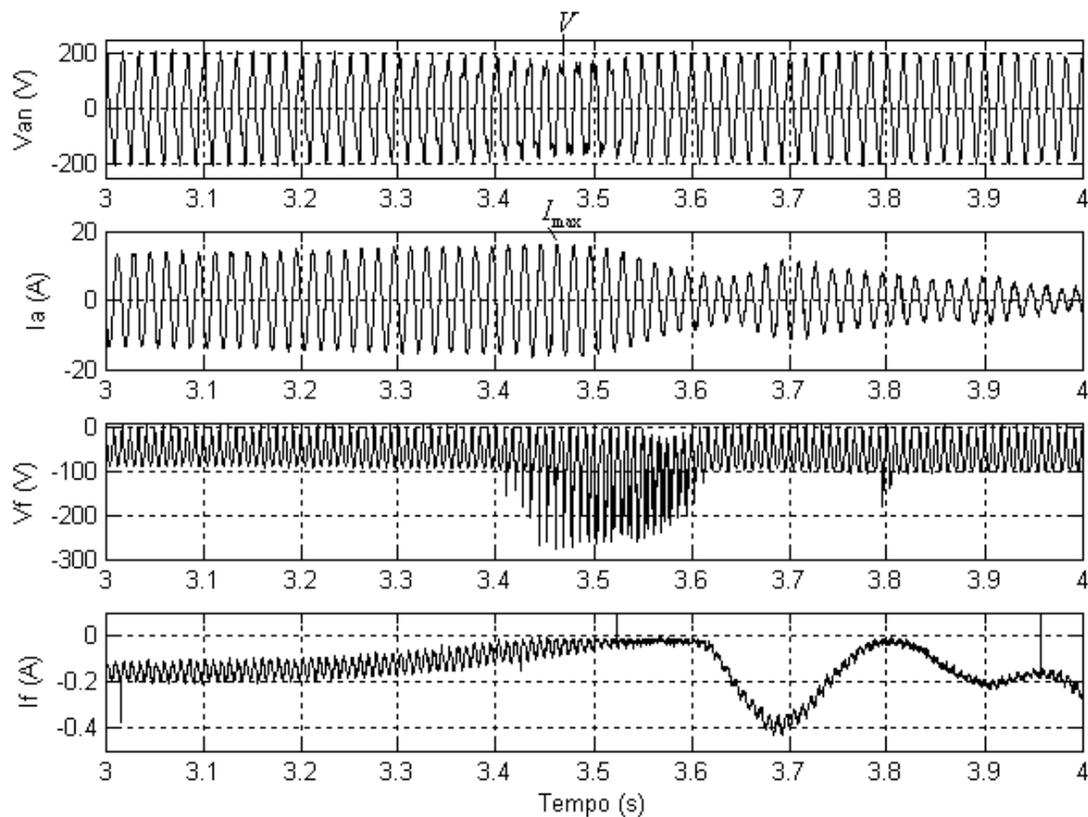


Figura 4. 3 Tensão e corrente elétrica de enrolamento de armadura obtidos no ensaio de máxima corrente indutiva

O valor de  $X_q$  é calculado por:

$$X_q = \frac{V}{I_{máx}} = \frac{176,4}{15,93} = 11,07\Omega$$

#### IV.5. Determinação da reatância de Potier ( $X_{potier}$ )

Para a realização do ensaio de Potier foi utilizada como carga do gerador síncrono um motor de indução funcionando em vazio, que apresenta o comportamento de uma carga fortemente indutiva (fator de potência muito baixo, da ordem de 0,2). Foram construídas as curvas de magnetização em vazio e a curva característica de curto circuito do gerador síncrono. No laboratório, para o gerador operando com carga indutiva obteve-se  $I_a = 4,05$  A (o valor nominal da corrente de armadura é de 5,0 A),  $V_a = 115$  V,  $I_f = 500$  mA.

Marcou-se o ponto  $R$  no gráfico ( $I_f$ ,  $V_a$ ) das curvas características em vazio e em curto circuito. O par ( $I_f$ ,  $V_a$ ) acima corresponde a uma corrente de armadura  $I_a = 4,05$  A, com fator de potência quase nulo (carga bastante indutiva). O ponto  $C$ , na curva de corrente de curto circuito, foi definido pela corrente de armadura  $I_a = 4,05$  A e corresponde a uma corrente de campo  $I_f = 245$  mA que corresponde o ponto  $R'$  no eixo das abscissas. Pelo ponto  $R$  traçou-se uma reta paralela ao eixo das abscissas e marcou-se o ponto  $S$  de tal modo que  $\overline{RS} = \overline{\Omega 0}$  [9].

Pelo ponto  $S$  traça-se uma paralela à parte reta da curva de magnetização (reta de entreferro) obtendo-se os pontos  $P$  e  $Q$ . Define-se o triângulo de Potier ( $PQR$ ). Para obter a curva de carga correspondente à corrente de armadura  $I_a = 4,05$  A desloca-se o triângulo de Potier mantendo o vértice  $P$  sobre a curva de magnetização em vazio e os lados paralelos aos lados do triângulo  $P'Q'R'$ .

O valor da reatância de Potier  $X_p$  é obtido pelo quociente entre o comprimento do segmento  $PQ$  e a corrente de armadura usada para construir a curva de carga. A reatância de Potier é um pouco maior do que a reatância de dispersão dos enrolamentos de armadura ( $X_{ls}$ ), porém é uma aproximação dela.

$$X_{Potier} = \frac{\overline{PQ}}{I_a} = \frac{12,2}{4,05} = 3,01\Omega$$

Como a reatância de dispersão dos enrolamentos de armadura pode chegar a ser 20% menor do que a reatância de Potier admite-se neste trabalho o valor:

$$X_{ls} = 2,7\Omega$$

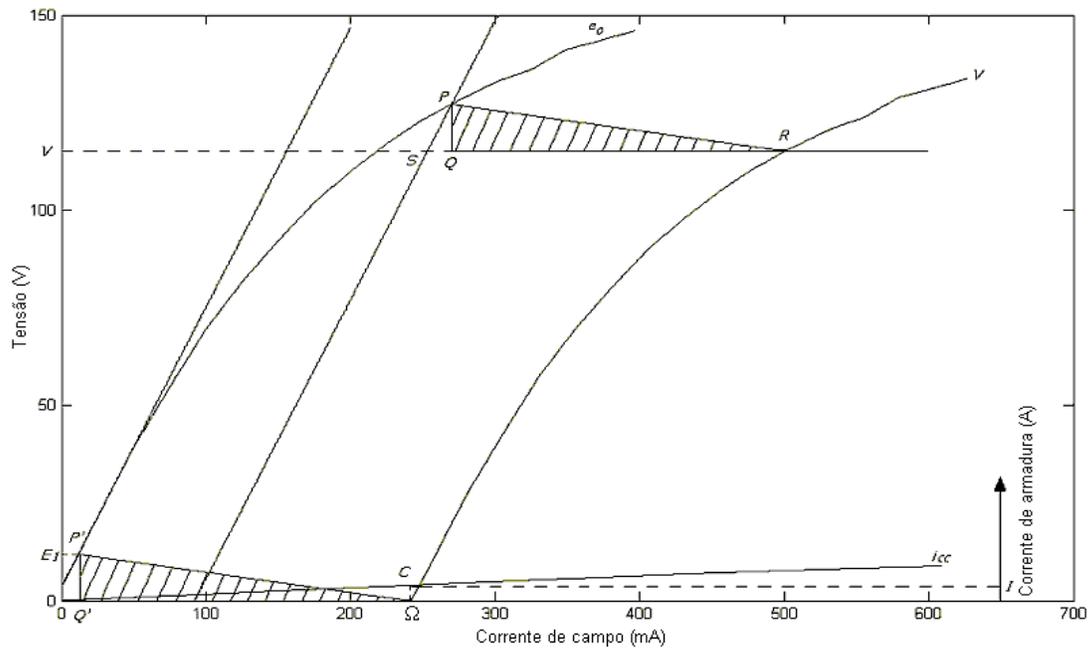
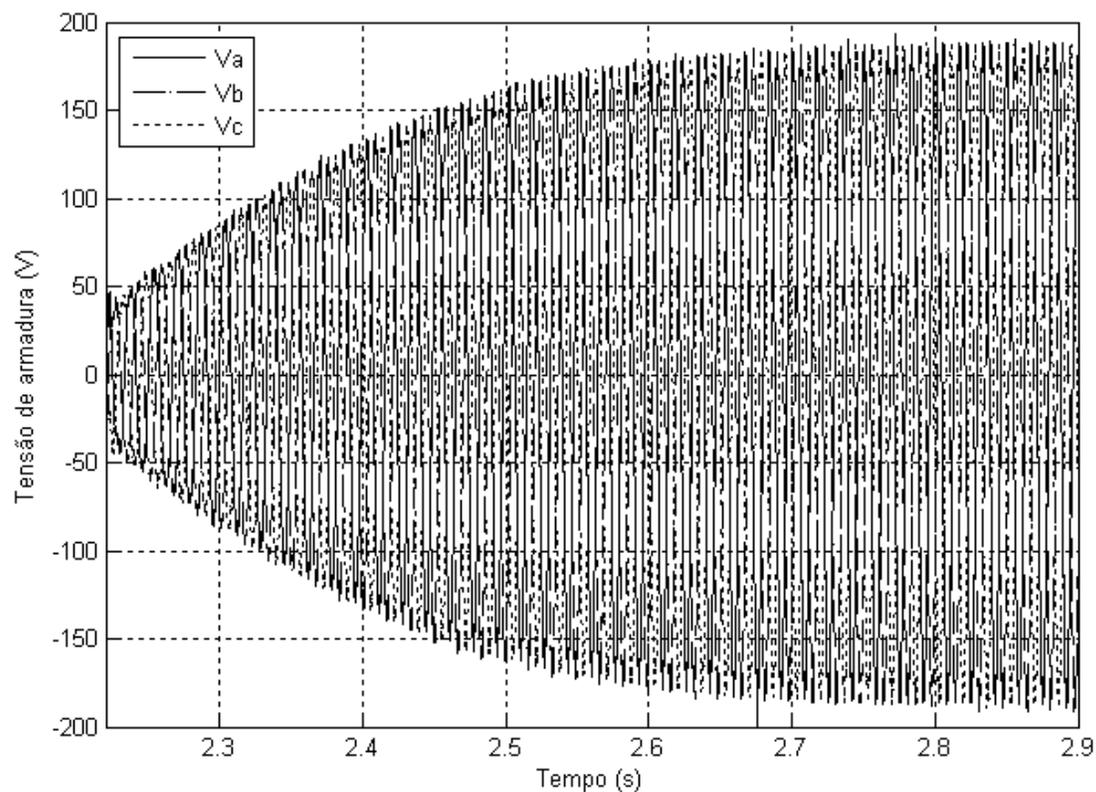


Figura 4. 4 Curvas para a obtenção da reatância de Potier

#### IV.6. Ensaio para determinação de $X'd$ e $X''d$ pela abertura da corrente de curto circuito de regime permanente dos terminais de enrolamentos de armadura.

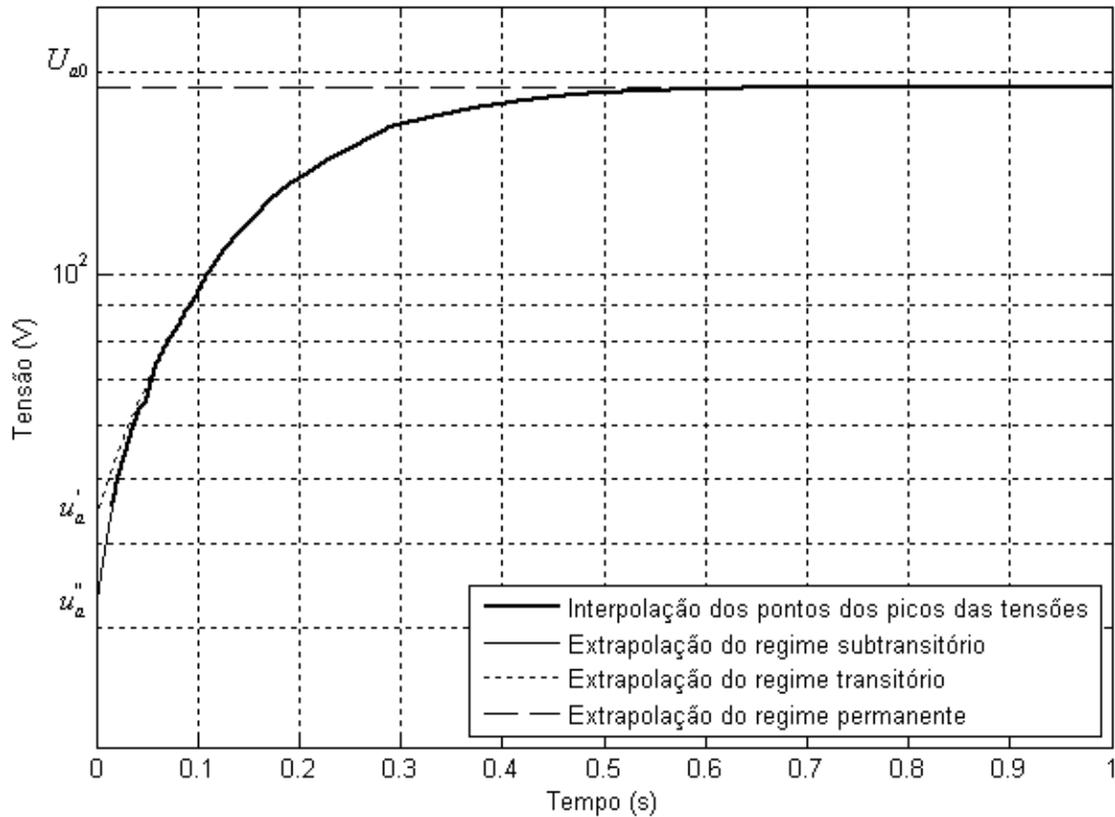
O ensaio abertura da corrente de curto circuito de regime permanente dos terminais de enrolamentos de armadura é realizado acionando-se o gerador síncrono à velocidade nominal com seus terminais de armadura curto circuitados como mostra a figura 4.5. No laboratório aplicou-se corrente de campo suficiente para manter a tensão de armadura em valor nominal quando os terminais dos enrolamentos de armadura foram abertos. Para o gerador em estudo a corrente de campo utilizada foi  $I_f = 330 \text{ mA}$  para uma tensão eficaz de armadura de  $V_a = 132 \text{ V}$ .

A figura 4.5 mostra a curva das tensões de armadura obtidas neste ensaio no momento da abertura das chaves que mantinham o curto circuito. Observa-se que a tensão terminal do gerador síncrono saiu do valor zero (de curto circuito) para o valor nominal após a abertura do curto circuito e entrada do sistema em regime permanente.



**Figura 4.5** Curva de tensão do ensaio de abertura de curto circuito de regime permanente

Através dessa figura, pode-se traçar uma envoltória ligando os pontos dos picos das tensões de armadura de acordo com a figura 4.6. Essa figura apresenta a interpolação desses pontos e a extrapolação dos regimes subtransitório, transitório e permanente dessa curva em escala logarítmica no eixo das ordenadas e seus respectivos valores.



**Figura 4. 6 Envoltória e extrapolações do ensaio de abertura de curto circuito**

Como visto no capítulo III, essa curva pode ser aproximada por três outras curvas: uma constante que corresponde ao regime permanente, outra exponencial sobre o regime permanente (transitório) e uma terceira exponencial sobre a exponencial anterior (subtransitório).

Os valores das extrapolações dos regimes seguem abaixo juntamente com os cálculos das impedâncias onde:  $I_{acc}$  é o valor de regime permanente da corrente de curto circuito antes da sua abertura,  $V_{ao}$  é a tensão de regime permanente após a abertura do curto circuito,  $u'_a$  o valor da tensão extrapolado de regime transitório que corresponde à uma primeira tendência exponencial da parte de regime transitória (primeira exponencial), e analogamente para  $u''_a$  em relação ao regime subtransitório.

$$I_{acc} = 7,259 \text{ A}$$

$$u''_a = 32,11 \text{ V}$$

$$u_a' = 43,65 \text{ V}$$

$$V_{a0} = 189,3 \text{ V}$$

Com os valores obtidos no ensaio pode-se determinar as reatâncias síncrona de eixo direto ( $X_d$ ) e as reatâncias transitória ( $X_d'$ ) e subtransitória ( $X_d''$ ) de eixo direto.

$$X_d'' = \frac{u_a''}{I_{acc}} = \frac{32,11}{7,259} = 4,42 \Omega$$

$$X_d' = \frac{u_a'}{I_{acc}} = \frac{43,65}{7,259} = 6,01 \Omega$$

$$X_d = \frac{V_{a0}}{I_{acc}} = \frac{189,3}{7,259} = 26,07 \Omega$$

#### **IV.7. Ensaio de curto circuito trifásico brusco dos terminais de enrolamentos de armadura**

O ensaio de curto circuito brusco foi realizado em dois níveis de tensão de armadura imediatamente antes do fechamento dos terminais, para se observar os efeitos da saturação no cálculo das impedâncias. Primeiramente foi realizado o ensaio de curto circuito brusco com tensão reduzida (40 V eficazes) e, posteriormente, com a tensão de fase nominal do gerador síncrono utilizado (132 volts eficazes).

A figura 4.7 mostra a curva das correntes de curto circuito brusco nos terminais dos enrolamentos de armadura do ensaio com tensão reduzida de 40 V no instante do curto circuito.

A partir dessa curva, traça-se uma envoltória para cada uma das correntes de curto circuito com os pontos dos picos das correntes e interpola-se esses pontos formando três curvas envoltórias. A figura 4.8 mostra esses pontos e a envoltória média traçada. A figura 4.9 mostra a extrapolação dos regimes subtransitório, transitório e permanente.

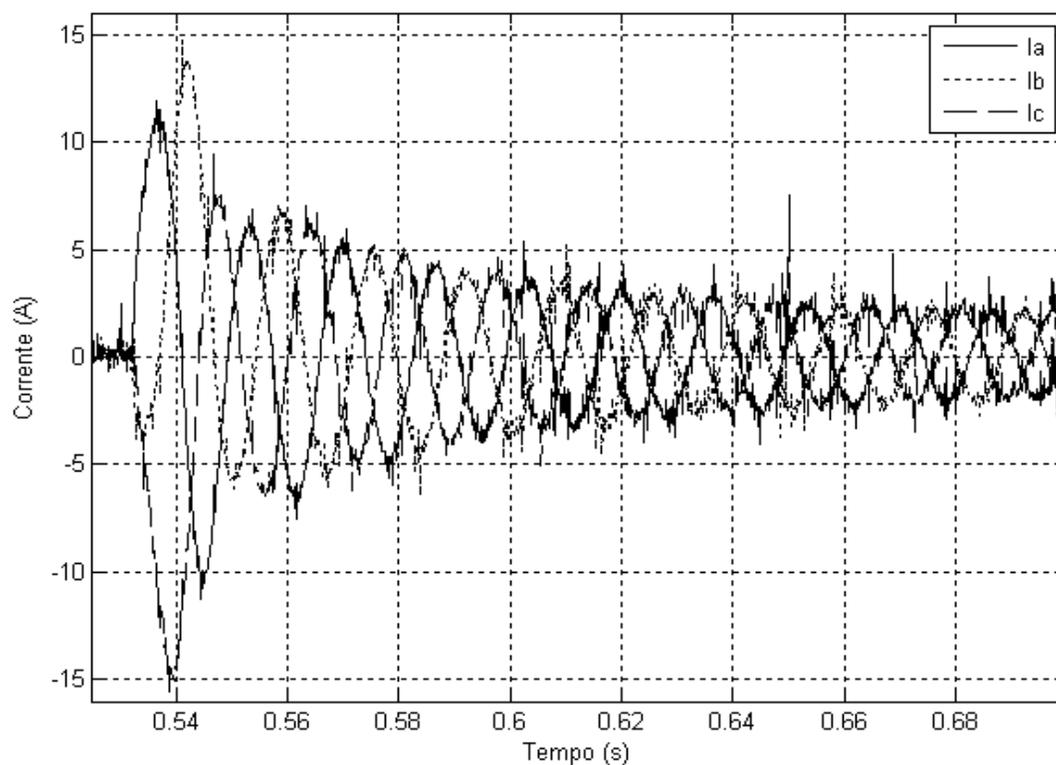


Figura 4.7 Curva de correntes de curto circuito brusco dos enrolamentos de armadura com 40 volts antes do instante de curto circuito

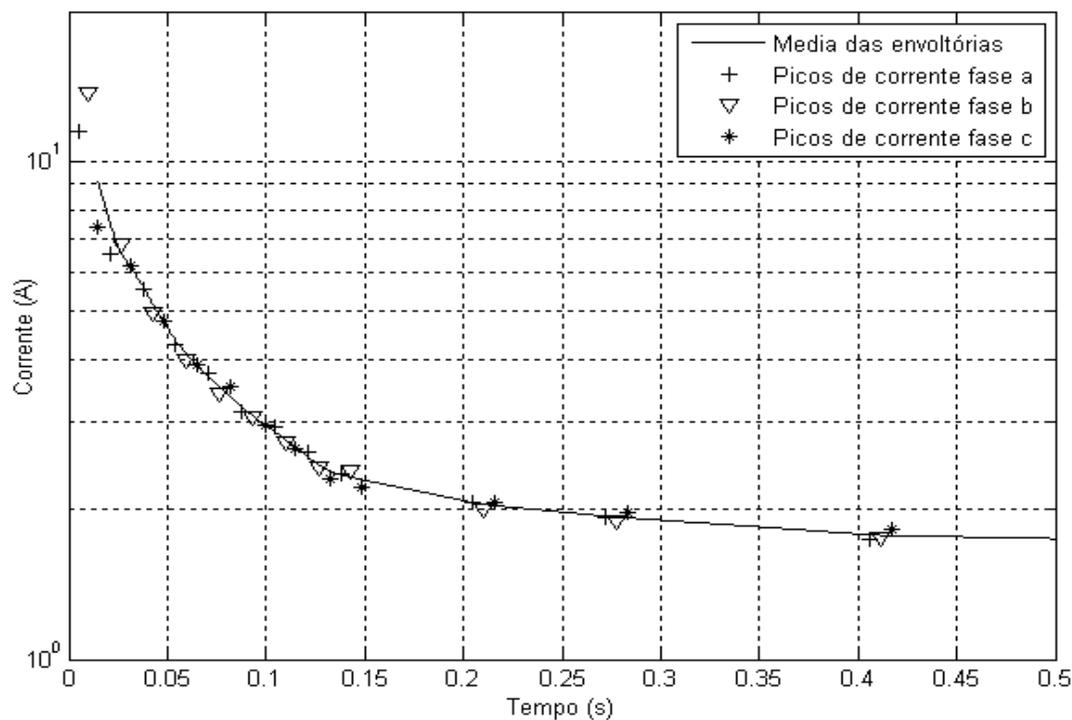
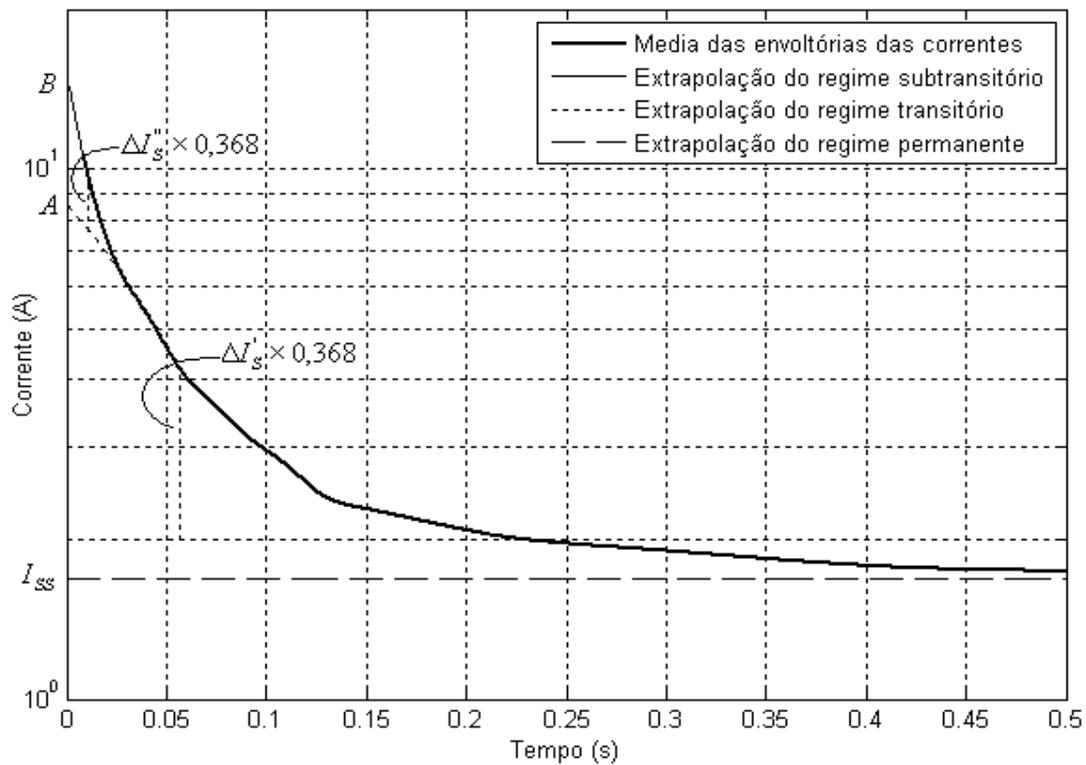


Figura 4.8 Medição e interpolação dos pontos do ensaio de curto circuito brusco



**Figura 4.9 Interpolação e extrapolação dos pontos do ensaio de curto circuito**

Pela análise dos gráficos obtidos para o ensaio de curto circuito com tensão reduzida a 40 V eficazes, os resultados foram os seguintes:

Tensão de armadura antes do curto circuito:  $U = 58,56 \text{ V}$  (valor de pico correspondente a 40 V eficazes)

$$X_d = \frac{U}{I_{ss}} = \frac{58,56}{1,681} = 34,83 \ \Omega$$

$$X'_d = \frac{U}{A} = \frac{58,56}{8,674} = 6,75 \ \Omega$$

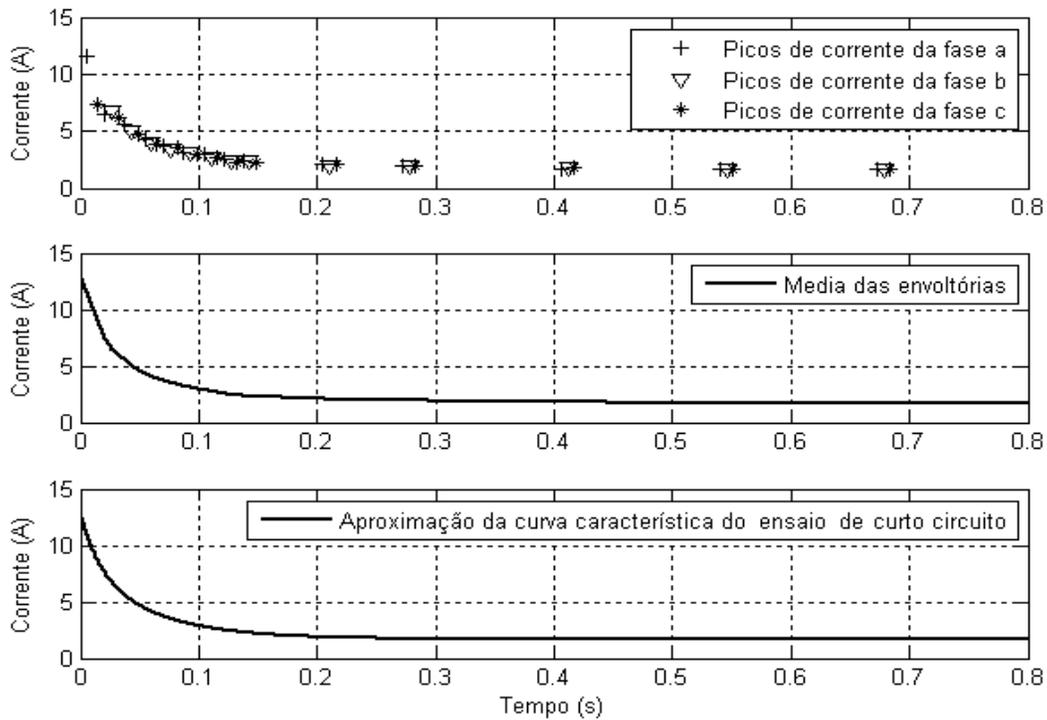
$$X''_d = \frac{U}{B} = \frac{58,56}{13,08} = 4,477 \ \Omega$$

$$\tau'_d = 56,5 \text{ ms}$$

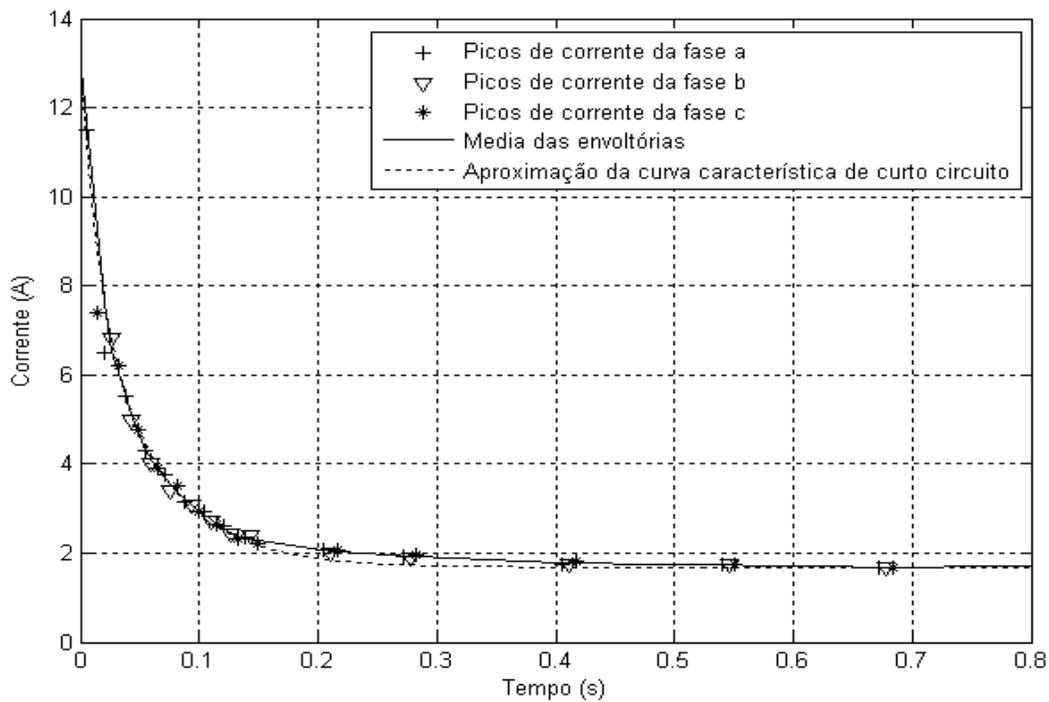
$$\tau_d'' = 14,9 \text{ ms}$$

Segundo a expressão (3.12) pode-se traçar a curva aproximada característica do ensaio de curto circuito tendo os valores dos parâmetros determinados por esse método.

A figura 4.10 mostra a comparação entre os pontos dos picos de corrente medidos no ensaio de curto circuito, a envoltória desses pontos com o regime subtransi rio extrapolado e a aproxima o da curva característica do ensaio de curto circuito. Em seguida na figura 4.11 sobrepõe-se essas curvas para verificar a fidelidade dos parâmetros obtidos no ensaio.

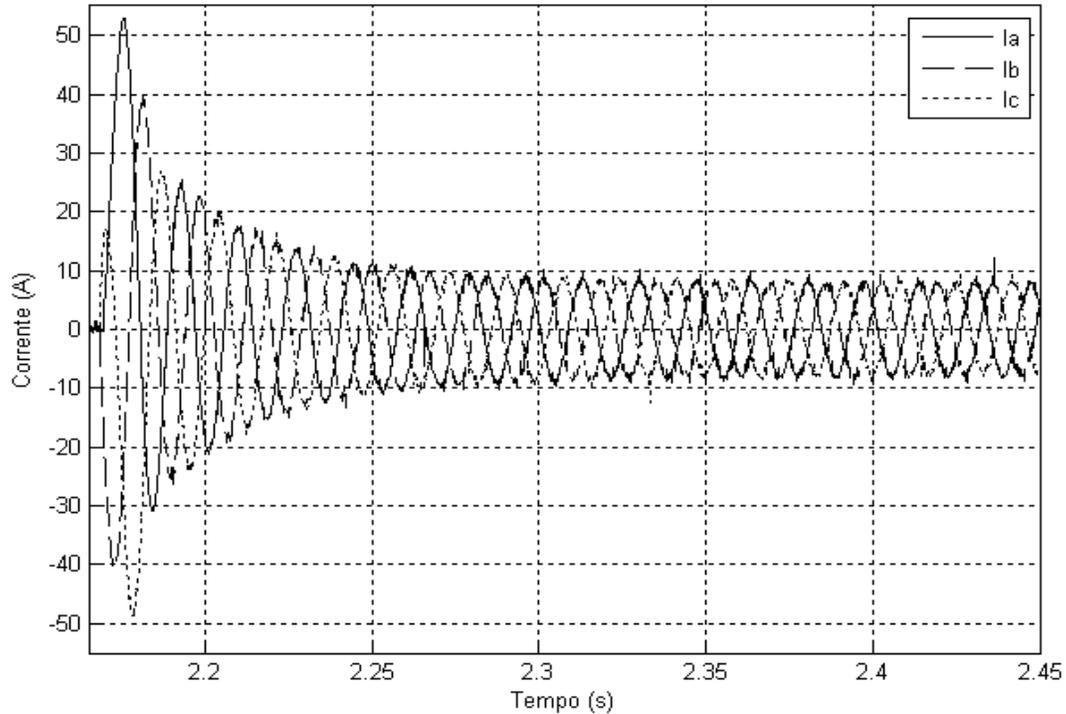


**Figura 4. 10** Compara o entre curva do ensaio de curto circuito e curva característica



**Figura 4. 11 Sobreposição da envoltória de curto circuito e curva característica**

Foi realizado também o ensaio de curto circuito com tensão nominal no mesmo gerador. Seguem os gráficos e os resultados.



**Figura 4. 12 Curva de correntes de curto circuito com 132 volts eficazes**

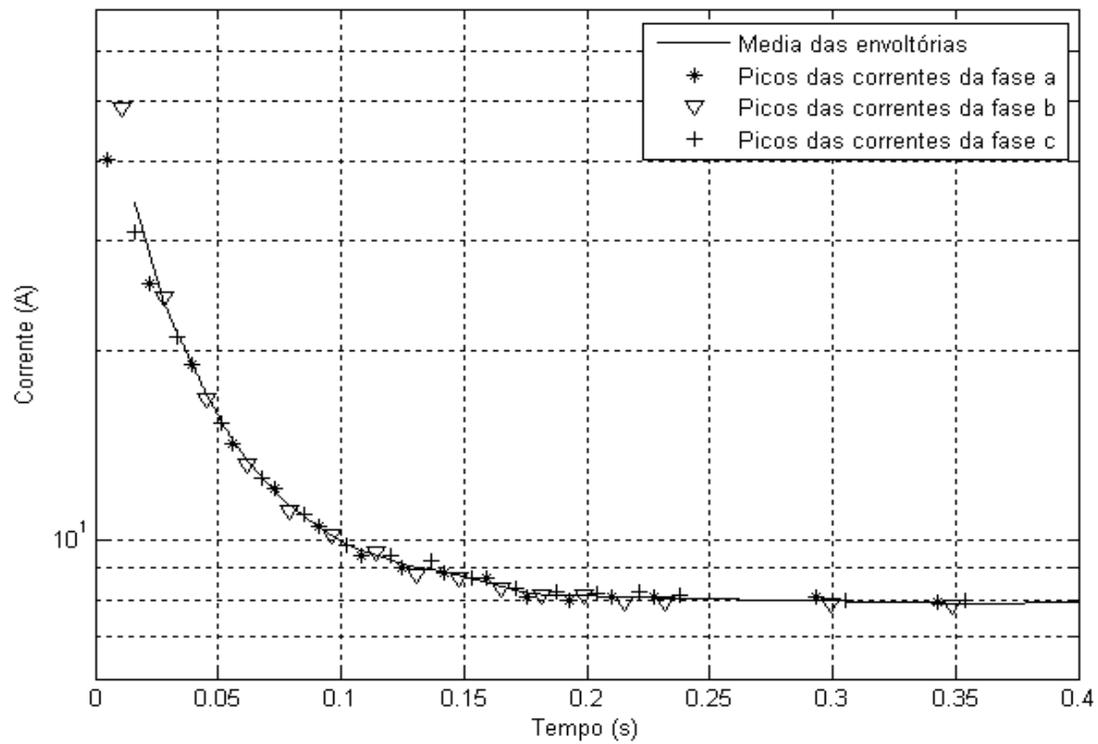


Figura 4. 13 Medição e interpolação dos pontos do ensaio de curto circuito brusco com 132 volts eficazes

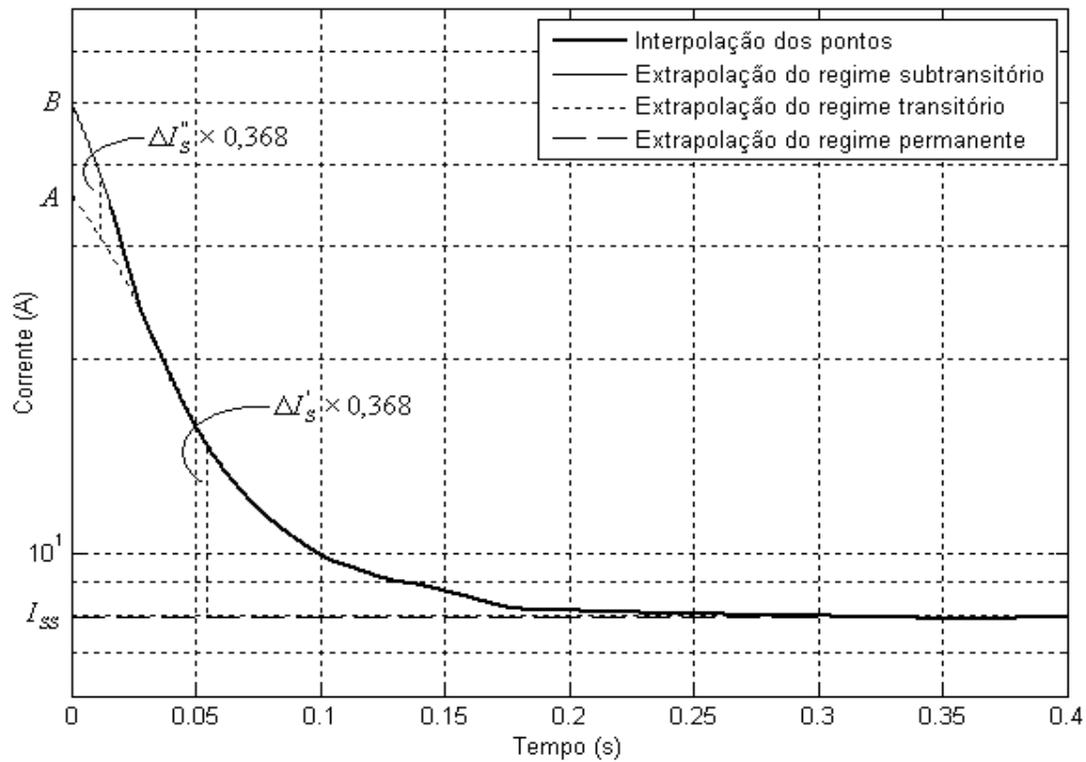


Figura 4. 14 Interpolação e extrapolação dos pontos do ensaio de curto circuito

Pela análise dos gráficos obtidos para o ensaio de curto circuito com tensão nominal a 132V eficazes, os resultados foram os seguintes:

Tensão de armadura antes do curto circuito:  $U = 198,6V$  (pico)

$$X_d = \frac{U}{I_{ss}} = \frac{198,6}{7,916} = 25,08\Omega$$

$$X_d' = \frac{U}{A} = \frac{198,6}{36,55} = 5,51\Omega$$

$$X_d'' = \frac{U}{B} = \frac{198,6}{85,23} = 3,98\Omega$$

$$\tau_d' = 51,6ms$$

$$\tau_d'' = 16,7ms$$

A figura 4.15 mostra a comparação entre os pontos dos picos de corrente medidos no ensaio de curto circuito, a envoltória desses pontos com o regime subtransitório extrapolado e a aproximação da curva característica do ensaio de curto circuito. Em seguida, na figura 4.16, sobrepõe-se essas curvas para se verificar a fidelidade dos parâmetros obtidos no ensaio.

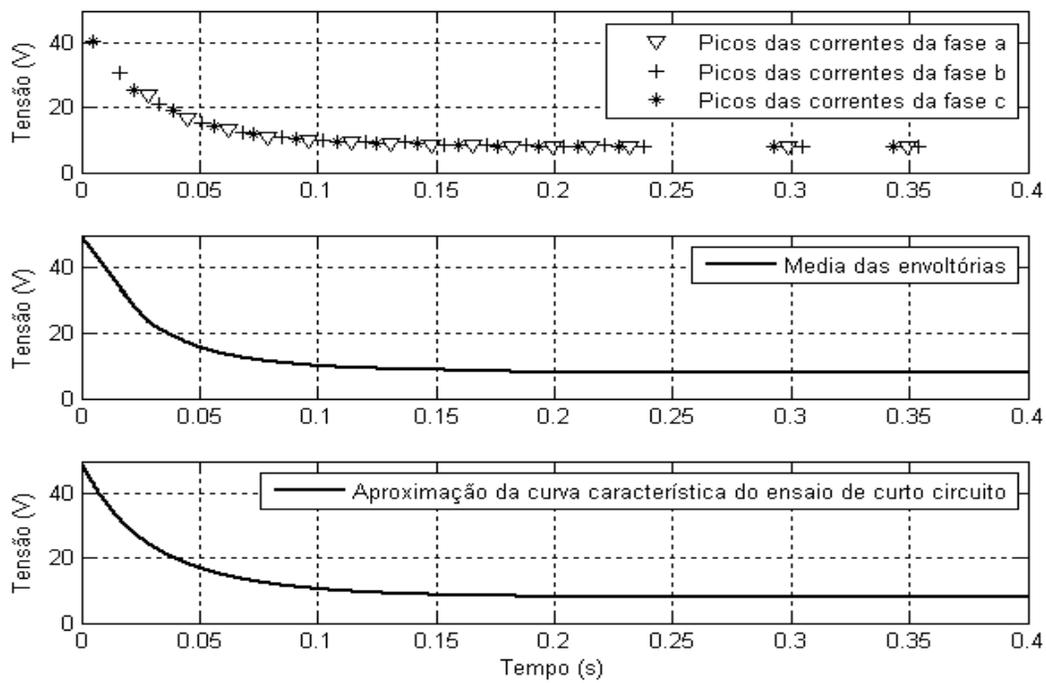


Figura 4. 15 Comparação entre curva do ensaio de curto circuito e curva característica

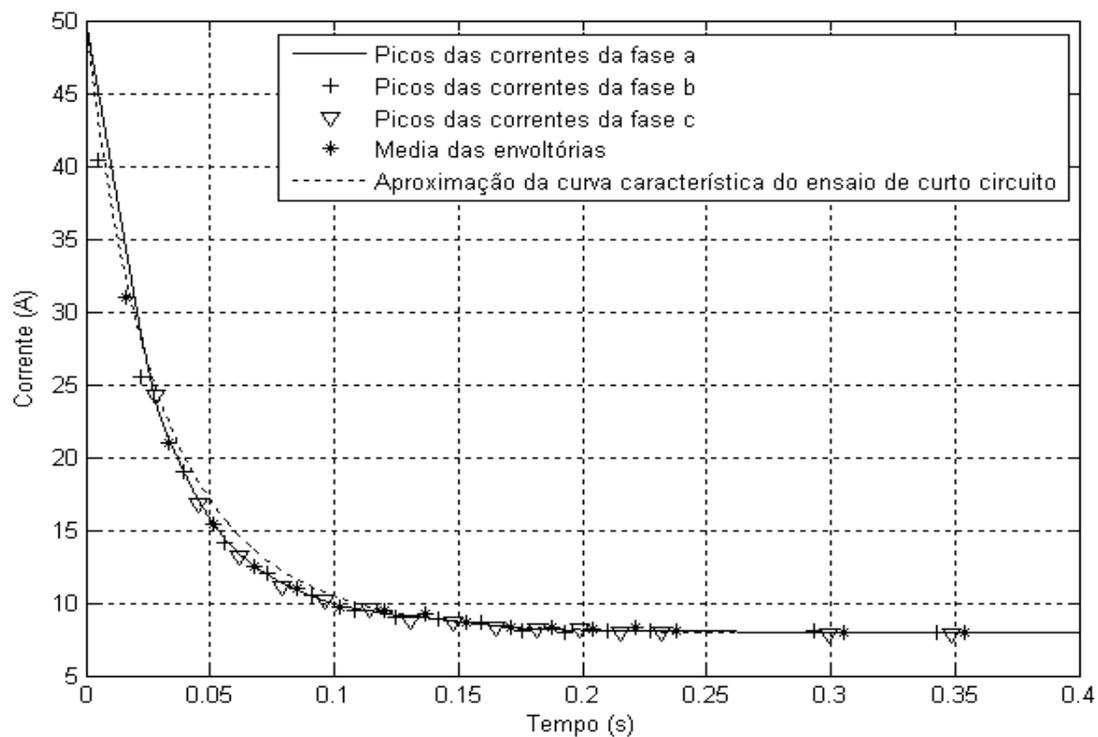


Figura 4. 16 Sobreposição da envoltória de curto circuito e aproximação da curva de corrente de curto circuito

## IV.8. Ensaio de rejeição de carga

### IV.8.1 Ensaio de rejeição de carga de eixo direto

O ensaio de rejeição de carga de eixo direto (fluxo magnético produzido pelo campo alinhado com o eixo direto do gerador síncrono) foi realizado com o gerador síncrono conectado à rede elétrica. Para obter-se uma condição em que a corrente de armadura ficasse alinhada com o eixo direto do gerador síncrono, condição de potência ativa nula, o gerador esteve subexcitado e portanto não saturado.

Após o gerador síncrono entrar em sincronismo com a rede elétrica, diminuiu-se a corrente de campo e controlou-se a velocidade até a gerador síncrono tornar-se subexcitado e com fator de potência capacitivo, próximo de zero, que foi o momento da desconexão do gerador síncrono da rede elétrica juntamente com o desligamento do motor utilizado como acionador (turbina).

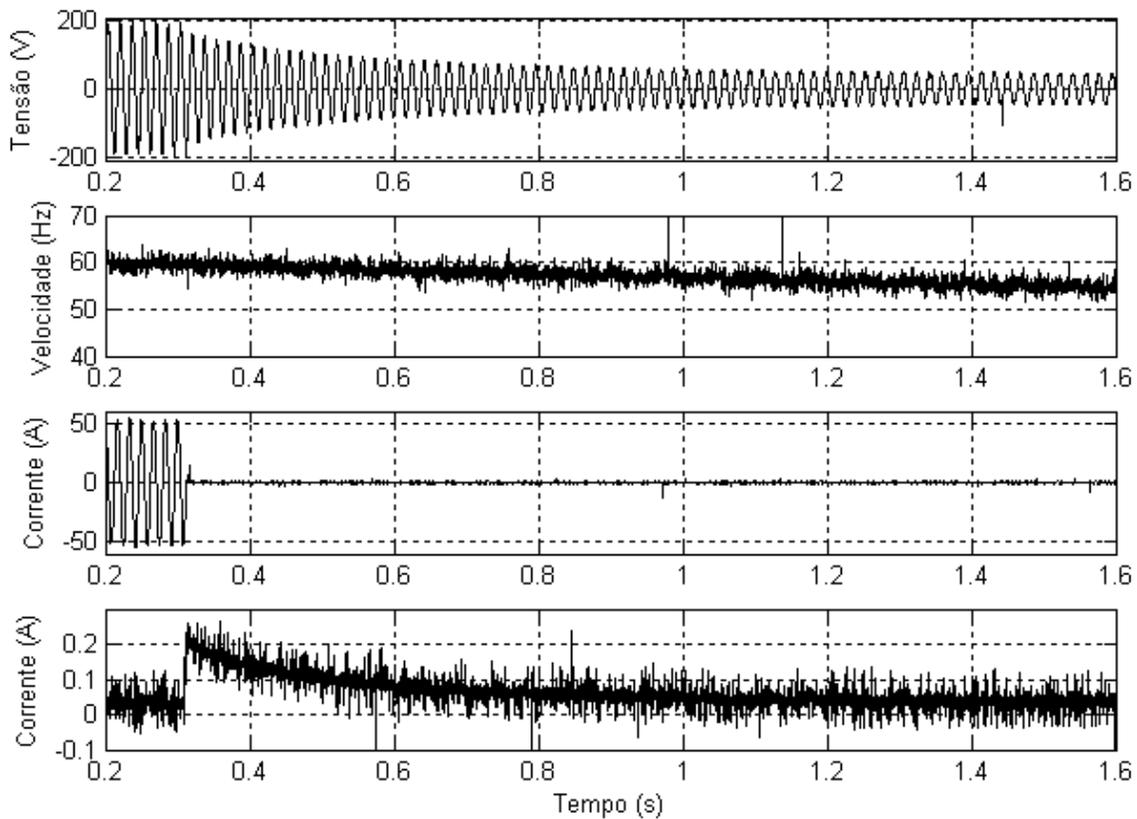
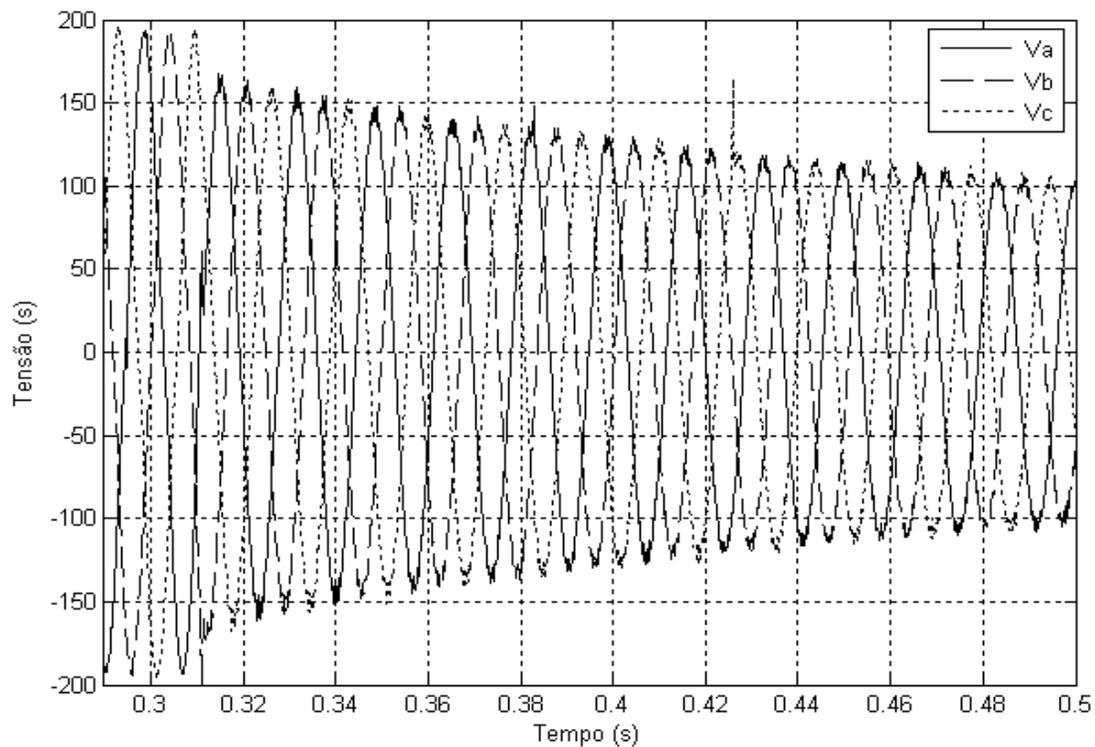


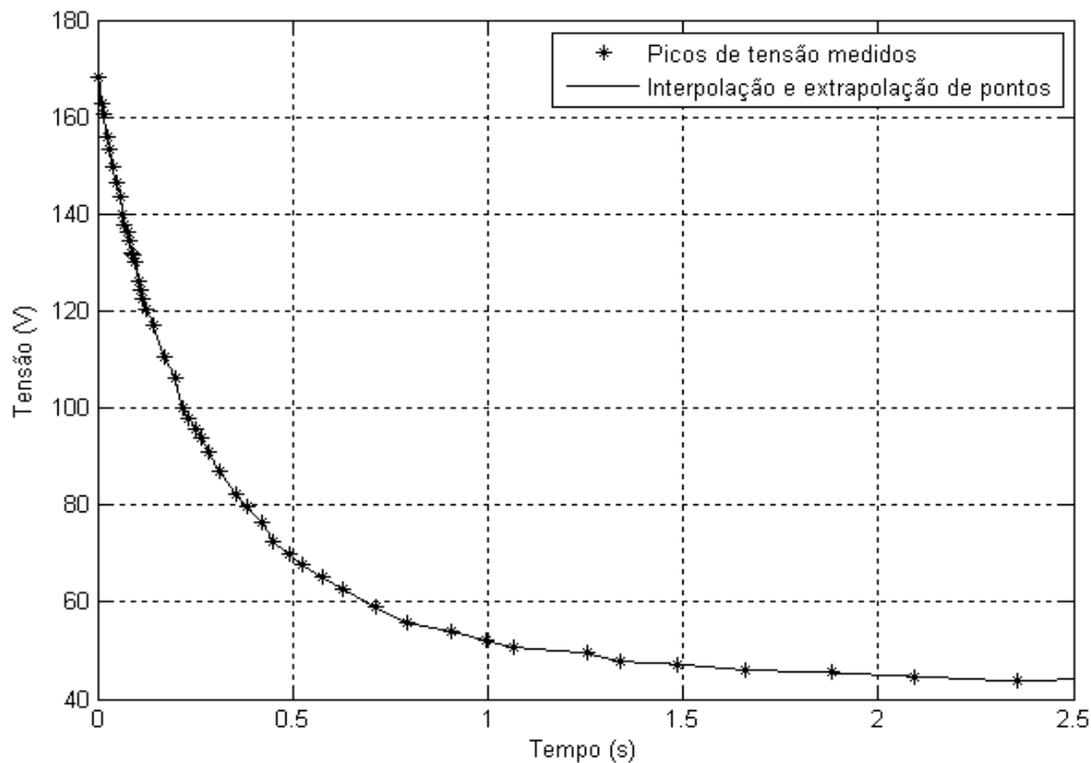
Figura 4. 17 Formas de onda das diversas grandezas durante a rejeição de carga de eixo direto

A figura 4.17 mostra o momento da desconexão do gerador síncrono da rede elétrica e suas curvas de tensão de enrolamentos de armadura, velocidade do rotor, corrente de armadura e corrente de campo. É importante notar que a velocidade diminui com o tempo quando ela deveria se manter constante. Desse modo para manter o fluxo do entreferro constante deve-se dividir a tensão pela velocidade em p.u para se obter o valor correto de tensão

As tensões de enrolamentos de armadura podem ser vistas na figura 4.18 e, a partir desta, pelos picos das tensões pode-se traçar o gráfico da envoltória das tensões das fases, que é mostrado na figura 4.19.



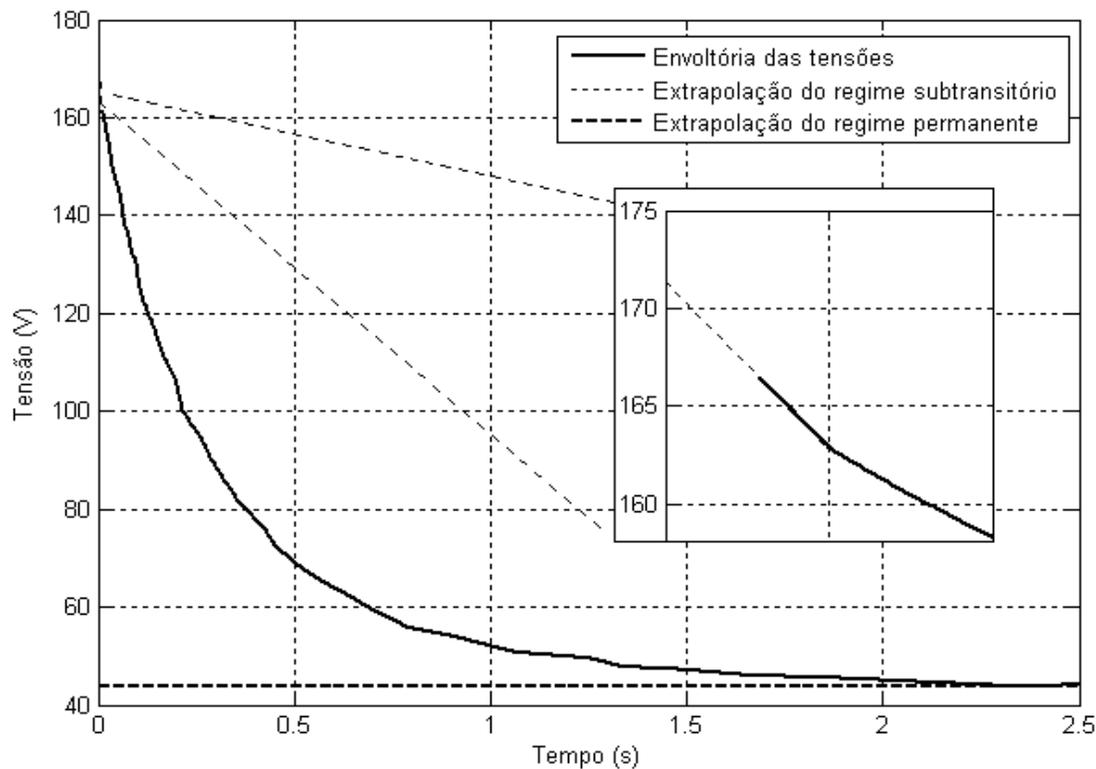
**Figura 4. 18 Formas de ondas das tensões do ensaio de rejeição de carga de eixo direto**



**Figura 4. 19 Picos e envoltória das tensões do ensaio de rejeição de carga de eixo direto**

Em seguida faz-se a extrapolação dos regimes subtransitório, transitório e permanente. Note-se, pela figura 4.20, que para os regimes subtransitório e permanente a identificação da tendência dessas extrapolações é evidente e facilmente realizável. Na figura há uma ampliação do regime subtransitório para melhor visualização.

Essas tendências são bem definidas pelo fato de que para o regime subtransitório deve-se somente continuar a tendência do início da linha de interpolação dos pontos medidos, e para o regime permanente deve-se somente traçar uma linha paralela ao eixo dos tempos.



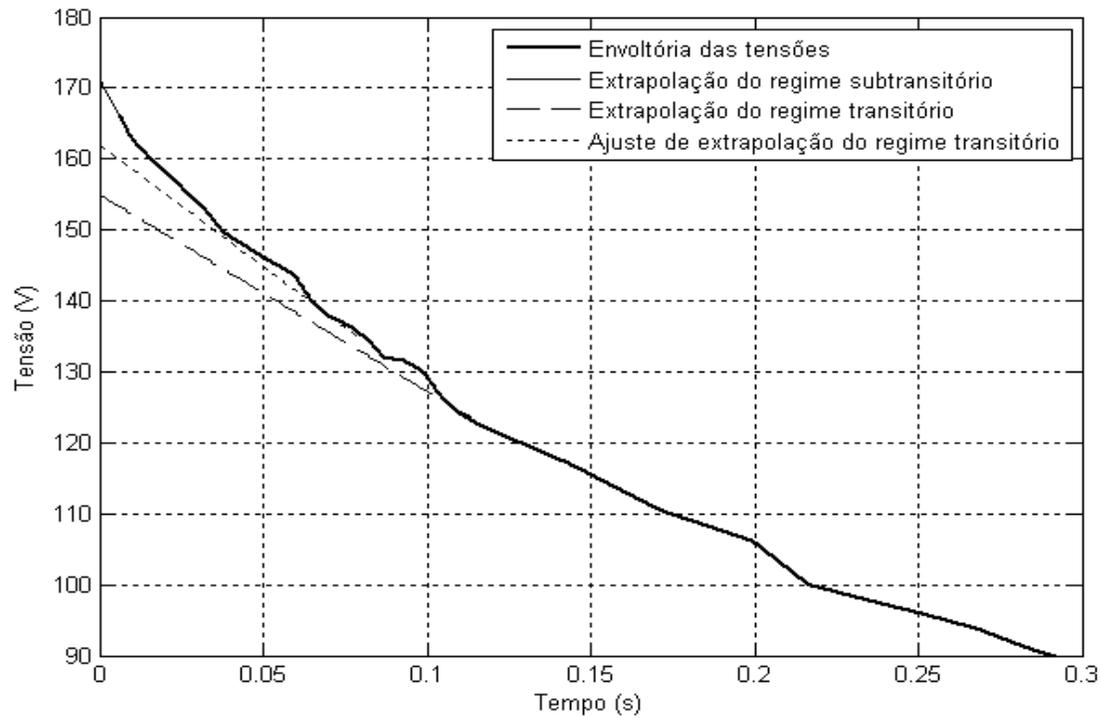
**Figura 4. 20 Extrapolações dos regimes subtransitório e permanente**

A identificação da parte da curva de regime transitório é bastante trabalhosa pois, como se pode ver na curva da figura 4.20 há muitas possibilidades de construir tangentes à curva de tensão de rejeição de carga. Não há, em princípio, uma aproximação quase perfeita da curva de rejeição de carga por duas funções exponenciais e uma função constante como há na curva de curto circuito.

Há um trabalho [10] publicado recentemente que trata de encontrar uma aproximação analítica para essa curva, porém não por exponenciais que permitam determinar constantes de tempo transitória e subtransitória e que, portanto nada ajudam em relação à modelagem matemática dinâmica de geradores síncronos.

Deve-se, então, primeiramente traçar uma tendência que se suponha ser a correta, e em seguida fazer os cálculos para determinação das impedâncias e constantes de tempo. Após, deve-se conferir os valores calculados pelas expressões (2.81) e (2.82). Geralmente para a expressão (2.81), os valores calculados conferem com os valores medidos. Para a expressão (2.82) o valor da constante de tempo  $\tau''_{d0}$  pode apresentar divergência de resultado, nesse caso, deve-se ajustar a tendência do regime transitório para que o resultado

satisfaça a condição da equação (2.82), e para isso haverá uma pequena mudança na reatância  $X'_d$  e na constante de tempo  $\tau''_{d0}$ . A figura 4.21 representa a extrapolação inicial do regime transitório e o ajuste feito nessa tendência para satisfazer as condições acima citadas.



**Figura 4. 21 Ajuste dos parâmetros do ensaio de rejeição de carga de eixo direto**

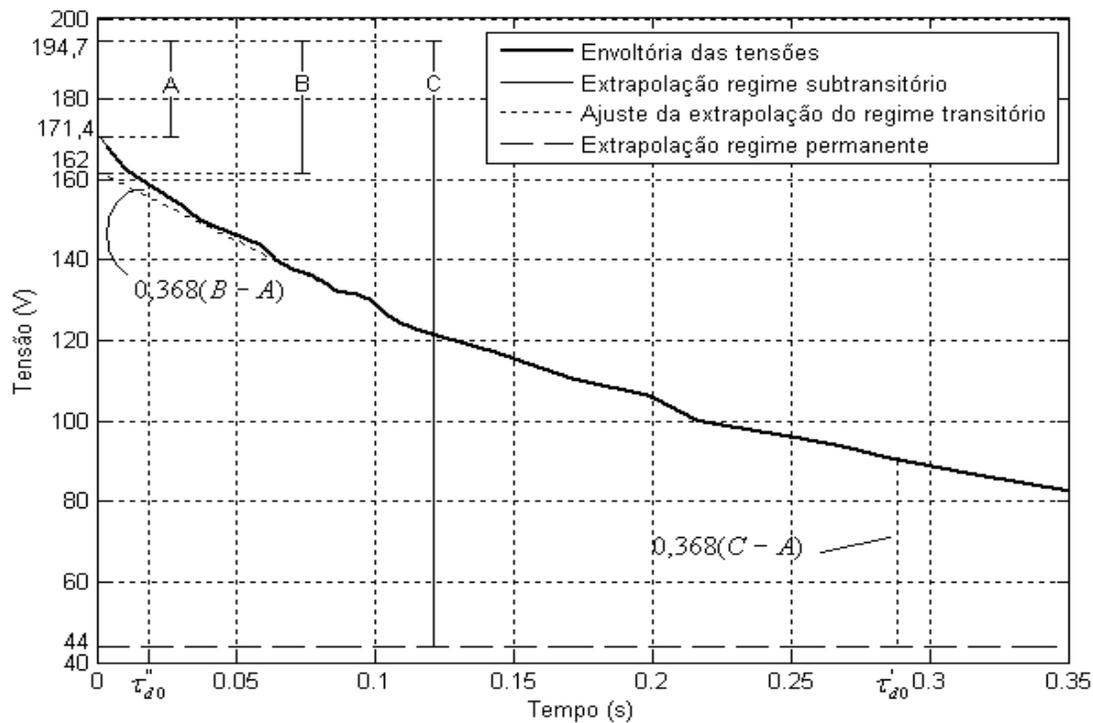


Figura 4.22 Interpolação e extrapolações do ensaio de rejeição de carga de eixo direto

O cálculo das reatâncias de eixo direto pelo método de rejeição de carga, figura 4.22, corresponde a:

$$I_{sd0} = 5,34 \text{ A}$$

$$A = 194,7 - 171,4 = 23,3 \text{ V}$$

$$B = 194,7 - 154,7 = 37,3 \text{ V}$$

$$C = 194,7 - 44 = 150,7 \text{ V}$$

$$x_d = \frac{C}{i_{sd0}} = \frac{150,7}{5,34} = 28,22 \text{ } \Omega$$

$$x_d' = \frac{B}{i_{sd0}} = \frac{37,3}{5,34} = 6,98 \text{ } \Omega$$

$$x_d'' = \frac{A}{i_{sd0}} = \frac{23,3}{5,34} = 4,36 \text{ } \Omega$$

$$\tau_{d0}' = 0,2854 \text{ s}$$

$$\tau_{d0}'' = 0,033 \text{ s}$$

Pode-se calcular os valores de  $\tau_d'$  e de  $\tau_d''$  usando as equações (2.81) e (2.82). Obtém-se:

$$\tau_d' = 0,0706 \text{ s}$$

$$\tau_d'' = 0,0206 \text{ s}$$

Usando os dados do ensaio de curto circuito trifásico brusco com tensão reduzida a 40 V (parâmetros não saturados) obteve-se:

$$x_d = 34,83 \ \Omega$$

$$x_d' = 6,75 \ \Omega$$

$$x_d'' = 4,47 \ \Omega$$

$$\tau_d' = 0,0565 \text{ s}$$

$$\tau_d'' = 0,0149 \text{ s}$$

$$\tau_{d0}' = \frac{X_d}{X_d'} \tau_d' = \frac{34,83}{6,75} \times 0,0565 = 0,2917 \text{ s}$$

$$\tau_{d0}'' = \frac{X_d}{X_d''} \frac{\tau_d' \tau_d''}{\tau_{d0}'} = \frac{34,83}{4,47} \times \frac{0,0565 \times 0,0149}{0,2917} = 0,02247 \text{ s}$$

No ensaio de curto circuito com tensão nominal a 130 V (parâmetros saturados) obteve-se:

$$x_d = 25,08 \ \Omega$$

$$x_d' = 5,51 \ \Omega$$

$$x_d'' = 3,98 \ \Omega$$

$$\tau_d' = 0,0516 \text{ s}$$

$$\tau_d'' = 0,0167 \text{ s}$$

$$\tau_{d0}' = 0,235 \text{ s}$$

$$\tau_{d0}'' = 0,0231 \text{ s}$$

Observa-se que os valores dos parâmetros de eixo direto obtidos nos ensaios de rejeição de carga resultaram entre os valores obtidos nos ensaios de curto circuito trifásicos bruscos para tensão baixa (40 V) e para tensão mais alta (132 V). Como no ensaio de curto circuito trifásico brusco existe uma expressão aproximada da curva envoltória de curto circuito tornando o método mais confiável sob o ponto de vista de respaldo teórico, pode-se afirmar, ainda que não taxativamente, que os resultados obtidos no ensaio de rejeição de carga de eixo direto, embora diferentes dos resultados obtidos nos ensaios de curto circuitos trifásicos bruscos estão dentro de uma faixa aceitável.

Através de alterações nas funções exponenciais da tensão terminal do gerador síncrono durante a rejeição de carga pode-se acertar as diferenças. Entretanto esse processo requer a execução do ensaio de curto circuito trifásico brusco que é um ensaio de risco.

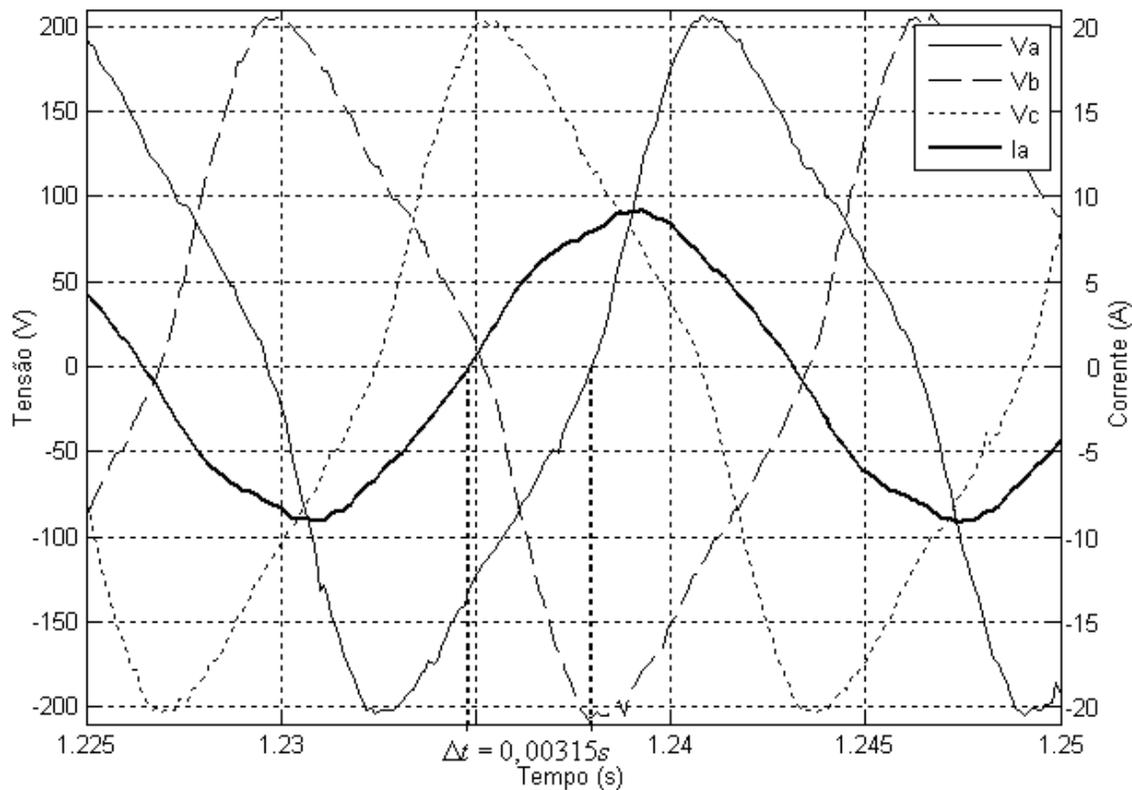
Dessa maneira é possível concluir que o ensaio de rejeição de carga de eixo direto permite determinar valores aproximados dos parâmetros padronizados em comparação com o ensaio de curto circuito trifásico brusco.

#### **IV.8.2 Ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário**

O ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário permite calcular os parâmetros de eixo em quadratura.

Este ensaio pode ser realizado em qualquer condição de carga e de posição de eixos d e q, porém é preciso ter o valor do ângulo de carga  $\delta$  imediatamente antes do instante da rejeição de carga. Para os cálculos dos parâmetros procede-se sempre da mesma maneira como tem sido até o momento, ou seja, calculando-se o valor da reatância síncrona de eixo q através da parte de regime permanente da curva de tensão terminal do gerador e calculando-se as reatâncias transitórias e subtransitórias bem como constantes de tempo transitórias e subtransitórias de circuito aberto usando-se, também valores de tensões obtidos imediatamente antes da rejeição de carga.

Para os cálculos serão analisados os gráficos da tensão e da corrente (figura 4.23) no momento anterior à rejeição.



**Figura 4. 23 Ângulo entre a tensão e corrente de fase do ensaio de rejeição de carga de eixo direto imediatamente antes da rejeição de carga**

O ângulo entre a tensão e a corrente de enrolamento de estator, no instante da rejeição de carga pode ser calculado usando a figura 4.23. A variação de tempo se dá por:

$$1,23795s - 1,2348s = 0,00315s$$

$$\Delta t = 0,00315s$$

Para frequência de 60 Hz um período equivale a 0,01666 s

Então:

$$360^\circ \rightarrow 0,01666s$$

$$\theta \rightarrow 0,00315s$$

$$\theta = 68,04^\circ$$

Na falta de um sistema de medição do ângulo de carga do gerador no instante da rejeição de carga, como é o caso deste trabalho, e que é necessário neste procedimento,

pode-se fazer uma estimativa de valor através do cálculo do vetor que representa a tensão interna do gerador. Para isso é necessário conhecer o valor de  $X_q$ . Como estamos à procura do mesmo juntamente com todos os outros parâmetros de eixo em quadratura, pode-se usar o valor de projeto de  $X_q$  ou o valor de  $X_q$  obtido em outro ensaio como o de escorregamento. Neste caso foi usado um valor de projeto fornecido pelo fabricante da máquina. O cálculo de  $\delta$  utiliza a expressão 3.25 e os dados são os seguintes:

$$X_q = 20,56 \Omega (\text{valor obtido no ensaio de escorregamento})$$

$$R_a = 1,4 \Omega$$

$$\dot{V} = 205,4V \angle 0^\circ \text{ (tensão usada no ensaio)}$$

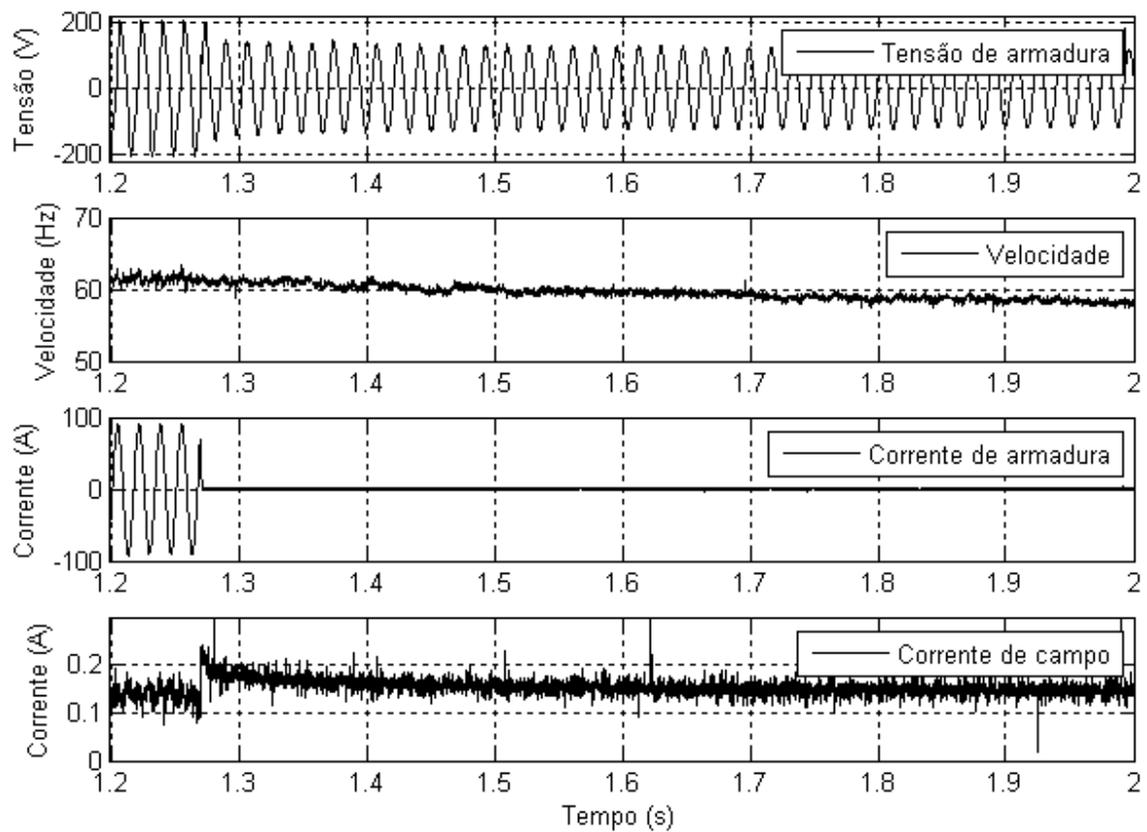
$$\dot{I}_a = 9,0A \angle 68,04^\circ$$

$$\dot{E}_a = 205,4 \angle 0^\circ + (1,4 + 20,56)9,0 \angle 68,04^\circ = 89,41V \angle 64,77^\circ$$

$$\delta = 64,77^\circ$$

Observa-se que este valor calculado do ângulo de carga é praticamente o valor calculado do ângulo da corrente elétrica de enrolamento de armadura conforme pode ser visto nas curvas de tensão terminal do gerador síncrono e corrente no enrolamento de armadura imediatamente antes da rejeição de carga, na figura 4.23. Dessa forma, neste caso, praticamente foi realizado um ensaio de rejeição de carga de eixo em quadratura.

A figura 4.24 mostra o momento da desconexão do gerador síncrono da rede elétrica e suas curvas de tensão de armadura, velocidade do rotor, corrente de armadura e corrente de campo. É interessante notar que a velocidade diminui com o tempo, então, igualmente ao que já foi feito no ensaio de rejeição de carga de eixo direto, deve-se fazer a divisão da tensão pela velocidade para obter-se o valor correto de tensão a ser usada nos cálculos dos parâmetros.



**Figura 4. 24 Formas de onda do momento de rejeição de carga de eixo arbitrário**

As tensões de armadura podem ser vistas na figura 4.25 e, a partir desta, pelos picos das tensões, pode-se traçar o gráfico da envoltória deste ensaio, que é construído e representado na Figura 4.26.

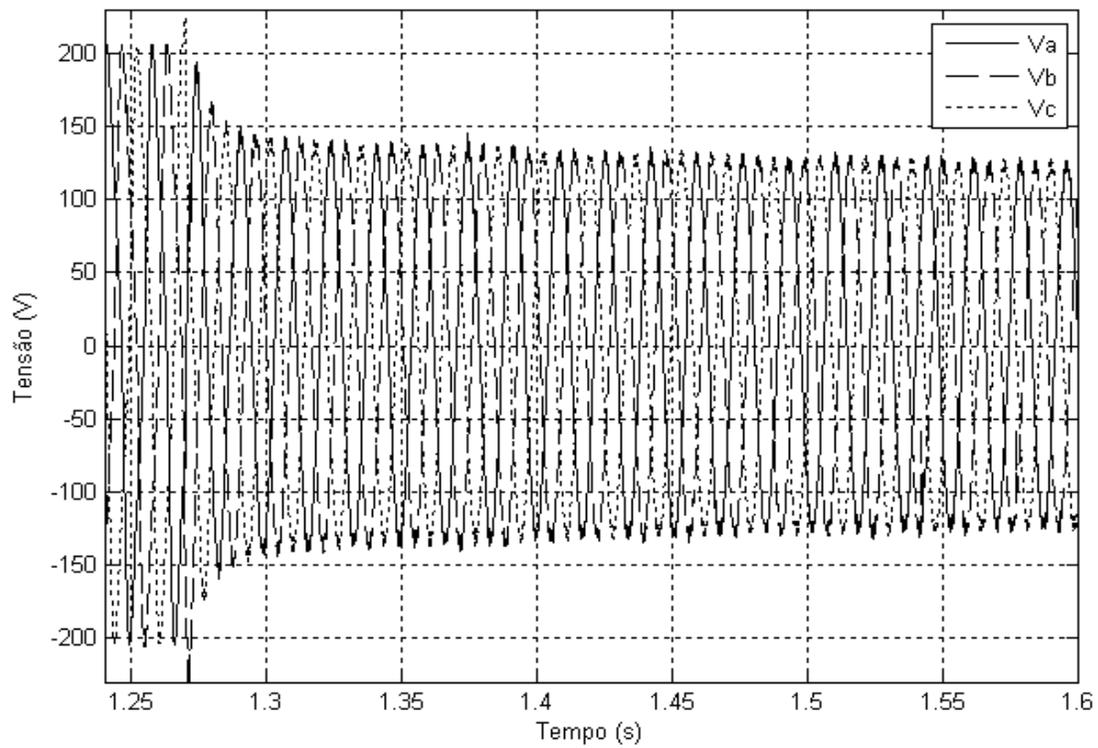


Figura 4. 25 Forma de onda das tensões de armadura durante a rejeição de carga de eixo arbitrário

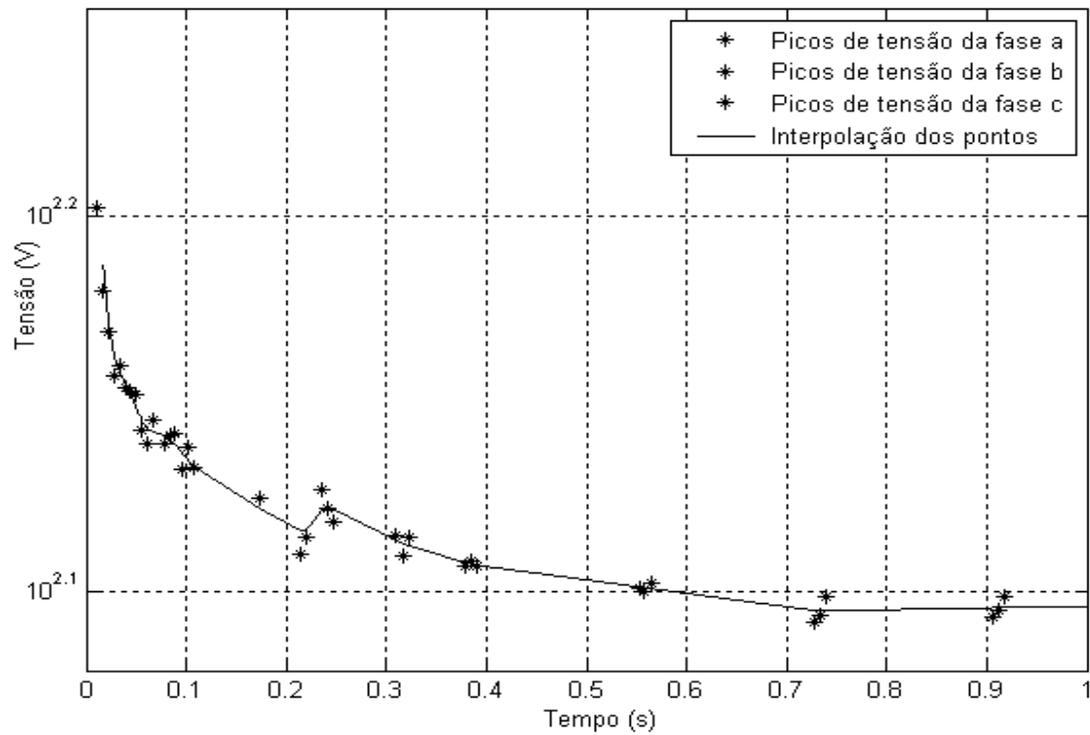
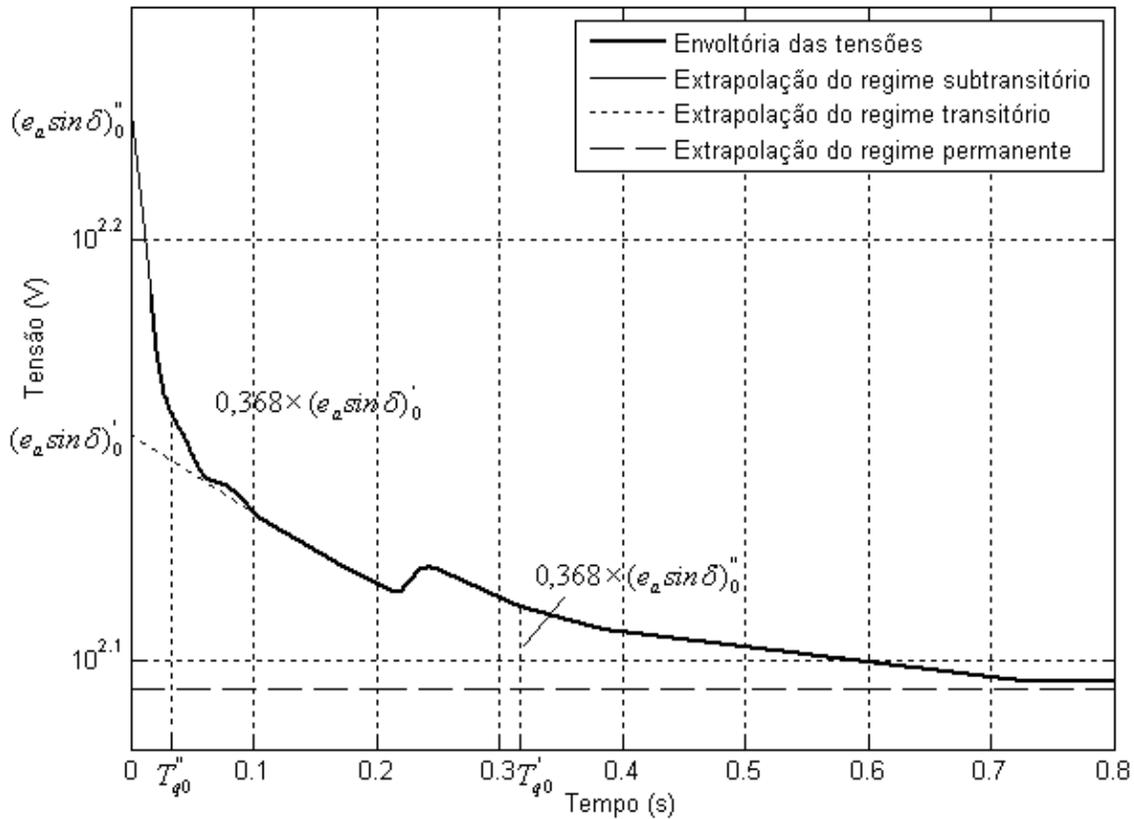


Figura 4. 26 Picos e envoltória das tensões terminais de estator do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário

Em seguida, deve-se realizar as extrapolações dos regimes subtransitório, transitório e permanente da envoltória das tensões. É importante notar que, nas figuras 4.26 e 4.27, que se apresentam em escala logarítmica no eixo das ordenadas, o regime transitório é de fácil identificação quando comparado com o ensaio de rejeição de carga de eixo direto por se comportar praticamente como uma reta indicando a presença certa de uma função exponencial em coordenadas decimais.



**Figura 4. 27** Interpolação e extrapolações do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário

Com os valores obtidos pela análise gráfica e de acordo com o capítulo III, o cálculo das reatâncias de eixo em quadratura ( $X_q$  e  $X_q''$ ) se dá pelas expressões (3.22) a (3.24).

Dados do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário:

$$e_a = 205,4 \text{ V}$$

$$I_a = 9,0 \text{ A}$$

$$\theta = 68,04^\circ$$

$$\delta = 64,77^\circ$$

$$(e_a \sin \delta)'_0 = 142,5 \text{ V}$$

$$(e_a \sin \delta)''_0 = 170,7 \text{ V}$$

E com esses dados, calcula-se as reatâncias:

$$X_q = e_a \sin \delta / i_{sq0} = 20,63 \Omega$$

$$X'_q = X_q - (e_a \sin \delta)'_0 / i_{sq0} = 6,31 \Omega$$

$$X''_q = X'_q - (e_a \sin \delta)''_0 / i_{sq0} = -10,90 \Omega$$

Como o cálculo de  $X''_q$  resultou em valor negativo, conclui-se que o gerador síncrono não possui dois enrolamentos amortecedores no eixo em quadratura (comum em geradores síncronos de polos salientes), então, refaz-se o cálculo para a reatância subtransitória segundo a expressão abaixo porque não há regime transitório neste caso.

$$X''_q = X_q - (e_a \sin \delta)''_0 / i_{sq0} = 3,463 \Omega$$

Alguns autores consideram que não há regime subtransitório, mas somente regime transitório, o que é razoável tendo em vista o valor calculado de constante de tempo. Apesar disso, neste trabalho considera-se que o regime subtransitório existe e o transitório não existe como acontece na maioria das publicações a respeito do assunto.

Pela análise gráfica da figura 4.28 obtém-se o valor da constante de tempo subtransitória de circuito aberto:

$$\tau''_{q0} = 0,0492$$

E calcula-se a constante de tempo  $\tau''_q$  pela expressão (2.83).

$$\tau''_q = \tau''_{q0} \frac{X''_q}{X_q} = 0,0492 \times \frac{3,463}{20,63} = 0,008258 \text{ s}$$

## IV.9. Tabela dos valores de parâmetros obtidos em todos os ensaios

Apresenta-se a seguir a tabela 4.1 com todos os parâmetros obtidos nos diversos ensaios realizados.

**Tabela 4.3. Valores obtidos nos ensaios realizados**

A letra “c” representa valores calculados

Parâmetros	Vazio e CC	Escorregamento	Max Corr Indut	Potier	Abertura CC	CC 40 V	CC 130V	RC eixo direto	RC eixo arbitrário
Xdns Ohms	37,14	43,17				34,83			
Xds Ohms	23,57				26,07		25,08	28,22	
X'd Ohms					6,01	6,75	5,51	6,98	
X''d Ohms					4,42	4,48	3,98	4,36	
Xq Ohms		20,56	11,07						20,63
X'q Ohms									
X''q Ohms									3,463
T'd0 s						0,2917	0,235	0,2854	
T''d0 s						0,0225	0,023	0,033	
T'q0 s									
T''q0 s									0,0492
T'd s						0,0565	0,0516	0,0706	
T''d s						0,0149	0,0167	0,0206	
T'q s									
T''q s									0,0083
Xls Ohms				2,7					
Rs Ohms	1,38								
Rfd Ohms	265								

Na tabela 4.3 as constantes de tempo estão em segundos e as reatâncias e resistências elétricas em Ohms

## IV.10. Ensaio de resposta em frequência

O ensaio de resposta em frequência foi realizado conforme descrito no capítulo III, através da obtenção das curvas de resposta em frequência (espectros de amplitude e de ângulos) das reatâncias operacionais ( $X_d(s)$  e  $X_q(s)$ ) aplicando-se tensão de frequência variável de 0,001 a 200 Hz em configurações de eixo direto e de eixo em quadratura do gerador síncrono. Obteve-se para as reatâncias operacionais de eixo direto  $X_d(s)$  e de eixo em quadratura  $X_q(s)$  os espectros de amplitude e de fase seguintes.

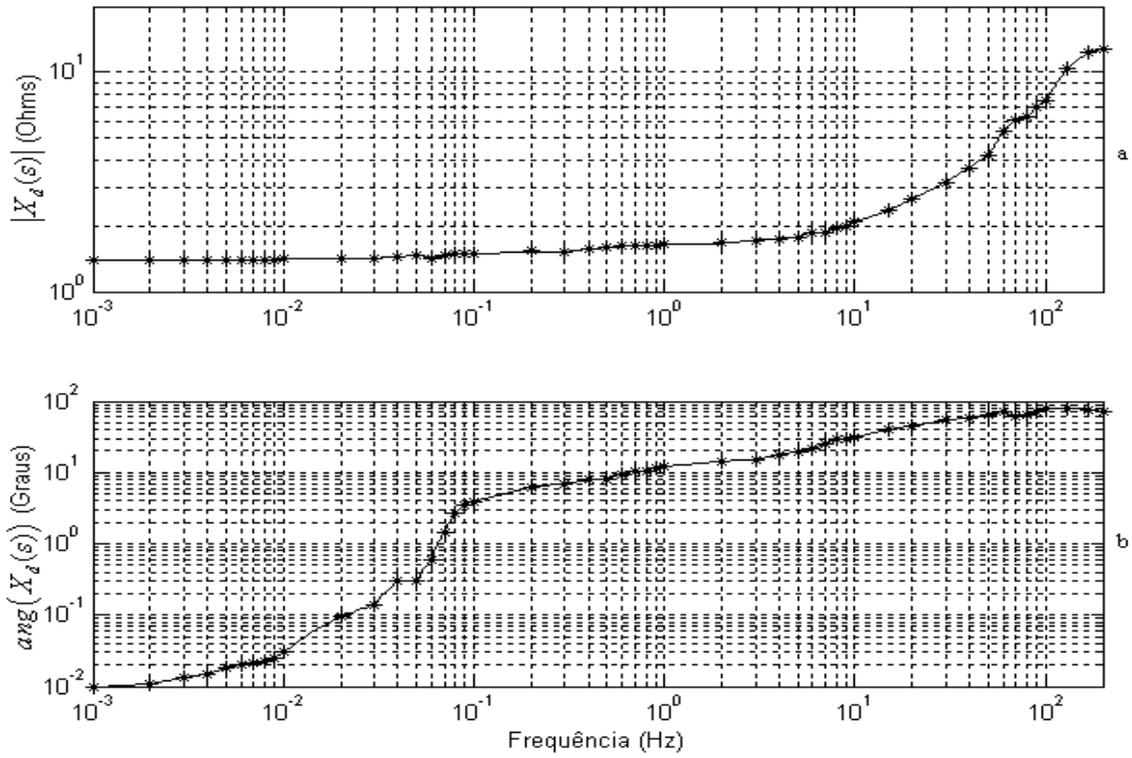


Figura 4. 28 Diagrama de Bode para resposta em frequência de eixo direto

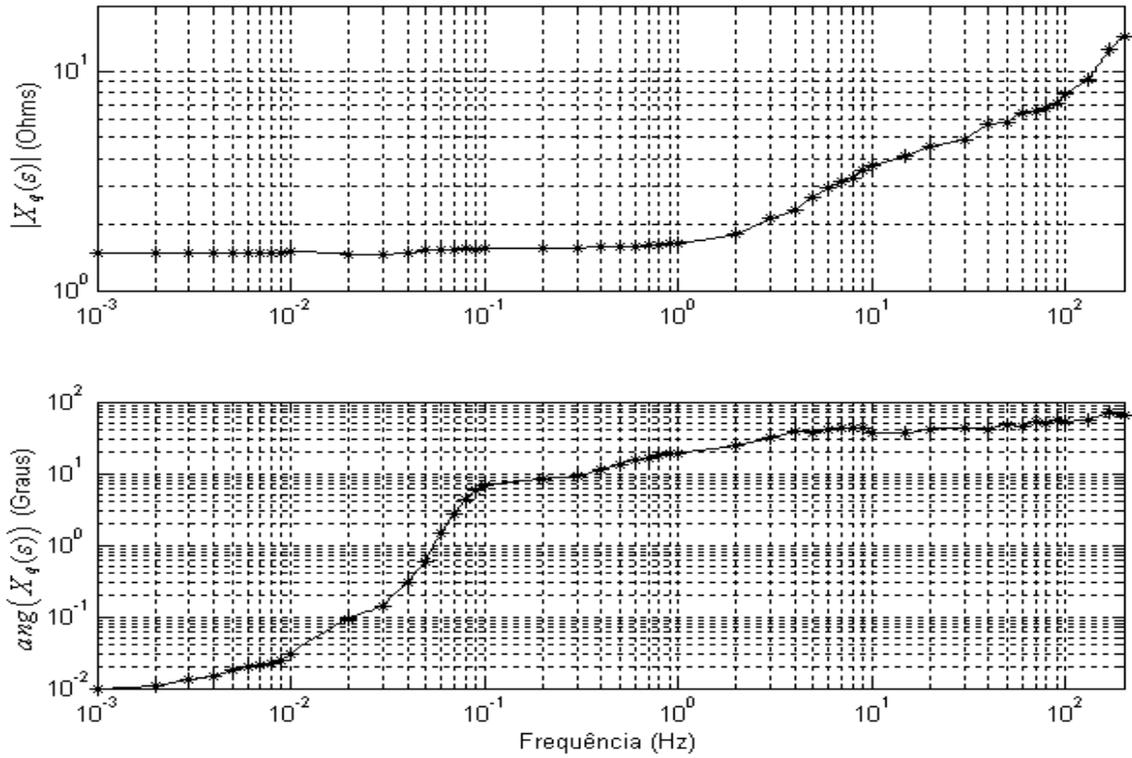


Figura 4. 29 Diagrama de Bode para resposta em frequência de eixo em quadratura

#### 4.10.1. Resposta em frequência da reatância operacional de eixo $d$ obtida com os parâmetros dos ensaios de curto circuito brusco.

Utilizando os valores dos parâmetros obtidos nos ensaios de curto circuito brusco com tensão de armadura de 40V e as expressões (2.81), (2.82) e (2.84), tem-se:

$$X_d = 34,83 \Omega$$

$$\tau_d' = 0,0565 \text{ s}$$

$$\tau_d'' = 0,0149 \text{ s}$$

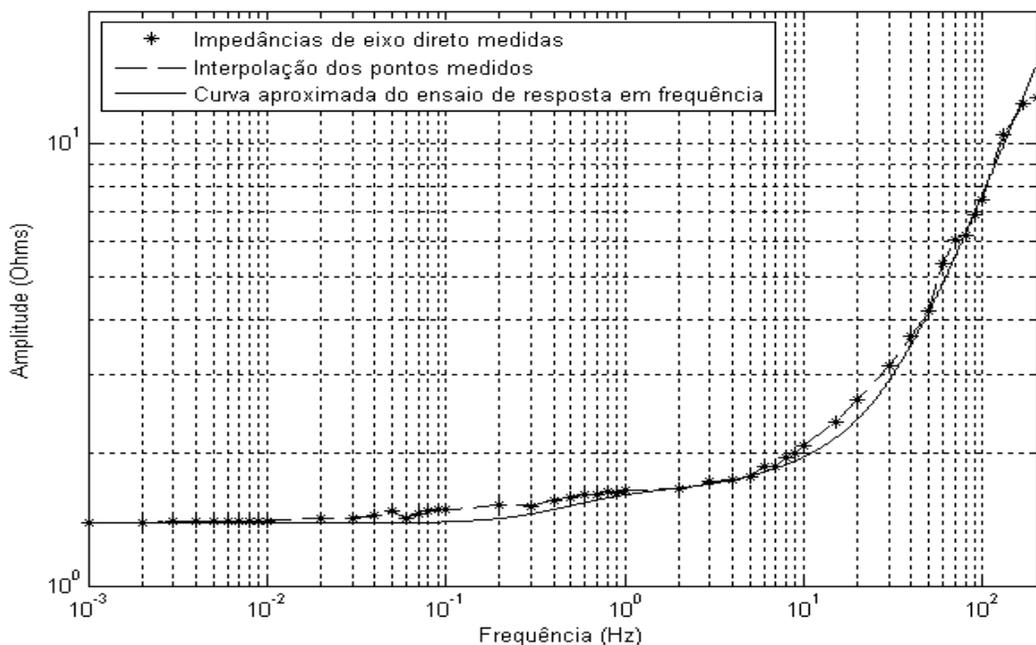
$$\tau_{d0}' = \frac{X_d}{X_d'} \tau_d' = \frac{34,83}{6,75} \times 0,0565 = 0,2917 \text{ s}$$

$$\tau_{d0}'' = \frac{X_d}{X_d''} \frac{\tau_d' \tau_d''}{\tau_{d0}'} = \frac{34,83}{4,47} \times \frac{0,0565 \times 0,0149}{0,2917} = 0,02247 \text{ s}$$

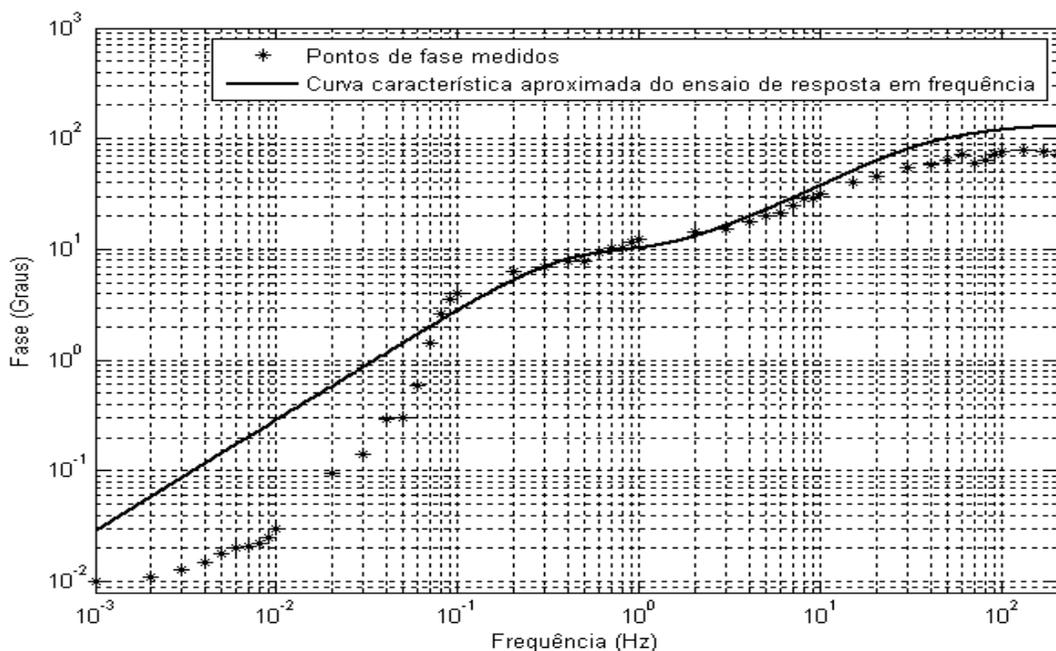
Usando os parâmetros acima, pode-se calcular a expressão da reatância operacional  $X_d(s)$  como visto abaixo:

$$X_d(s) = X_d \frac{(1 + \tau_d' s)(1 + \tau_d'' s)}{(1 + \tau_{d0}' s)(1 + \tau_{d0}'' s)} = 34,83 \times \frac{(1 + 0,0565s)(1 + 0,0149s)}{(1 + 0,2917s)(1 + 0,02247s)}$$

Construindo-se os diagramas de Bode de amplitude e de fase para a reatância operacional  $X_d(s)$  acima e superpondo-as aos diagramas de Bode da figura 4.28, pode-se comparar o desempenho do ensaio de curto circuito brusco com a resposta em frequência de eixo  $d$  do gerador síncrono.



**Figura 4. 30** Comparação entre a resposta em frequência de eixo direto do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo direto com parâmetros do ensaio de curto circuito em 40V (espectro de amplitudes)



**Figura 4. 31** Comparação entre a resposta em frequência de eixo direto do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo direto com parâmetros do ensaio de curto circuito em 40V (espectro de fases)

Pode se observar que a partir da frequência de 0,1 Hz há uma razoável concordância entre ambos os espectros, o que mostra que o ensaio de curto circuito permitiu a obtenção de parâmetros que satisfazem à resposta em frequência do gerador síncrono parado (sem rotação).

Para frequências menores do que 0,1 Hz a medição de ângulos ficou prejudicada devido à presença de ruídos nos sinais, tornando imprecisa a determinação do momento exato do cruzamento do zero das tensões e correntes das fases.

Supõe-se, dessa forma, que se o espectro em frequência do gerador parado apresenta uma boa concordância com os diagramas de Bode da reatância operacional de eixo direto, os parâmetros do gerador ( $X_d, \tau_d', \tau_d'', \tau_{d0}'$  e  $\tau_{d0}''$ ), obtidos através da identificação de polos e zeros da função de transferência de eixo  $d$  do gerador síncrono parado, devem concordar com os parâmetros de eixo  $d$  obtidos no ensaio de curto circuito brusco.

#### 4.10.2. Resposta em frequência da reatância operacional de eixo $d$ obtida com os parâmetros do ensaio de rejeição de carga de eixo $d$ .

Utilizando os valores dos parâmetros obtidos nos ensaios de rejeição de carga de eixo direto e as expressões (2.81), (2.82) e (2.84), tem-se:

$$X_d = 28,22 \Omega$$

$$\tau_{d0}' = 0,2854 \text{ s}$$

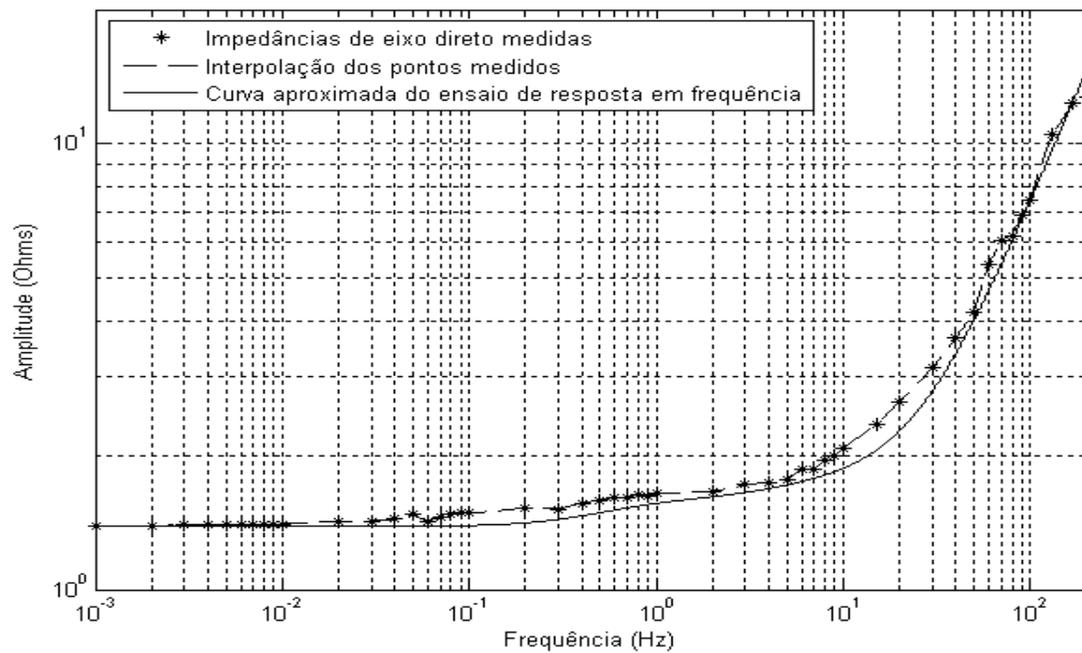
$$\tau_{d0}'' = 0,033 \text{ s}$$

$$\tau_d' = \frac{X_d'}{X_d} \tau_{d0}' = \frac{6,98}{28,22} \times 0,2854 = 0,07046 \text{ s}$$

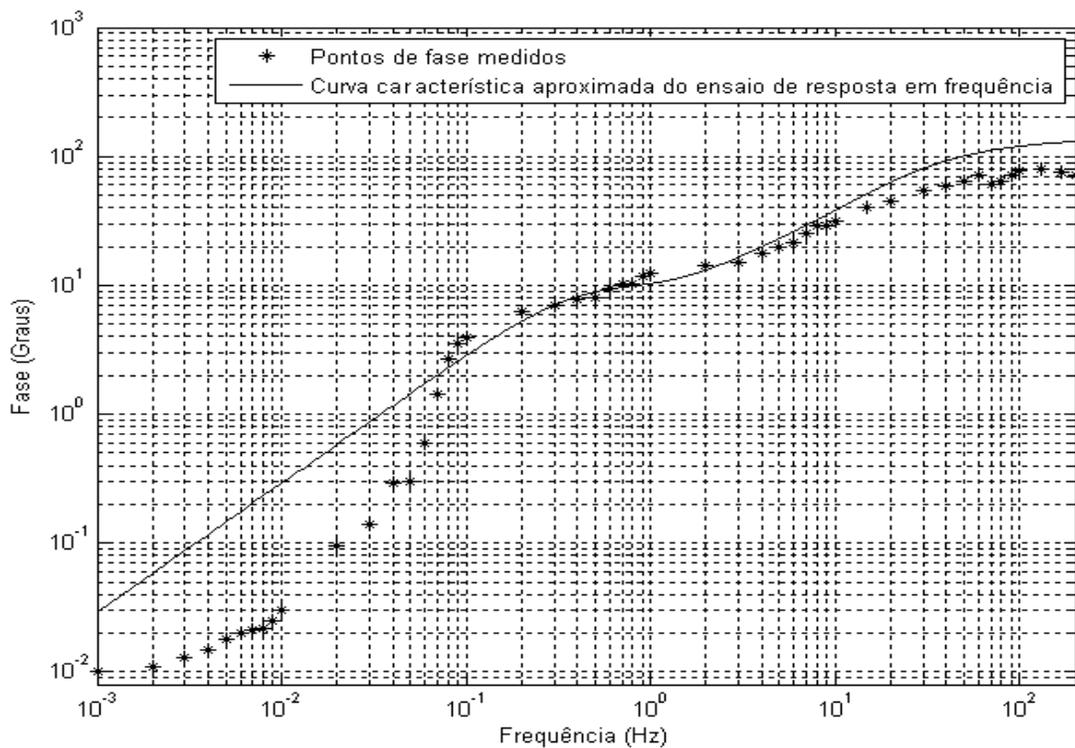
$$\tau_d'' = \frac{X_d''}{X_d} \frac{\tau_{d0}' \tau_{d0}''}{\tau_d'} = \frac{4,36}{28,22} \times \frac{0,2854 \times 0,033}{0,07046} = 0,02061 \text{ s}$$

Usando os parâmetros acima, pode-se calcular a expressão da reatância operacional  $X_d(s)$  como visto abaixo:

$$L_d(s) = L_d \frac{(1 + \tau_d' s)(1 + \tau_d'' s)}{(1 + \tau_{d0}' s)(1 + \tau_{d0}'' s)} = 28,22 \times \frac{(1 + 0,07046s)(1 + 0,02061s)}{(1 + 0,2854s)(1 + 0,033s)}$$



**Figura 4. 32** Comparação entre a resposta em frequência de eixo direto do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo direto com parâmetros do ensaio de rejeição de carga em eixo direto (espectro de amplitudes)



**Figura 4. 33** Comparação entre a resposta em frequência de eixo direto do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo direto com parâmetros do ensaio de rejeição de carga de eixo direto (espectro de fases)

Pode-se observar que, semelhante ao espectro de comparação de resposta em frequência de eixo direto da Figura 4.30, a partir da frequência de 0,1 Hz há uma razoável concordância entre ambos os espectros, o que mostra que o ensaio de rejeição de carga permitiu a obtenção de parâmetros que satisfazem à resposta em frequência do gerador síncrono parado (sem rotação).

Para frequências menores do que 0,1 Hz, a medição de ângulos também ficou prejudicada devido à presença de ruídos no sinal, pois, como no caso anterior, devido a instrumentação, não se conseguiu determinar o momento exato do cruzamento do zero das tensões e correntes das fases.

Supõe-se, dessa forma, que se o espectro em frequência do gerador parado apresenta uma boa concordância com os diagramas de Bode da reatância operacional de eixo direto, os parâmetros do gerador ( $X_d, \tau_d', \tau_d'', \tau_{d0}'$  e  $\tau_{d0}''$ ), obtidos através da identificação de polos e zeros da função de transferência de eixo  $d$  do gerador síncrono parado, devem concordar com os parâmetros de eixo  $d$  obtidos no ensaio de rejeição de carga de eixo direto.

Na Figura 4.34 apresenta-se uma comparação das duas curvas características de curto circuito e de rejeição de carga em relação aos pontos de reatâncias medidos no ensaio. Percebe-se que a curva com os dados de curto circuito se aproximou mais dos dados medidos, isso se deve à maior confiabilidade dos dados obtidos nesse ensaio e prova que, apesar de ser um ensaio de maior risco a ser realizado para os geradores síncronos, ele apresenta resultados mais confiáveis do que o ensaio de rejeição de carga.

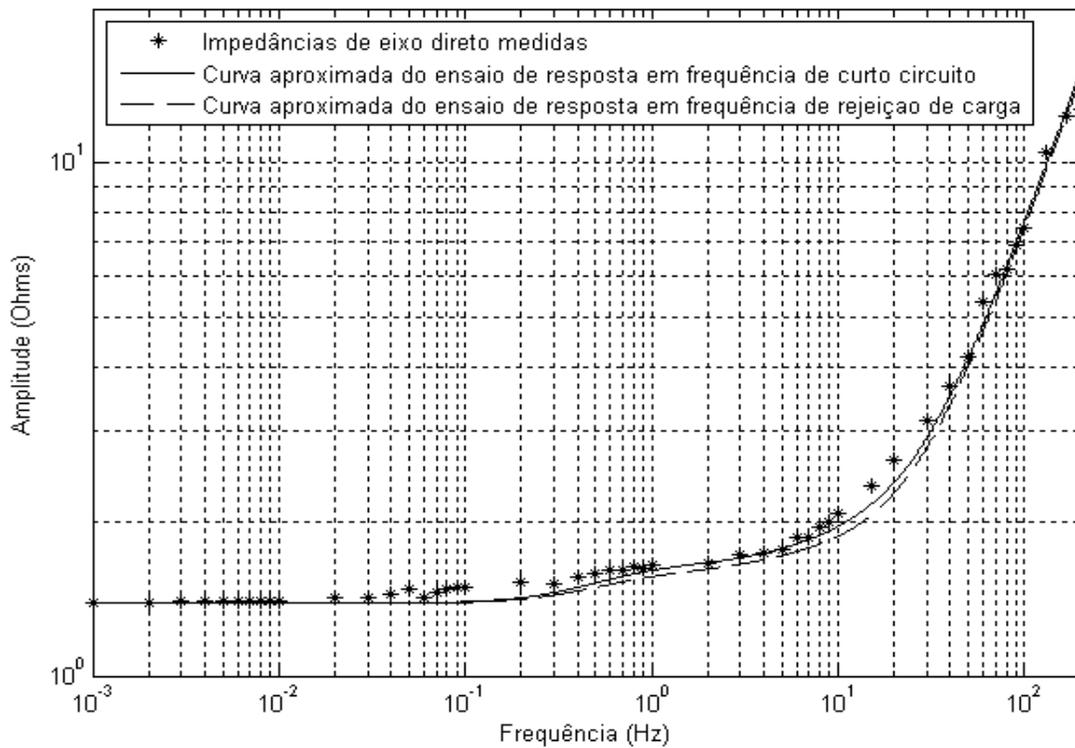


Figura 4. 34 Comparação entre curvas aproximadas características de ensaio de resposta em frequência de curto circuito e rejeição de carga de eixo direto.

#### 4.10.3. Resposta em frequência da reatância operacional de eixo $q$ obtida com os parâmetros dos ensaios de rejeição de carga em eixo arbitrário.

Utilizando os valores dos parâmetros obtidos nos ensaios de rejeição de carga de eixo arbitrário e as expressões (2.83) e (2.85), tem-se:

$$X_q = 20,63 \Omega$$

$$\tau_{q0}'' = 0,0492 \text{ s}$$

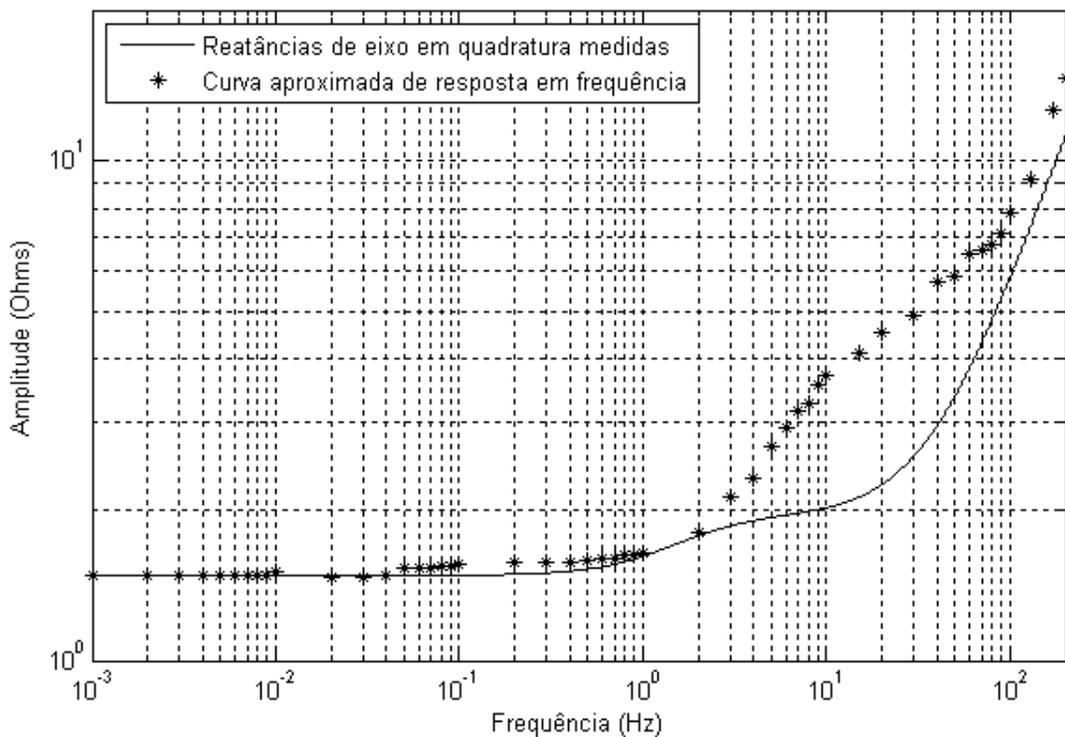
$$\tau_q'' = \tau_{q0}'' \frac{X_q''}{X_q} = 0,0492 \times \frac{3,463}{20,63} = 0,008258 \text{ s}$$

$$\tau_q'' = 0,008258 \text{ s}$$

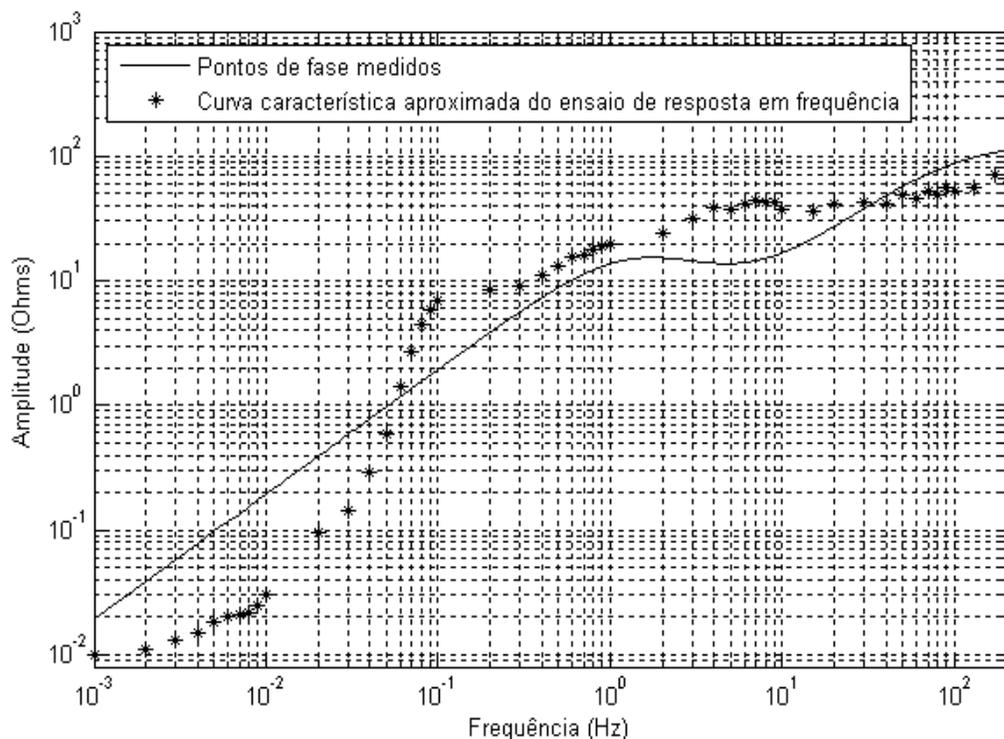
Usando os parâmetros acima, pode-se calcular a expressão da reatância operacional  $X_q$  como visto abaixo:

$$X_q(s) = X_q \frac{(1 + \tau_q'' s)}{(1 + \tau_{q0}'' s)} = 20,63 \times \frac{(1 + 0,008258s)}{(1 + 0,0492s)}$$

Construindo-se os diagramas de bode de amplitude e de fase para a reatância operacional  $X_q(s)$  acima e superpondo-as aos diagramas de Bode da figura 4.28, pode-se comparar o desempenho do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário com a resposta em frequência de eixo  $q$  do gerador síncrono.



**Figura 4. 35 Comparação entre a resposta em frequência de eixo em quadratura do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo em quadratura com parâmetros do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário (espectro de amplitudes)**



**Figura 4. 36** Comparação entre a resposta em frequência de eixo em quadratura do gerador síncrono com a curva de resposta em frequência da reatância operacional de eixo em quadratura com parâmetros do ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário (espectro de fases)

Observa-se que, no caso dos parâmetros de eixo em quadratura obtidos usando o método de rejeição de carga de eixo arbitrário não há boa concordância entre os dois espectros. Isso permite supor que o ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário pode não levar a valores adequados dos parâmetros de eixo q.

#### **IV.11. Considerações sobre os valores dos parâmetros obtidos nos diversos ensaios**

Como cada um dos parâmetros do gerador síncrono objeto dos ensaios deste trabalho apresentou valores diferentes em cada ensaio onde eles foram determinados apresenta-se aqui uma proposta para a determinação do valor de cada um deles que é a seguinte: quando para o parâmetro só há um valor determinado num dado ensaio o valor desse parâmetro será o próprio.

É o caso dos parâmetros  $X_q'' = 3,463 \Omega$ ,  $\tau_{q0}'' = 0,0492 s$ ,  $\tau_q'' = 0,0083 s$  e  $X_{ls} = 2,70 \Omega$ .

Para os demais parâmetros eliminou-se os valores mais distantes dos demais e calculou-se a média aritmética entre os que sobraram. Dessa maneira obteve-se:  $X_{dns} = 35,99 \Omega$ ,  $X_{ds} = 25,58 \Omega$ ,  $X_{qns} = 20,60 \Omega$ ,  $X_{qs} = 11,97 \Omega$ ,  $X'_d = 6,38 \Omega$ ,  $X''_d = 4,42 \Omega$ ,  $\tau'_{do} = 0,26 s$ ,  $\tau''_{do} = 0,023 s$ ,  $\tau'_d = 0,054 s$ ,  $\tau''_d = 0,016 s$ .

Entretanto, considerando-se que o ensaio de curto circuito trifásico brusco é um ensaio temeroso para o gerador de modo que os seus resultados não serão disponíveis os parâmetros ficarão:  $X_{dns} = 40,16 \Omega$ ,  $X_{ds} = 25,95 \Omega$ ,  $X_{qns} = 20,60 \Omega$ ,  $X_{qs} = 11,97 \Omega$ ,  $X'_d = 6,50 \Omega$ ,  $X''_d = 4,39 \Omega$ ,  $\tau'_{do} = 0,29 s$ ,  $\tau''_{do} = 0,033 s$ ,  $\tau'_d = 0,071 s$ ,  $\tau''_d = 0,021 s$ ,  $X''_q = 3,463 \Omega$ ,  $\tau''_{q0} = 0,0492 s$ ,  $\tau''_q = 0,0083 s$  e  $X_{ls} = 2,70 \Omega$ .

Nota-se diferenças nos parâmetros de eixo direto evidentemente porque os parâmetros de eixo em quadratura são obtidos nos ensaios de rejeição de carga e não nos ensaios de curto circuito. Tem-se, dessa forma, diferenças nos seguintes parâmetros:  $X_{ds}$ ,  $X'_d$ ,  $X''_d$ ,  $\tau'_{do}$ ,  $\tau''_{do}$ ,  $\tau'_d$ ,  $\tau''_d$ .

## IV.12 Foto da bancada experimental

A figura 4.37 mostra a bancada com os equipamentos utilizados nos ensaios realizados nessa dissertação. Utilizou-se um gerador síncrono de 2 kVA, excitado por um retificador monofásico controlado e acionado por um motor de corrente contínua de 2 kW, excitação separada, controlado por dois conversores CA/CC. Para ligar o gerador à rede elétrica, utilizou-se um variac trifásico para manter a tensão terminal do gerador no valor da tensão nominal da rede elétrica e também para proteger o gerador através do seu circuito de proteção. No eixo do conjunto motor/gerador foi acoplado um tacogerador.

Os dados dos ensaios realizados foram adquiridos por um sistema de aquisição de dados. Os dados adquiridos pelo sistema de aquisição de dados foram transferidos para um microcomputador e tratados usando o software MATLAB.

O sistema de aquisição de dados é dotado de diversos conversores de sinais do tipo  $\pm 450V / \pm 10V$ ,  $\pm 1,2V / \pm 10V$  e  $\pm 500\mu A / \pm 10V$ . A entrada dos sensores de  $\pm 500\mu A$  exigiu a construção de um circuito eletrônico com sensores de efeito “Hall” para leitura das

correntes de armadura e de campo. Os sensores de  $\pm 1,2V$  exigiram a construção de divisores de tensão resistivos para a medição da tensão de armadura no ensaio de resposta em frequência. Os sensores de  $\pm 450V$  não exigiram qualquer conversor adicional e foram utilizados para medição das tensões de armadura e de campo. As saídas de todos os sensores foram conectadas ao sistema de aquisição de dados. Não houve medições visuais e nem osciloscópio foi usado.

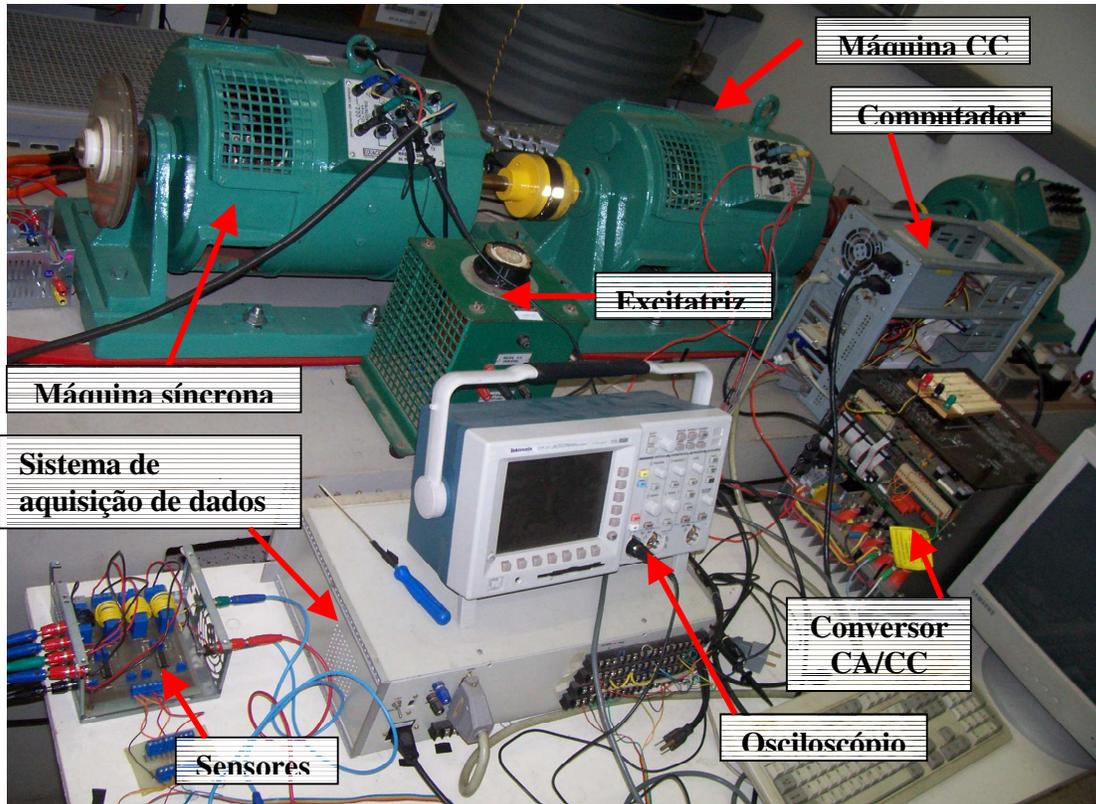


Figura 4. 37 Bancada com equipamentos utilizados nos ensaios

## Capítulo V

### Conclusões e sugestões para novos trabalhos

Este trabalho tratou da determinação dos parâmetros elétricos padronizados de geradores síncronos de polos salientes.

Os métodos descritos na literatura e usados neste trabalho para determinar os parâmetros de geradores síncronos foram os seguintes:

- Método das curvas características de circuito aberto e de curto circuito para determinação da reatância síncrona de eixo direto;
- Ensaio de escorregamento para a determinação das reatâncias síncronas de eixo direto e de eixo em quadratura;
- Ensaio de máxima corrente indutiva para determinar a reatância síncrona de eixo em quadratura;
- Ensaio de abertura de curto circuito permanente na armadura (que permite determinar as reatâncias transitória e subtransitória de eixo direto);
- Ensaio de curto circuito brusco trifásico dos terminais de enrolamento de estator (que permite determinar todos os parâmetros padronizados de eixo direto);
- Ensaio de rejeição de carga de eixo direto, o ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário e parte do ensaio de resposta em frequência.

Todos os ensaios foram realizados em um gerador síncrono de 2 kVA, 230 V, 60 Hz, 4 polos, fator de potência unitário.

Apesar das dificuldades naturais que se encontra normalmente num trabalho deste tipo onde cada ensaio foi repetido inúmeras vezes por diversos motivos técnicos, além de problemas burocráticos como utilização de laboratório em aulas e em outras pesquisas.

O ensaio de curto circuito brusco trifásico dos terminais de enrolamentos de estator permitiu determinar todos os parâmetros padronizados de eixo direto e os resultados foram confrontados com os espectros de amplitude e de fase da reatância operacional de eixo direto obtidos do ensaio de resposta em frequência do gerador.

Verificou-se que os parâmetros padronizados obtidos no ensaio de curto circuito trifásico brusco encontram respaldo na comparação dos espectros de amplitude e de fase obtidos no ensaio de resposta em frequência. Desse modo pode-se ter razoável confiança nos valores determinados.

Praticamente o mesmo ocorreu em relação ao ensaio de rejeição de carga de eixo direto, ou seja, os parâmetros obtidos encontram respaldo na comparação dos espectros de amplitude e de fase obtidos no ensaio de resposta em frequência, apesar de dos espectros apresentarem menor grau de semelhança com os espectros de amplitude e de fase obtidos com o ensaio de curto circuito trifásico brusco.

Já em relação aos parâmetros de eixo em quadratura obtidos no ensaio de rejeição de carga de eixo arbitrário não se encontrou o mesmo respaldo encontrado em relação aos parâmetros de eixo direto.

Esse resultado é respaldado por duas importantes evidências mostradas na literatura a respeito do assunto: a primeira é que diversos livros e artigos que tratam do assunto de determinação de parâmetros padronizados de geradores síncronos, como [1], [4], [6], [7], [10], [14], não dedicam nem tempo e nem espaço aos parâmetros de eixo em quadratura de geradores síncronos, que são importantes nos estudos de dinâmica de geradores de polos salientes.

A segunda é que na referência [15], cuja função é a de recomendar a determinação de parâmetros de geradores síncronos para estudos, a parte de parâmetros de eixo em quadratura é tratada de maneira superficial e equivocada. Nessa referência é dito que para geradores síncronos de polos salientes  $X_q$  é da ordem de  $0,6$  a  $0,7 X_d$ ,  $X''_q$  é da ordem de  $X''_d$  e que  $\tau''_{qo}$  é da ordem de  $\tau''_{do}$  afirmações essas que não são verdadeiras pelos inúmeros exemplos que temos desse tipo de geradores no Brasil.

Dessa forma, uma proposta de pesquisas futuras é certamente o investimento maior na determinação de parâmetros de eixo em quadratura. A identificação desses parâmetros através do ensaio de resposta em frequência pode ser uma solução.

Trabalhos que visem mostrar a importância da determinação dos parâmetros de eixo em quadratura são importantes para impulsionar os estudos para identificá-los. Outras sugestões para trabalhos futuros em relação à determinação de parâmetros de geradores

síncronos são a medição do ângulo de carga ( $\delta$ ) e o uso de técnicas de otimização dinâmica e de elementos finitos.

## Referências Bibliográficas

- [1] |KUNDUR, P. **Power system stability and control**, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [2] IEEE Std 115, **Guide Test Procedures for Synchronous Machines Part I – Acceptance and Performance Testing Part II – Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis**, 2009.
- [3] IEEE Std 1110, **Guide for Synchronous Generator Modeling Practices And Applications in Power System Stability Analyses**, 2002
- [4] KRAUSE, P.C., **Analysis of electric machinery**, McGraw Hill Book Company, NY, 1986
- [5] PARK R.H. **Two-Reaction theory of synchronous machine – generalized method of analysis – part I, part II**, AIEE Trans., vol. 48, pp. 716-727; vol. 52, pp. 352-355, 1933
- [6] VAS, P. **Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines**, CLAREDON PRESS OXFORD, 1993.
- [7] BORTONI, E. C., JARDINI, J. A. **Identification of Synchronous Machine Parameters Using Load Rejection Test Data**, IEEE Trans. On Energy Conversion, VOL. 17, NO. 2. JUNE, 2002.
- [8] BORTONI, E. C. **Modelagem de Máquinas Síncronas de Polos Salientes Empregando Técnicas de Resposta em Frequência**, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- [9] JORDÃO, R. G. **Máquinas Síncronas**, LTC/EDUSP, 1980.
- [10] WAMKEUE, R., JOLETTE, C., KAMWA, I. **Analytical Response of Synchronous Generators during Load Rejection and Field Short-circuit Tests**, Electric Power Components and Systems, Volume 35, número 7, Julho 2007, p. 803 – 821.
- [11] SUNI, J. C. P. **Sobre a determinação de Parâmetros de Geradores Síncronos para Estudos de Comportamento Dinâmico de Sistemas Elétricos**, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, Campinas – SP, 2009
- [12] FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, C, UMANS, S. D., **Máquinas Elétricas com Introdução à Eletrônica de Potência**, Bookman, 2006.
- [13] KIMBARK, E. W. **Power System Stability**, Vol. I, Elements of Stability Calculations, John Wiley & Sons, 1948.

- [14] BOLDEA, I. **The Electric Generators Handbook: Synchronous generators**, Taylor&Francis, 2006.
- [15] EPRI Report no. 1015241 **Power Plant Modeling and Parameter Derivation for Power Systems Studies**, Palo Alto, California, Junho de 2007.