

Lucas Beordo

**Determinação experimental dos
parâmetros de um gerador síncrono
via testes convencionais (*off-line*) e
via técnica de análise de
sensibilidade de trajetória (*on-line*)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Energia e Automação

ORIENTADOR: Professor Dr. Luís Fernando Costa Alberto

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B481d Beordo, Lucas
Determinação experimental dos parâmetros de um gerador síncrono via testes convencionais (off-line) e via técnica de análise de sensibilidade de trajetória (on-line) / Lucas Beordo; orientador Luís Fernando Costa Alberto. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Estimção de parâmetros. 2. Gerador síncrono. 3. Sensibilidade de trajetória. 4. Parâmetros padronizados. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Lucas Beordo

Título: "Determinação experimental dos parâmetros de um gerador síncrono via técnica de análise de sensibilidade de trajetória"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 20/11/2014,

com NOTA 10,0 (Dez, Zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado Luís Fernando Costa Alberto - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari - (SEL/EESC/USP)

Dr. Edson Aparecido Rozas Theodoro - (Pós-Doutorando - USP/campus São Carlos)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus e seu filho Jesus Cristo, aos meus pais João Carlos e Leonor, meus irmãos Poliana, Gisele e Mateus, à minha noiva Samantha, meu sogro José Carlos e sogra Selma, meus cunhados e todos que me apoiaram e contribuíram para esta conquista.

Agradecimentos

Agradeço a Deus e seu filho Jesus Cristo, por me darem forças e condições para realizar essa graduação.

Agradeço minha noiva, Samantha, pela paciência e por sempre estar ao meu lado nessa caminhada.

Agradeço ao pessoal da seção de graduação da UNESP (IGCE) - Rio Claro de 2011, principalmente Matheus, Eliana, Geraldo e Cléber.

Agradeço ao pessoal da seção de graduação da USP, principalmente a funcionária Priscila.

Agradeço a todos os funcionários e docentes da USP, por fazerem dessa instituição uma instituição de qualidade.

Agradeço ao professor Luís Fernando Costa Alberto pela orientação neste trabalho.

Agradeço ao professor Elmer Pablo Tito Cari, pela paciência, atenção e ajuda neste trabalho.

Agradeço ao amigo Fernando Fermino, pela companhia e ajuda em muitos trabalhos e provas.

Agradeço aos donos e funcionários do Madalena Musica e Bar – Rio Claro, que foram por muitos anos companheiros e amigos.

Agradeço aos alunos Taylon e Edson pela ajuda nos testes experimentais.

Agradeço aos técnicos Alessandro e César.

Agradeço ao “Japonês” pela orientação decisiva na escolha para cursar outra graduação.

Agradeço a funcionária Jussara por atender aos alunos sempre de bom humor, tirando dúvidas pertinentes ao curso.

Resumo

Beordo, Lucas (2014). Determinação experimental dos parâmetros de um gerador síncrono via testes convencionais (*off-line*) e via técnica de análise de sensibilidade de trajetória (*on-line*). Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Neste trabalho comparam-se técnicas convencionais com a técnica baseada em análise de sensibilidade de trajetória para estimar parâmetros do gerador síncrono. Os testes convencionais realizados foram:

- Ensaio de curto-circuito e circuito aberto em regime permanente
- Ensaio de curto-circuito brusco
- Ensaio de abertura da corrente de curto-circuito
- Ensaio de escorregamento
- Ensaio da máxima corrente indutiva

Os testes estão padronizados e bem documentados na literatura, entretanto requerem a parada da máquina e a obtenção das medidas é feita em condições especiais de operação. Por outro lado, a técnica baseada em sensibilidade de trajetória permite a estimação de parâmetros do gerador síncrono sem a necessidade de desligar a máquina.

Um pequeno sistema elétrico de potência foi montado em laboratório, com a máquina síncrona operando como gerador e foram feitas medições de: correntes e tensões de armadura, tensão e corrente de campo. No final compararam-se os valores dos parâmetros estimados pelos ensaios convencionais e pela técnica baseada em análise de sensibilidade de trajetória.

No final mostra-se que, a técnica baseada em análise de sensibilidade de trajetória estima os parâmetros do gerador síncrono com uma margem de erro pequena, comparando com os valores obtidos nos ensaios convencionais, e sugerem-se algumas modificações para que este erro possa ser minimizado.

Palavras-Chaves: Estimação de parâmetros. Gerador síncrono. Sensibilidade de trajetória. Parâmetros padronizados.

Abstract

Beordo, Lucas (2014). Experimental determination of the parameters of a synchronous generator via conventional tests (offline) and via technique trajectory sensitivity analysis (online). Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

This work compares conventional techniques with the technique based on trajectory sensitivity analysis to estimate parameters of synchronous generator. Some of the conventional tests are detached in the list below:

- Short circuit and open circuit in steady regime
- sudden short circuit
- Voltage recovery
- Slip test
- Maximum lagging current

The tests are standardized and well documented in the literature, however requires the stop of the machine and the measurements are made in special operations conditions. On the other hand, a technique based on trajectory sensitivity analysis enables estimation of the synchronous generator parameter without stopping the machine.

A small electric power system was assembled in the laboratory, with the synchronous machine operating as a generator and measurements were made of: currents and voltages armor, voltage and current field. At the end we compared the values of the parameters estimated by conventional assays and the technique based on trajectory sensitivity analysis.

At the end, it is shown that, the technique based on the trajectory sensitivity analysis estimates the parameters of the synchronous generator with a small margin of error compared to the values obtained in conventional tests and are suggested some modifications to this error can be minimized.

Key Words: Parameter estimation. Synchronous generator. Sensitivity of trajectory. Standard parameters.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Máquina síncrona de dois polos.....	3
Figura 2.2: Circuito equivalente da máquina síncrona na referência abc	5
Figura 2.3: Circuito equivalente da máquina síncrona na referência $0dq$	8
Figura 2.4: Circuito equivalente de eixo direto	9
Figura 2.5: Circuito equivalente de eixo em quadratura	9
Figura 3.1: Diagrama eletromecânico para o ensaio de circuito aberto	14
Figura 3.2: Ensaio de circuito aberto em regime permanente	15
Figura 3.3: Diagrama eletromecânico para o ensaio de curto-circuito.....	16
Figura 3.4: Ensaio de curto-circuito em regime permanente.....	16
Figura 3.5: Curvas necessárias para determinar as reatâncias síncronas de eixo direto..	17
Figura 3.6: Análise gráfica para determinação do fator de saturação	18
Figura 3.7: Diagrama eletromecânico para o ensaio de curto-circuito brusco	19
Figura 3.8: Curvas das correntes de curto-circuito.....	20
Figura 3.9: Média das envoltórias das correntes de curto-circuito	20
Figura 3.10: Gráfico para determinar T_2 , escala semi-logarítmica.....	22
Figura 3.11: Extrapolações dos períodos em regime permanente, subtransitório e transitório.....	23
Figura 3.12: Diagrama eletromecânico para determinar a corrente de campo que leva o gerador, em circuito aberto, à tensão nominal.....	23
Figura 3.13: Diagrama eletromecânico para o ensaio de abertura da corrente de curto-circuito.....	24
Figura 3.14: Ensaio de abertura da corrente de curto-circuito	24
Figura 3.15: Média das envoltórias e extrapolações dos períodos em regime permanente, transitório e subtransitório	25
Figura 3.16: Curva resultante após a subtração do valor em regime.....	26
Figura 3.17: Diagrama eletromecânico para o ensaio de escorregamento	27
Figura 3.18: Ensaio de escorregamento.....	28

Figura 4.1: Método para estimação dos parâmetros baseado no método de análise de sensibilidade de trajetória	30
Figura 4.2: Comparação entre saídas do sistema real e modelado	33
Figura 4.3: Diagrama esquemático da técnica de análise de sensibilidade de trajetória	35
Figura 5.1: Sistema de referência da máquina síncrona (eixo $d-q$), do sistema de potência e a proposta ($u-v$, na tensão terminal)	37
Figura 5.2: Diagrama eletromecânico do sistema elétrico montando em laboratório	38
Figura 5.3: Diagrama de blocos para estimar parâmetros com o modelo do gerador modificado	38
Figura 5.4: Procedimento completo para estimação dos parâmetros aplicando a técnica de análise de sensibilidade de trajetória	41
Figura 5.5: Fluxograma referente ao programa <i>Generator Parameter Estimation v1.0</i>	43
Figura 6.1: Conjunto, máquina síncrona (esquerda) e motor de corrente contínua (direita), utilizado em laboratório	44
Figura 6.2: Curva experimental para o ensaio de circuito aberto	46
Figura 6.3: Curva experimental para o ensaio de curto-circuito	47
Figura 6.4: Identificação das correntes I_{fs} e I_{fns}	47
Figura 6.5: Curva experimental das correntes de curto-circuito	48
Figura 6.6: Valores máximos e mínimos das correntes de curto-circuito	48
Figura 6.7: Média das envoltórias das correntes de curto-circuito	49
Figura 6.8: Comparação da curva do ensaio experimental com a curva característica	50
Figura 6.9: Curvas extrapoladas para os períodos em regime permanente, transitório e subtransitório	50
Figura 6.10: Tensões das fases a , b e c adquiridas no ensaio de abertura da corrente de curto-circuito	51
Figura 6.11: Média das envoltórias para o ensaio de abertura das correntes de curto-circuito	52
Figura 6.12: Curva resultante após a subtração do valor em regime	53
Figura 6.13: Curvas adquiridas no ensaio de escorregamento	54

Figura 6.14: Diagrama unifilar para o ensaio experimental da técnica de análise de sensibilidade de trajetória	56
Figura 6.15: Tensão de fase durante a perturbação	56
Figura 6.16: Corrente de armadura durante a perturbação	57
Figura 6.17: Tensão de campo durante a perturbação	57
Figura 6.18: Corrente de campo durante a perturbação.....	58
Figura 6.19: Tensão de campo calculada.....	59
Figura 6.20: Componentes de sequência positiva, negativa e zero da tensão	59
Figura 6.21: Componentes de sequência positiva, negativa e zero da corrente	60
Figura 6.22: Potência ativa e reativa	60
Figura 6.23: Referência para determinar a base da tensão de campo.....	61
Figura 6.24: Potência ativa no início do processo de estimação	63
Figura 6.25: Potência reativa no início do processo de estimação	64
Figura 6.26: Potência ativa após a convergência dos parâmetros	64
Figura 6.27: Potência reativa após a convergência dos parâmetros	65

Lista de símbolos

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

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

X_{lkq} - Reatância de dispersão do enrolamento de amortecimento de eixo em quadratura

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

$X_{lf d}$ - Reatância de dispersão do enrolamento campo

X_{md} - Reatância de magnetização de eixo direto

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

T'_{d0} - Constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo direto

T''_{d0} - Constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo direto

T'_d - Constante de tempo transitória de curto-circuito de eixo direto

T''_d - Constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo direto

T'_{q0} - Constante de tempo transitória de circuito aberto de eixo em quadratura

T''_{q0} - Constante de tempo subtransitória de circuito aberto de eixo em quadratura

T'_q - Constante de tempo transitória de curto-circuito de eixo em quadratura

T''_q - Constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo em quadratura

r_{fd} - Resistência elétrica do enrolamento de campo

r_{kq} - Resistência elétrica do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura

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

r_s - Resistência elétrica do enrolamento do estator por fase

Sumário

Dedicatória	iii
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Símbolos	xv
1. Introdução	1
1.1. Organização do Trabalho.....	2
2. Modelagem da Máquina Síncrona	3
2.1. Elementos da máquina síncrona trifásica e princípios de funcionamento.....	3
2.2. Modelagem do gerador síncrono em variáveis <i>abc</i>	4
2.3. Modelagem do gerador síncrono sistema de referência <i>Odq</i>	6
2.4. Modelos simplificados.....	9
2.4.1. Modelo de dois eixos.....	10
2.4.2. Modelo de um eixo	10
2.4.3. Modelo clássico	11
2.5. Parâmetros padronizados em função dos parâmetros fundamentais	11
3. Determinação experimental dos parâmetros padronizados	14
3.1. Introdução.....	14
3.2. Ensaio de circuito aberto e curto em regime permanente.....	14
3.3. Ensaio de curto-circuito brusco	18
3.4. Ensaio de abertura da corrente de curto-circuito	23
3.5. Ensaio de escorregamento	27
3.6. Ensaio da máxima corrente indutiva	29
4. Técnica de sensibilidade de trajetória	30
4.1. Introdução.....	30
4.2. Funções de sensibilidade de trajetória	31

4.3. Funções de sensibilidade de trajetória aplicada a um sistema linear invariante no tempo	31
4.4. Funções de sensibilidade de trajetória para sistemas não lineares	32
4.5. Processo de minimização de erro	32
5. Estimação de parâmetros aplicada ao gerador síncrono	36
5.1. Introdução.....	36
5.2. Alternativas de solução.....	36
5.3. Esquema para estimar parâmetros com gerador em operação.....	37
5.4. Estimação dos parâmetros elétricos do gerador utilizando o modelo	39
5.5. Utilização do programa <i>Generator Parameter Estimation v1.0</i>	41
6. Testes e Resultados	44
6.1. Ensaio de circuito aberto e curto-circuito em regime permanente	44
6.2. Ensaio de curto-circuito brusco	47
6.3. Ensaio de abertura da corrente de curto-circuito	50
6.4. Ensaio de escorregamento	53
6.5. Ensaio da máxima corrente indutiva	55
6.6. Técnica de sensibilidade de trajetória.....	55
6.6.1. Aplicação da técnica de análise de sensibilidade de trajetória	61
6.7. Quadro comparativo dos parâmetros	67
7. Conclusões	71
Referências bibliográficas.....	73

Capítulo 1

1. Introdução

A principal fonte de geração de energia elétrica mundial se dá através do uso de geradores síncronos. Com o aumento dos sistemas elétricos de potência (SEP), para manter a estabilidade do sistema, torna-se imprescindível o conhecimento do comportamento do sistema perante modificações em seu estado, como: chaveamentos de cargas, defeitos na rede e interação com outros geradores associados à rede. Simulações computacionais são empregadas para isto e para se obter uma análise precisa das condições reais, é necessário que o modelo matemático usado nas simulações, descreva o mais próximo possível o comportamento real do sistema. Engenheiros tomam decisões com base nestas simulações e decisões equivocadas podem levar o sistema ao colapso, provocando grandes prejuízos econômicos aos envolvidos.

Os modelos matemáticos dos geradores utilizados em simulações são funções de parâmetros correspondentes às características físicas dos elementos do gerador. Dado a importância dos geradores nos sistemas elétricos, para que se obtenha uma resposta satisfatória das simulações que descreva o que está acontecendo no sistema, é importante conhecer os parâmetros associados aos modelos dos geradores.

Na literatura encontram-se alguns métodos para se determinar os parâmetros das máquinas síncronas, o *Institute of Electric and Electronic Engineers (IEEE)* lançou a norma Std115 que enumera e descreve testes para a determinação destes parâmetros. A norma Std115 está dividida em duas partes, a primeira relata testes de desempenho e aceitação, usualmente realizados no comissionamento dos geradores, e a segunda trata dos procedimentos para determinação dos parâmetros. Porém, os testes encontrados na literatura muitas vezes são realizados com o gerador “*off line*”, isto é, somente são passíveis de serem feitos com o gerador desconectado da rede. Além disso, alguns testes requerem esforços ao gerador, como é o caso do teste em curto-circuito brusco, que carrega o gerador com altas correntes.

Este trabalho vislumbra a determinação experimental dos parâmetros da máquina síncrona através de testes “*on line*”, isto é, com o gerador conectado a rede, por meio da técnica de análise de sensibilidade de trajetória, onde o sistema sofre uma perturbação e, pela análise da resposta do gerador, é possível determinar tais parâmetros. O método utilizado neste trabalho foi proposto em [1] e possui as seguintes características:

- Estimativa independente dos parâmetros elétricos e mecânicos;
- Estimar parâmetros a partir de perturbações obtidas com o gerador em operação;

- Utilização de medidas de fácil acesso;
- Independência dos parâmetros da rede;
- Divisão do processo de estimação de parâmetros em duas fases.

Neste trabalho, relata-se pela primeira vez a aplicação da técnica proposta em [1] com dados reais obtidos em testes de laboratório. Comparam-se os parâmetros determinados pelos métodos convencionais com aqueles determinados pelo método de análise de sensibilidade de trajetória.

1.1. Organização do Trabalho

O trabalho foi organizado como mostrado a seguir.

O Capítulo 2 apresenta alguns conceitos teóricos sobre a modelagem do gerador síncrono, seus sistemas de referência e parâmetros.

O Capítulo 3 apresenta a descrição de alguns ensaios convencionais e métodos para realização dos mesmos.

O Capítulo 4 apresenta fundamentos teóricos sobre a técnica de análise de sensibilidade de trajetória.

O Capítulo 5 mostra a aplicação da metodologia desenvolvida para estimar parâmetros de geradores síncronos.

O Capítulo 6 apresenta os resultados dos parâmetros obtidos nos diversos ensaios e na técnica de análise de sensibilidade de trajetória.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e algumas considerações finais do trabalho.

Capítulo 2

2. Modelagem da máquina síncrona

2.1. Elementos da máquina síncrona trifásica e princípios de funcionamento

A figura 2.1 mostra um esquema básico dos elementos de uma máquina síncrona trifásica de dois polos que, simplificada, é composta por um elemento gerador de campo, geralmente é a parte girante da máquina denominada rotor, e por enrolamentos de armadura, localizados na parte fixa da máquina denominada estator.

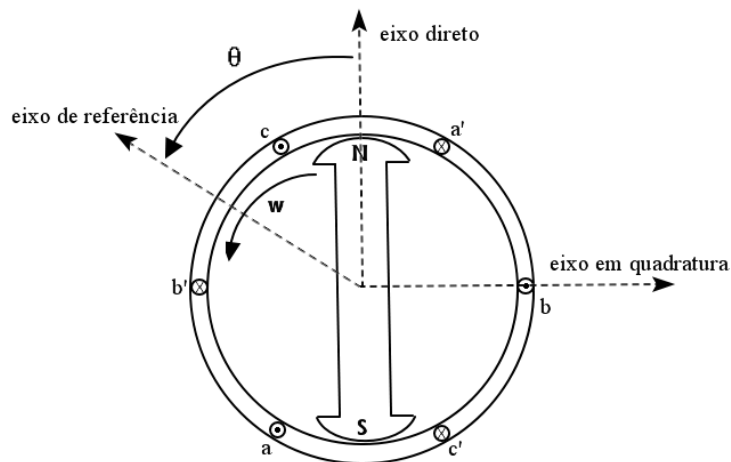


Figura 2.1: Máquina síncrona de dois polos

O enrolamento principal presente no rotor é alimentado por corrente contínua produzindo um campo magnético paralelamente ao seu eixo. Existem no rotor enrolamentos curto-circuitados, chamados enrolamentos amortecedores cuja função é amortecer pequenas oscilações resultantes de perturbações nas condições normais de operação da máquina.

Para simplificar a análise da máquina síncrona é conveniente usar apenas um par de polos e considerar comportamento idêntico para os demais polos sem perda de generalidade.

Os enrolamentos da armadura são distribuídos entorno da máquina de forma que o movimento do campo magnético produzido pelo acionamento do rotor induza, nos enrolamentos da armadura, uma força magneto motriz aproximadamente senoidal que provoca o aparecimento de tensões alternadas senoidais nos enrolamentos da armadura com frequência determinada pela velocidade angular e pelo número de polos magnéticos do rotor.

Os enrolamentos das fases a , b e c estão dispostos defasados uns dos outros de 120° . O rotor gira à velocidade mecânica representada pela letra ω e a letra θ representa o ângulo entre o eixo direto e o eixo de referência.

A quantidade de polos de um gerador síncrono depende usualmente da máquina primária. Turbinas hidráulicas, devido a sua grande inércia e diâmetro do rotor, giram relativamente a baixas velocidades havendo necessidade de um número maior de pares de polos para atingir a frequência elétrica. O emprego de máquinas de polos salientes é mais adequado mecanicamente para essas ocasiões. Turbinas a vapor giram em altas velocidades, caracterizando a necessidade de um número menor de pares de polos para atingir a frequência elétrica desejada.

A relação entre a velocidade angular mecânica e a velocidade angular elétrica é dada por:

$$\omega_m = \frac{2}{P} \omega_s \quad (2.1)$$

Onde ω_m é a velocidade angular mecânica, P representa o número de polos e ω_s é a velocidade angular elétrica.

2.2. Modelagem do gerador síncrono em variáveis abc

Definem-se dois eixos fixos no rotor, como mostrado na figura 2.1, sendo um eixo paralelo ao centro magnético do rotor, chamado eixo direto (d), e outro eixo, em quadratura (q), noventa graus elétricos atrasados do eixo direto. A posição relativa do rotor para o estator é dada pelo ângulo θ , que é o ângulo entre o eixo direto e o eixo magnético do enrolamento da fase a.

Um modelo que representa o circuito equivalente do circuito de campo e circuito de armadura é mostrado na figura 2.2, onde são inclusos mais dois circuitos para representar os efeitos dos enrolamentos amortecedores que, dependendo da modelagem, podem ser representados por mais de dois enrolamentos no circuito de campo.

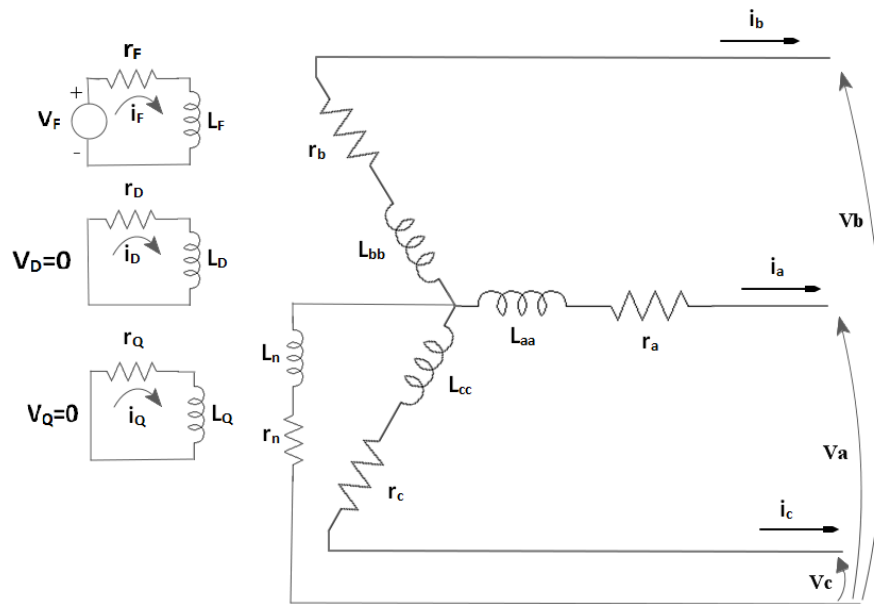


Figura 2.2: Circuito equivalente da máquina síncrona na referência abc.

Considere o circuito mostrado na figura 2.2. O circuito de armadura consiste em enrolamentos trifásicos conduzindo correntes alternadas. O circuito de campo, alimentado por corrente contínua, e outros dois circuitos correspondentes aos enrolamentos amortecedores do rotor. Estes circuitos estão acoplados magneticamente. Utilizando a convenção de gerador, isto é, correntes positivas são correntes saindo dos enrolamentos da armadura, notamos que, com a grande quantidade de circuitos magneticamente acoplados, as indutâncias próprias e mútuas do estator variam relativamente com a posição do rotor devido à variação da permeabilidade magnética provocada pela não uniformidade do entreferro. Este efeito se torna mais acentuado em máquinas síncronas de polos salientes, onde há maior diferença no caminho do fluxo entre os eixos direto e em quadratura.

Aplicando a Lei de Lenz, juntamente com lei de Kirchhoff, podemos escrever as equações diferenciais do circuito do estator e do rotor na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{abc} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_n \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

onde, \mathbf{v}_{abc} , \mathbf{i}_{abc} , e λ_{abc} são vetores com as tensões, correntes e fluxos concatenados nas fases a , b e c , respectivamente, \mathbf{v}_{FDQ} , \mathbf{i}_{FDQ} e λ_{FDQ} são vetores com as tensões, correntes e fluxos concatenados nos circuitos F, D e Q, respectivamente, \mathbf{R}_{abc} e \mathbf{R}_{FDQ} matrizes diagonais com as resistências dos circuitos a , b , c , F, D e Q, respectivamente, e \mathbf{v}_n um vetor com a tensão de neutro.

Como os fluxos concatenados nos circuitos de campo e armadura variam com a posição do rotor, se torna difícil a análise por meio destas equações.

2.3. Modelagem do gerador síncrono sistema de referência $0dq$

Um meio de simplificar as equações do comportamento dinâmico da máquina síncrona é mudar o sistema de referência fixo no estator para um sistema de referência girante que acompanha o movimento do rotor. A adoção da referência girante faz com que as indutâncias da máquina deixem de depender da posição angular θ e é realizado com uma mudança de variável chamada Transformação de Park [2].

A transformação de Park cria três novas correntes i_d , i_q e i_0 , sendo i_d a projeção das correntes de fase no eixo direto, i_q a projeção das correntes de fase no eixo em quadratura e i_0 uma corrente estacionária proporcional à corrente de sequência zero. Para condições equilibradas $i_0 = 0$. A transformação de Park, originalmente introduzida por Park, é dada por:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Sendo P' uma matriz, definida por:

$$P' = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Apesar da grande simplificação proporcionada, esta matriz apresentou uma característica indesejada onde os valores da potência trifásica calculados antes e depois da transformação eram diferentes. Definindo uma nova matriz P pode-se mostrar que a potência agora é invariante a essa transformação [3].

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Aplicando a transformação de Park para este circuito obtém-se [4]:

$$\begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{0dq} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{0dq} \\ \dot{\lambda}_{FDQ} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{P}P^{-1}\lambda_{0dq} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{0dq} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Sendo \mathbf{R}_{0dq} uma matriz diagonal com resistências equivalentes e \mathbf{v}_{0dq} , \mathbf{i}_{0dq} e λ_{0dq} vetores com as tensões, correntes e fluxos concatenados nos enrolamentos fictícios 0 , d e q ,

respectivamente. No novo sistema de coordenadas as indutâncias próprias e mútuas dos enrolamentos fictícios 0 , d e q não variam com o ângulo θ .

A relação entre os fluxos magnéticos e as correntes nos circuitos pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Sendo L_i a indutância própria do enrolamento i , M_F a indutância mútua entre os enrolamentos F e d, M_D a indutância mútua entre os enrolamentos D e d, M_Q a indutância mútua entre os enrolamentos Q e q, ω a velocidade angular absoluta do rotor e k uma constante igual à $\sqrt{3/2}$.

Rearranjando as equações, obtém-se um bloco de equações para o eixo direto e outro bloco de equações para o eixo em quadratura. Pode-se admitir as resistências do circuito do estator iguais, dessa forma obtemos [4]:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ -v_F \\ v_D = 0 \\ v_q \\ v_Q = 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r + 3r_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & \omega L_q & \omega kM_q \\ 0 & 0 & r_F & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 & 0 \\ 0 & -\omega L_d & -\omega kM_F & -\omega kM_D & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_0 + 3L_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & kM_F & kM_D & 0 & 0 \\ 0 & kM_F & L_F & M_R & 0 & 0 \\ 0 & kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q \\ 0 & 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_F \\ i_D \\ i_q \\ i_Q \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

sendo v_i , i_i e r_i a tensão, a corrente e a resistência do i -ésimo enrolamento e r_n e L_n as respectivas resistência e indutância do neutro.

Isolando-se o vetor composto pelas derivadas das correntes $\frac{di}{dt}$, pode-se escrever o conjunto de equações que compõe (2.8) na forma de espaço de estados, que juntamente com as duas equações mecânicas formam o modelo em espaço de estados para a máquina síncrona.

Em condições balanceadas a equação matricial (2.8) pode ser escrita sem a equação de sequência zero, podendo ser resolvida separadamente para condições desbalanceadas.

Com o novo sistema de coordenadas criado pela transformação de Park, pode-se representar novamente os circuitos do estator (d e q) agora desacoplados. Modela-se a mesma máquina com dois circuitos que representam as mesmas características, sendo um circuito equivalente representando o eixo d e outro representando o eixo q como mostrado na figura 2.3.

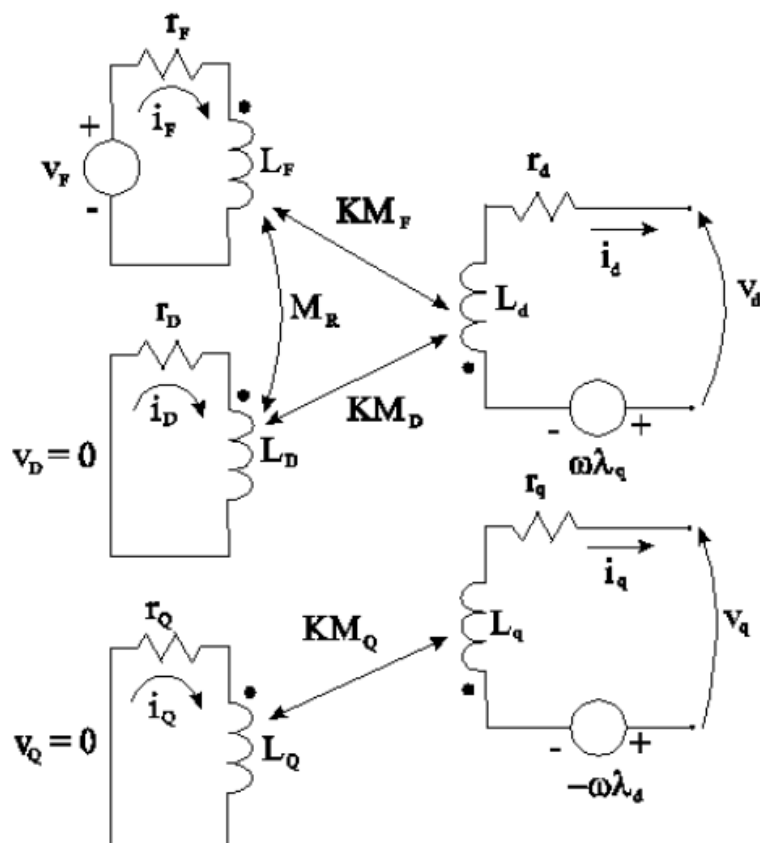


Figura 2.3: Circuito equivalente da máquina síncrona na referência 0dq.

Adotando-se uma base especial para a conversão das grandezas ao sistema por unidade (p.u.), de modo que o fluxo mútuo concatenado em qualquer um dos enrolamentos seja igual aos demais, faz com que a indutância mútua entre dois enrolamentos possa ser representada por um circuito T, permitindo que o conjunto de equações 2.8 seja representado por apenas dois circuitos equivalentes, conforme figuras 2.4 e 2.5,

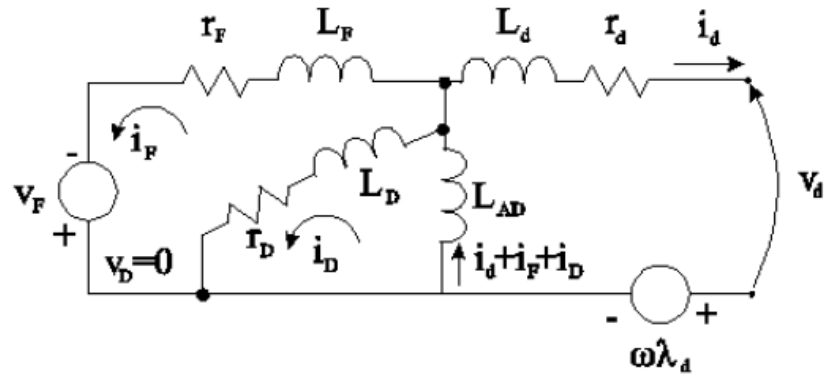


Figura 2.4: Circuito equivalente de eixo direto.

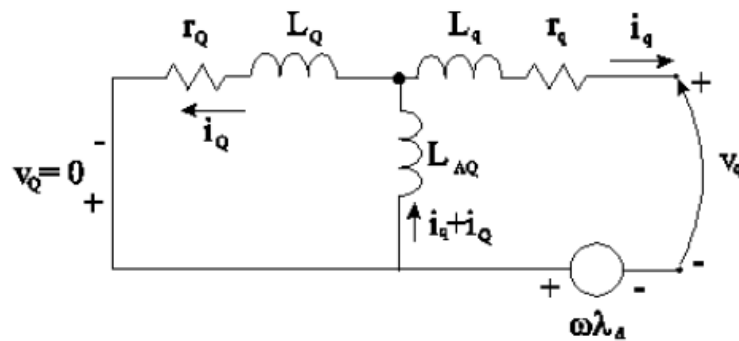


Figura 2.5: Circuito equivalente de eixo em quadratura.

onde, em p.u., $L_{AD} = kM_F = kM_D = M_R$ e $M_{AQ} = kM_Q$.

2.4. Modelos simplificados

Em estudos de estabilidade é, frequentemente, necessário obter a resposta do sistema de um grande número de máquinas síncronas a uma determinada perturbação numa condição estável de operação do sistema, isto implicaria num conjunto grande de equações diferenciais se adotada uma modelagem detalhada para cada uma dessas máquinas. É comum utilizar uma modelagem detalhada apenas nas máquinas que estão eletricamente mais próximas da perturbação em estudo [3]. Para facilitar a estimativa dos parâmetros da máquina síncrona, algumas simplificações nos modelos são adotadas. O modelo de dois eixos, para a máquina de polos lisos, o modelo de um eixo, para a máquina de polos salientes e o modelo clássico são apresentados.

Estes modelos incluem os efeitos do enrolamento amortecedor, mas despreza as tensões transformatórias proporcionadas pelas variações dos fluxos nos eixos direto e em quadratura, por serem pequenas, quando comparadas com as tensões rotacionais. Retirando os termos $\dot{\lambda}_d$ e

$\dot{\lambda}_q$ das equações de v_d e v_q , estas se tornam duas equações algébricas. Outra simplificação adotada é considerar $\omega_m = 1$ p.u., para este modelo também se despreza os fenômenos ocorridos no período subtransitório e os efeitos do enrolamento amortecedor. Isto permite que se faça uma primeira simplificação da equação (2.8) nos termos de v_d e v_q .

$$v_d = -\lambda_q - r i_d \quad (2.9)$$

$$v_q = \lambda_d - r i_q \quad (2.10)$$

Outra simplificação do modelo é feita nas indutâncias subtransitórias L_q'' e L_d'' , que são numericamente iguais em p.u. Isto permite que o estator possa ser modelado por apenas um circuito equivalente, consistindo de uma força eletromotriz atrás de uma resistência e de uma reatância subtransitória.

Não é o intuito deste trabalho analisar detalhadamente as equações que regem o comportamento da máquina síncrona, para maiores detalhes é recomendado ao leitor estudar as referências [4] e [5]. Aqui serão apresentadas e utilizadas as equações obtidas nestas referências.

2.4.1. Modelo de dois eixos

Neste modelo segue as considerações mostradas anteriormente, porém, devido as correntes de Foucault que fluem através do rotor sólido de polos lisos é necessário incluir um circuito equivalente adicional no eixo Q para modelar essas correntes.

$$\delta = \omega_e \quad (2.11)$$

$$\dot{\omega}_e = \frac{\omega_o}{2H} [P_m - E'_q I_q - E'_d I_d - (x_d - x'_d) I_d I_q - \frac{D}{\omega_o} \omega_m] \quad (2.12)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - E'_q + (x_d - x'_d) I_d] \quad (2.13)$$

$$\dot{E}'_d = -\frac{1}{T'_{do}} [E'_d + (x_q - x'_q) I_q] \quad (2.14)$$

$$V_q = E'_q - r I_q + x'_d I_d \quad (2.15)$$

$$V_d = E'_d - r I_d + x'_q I_q \quad (2.16)$$

2.4.2. Modelo de um eixo

Na máquina de polos salientes, os caminhos das correntes através do rotor são bem menores, por isso estas correntes podem ser desprezadas. Sendo assim, não é usual incluir o circuito de eixo direto na modelagem ($E_d = 0$). Além disso, as reatâncias x_q e x'_q são

praticamente iguais, pois a diferença entre elas é consequência das correntes de Foucault, que estão sendo desprezadas. Portanto, a tensão de excitação E e a tensão transitória nunca saem do eixo em quadratura.

$$\dot{\delta} = \omega_e \quad (2.17)$$

$$\dot{\omega}_e = \frac{\omega_o}{2H} [P_m - E'_q I_q - E'_d I_d - (x_d - x'_q) I_d I_q - \frac{D}{\omega_o} \omega_m] \quad (2.18)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - E'_q + (x_d - x'_d) I_d] \quad (2.19)$$

$$V_q = E'_q - r I_q + x'_d I_d \quad (2.20)$$

$$V_d = -r I_d - x'_q I_q \quad (2.21)$$

2.4.3. Modelo clássico

Além de incorporar todas as simplificações anteriores, a modelagem clássica admite também que, a variação da tensão E'_q durante o período transitório não é muito grande, e que a tensão E_{FD} não tem variações muito rápidas. Dessa forma, pode-se considerar o fluxo no eixo direto e, portanto, também a tensão E'_q , como constantes [3]. Este modelo é usado para modelar máquinas eletricamente distantes do distúrbio estudado.

$$\dot{\omega}_e = \frac{\omega_o}{2H} [P_m - \frac{E' V_t}{x'_d} \text{sen}(\delta - \theta)] \quad (2.22)$$

$$\dot{\delta} = \omega_e \quad (2.23)$$

$$V_t = E' - r I_t + x'_d I_t \quad (2.24)$$

2.5. Parâmetros padronizados em função dos parâmetros fundamentais

Vimos nas equações que modelam matematicamente o comportamento da máquina síncrona que, para realizar simulações, devemos conhecer os parâmetros da máquina tais como: resistências, indutâncias próprias e mútuas dos enrolamentos, estes são chamados parâmetros fundamentais da máquina síncrona. Porém, nos ensaios não é possível determinar diretamente todos esses parâmetros fundamentais, nos ensaios determina-se os parâmetros chamados padronizados (*Standard*) que são função dos parâmetros fundamentais.

Em [6], [7] e [8] são descritos métodos para determinar os parâmetros padronizados, tais como: as reatâncias de eixo direto (X_d) e de eixo em quadratura (X_q), as reatâncias

transitórias de eixo direto (X'_d) e de eixo em quadratura (X'_q), as reatâncias subtransitórias de eixo direto (X''_d) e em quadratura (X''_q), constantes de tempo do período transitório (T'_d) e subtransitório (T''_d), constantes de tempo de circuito aberto de eixo direto do período transitório (T'_{d0}) e subtransitório (T''_{d0}).

As relações entre os parâmetros fundamentais e os padronizados são dadas por [4], [5]:

$$X_d = X_{ls} + X_{md} \quad (2.25)$$

$$X_q = X_{ls} + X_{mq} \quad (2.26)$$

$$X'_d = X_{ls} + \frac{X_{md}X_{lfd}}{X_{md}+X_{lfd}} = X_d - \frac{X_{md}^2}{X_{fd}} \quad (2.27)$$

$$X_{fd} = X_{md} + X_{lfd} \quad (2.28)$$

$$X'_q = X_{ls} + \frac{X_{mq}X_{lkq}}{X_{mq}+X_{lkq}} = X_q - \frac{X_{mq}^2}{X_{kq}} \quad (2.29)$$

$$X_{kq} = X_{mq} + X_{lkq} \quad (2.30)$$

$$X''_d = X_{ls} + \frac{X_{md}X_{lfd}X_{lkd}}{X_{md}X_{lfd}+X_{lfd}X_{lkd}+X_{md}X_{lkd}} \quad (2.31)$$

$$X''_q = X_{ls} + \frac{X_{mq}X_{lkq}}{X_{mq}+X_{lkq}} \quad (2.32)$$

$$T'_{d0} = \frac{X_{fd}}{\omega_s r_{fd}} \quad (2.33)$$

$$T'_{q0} = \frac{X_{kq}}{\omega_s r_{kq}} \quad (2.34)$$

$$T''_{d0} = \frac{1}{\omega_s r_{kd}} \left(X_{lkd} + \frac{X_{md}X_{lfd}}{X_{md}+X_{lfd}} \right) \quad (2.35)$$

$$T''_{q0} = \frac{1}{\omega_s r_{kq}} \left(X_{lkq} + \frac{X_{mq}X_{lkq}}{X_{mq}+X_{lkq}} \right) \quad (2.36)$$

$$T'_d = \frac{1}{\omega_s r_{fd}} \left(X_{lfd} + \frac{X_{md}X_{ls}}{X_{md}+X_{ls}} \right) \quad (2.37)$$

$$T''_d = \frac{1}{\omega_s r_{kd}} \left(X_{lkd} + \frac{X_{md}X_{ls}X_{lfd}}{X_{md}X_{ls}+X_{mq}X_{lfd}+X_{ls}X_{lfd}} \right) \quad (2.38)$$

$$T''_q = \frac{1}{\omega_s r_{kq}} \left(X_{lkq} + \frac{X_{mq}X_{ls}}{X_{mq}+X_{ls}} \right) \quad (2.39)$$

Considerando-se que as resistências elétricas dos enrolamentos amortecedores dos eixos q e d são bem maiores do que as resistências elétricas do enrolamento de campo, pode se realizar algumas simplificações e chegar aos seguintes resultados [5].

$$\frac{T'_d}{T'_{d0}} = \frac{X'_d}{X_d} \quad (2.40)$$

$$\frac{T''_d}{T''_{d0}} = \frac{X''_d}{X'_d} \quad (2.41)$$

$$\frac{T''_q}{T''_{q0}} = \frac{X''_q}{X_q} \quad (2.42)$$

Capítulo 3

3. Determinação experimental dos parâmetros padronizados

3.1. Introdução

Sabemos que os geradores são compostos por diversos parâmetros elétricos, como visto no capítulo anterior, também que os parâmetros fundamentais são funções dos parâmetros padronizados. Existem diversos ensaios encontrados na literatura que permitem determinar tais parâmetros padronizados e por meio das relações, apresentadas na seção (2.5), se encontra o valor dos parâmetros fundamentais. Para uma modelagem precisa do comportamento do gerador síncrono é necessário o conhecimento desses parâmetros. Neste capítulo, apresentam-se alguns ensaios que podem ser feitos para obter os valores das reatâncias e constantes de tempo do gerador síncrono.

3.2. Ensaio de circuito aberto e curto-circuito em regime permanente

Através do ensaio de circuito aberto em regime permanente, juntamente com o ensaio de curto-circuito em regime permanente, pode-se obter o valor das reatâncias síncronas de eixo direto saturada (X_{ds}) e não saturada (X_{dns}).

Ensaio de circuito aberto em regime permanente

Para realizar o ensaio de circuito aberto em regime permanente é necessário acionar o gerador a velocidade síncrona, variar a corrente de campo e adquirir os valores de tensão de armadura em circuito aberto.

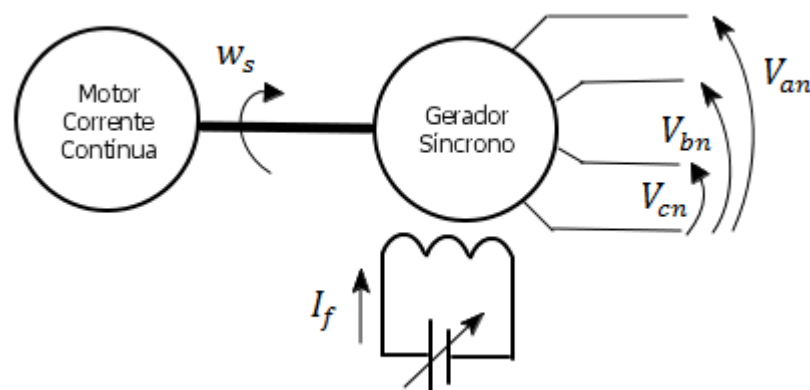


Figura 3.1: Diagrama eletromecânico para o ensaio de circuito aberto.

A figura 3.2 ilustra o comportamento esperado da curva da tensão (V_a) em função da corrente de campo (I_f).

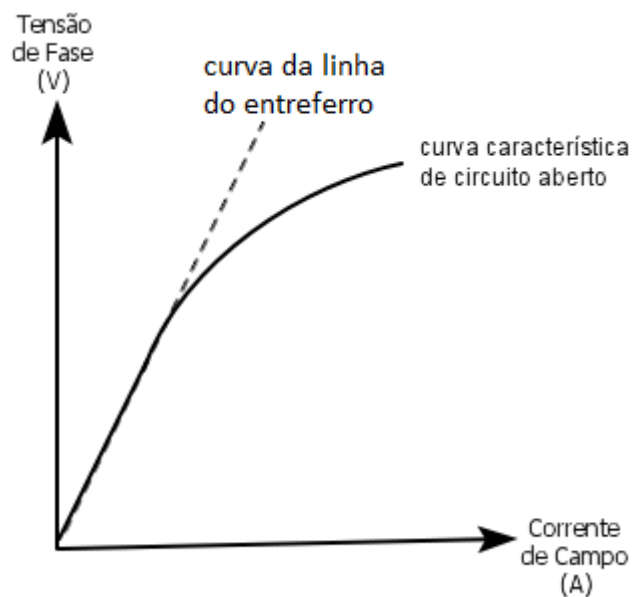


Figura 3.2: Ensaio de circuito aberto em regime permanente.

A linha pontilhada representa o comportamento da curva da tensão (V_a) em função da corrente de campo (I_f) se não houvesse saturação no núcleo.

Ensaio de curto-circuito em regime permanente

Ao realizar este ensaio, o gerador deve ser acionado à velocidade síncrona e seus terminais de armadura devem estar curto-circuitados. Deve-se variar a corrente de campo, até que o valor da corrente de armadura atinja o valor nominal, e tomar nota dos valores da corrente de campo e corrente de armadura.

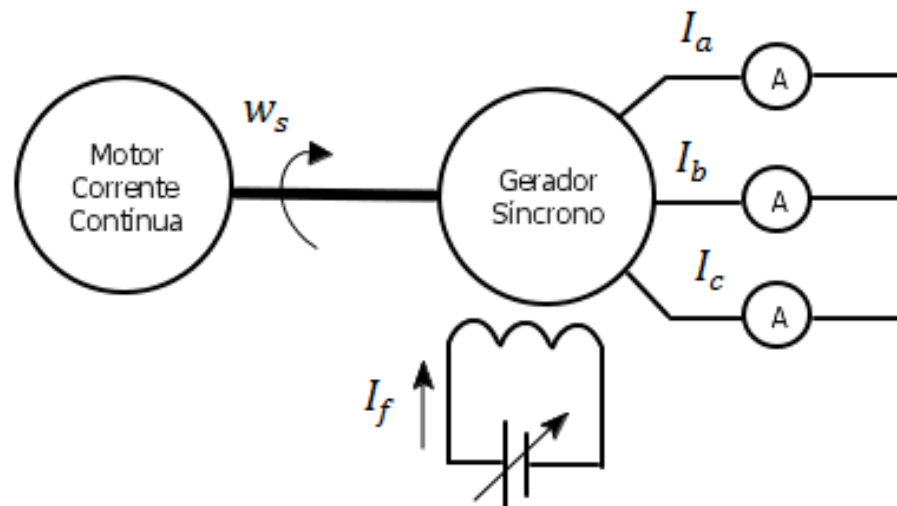


Figura 3.3: Diagrama eletromecânico para o ensaio de curto-circuito.

A figura 3.4 ilustra o comportamento esperado da curva da corrente de armadura (I_a) em função da corrente de campo (I_f). Neste caso o comportamento da curva é uma reta, pois no caso de curto-circuito a corrente de armadura mantém-se proporcional a força magnetomotriz de excitação de campo, desde zero até valores bem acima do nominal.

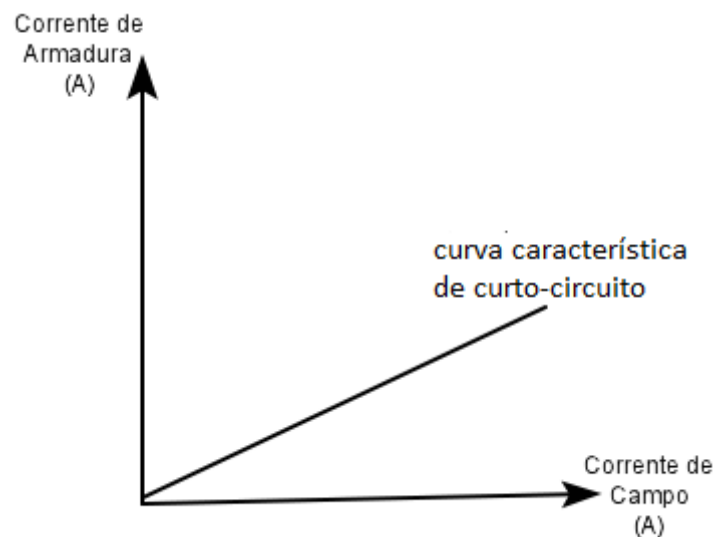


Figura 3.4: Ensaio de curto-circuito em regime permanente.

Para determinar o valor da reatância síncrona saturada é necessário encontrar o valor da corrente de campo I_f no gráfico, $V_a \times I_f$, para tensão nominal e encontrar no gráfico, $I_a \times I_f$, o valor da corrente de armadura correspondente a mesma corrente de campo. O mesmo procedimento é feito para a reatância síncrona não saturada, utilizando a linha do entreferro para

determinar a tensão correspondente à mesma corrente de campo encontrada. A figura 3.5 ilustra o procedimento.

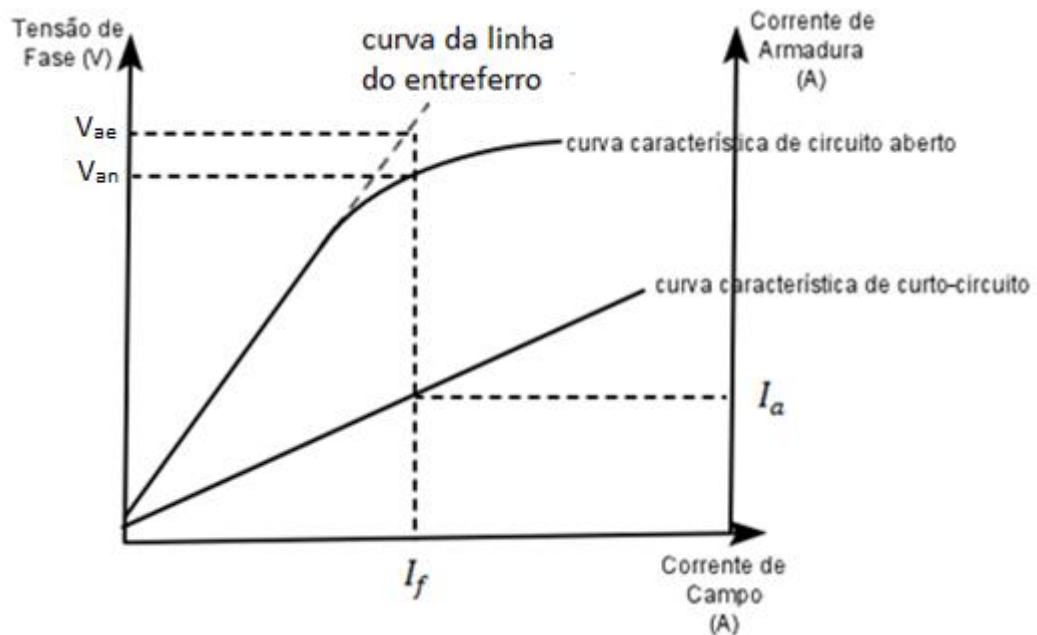


Figura 3.5: Curvas necessárias para determinar as reatâncias síncronas de eixo direto.

As reatâncias síncronas de eixo direto são dadas conforme as equações (3.1) e (3.2).

$$X_{dns} = \frac{V_{ae}}{I_a} \quad (3.1)$$

$$X_{ds} = \frac{V_{an}}{I_a} \quad (3.2)$$

Onde V_{ae} é a tensão (fase) de armadura correspondente à linha do entreferro, V_{an} é a tensão (fase) nominal do gerador e I_a é a corrente de armadura para o valor da corrente de campo obtida. A reatância síncrona calculada desta forma é uma aproximação, pois o valor da resistência elétrica do enrolamento do estator é desprezado nesse cálculo. Contudo, em geral a resistência do estator é muito menor comparada ao valor de X_d o que leva o erro a ser pequeno.

Os valores de X_d dependem da reatância de dispersão, X_l , e da reatância de magnetização do eixo direto, X_m , como visto no capítulo 2. O valor de X_l não varia com o ponto de operação da máquina, mas o valor de X_m varia com o ponto de operação da máquina, pois a permeabilidade magnética, a qual X_m é função, varia com nível de saturação do ferro. Portanto, consideremos as seguintes equações;

$$X_{dns} = X_l + X_{mns} \quad (3.3)$$

$$X_{ms} = k_s X_{mns} \quad (3.4)$$

onde, k_s é o fator de saturação que, para a máquina não saturada $k_s = 1$ e para máquina em condições de saturação $k_s > 1$, X_{dns} é a reatância síncrona de eixo direto não saturada, X_{mns} é a reatância de magnetização não saturada.

O fator de saturação pode ser encontrado analisando-se a curva de circuito aberto, encontrando para tensão nominal, duas correntes I_{fns} e I_{fs} , que são valores das correntes de campo encontrados utilizando a linha do entreferro e a curva saturada respectivamente. A figura 3.6 ilustra o procedimento.

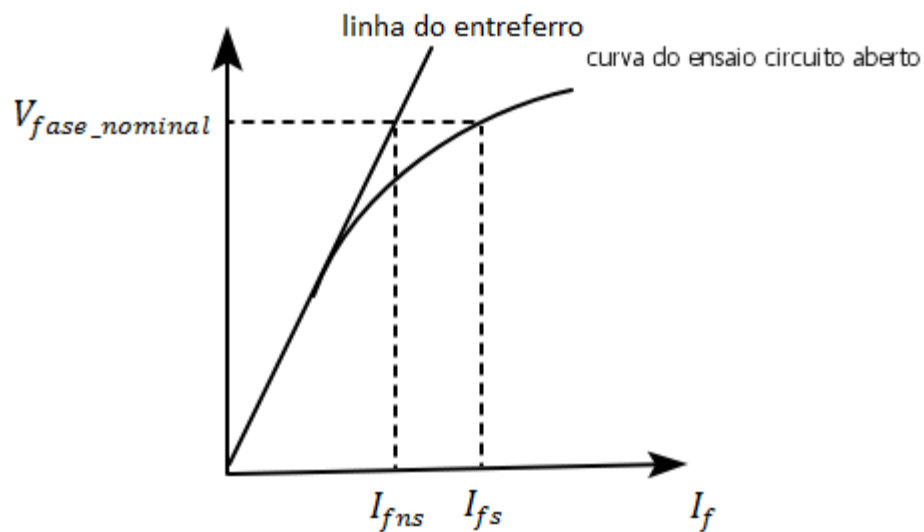


Figura 3.6: Análise gráfica para determinação do fator de saturação.

O fator de saturação é dado por:

$$k_s = \frac{I_{fs}}{I_{fns}} \quad (3.5)$$

3.3. Ensaio de curto-circuito brusco

O ensaio de curto-circuito brusco nos enrolamentos da armadura permite que sejam determinados somente os parâmetros de eixo direto da máquina síncrona. Este ensaio pode ser realizado para estimar a magnitude das correntes de curto-circuito e suas taxas de decaimento, calibrar sistemas de proteção e determinar os parâmetros de eixo direto.

A análise das curvas de curto-circuito mostra que existem três períodos bem definidos para o comportamento das correntes depois do curto-circuito, sendo: um período inicial curto, onde a corrente decai rapidamente, chamado de regime subtransitório, um período subsequente mais longo chamado de regime transitório e um período permanente, em regime. Para os dois

primeiros regimes estão associadas constantes de tempo, que indicam a taxa de decaimento para que as correntes, em cada período, decaiam do valor de $1/e$, ou 0,368, do seu valor inicial.

Para a realização do ensaio é necessário que o gerador esteja à velocidade síncrona, com o enrolamento de campo excitado, de forma a se ter alguma tensão nos terminais da armadura.

Os terminais da armadura devem permanecer em circuito aberto. Num determinado instante de tempo, fecha-se o contato nos terminais da armadura provocando um curto-circuito trifásico no gerador. As correntes nos enrolamentos da armadura devem ser adquiridas com sistema de aquisição de dados para posteriormente serem tratadas e analisadas.

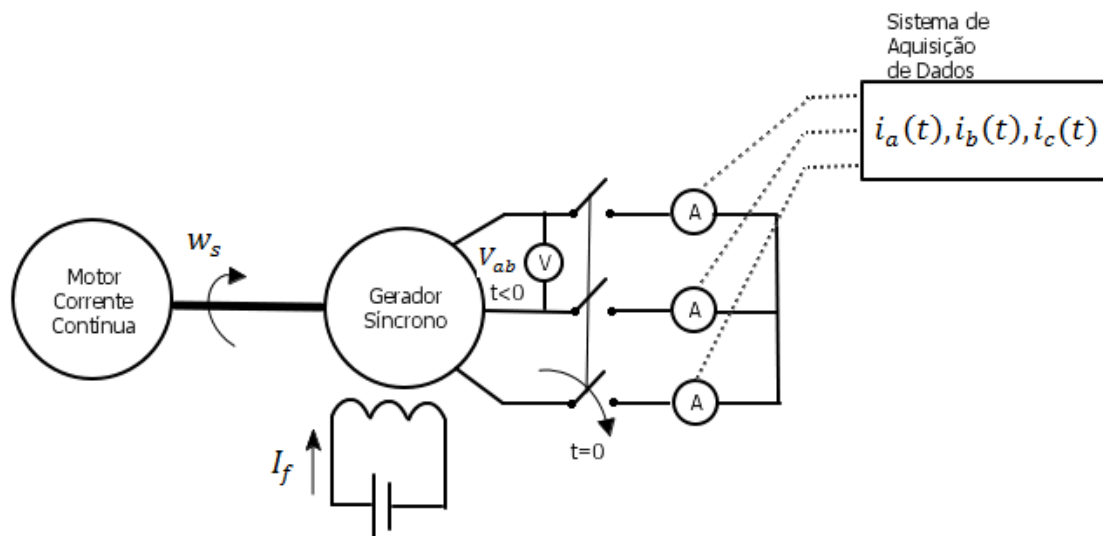


Figura 3.7: Diagrama eletromecânico para o ensaio de curto-circuito brusco

No momento do curto-circuito, as correntes tendem a ser elevadas diminuindo em alguns ciclos até o seu valor em regime permanente de curto-circuito. Podem ser usados vários níveis de tensão para realizar o ensaio, para estudar os efeitos de saturação do gerador, porém o ensaio tende a solicitar grande esforço do gerador devido às correntes elevadas.

As correntes ao longo do tempo, no ensaio de curto-circuito brusco, devem apresentar forma de onda conforme a figura 3.8, das quais se extraem as curvas da média das envoltórias das três correntes, figura 3.9, necessária para determinar os parâmetros do eixo direto.

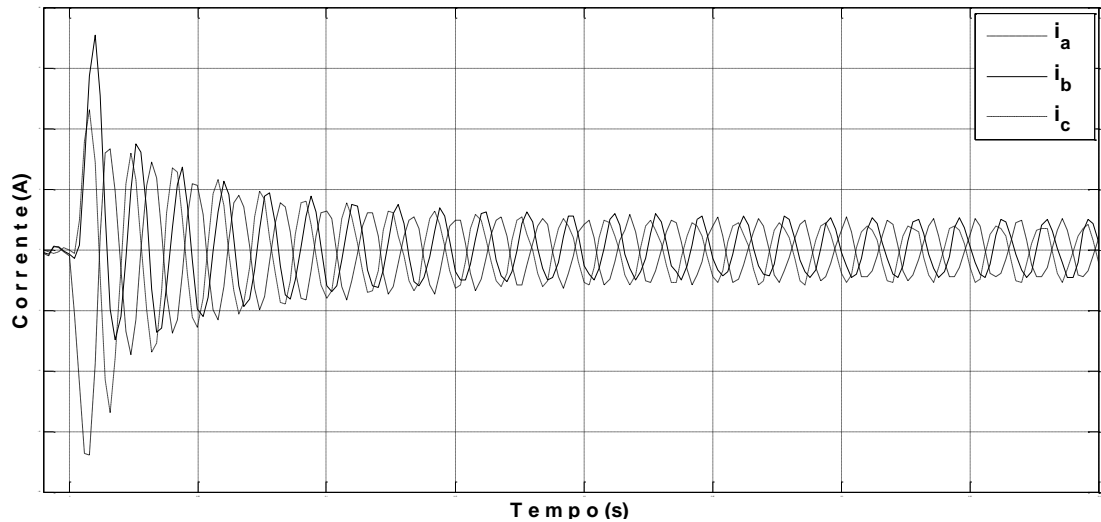


Figura 3.8: Curvas das correntes de curto-circuito.

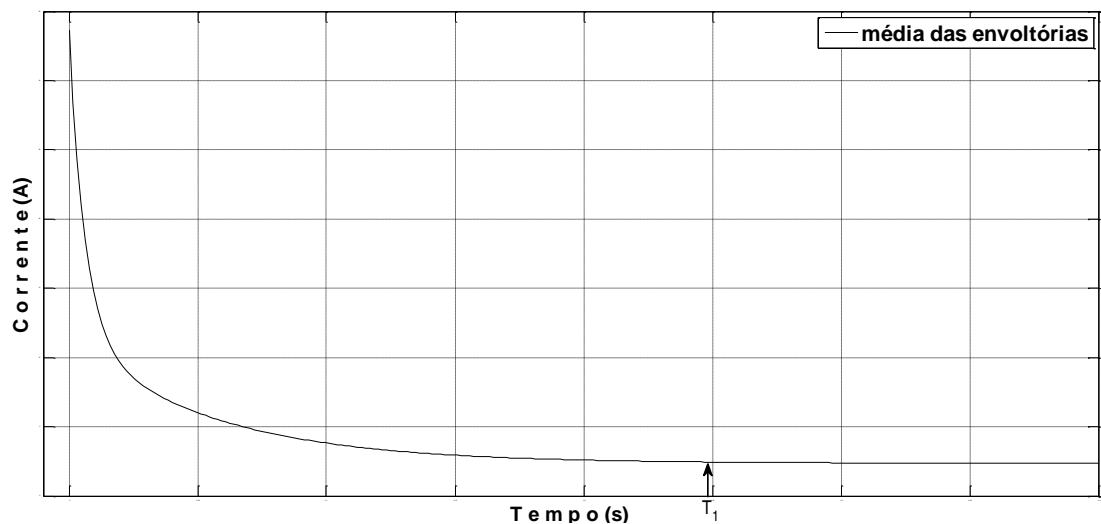


Figura 3.9: Média das envoltórias das correntes de curto-circuito.

Na curva da média das envoltórias, regida pela equação (3.6), notam-se os três períodos discutidos anteriormente, sendo que: o primeiro termo desta equação representa a corrente em regime permanente (I_{ss}), o segundo termo representa a corrente transitória $i'(t)$, a qual decai com uma constante de tempo T'_d , e o terceiro termo representa a corrente subtransitória $i''(t)$, a qual decai com uma constante de tempo T''_d . O instante de tempo T_1 (figura 3.9) é o tempo onde a corrente atinge seu estado em regime permanente.

$$i_s(t) = I_{ss} + I' e^{(-t/T'_d)} + I'' e^{(-t/T''_d)} \quad (3.6)$$

$$i'(t) = I' e^{(-t/T'_d)} \quad (3.7)$$

$$i''(t) = I'' e^{(-t/T''_d)} \quad (3.8)$$

Para identificar os parâmetros de eixo direto é necessário obter o valor da corrente em regime permanente, I_{ss} , na curva da média das envoltórias. Para determinar a reatância do eixo direto, X_d , utiliza-se o valor encontrado para I_{ss} e o valor da tensão de circuito aberto da armadura, U , instante antes do curto-circuito ser aplicado, conforme equação (3.9).

Após identificar o valor em regime permanente subtrai-se este valor da curva da média das envoltórias. Ao realizar a subtração restarão apenas valores das correntes subtransitórias e transitórias e a seguir aplica-se escala logarítmica no eixo das ordenadas. Ao aplicar escala logarítmica, verifica-se que, a partir de um determinado instante de tempo (T_2), a curva tornar-se-á uma reta. Devido a constante de tempo subtransitória ser muito pequena faz com que reste somente o segundo termo da equação (3.6), que são valores do período transitório.

Para determinar a reatância transitória, X'_d , e a reatância subtransitória, X''_d , é necessário, na curva da média das envoltórias, extrapolar as curvas em cada período e determinar os pontos A (equação 3.10) e B (equação 3.11), correspondentes à interceptação da curva com o eixo das ordenadas. Os valores de X'_d e X''_d são dados conforme as equações (3.12) e (3.13).

$$X_d = \frac{U}{I_{ss}} \quad (3.9)$$

$$A = I_{ss} + i'(0) = I_{ss} + I' \quad (3.10)$$

$$B = I_{ss} + i'(0) + i''(0) = I_{ss} + I' + I'' \quad (3.11)$$

$$X'_d = \frac{U}{A} \quad (3.12)$$

$$X''_d = \frac{U}{B} \quad (3.13)$$

Para determinar o valor das constantes de tempo subtransitória e transitória basta analisar o tempo em que o valor da corrente, nas extrapolações de cada período, decai de $1/e$, ou 0,368, do seu valor inicial.

Para se encontrar valores mais precisos de A , B e das constantes de tempo T'_d e T''_d o seguinte procedimento pode ser adotado. Subtrai-se o valor da corrente em regime permanente na curva da média das envoltórias, restando apenas componentes das correntes transitórias e subtransitória, equação (3.14). Aplica-se escala logarítmica ao eixo das ordenadas e encontra-se o tempo (T_2) em que a curva torna-se uma reta, figura 3.10. A partir deste instante haverá somente componente das correntes transitórias, visto que o valor em regime fora retirado e a contribuição das correntes subtransitórias é igual à zero.

$$i_s(t) - I_{ss} = I' e^{(-t/T'_d)} + I'' e^{(-t/T''_d)} \quad (3.14)$$

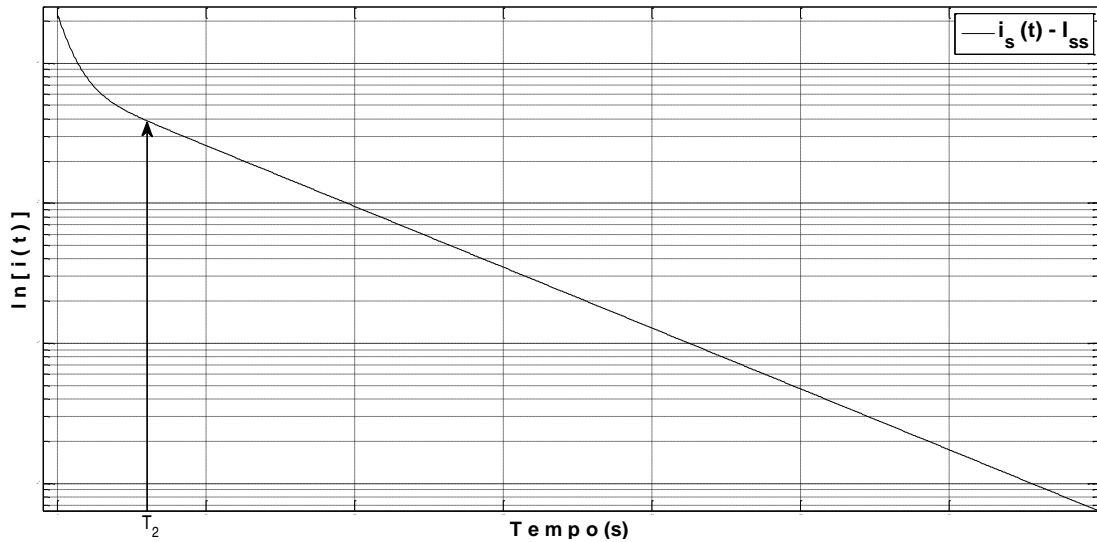


Figura 3.10: Gráfico para se determinar T_2 , escala semi-logarítmica.

No intervalo de tempo de T_2 até T_1 a curva das médias das envoltórias é regida pela equação (3.15).

$$i_s(t) - I_{ss} = I' e^{(-t/T_d')} \quad (3.15)$$

Aplicando função logarítmica aos pontos do período transitório, no intervalo T_2 à T_1 , temos:

$$y_{trans} = \ln[i'(t)] = a_1 + b_1 \cdot t = \ln[I'] - t/T_d' \quad (3.16)$$

a equação exponencial torna-se uma reta, onde são obtidos seus coeficientes. O coeficiente b_1 representa a constante $(1/T_d')$, portanto, tomando o inverso deste coeficiente obtém-se a constante de tempo T_d' e valor da constante I' é obtido através do coeficiente a_1 , sendo $I' = e^{a_1}$.

O passo seguinte é substituir o valor do tempo, para cada instante de tempo, na equação (3.15) e subtrair o resultado, para cada instante de tempo, nos pontos da curva das médias das envoltórias, juntamente com o valor em regime (equação 3.17).

$$i_s(t) - I_{ss} - I' e^{(-t/T_d')} = I'' e^{(-t/T_d'')} \quad (3.17)$$

Este procedimento fará com que, somente se tenha pontos do período subtransitório e, portanto, realiza-se o mesmo para determinar a equação da reta com estes dados, obtendo:

$$y_{sub} = \ln[i''(t)] = a_2 + b_2 \cdot t = \ln[I''] - t/T_d'' \quad (3.18)$$

Obtendo os coeficientes da equação da reta tem-se: $T_d'' = (1/b_2)$ e $I'' = e^{a_2}$.

A figura 3.11 mostra os pontos, A, B e I_{ss} , necessários para se determinar os valores das reatâncias síncronas de eixo direto.

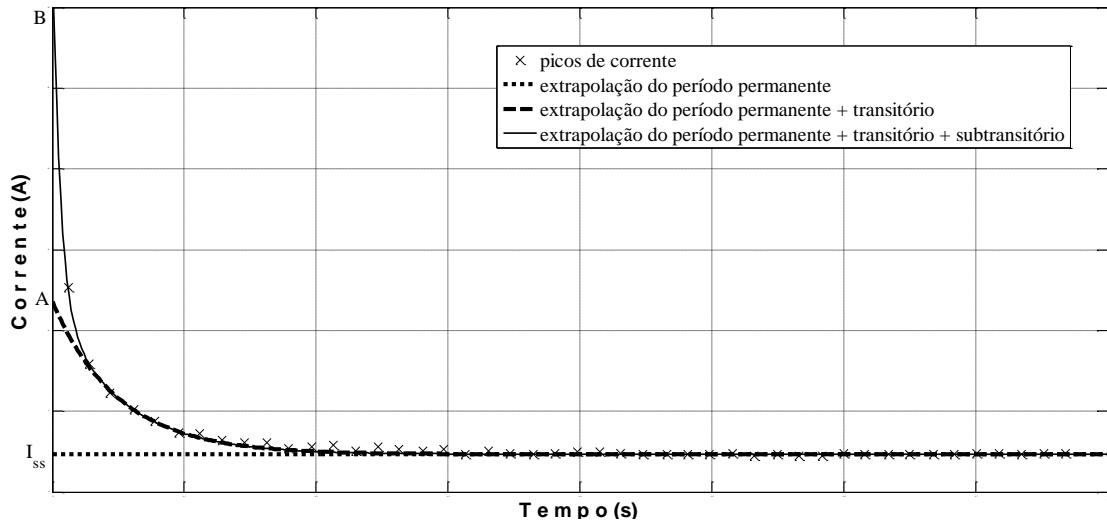


Figura 3.11: Extrapolações dos períodos em regime permanente, subtransitório e transitório.

3.4. Ensaio de abertura da corrente de curto-circuito

O ensaio de abertura da corrente de curto-circuito permite determinar os parâmetros de eixo direto do gerador síncrono. Para realizar o ensaio é necessário que o gerador esteja girando em velocidade nominal, determina-se a corrente de campo que leva o gerador, quando em circuito aberto, a tensão nominal (figura 3.12) e aplica-se aos terminais da armadura um curto-circuito. Após alguns instantes se interrompe o curto-circuito abrindo os terminais do gerador (figura 3.13). Os dados das formas de onda da tensão de armadura, no período da abertura da corrente de curto-circuito, devem ser armazenados para posteriormente serem tratados com uso de software.

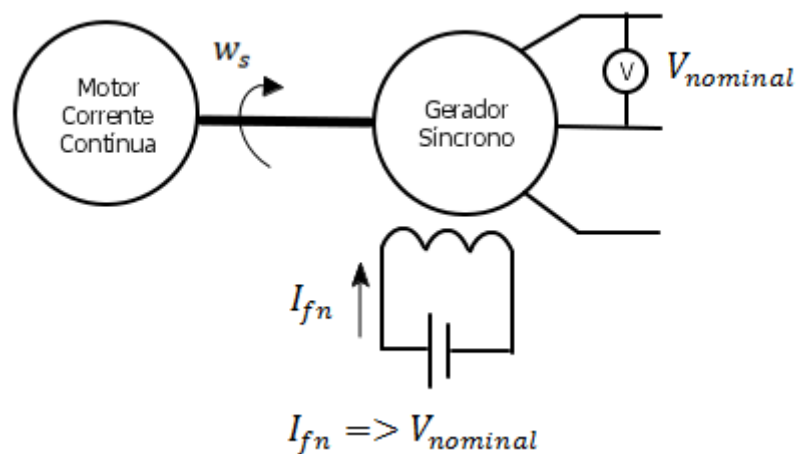


Figura 3.12: Diagrama eletromecânico para determinar a corrente de campo que leva o gerador, em circuito aberto, à tensão nominal.

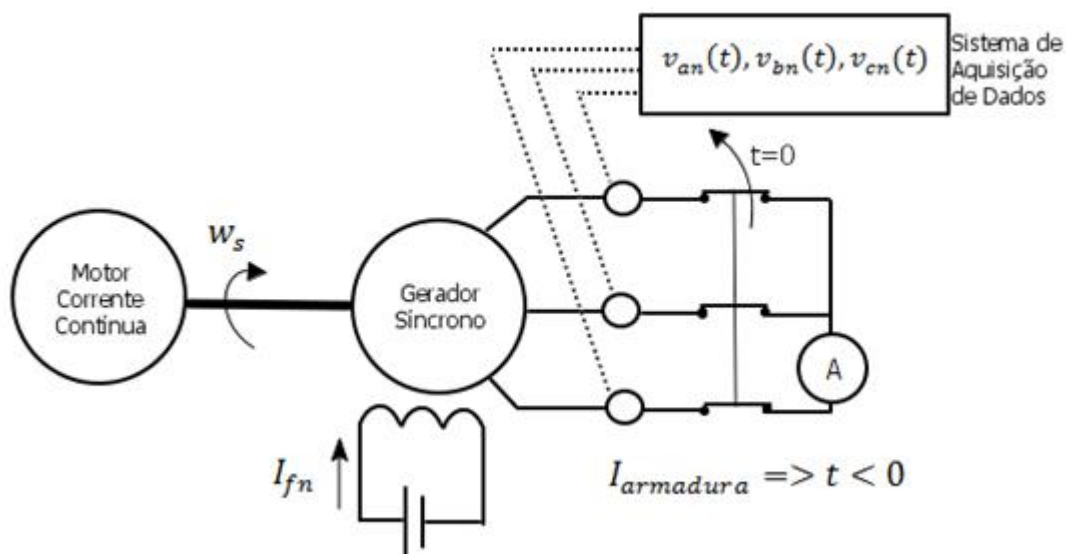


Figura 3.13: Diagrama eletromecânico para o ensaio de abertura da corrente de curto-circuito.

As formas devem apresentar comportamento semelhante ao da figura 3.14.

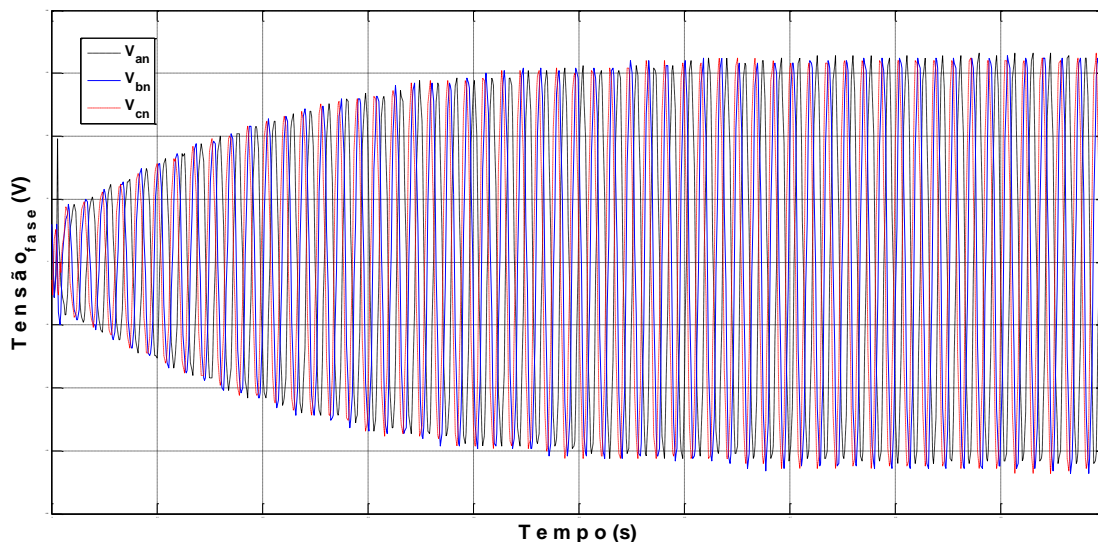


Figura 3.14: Ensaio de abertura da corrente de curto-circuito.

Após o ensaio os dados devem ser analisados separando-se os picos de tensão de cada fase. Obtendo as envoltórias de tensão de cada fase e posteriormente calculando-se a média das envoltórias, curva semelhante à figura 3.15. A média das envoltórias é composta de três curvas sendo: curva em regime permanente, curva do período transitório e curva do período subtransitório. Para determinar as reatâncias de eixo direto é necessário extrapolar as curvas do

período em regime permanente, transitório e subtransitário, a fim de obter os pontos U_{a0} , u'_a e u''_a , como ilustrado na figura 3.15. As reatâncias são dadas conforme as equações abaixo:

$$X_d = \frac{U_{a0}}{I_{cc}} \quad (3.19)$$

$$X'_d = \frac{u'_a}{I_{cc}} \quad (3.20)$$

$$X''_d = \frac{u''_a}{I_{cc}} \quad (3.21)$$

onde I_{cc} é a corrente de curto-circuito momento antes da abertura dos terminais de armadura.

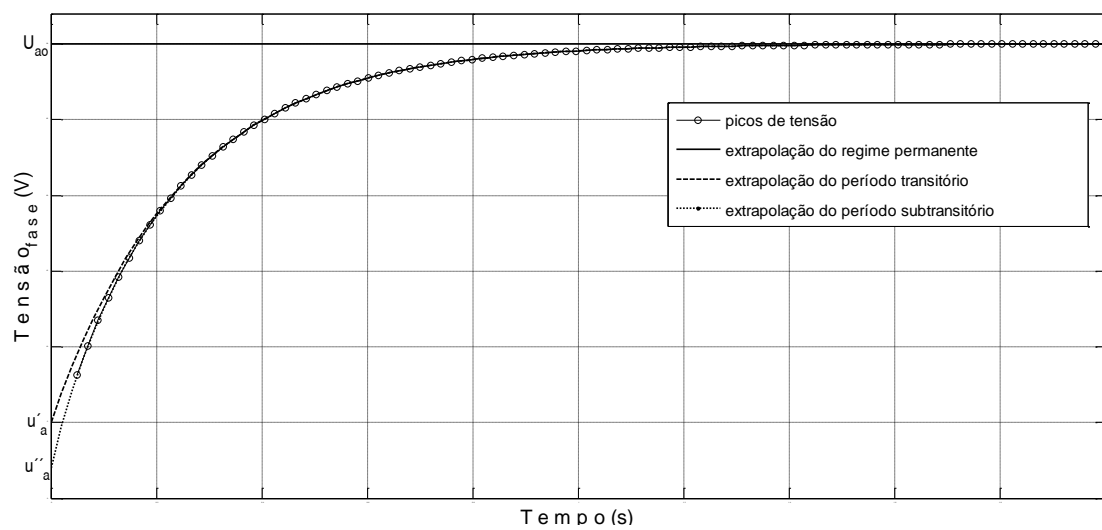


Figura 3.15: Média das envoltórias e extrapolações dos períodos em regime permanente, transitório e subtransitário.

Em [7] é mostrada uma forma alternativa para se determinar as reatâncias do eixo direto e também as constantes de tempo T'_{d0} e T''_{d0} .

Para realizar a análise, depois de obtida a curva da média das envoltórias, subtraem-se do valor de regime permanente encontrado (U_{a0}), os pontos da curva da média das envoltórias. A figura 3.16 ilustra a curva resultante após o procedimento.

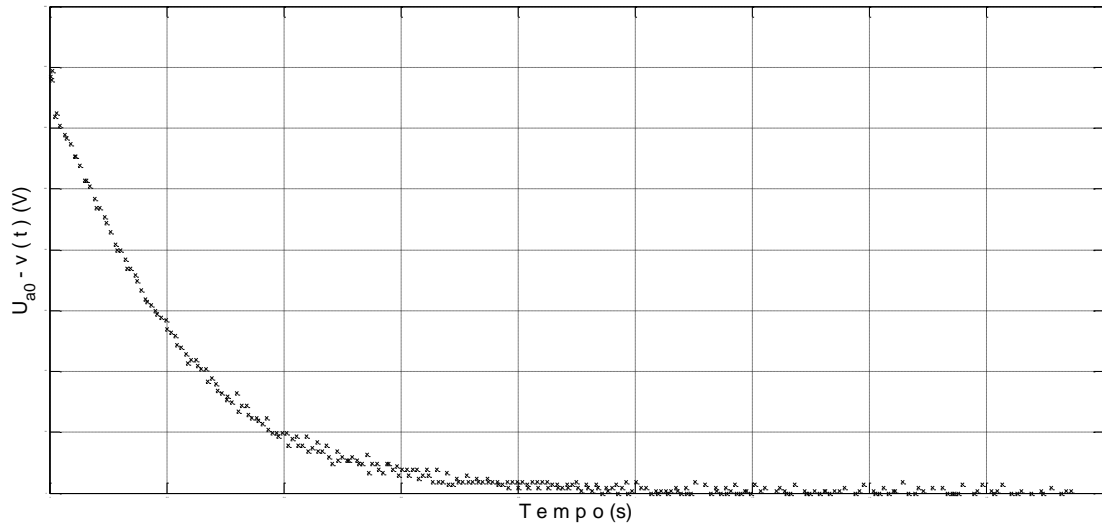


Figura 3.16: Curva resultante após a subtração do valor em regime permanente.

Agora curva apresenta somente dois períodos, já que o período em regime permanente fora subtraído. A seguir aplica-se escala logarítmica ao eixo das ordenadas e verifica o período em que a curva torna-se uma reta, procedimento semelhante ao explicado na seção 3.3, a partir deste ponto em diante somente haverá componentes de tensão transitórias, devido ao fato da componente subtransitória decair rapidamente.

Para evitar erros ao se fazer uma análise gráfica, pode-se chegar a resultados mais precisos da seguinte forma. A curva resultante que rege o período transitório e subtransitório, como mostrado na figura 3.16, é dada por:

$$U_{a0} - v(t) = v' e^{-t/T'_{do}} + v'' e^{-t/T''_{do}} \quad (3.22)$$

Para um determinado instante de tempo, após alguns ciclos, devido a constante de tempo T''_{do} ser muito pequena, haverá somente o primeiro termo da equação (3.22). Aplicando logaritmo à equação (3.22), esta se torna uma reta:

$$y_{trans} = \ln[v_{trans}(t)] = a_1 + b_1 \cdot t = \ln[v'] - t/T'_{do} \quad (3.23)$$

Com o auxílio de um software, encontra-se a equação da reta através dos dados, obtendo seus coeficientes. O coeficiente b_1 representa a constante $(1/T'_{do})$, tomando o inverso deste coeficiente obtém-se a constante de tempo T'_{do} e o valor da constante v' é obtido através do coeficiente a_1 , sendo $v' = e^{a_1}$.

O passo seguinte é substituir o valor do tempo, para cada instante de tempo, na equação (3.22) e subtrair o resultado para cada instante de tempo, como mostrado pela equação 3.24.

$$U_{a0} - v(t) - v' e^{-t/T'_{do}} = v'' e^{-t/T''_{do}} \quad (3.24)$$

Este procedimento fará com que haja somente dados do período subtransitário e realiza-se o mesmo procedimento para se determinar a equação da reta com estes dados, obtendo:

$$y_{sub} = \ln[v_{sub}(t)] = a_2 + b_2 \cdot t = \ln[v''] - t/T''_{do} \quad (3.25)$$

Obtendo os coeficientes da equação da reta temos que: $T''_{do} = (1/b_2)$ e $v'' = e^{a_2}$.

Da mesma forma anterior podemos obter os valores de U_{a0} , u'_a e u''_a , sendo:

$$U_{a0} = U_{regime} \quad (3.26)$$

$$u'_a = U_{regime} - v' \quad (3.27)$$

$$u''_a = U_{regime} - v' - v'' \quad (3.28)$$

Os valores das reatâncias são dados pelas equações (3.19), (3.20) e (3.21).

3.5. Ensaio de escorregamento

Pelo ensaio de escorregamento é possível determinar valores para as reatâncias de eixo direto (X_d) e de eixo em quadratura (X_q).

Para a realização do ensaio é necessário que o gerador seja acionado à velocidade diferente à velocidade síncrona, os enrolamentos de campo devem estar em circuito aberto, uma fonte variável trifásica externa deve ser conectada aos terminais do gerador na mesma sequência de fase. Durante o ensaio alimenta-se o gerador com alguma tensão de armadura, fornecida pela fonte trifásica, não permitindo que o gerador entre em sincronismo com a fonte, e medem-se os valores de tensão e corrente de armadura. A tensão induzida no campo também pode ser medida para uma visualização mais clara dos pontos de mínimos e máximos das envoltórias das correntes e tensões.

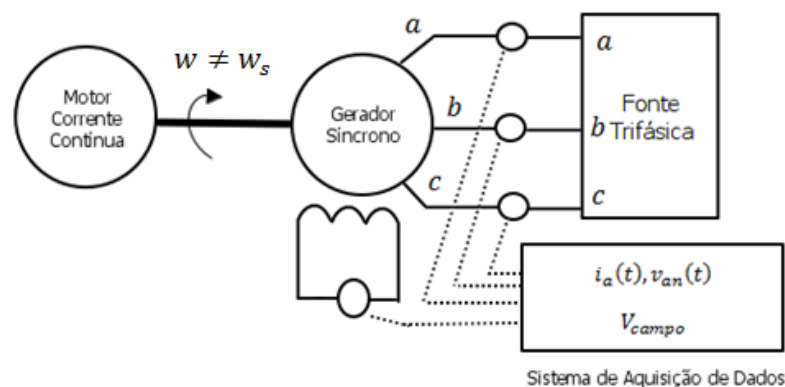


Figura 3.17: Diagrama eletromecânico para o ensaio de escorregamento.

Recomenda-se utilizar um osciloscópio ou sistema de aquisição de dados para analisar as curvas que devem apresentar a forma de onda conforme ilustrado figura 3.18.

Se a tensão induzida no campo for nula então o gerador entrou em sincronismo com a fonte, sendo necessário aumentar ou diminuir a velocidade do gerador para forçá-lo a sair do sincronismo. A tensão induzida no circuito de campo pode alcançar valores perigosos quando o escorregamento é grande [7], portanto deve-se energizar a armadura somente quando o escorregamento for pequeno.

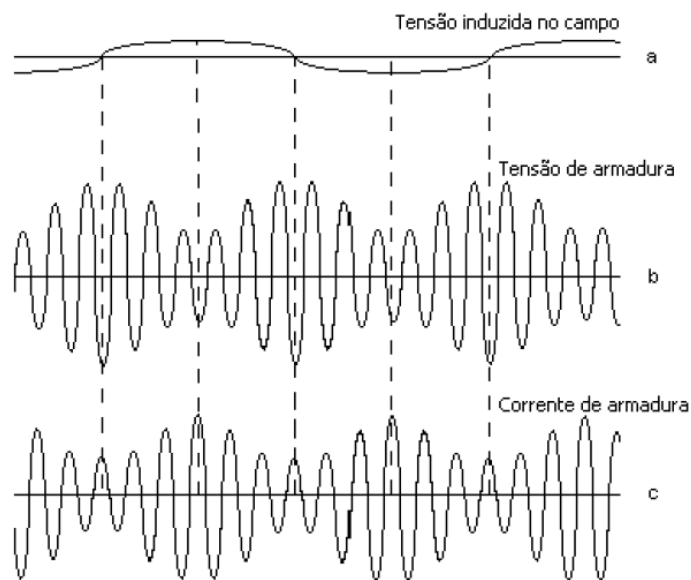


Figura 3.18: Ensaio de escorregamento.

Pela figura 3.18, nota-se que quando a tensão de campo passa pelo zero a envoltória da corrente de armadura tem seu pico máximo enquanto que a envoltória da tensão de armadura tem seu pico mínimo. Com esses valores é possível determinar a reatância de eixo em quadratura X_q dada pela equação (3.29). Quando a tensão de campo tem seu módulo máximo, a envoltória da corrente e a envoltória da tensão de armadura tem seus pontos de pico mínimo e máximo respectivamente, com estes valores é possível determinar a reatância de eixo direto X_d dado pela equação (3.30).

Os parâmetros obtidos neste ensaio são parâmetros não saturados, devido à tensão de alimentação ser baixa, pois tensões maiores podem fazer com que o gerador entre em sincronismo com a fonte externa.

$$X_q = \frac{V_{a_min}}{I_{a_max}} \quad (3.29)$$

$$X_d = \frac{V_{a,max}}{I_{a,min}} \quad (3.30)$$

Cabe ressaltar que os valores de tensão de armadura utilizados são valores de tensão de fase.

3.6. Ensaio da máxima corrente indutiva

Com o método da máxima corrente indutiva é possível determinar a reatância síncrona de eixo em quadratura X_q . O método consiste em acionar a máquina síncrona trifásica como motor operando em vazio, com tensão terminal nominal, desexcitando o enrolamento de campo gradativamente até que a máquina opere como motor de relutância ($I_{campo} = 0$), a partir deste ponto, faz-se a inversão da polaridade do enrolamento de campo e aumenta-se gradativamente a corrente de campo, que está em sentido inverso. Há um momento em que a máquina sofre um brusco reajuste de posição e após algumas oscilações retorna a uma nova condição de equilíbrio em regime permanente.

Para realizar o ensaio a tensão deve ser ajustada no valor nominal e com o auxílio de um amperímetro ou sistema de aquisição de dados mede-se a máxima corrente de armadura no instante do reajuste de posição já mencionado. A reatância síncrona de eixo em quadratura é dada pela equação (3.31), onde por ser um ensaio com tensão nominal fornece valores da reatância de eixo em quadratura saturado (X_{qs}).

$$X_{qs} = \frac{V_{a, fase}}{I_{max}} \quad (3.31)$$

Capítulo 4

4. Técnica de sensibilidade de trajetória

4.1. Introdução

A técnica de sensibilidade de trajetória permite analisar qualquer sistema que possua equações diferenciais conhecidas, onde é possível monitorar as entradas e saídas do sistema. A técnica faz uma comparação dos dados de entrada reais com os resultados da solução das equações diferenciais, onde se faz o ajuste de parâmetros destas equações até que o erro seja minimizado a um valor desejado.

O diagrama exposto na figura 4.1 mostra o procedimento usado para estimação de parâmetros baseado na técnica de análise de sensibilidade de trajetória.

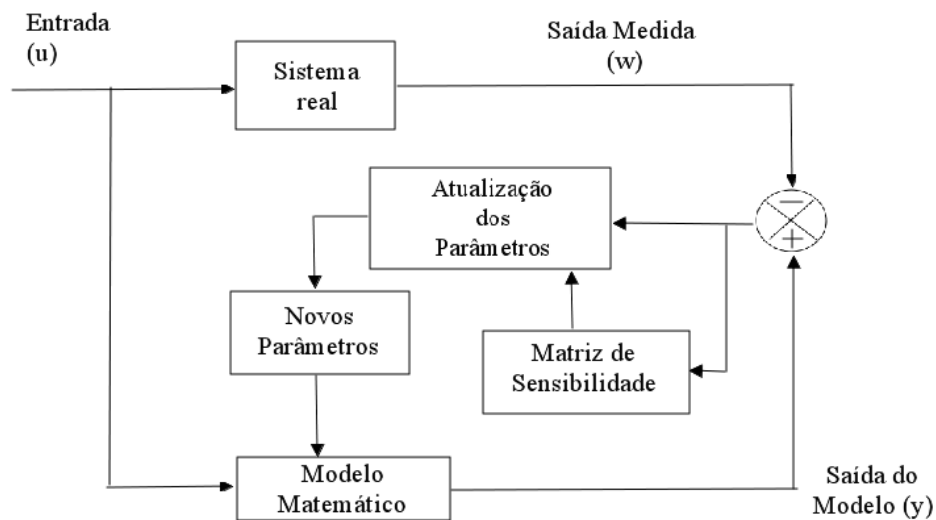


Figura 4.1: Método para estimação dos parâmetros baseado no método de análise de sensibilidade de trajetória.

Para que a técnica tenha sucesso é importante que a modelagem do sistema represente o comportamento real o mais próximo possível. A técnica pode ser usada para sistemas lineares e não lineares.

Os testes convencionais, apresentados no capítulo 3, requerem a parada da máquina e a obtenção das medidas é feita em condições especiais de operação. A técnica baseada em sensibilidade de trajetória permite a estimação de parâmetros do gerador síncrono sem a necessidade de desligar a máquina, adquirindo valores mensuráveis a qualquer sistema, tais como: correntes e tensões de armadura, tensão e corrente de campo.

4.2. Funções de sensibilidade de trajetória

Seja uma função $y(t, \alpha)$ o vetor solução de uma equação diferencial dependente do parâmetro α . Obtém-se a função de sensibilidade derivando-se o vetor solução pelo parâmetro a ser analisado, dado por:

$$\frac{\delta y}{\delta \alpha_i} = \lambda_i \quad (4.1)$$

Assim obtém-se a função de sensibilidade para cada parâmetro a ser estimado. Se a variação de um parâmetro altera significativamente a resposta do sistema, diz-se que o sistema é muito sensível a variação deste parâmetro.

4.3. Funções de sensibilidade de trajetória aplicada a um sistema linear invariante no tempo

Seja o sistema linear invariante no tempo:

$$\frac{d}{dt}(x(t), \alpha) = A(\alpha).x(t, \alpha) + B(\alpha).u(t) \quad (4.2)$$

$$y(t, \alpha) = C(\alpha).x(t, \alpha) \quad (4.3)$$

Com condição inicial $x(0, \alpha) = x_0$, sendo $A(\alpha)$, $B(\alpha)$ e $C(\alpha)$ matrizes que descrevem o sistema no espaço de estados, x o vetor de variáveis de estado, y o vetor de saídas e u o vetor de entradas do sistema.

As funções de sensibilidade para cada parâmetro são dadas pela derivada de (4.2) em relação a cada parâmetro.

$$\dot{\lambda}^i = A(\alpha)\lambda^i(t, \alpha) + \frac{\partial A(\alpha)}{\partial \alpha_i}x(t, \alpha) + \frac{\partial B(\alpha)}{\partial \alpha_i}u(t) \quad (4.4)$$

$$\text{Onde: } \lambda^i = \frac{\partial x}{\partial \alpha_i}$$

Os coeficientes das matrizes A , $\frac{\partial A}{\partial \alpha_i}$ e $\frac{\partial B}{\partial \alpha_i}$ são calculados para $\alpha = \alpha_n$ (valor nominal).

Fazendo o mesmo para a saída temos,

$$\frac{\partial y}{\partial \alpha} = \frac{\partial C(\alpha)}{\partial \alpha}x(t, \alpha) + C(\alpha)\lambda(t, \alpha) \quad (4.5)$$

As condições iniciais podem ser encontradas fazendo,

$$\lambda_0^i = \lambda^i(t, \alpha)|_{t=t_0} = \frac{\partial x(t, \alpha)}{\partial \alpha_i}|_{t=t_0} \quad (4.6)$$

4.4. Funções de sensibilidade de trajetória para sistemas não lineares

Considere o modelo não linear:

$$\frac{d}{dt}x(t) = f(x(t), p, u(t)) \quad (4.7)$$

$$y(t) = g(x(t), p, u(t)) \quad (4.8)$$

onde x , y e u tem o mesmo significado anterior, p é o vetor de parâmetros a ser determinado e f e g são funções não lineares contínuas e Lipschitzianas de x , p e u , podendo ou não ser diferenciáveis. Seja p_i a i -ésima componente do vetor p e sejam f e g diferenciáveis em relação ao parâmetro p_i .

As equações da função de sensibilidade são obtidas diferenciando-se as equações (4.7) e (4.8) em relação aos parâmetros p_i , obtendo-se:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial x(t)}{\partial p_i} = \frac{\partial f(x(t), p, u(t))}{\partial x} \cdot \frac{\partial x(t)}{\partial p_i} + \frac{\partial f(x(t), p, u(t))}{\partial p_i} \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial y(t)}{\partial p_i} = \frac{\partial g(x(t), p, u(t))}{\partial x} \cdot \frac{\partial x(t)}{\partial p_i} + \frac{\partial g(x(t), p, u(t))}{\partial p_i} \quad (4.10)$$

Se as funções f e g não são diferenciáveis em relação ao parâmetro p_i , obtêm-se valores aproximados para as derivadas da seguinte forma:

$$\frac{\partial x(t)}{\partial p_i} \approx \frac{x_1(t) - x_0(t)}{\Delta p_i} \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial y(t)}{\partial p_i} \approx \frac{y_1(t) - y_0(t)}{\Delta p_i} \quad (4.12)$$

onde $x_0(t)$ e $y_0(t)$ são respostas, no tempo, do modelo descrito pelas equações (4.7) e (4.8) obtida usando p_0 e $x_1(t)$ e $y_1(t)$ são respostas no tempo do modelo considerando o vetor de parâmetros p_1 .

Sendo p^0 o vetor de parâmetros nominais de p e p^1 um vetor cuja i -ésima componente é $p_i^1 = p_i^0 + \Delta p_i$, onde Δp_i é uma pequena perturbação.

4.5. Processo de minimização de erro

Basicamente este é um processo que tenta minimizar a diferença entre as saídas do sistema real e do sistema modelado. Supondo que se queira minimizar o erro, E , entre as saídas do sistema real e do sistema modelado, como na figura 4.2.

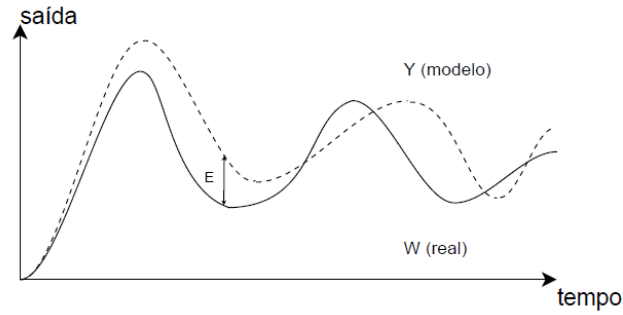


Figura 4.2: Comparação entre saídas do sistema real e modelado.

Minimizar a diferença entre as curvas em valor absoluto equivale a minimizar a norma 1 da diferença entre as duas funções

$$E(p) = \int_0^T |y_i(t) - \omega_i(t)| dt \quad (4.13)$$

Minimizar a raiz quadrada da diferença equivale a minimizar a norma 2 da diferença.

$$E(p) = \int_0^T \sum_0^T (y_i(t) - \omega_i(t)) dt^{1/2} \quad (4.14)$$

Minimizar a diferença entre as curvas durante todo intervalo de tempo, equivale a minimizar a norma infinito,

$$E(p) = \sup_{x \in [0, T]} |y_i(t) - \omega_i(t)| \quad (4.15)$$

Neste trabalho utilizar-se-á a norma 2, pela fácil representação e por ser diferenciável. Este processo de minimização também é conhecido como método dos mínimos quadrados, expresso por:

$$J(p) = \frac{1}{2} \int_0^T (y(t) - \omega(t))^t (y(t) - \omega(t)) dt \quad (4.16)$$

Onde $J(p)$ é o funcional de erro a ser minimizado, ω é a saída do sistema real e y é a saída do sistema modelado.

Para estimativas iniciais do vetor de parâmetros $p = p_0$, o problema de otimização pode ser resolvido calculando-se a derivada parcial de $J(p)$ em relação a seus parâmetros e igualando esta derivada à zero.

$$\frac{\partial J(p)}{\partial p} = \frac{1}{2} \int_0^T \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right)^t (y - \omega) dt + (y - \omega)^t \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right) dt \Big|_{p=p_0} \quad (4.17)$$

Nota-se que os dois termos desta integral são escalares e iguais, podendo se fazer a seguinte simplificação.

$$\frac{\partial J(p)}{\partial p} = \int_0^T \left(\frac{\partial y}{\partial p}\right)^t (y - \omega) dt \quad (4.18)$$

Fazendo $G(p) = \frac{\partial J(p)}{\partial p}$ e expandindo em série de Taylor no ponto $p = p_i$ e tomando apenas o termo de primeira ordem tem-se:

$$G(p) = G(p_i) + \frac{\partial G(p_i)}{\partial p} \Delta p + \dots = 0 \quad (4.19)$$

$$G(p) = G(p_i) + \frac{\partial G(p)}{\partial p} \Delta p = 0 \quad (4.20)$$

Substituindo $\frac{\partial G(p)}{\partial p}$ por Γ em (4.20) tem-se:

$$\Gamma \Delta p = -G(p_i) \quad (4.21)$$

Isolando Δp da equação anterior em função de $\frac{\partial J(p)}{\partial p}$ tem-se:

$$\Delta p = -\Gamma^{-1} \frac{\partial J(p_i)}{\partial p} \quad (4.22)$$

Os parâmetros são atualizados para a i -ésima iteração dada por:

$$p_{i+1} = p_i + \Delta p_{i+1} \quad (4.23)$$

A matriz Γ pode ser encontrada derivando-se a equação (4.18) em relação ao parâmetro p , obtendo-se:

$$\Gamma = \frac{\partial}{\partial p} \int_0^T \left[\left(\frac{\partial y}{\partial p}\right)^t (y - \omega) \right] dt \Big|_{p=p_0} \quad (4.24)$$

$$\Gamma = \int_0^T \left[\left(\frac{\partial^2 y}{\partial p^2}\right)^t (y - \omega) + \left(\frac{\partial y}{\partial p}\right)^t \left(\frac{\partial y}{\partial p}\right) \right] dt \Big|_{p=p_0} \quad (4.25)$$

Desprezando o termo de segunda ordem, obtém-se:

$$\Gamma \approx \int_0^T \left[\left(\frac{\partial y}{\partial p}\right)^t \left(\frac{\partial y}{\partial p}\right) \right] dt \Big|_{p=p_0} \quad (4.26)$$

Considerando o processo em intervalos discretos de tempo, as integrais tornam-se somatórios, as funções sensibilidade são dadas pelas equações (4.9) e (4.10). Sendo assim, o

procedimento é realizado sucessivamente até a convergência dos parâmetros, como mostrado na figura 4.3.

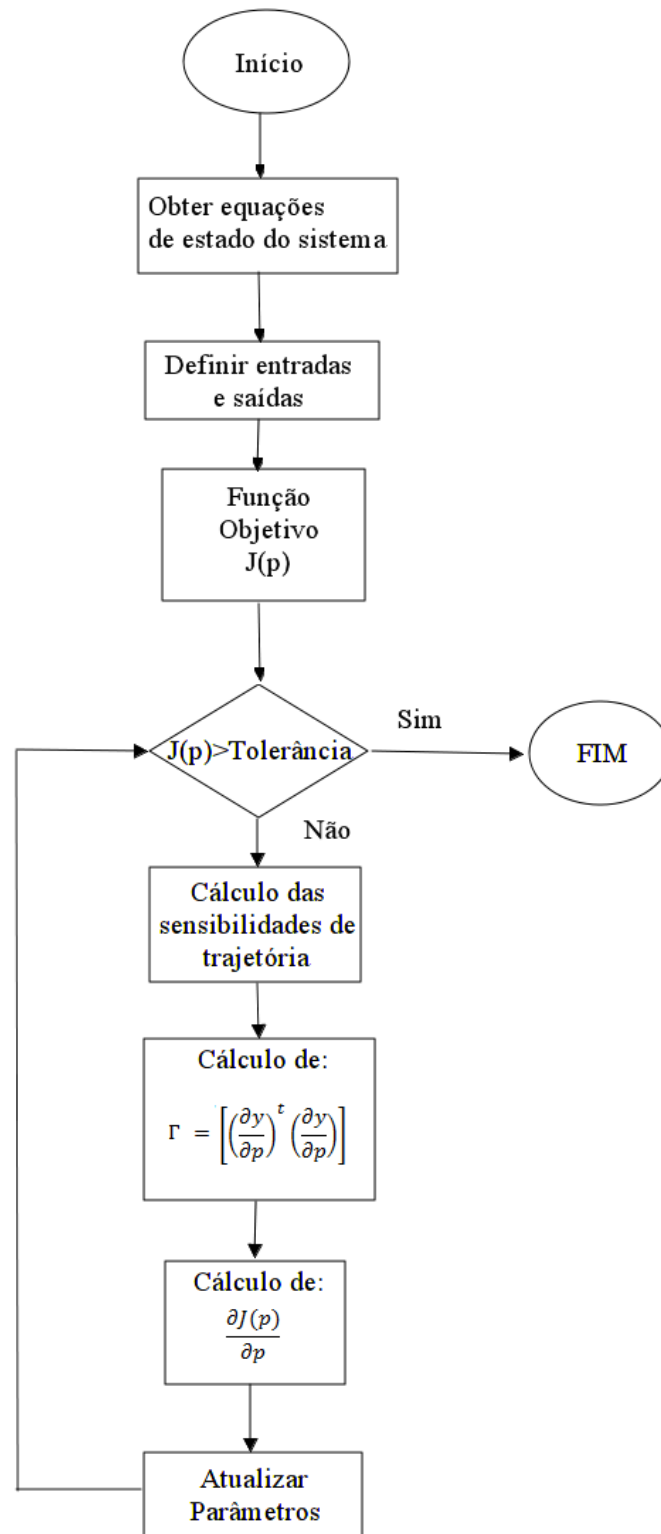


Figura 4.3: Diagrama esquemático da técnica de análise de sensibilidade de trajetória.

Capítulo 5

5. Estimação de parâmetros aplicada ao gerador síncrono

5.1. Introdução

Para a aplicação da metodologia de estimação de parâmetros para o gerador síncrono é necessário contornar algumas dificuldades, pois é necessário trabalhar com o sistema conectado à rede e utilizar apenas medidas locais e de fácil acesso.

Os modelos da máquina síncrona são equações diferenciais não lineares que possuem grandezas que são de difícil obtenção, ângulo do rotor ($\delta(t)$), e medidas que não são passíveis de serem medidas diretamente, tensões transitórias de eixo direto ($E'_d(t)$) e de eixo em quadratura ($E'_q(t)$), como podem ser vistas pelas equações apresentadas no capítulo 2. Além disso, a não linearidade das equações do gerador faz com que o sucesso da estimação dos parâmetros dependa fortemente dos valores iniciais utilizados. Se estes parâmetros não estiverem próximos o bastante dos valores reais, o sistema pode não encontrar solução e o programa diverge ou, encontrar soluções que não descrevam os valores reais dos parâmetros do gerador.

Em [1] são propostas algumas alternativas para contornar os problemas de estimação de medidas que não são passíveis de serem obtidas e de difícil acesso, também são encontradas as faixas de erros dos valores iniciais, onde o programa ainda consegue estimar com sucesso os parâmetros do sistema.

5.2. Alternativas de solução

Como mencionado anteriormente, medidas como as tensões transitórias de eixo direto ($E'_d(t)$) e de eixo em quadratura ($E'_q(t)$) são variáveis que não podem ser medidas diretamente, para este problema são adotadas as seguintes alternativas: utilizar a tensão terminal como referência ($V_t(t)$) e estimar as condições iniciais para $E'_{d0}(t)$ e $E'_{q0}(t)$ pela metodologia de estimação.

Os modelos dependem do ângulo do rotor, em [9] o ângulo do rotor é medido utilizando as componentes simétricas das tensões e correntes da máquina síncrona. No modelo usado foi mudada a referência do ângulo de fase, foi colocada a referência de ângulo nos terminais do gerador, assim as equações do gerador ficam independentes dos parâmetros da rede [1]. Na figura 5.1 estão apresentados os sistema de referência para medida do ângulo do rotor na referência síncrona I_m - R_e (usada no modelo tradicional), na tensão terminal u - v (proposta) e no eixo d-q.

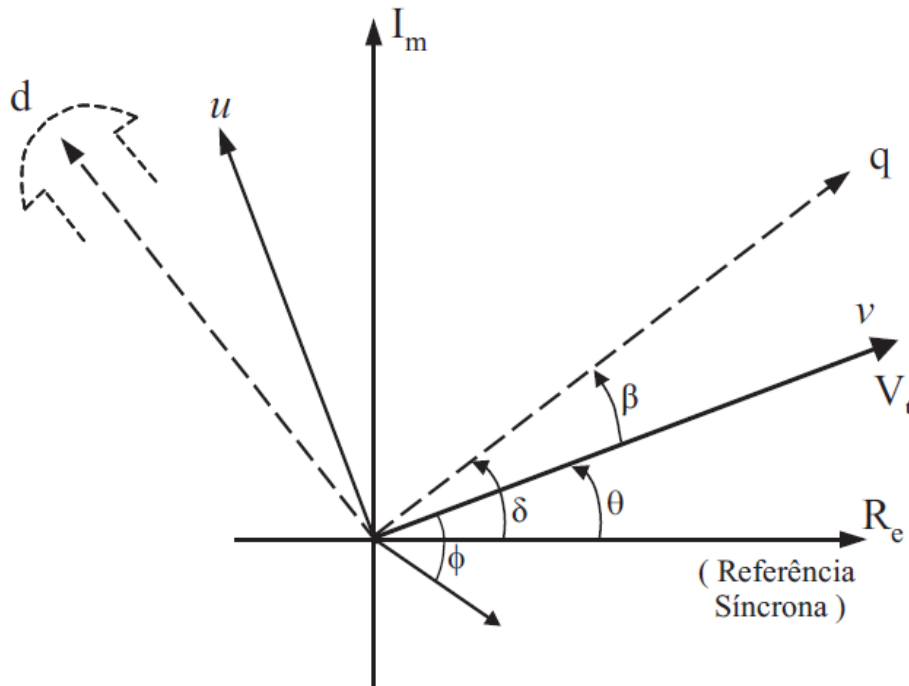


Figura 5.1: Sistema de referência da máquina síncrona (eixo d-q), do sistema de potência e a proposta (u - v , na tensão terminal).

Durante o processo de estimação pode ocorrer divergência dos parâmetros, especialmente quando vários parâmetros são estimados simultaneamente, para aumentar a possibilidade de convergência duas alternativas foram adotadas:

- Os parâmetros elétricos foram desacoplados dos parâmetros mecânicos, escolhendo convenientemente as entradas e saídas do sistema.
- Os parâmetros elétricos foram estimados em duas fases, para isto verifica-se a influência de cada parâmetro na resposta do sistema a uma dada entrada. Sendo estimados na primeira fase parâmetros bem condicionados, mantendo-se constante os demais parâmetros, e estimando todos os parâmetros simultaneamente na segunda fase do processo. Uma forma de determinar a influência dos parâmetros na saída é a decomposição QR da matriz Γ [1].

5.3. Esquema para estimar parâmetros com o gerador em operação.

O eixo da máquina síncrona foi conectado ao eixo de um motor de corrente contínua, este funcionará como propulsor da máquina síncrona para que a mesma opere como gerador. Foram obtidas as formas de onda das tensões e correntes de armadura, corrente de campo e tensão de campo. O sistema de aquisição de dados usado foi a placa da *National Instruments NI6024E*, que representa os relés digitais num sistema elétrico de potência, e por intermédio de

um computador se tem acesso aos dados gravados. Fez-se o uso de transformadores e divisores de tensão para adequar os níveis de tensão do sistema elétrico aos níveis suportados pela placa de aquisição.

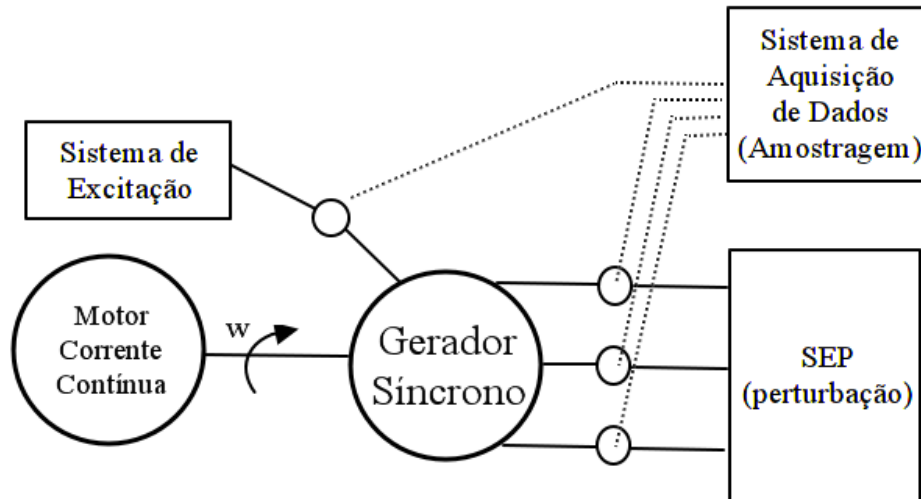


Figura 5.2: Diagrama eletromecânico do sistema elétrico montado em laboratório.

As equações do gerador síncrono compõe o “Sistema Auxiliar”.

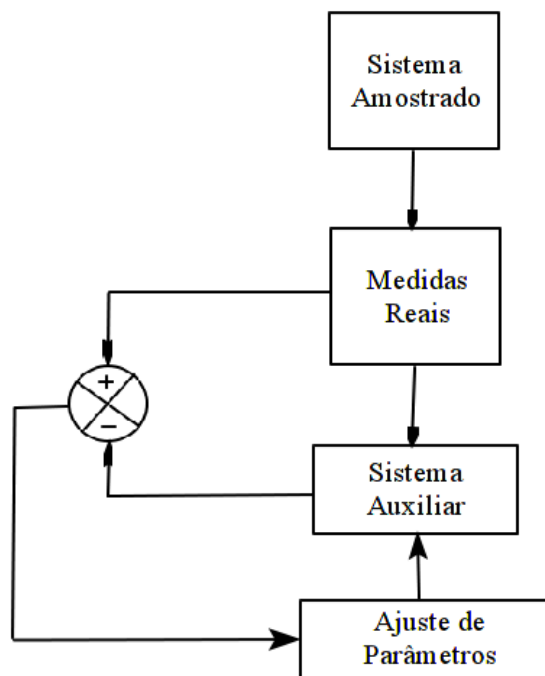


Figura 5.3: Diagrama de blocos para estimar parâmetros com o modelo do gerador modificado.

Na presença de uma perturbação no sistema existem três períodos definidos: período pré-falta, período em falta e período pós-falta. As análises serão feitas no período pós-falta, pois se acredita que problemas de ruídos e chaveamentos são minimizados.

5.4. Estimação dos parâmetros elétricos do gerador utilizando o modelo

Após a amostragem dos dados, com o uso de um software, ajustam-se os dados aos valores corretos, são transformados os valores das tensões e correntes em fasores, calculam-se as tensões e correntes de sequência, positiva, negativa e zero e por fim as potências ativa e reativa. Ao final deste primeiro tratamento temos um vetor contendo os seguintes dados (em p.u.) $v = [t P_e Q_e V_t I_t (\theta_V - \theta_I) E_{fd}]$. Após o tratamento os dados são inseridos no programa para a estimação dos parâmetros, onde estes têm certos valores iniciais, os quais podem ser usados os valores dados pelo fabricante ou dados de outros ensaios (desatualizados):

A convergência dos parâmetros está fortemente relacionada com os valores iniciais, se os valores iniciais não estão próximos dos reais o programa está sujeito a não convergir. Definindo o vetor de saída $s = [P_e Q_e]$, contendo os valores calculados das potências ativa e reativa reais, os quais, a cada iteração do programa, serão comparados com os valores calculados segundo o modelo representados pelo vetor $s_m = [P_{e_m} Q_{e_m}]$ até que o erro seja inferior ao valor desejado.

Para aumentar a probabilidade de convergência dos parâmetros divide-se o programa em duas etapas, na primeira etapa atualizam-se somente parâmetros bem condicionados mantendo fixos os demais e na segunda se atualiza todos os parâmetros. O bom condicionamento dos parâmetros é dado pelo cálculo da matriz Γ , que indica o quanto o parâmetro influencia na saída quando aplicado ao modelo.

As equações do modelo do gerador que constituem o sistema auxiliar são as equações (5.1) (5.2), a equação algébrica (5.3) e as saídas P_e (5.4) e Q_e (5.5). Onde I_d e I_q são variáveis intermediárias.

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - E'_q + (x_d - x'_d)I_d] \quad (5.1)$$

$$\dot{E}'_d = -\frac{1}{T'_{do}} [E'_d + (x_q - x'_q)I_q] \quad (5.2)$$

$$0 = I_T^2 - I_q^2 - I_d^2 \quad (5.3)$$

$$P_e = E'_d I_d + E'_q I_q + (x'_d - x'_q) I_d I_q \quad (5.4)$$

$$Q_e = E'_d I_q - E'_q I_d - x'_q I_q^2 - x'_d I_d^2 \quad (5.5)$$

$$I_d = \frac{1}{x'_d} (V_T \cos(\beta) - E'_q) \quad (5.6)$$

$$I_q = \frac{1}{x'_q} (V_T \sin(\beta) + E'_d) \quad (5.7)$$

Este modelo contém oito parâmetros $p = [x_d \ x'_d \ T'_{do} \ x_q \ x'_q \ T'_{qo} \ E'_{qo} \ E'_{do}]^T$, duas variáveis de estado $x = [E'_q(t) \ E'_d(t)]$ e uma variável algébrica $z = [\beta(t)]$. O vetor de entrada é $u = (V_t(t), I_t(t), E_{fd}(t))$ e o vetor de saídas é $y = (P_e(t), Q_e(t))$.

Os parâmetros do modelo são estimados a partir das EADs (Equações Algébrico-Diferenciais) do sistema auxiliar, o ângulo de potência $\beta(t)$ pode ser calculado por integração numérica. A regra trapezoidal foi escolhida para realizar os cálculos utilizando integração numérica, onde para as equações (5.1)-(5.3) obtém-se:

$$E'_{q(n+1)} - \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{1}{T'_{do}} (E_{fd(n+1)} - E'_{q(n+1)} + (x_d - x'_d) I_{d(n+1)}) \right] - E'_{q(n)} \dots \\ - \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{1}{T'_{do}} (E_{fd(n)} - E'_{q(n)} + (x_d - x'_d) I_{d(n)}) \right] = 0 \quad (5.8)$$

$$E'_{d(n+1)} - \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{-1}{T'_{qo}} (E'_{d(n+1)} + (x_q - x'_q) I_{q(n+1)}) \right] - E'_{d(n)} \dots \\ - \frac{\Delta t}{2} \left[\frac{-1}{T'_{qo}} (E'_{d(n)} + (x_q - x'_q) I_{q(n)}) \right] = 0 \quad (5.9)$$

$$I_{T(n+1)}^2 - I_{q(n+1)}^2 - I_{d(n+1)}^2 = 0 \quad (5.10)$$

Onde os sub-índices n e $n=1$ indicam os instantes de tempo $t_n = t_o + n\Delta t$ e $t_{n+1} = t_o + (n+1)\Delta t$. Este conjunto de equações pode ser resolvido pelo método de Newton, onde o procedimento é realizado em todo período de amostragem e no instante $n=0$ são consideradas as seguintes estimativas $E_{qo} = V_{to}$, $E_{do} = 0$ e $\beta_0 = \tan^{-1} \frac{P_{eo}}{\frac{V_{to}^2}{x_{do}} + Q_{eo}}$.

O fluxograma apresentado na figura 5.4 mostra como é feito o procedimento completo.

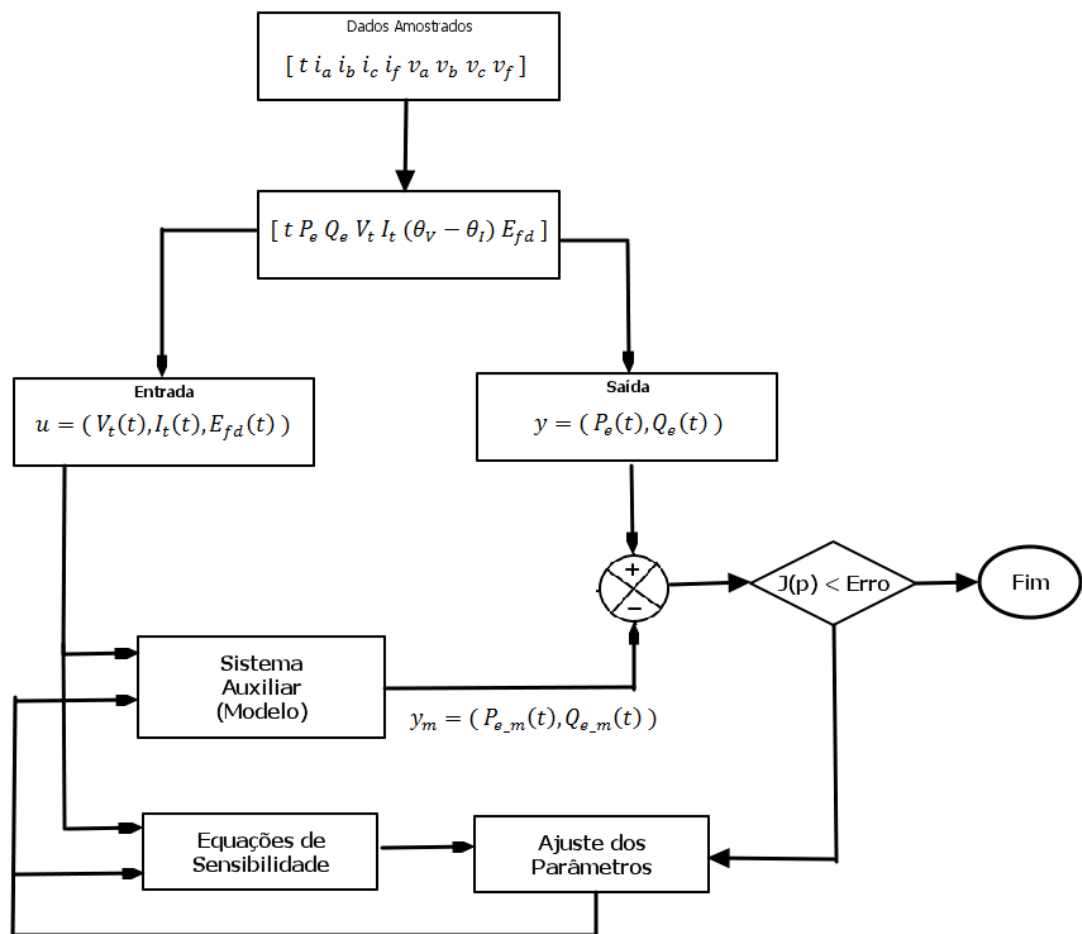
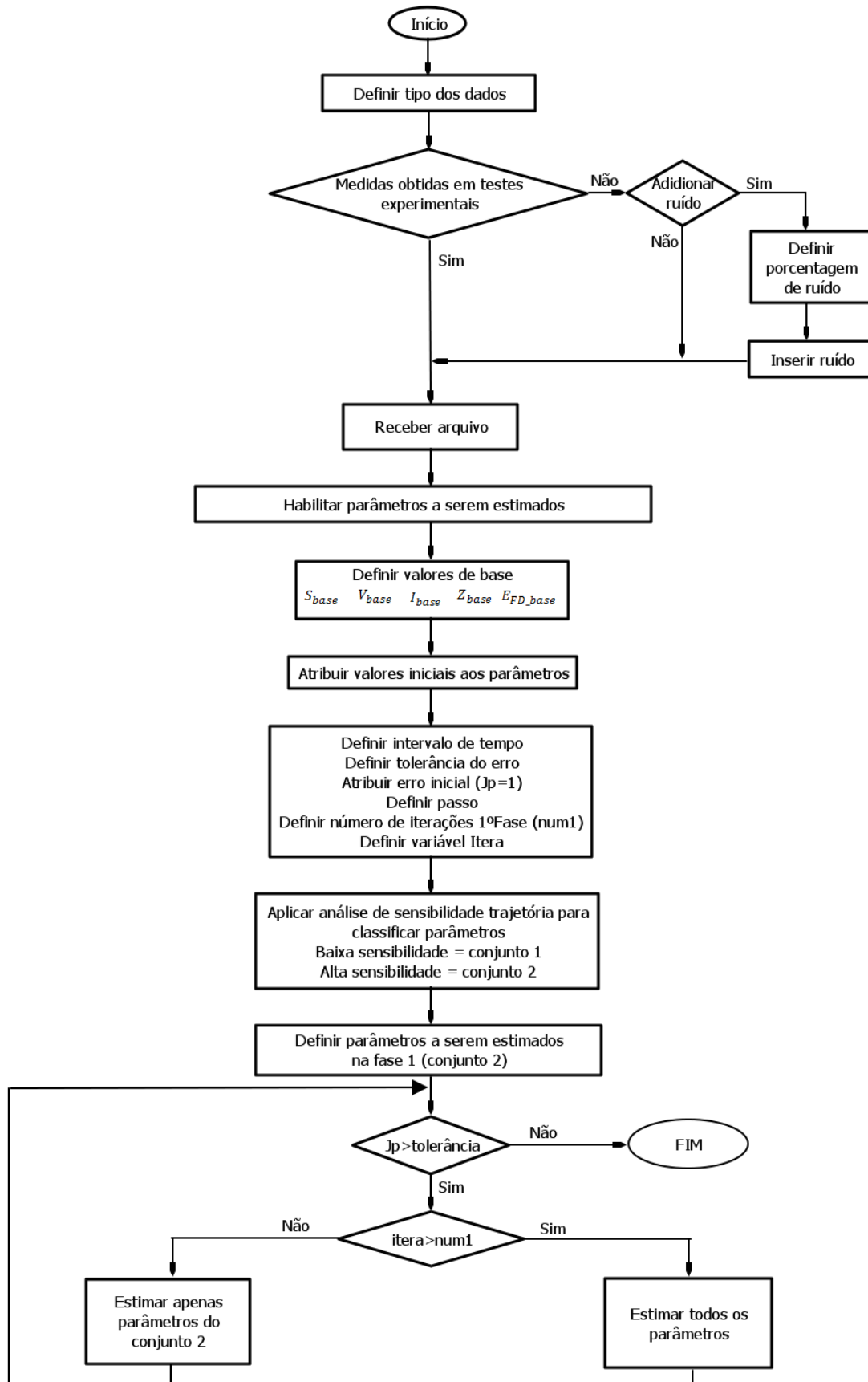


Figura 5.4: Procedimento completo para estimação dos parâmetros aplicando a técnica de análise de sensibilidade de trajetória.

5.5. Utilização do programa *Generator Parameter Estimation v1.0*

O algoritmo utilizado foi desenvolvido pelo Professor Doutor Elmer Tito Pablo Cari, implementado em MATLAB[®], este mesmo programa foi utilizado em sua tese de doutorado [1]. Abaixo, figura 5.5, foi apresentado o diagrama de blocos que representa os passos que segue o algoritmo.



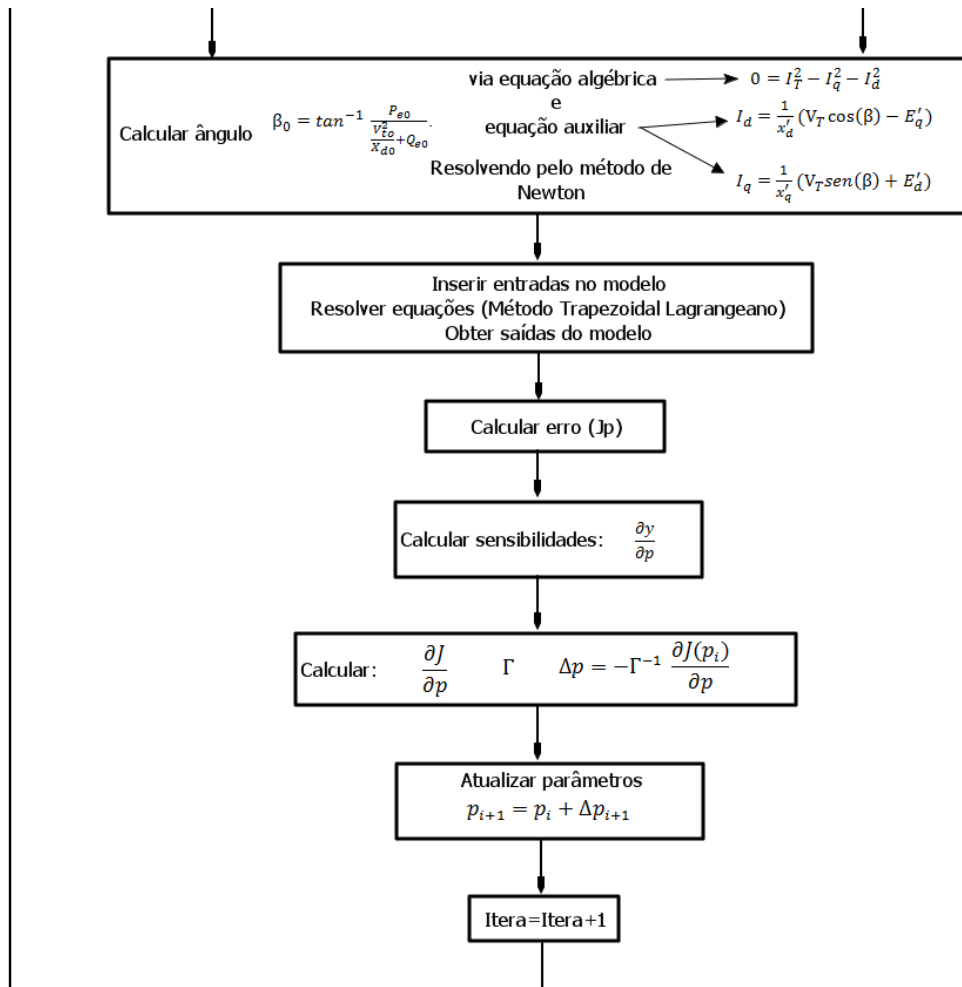


Figura 5.5: Fluxograma referente ao programa *Generator Parameter Estimation v1.0*

Capítulo 6

6. Testes e Resultados

Foi utilizada para os testes uma máquina síncrona trifásica (figura 6.1), na configuração (Y), a qual se deseja saber os valores dos parâmetros, com características apresentadas na tabela 6.1 (dados de placa), para acionar a máquina síncrona foi utilizado um motor de corrente contínua. Foram utilizados para aquisição de dados voltímetros, amperímetros, osciloscópios, wattímetros e placa de aquisição de dados com interface para *LabView*. Também foram utilizadas fontes de tensões alternada e contínua.

Tabela 6.1: Dados de placa da máquina síncrona trifásica.

Máquina Síncrona Trifásica		
$V_{nominal}$	220	V
$I_{armadura}$	5	A
Potência	2000	VA
I_{campo_max}	0,6	A
rpm	1800	
fp	0,8	

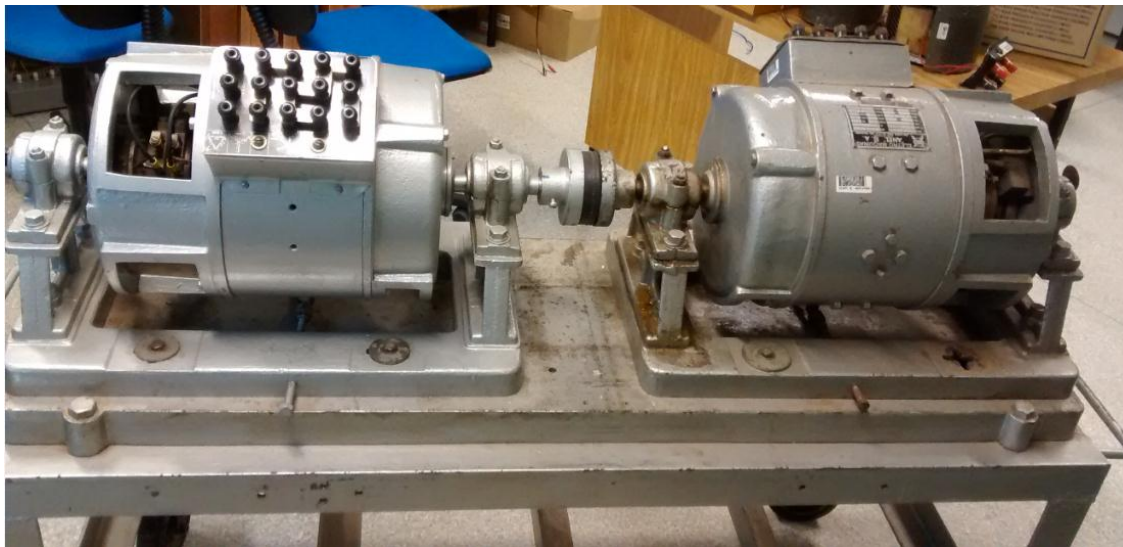


Figura 6.1: Conjunto, máquina síncrona (esquerda) e motor de corrente contínua (direita), utilizado em laboratório.

6.1. Ensaio de circuito aberto e curto-circuito em regime permanente

Para determinar os valores das reatâncias síncronas do gerador síncrono foram realizados os ensaios em circuito aberto e curto-circuito. A tabela 6.2 mostra os valores das

tensões de fase obtidos em função da variação da corrente de campo para o ensaio de circuito aberto.

Tabela 6.2: Valores medidos no ensaio de circuito aberto em regime permanente.

V _{oc} (V)			I _f (A)
Fase A	Fase B	Fase C	
164,2	163,5	164,5	0,583
159,1	159,1	159,8	0,532
155,4	156	156,1	0,497
150,7	150,7	151,6	0,457
146	145,9	146,3	0,418
138,9	139,2	138,5	0,375
132,2	132,2	132,8	0,35
126,4	126,8	126,6	0,32
120	120,1	120,4	0,29
113,5	113,7	113,7	0,262
105	105,2	105,3	0,23
96,3	96	96,3	0,198
85	85,1	85,3	0,165
74,1	74,1	74,3	0,135
61,4	61,3	61,5	0,103
50,2	50,3	50,4	0,079
37,9	37,9	38,1	0,059
31,7	31,7	31,7	0,041
19,9	19,9	19,9	0,02
12,8	12,8	12,8	0,007

A tabela 6.3 mostra os valores obtidos da corrente de armadura em função da variação da corrente de campo para o ensaio em curto-circuito.

Tabela 6.3: Valores medidos no ensaio de curto-circuito em regime permanente.

I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)	I_f (A)
0,486	0,492	0,486	0,006
0,7	0,705	0,697	0,02
1,002	1,01	0,999	0,037
1,239	1,253	1,234	0,051
1,431	1,445	1,427	0,061
1,696	1,709	1,688	0,077
1,978	1,992	1,971	0,091
2,117	2,137	2,11	0,1
2,264	2,28	2,253	0,108
2,405	2,418	2,394	0,115
2,693	2,709	2,674	0,13
2,964	2,982	2,95	0,145
3,178	3,197	3,161	0,155
3,409	3,429	3,396	0,168
3,812	3,832	3,799	0,189
4,146	4,17	4,134	0,206

As figuras 6.2 e 6.3 mostram as curvas dos ensaios de circuito aberto e curto-circuito, respectivamente, e os valores de V_{ac} , V_{an} (132,8 V) e I_a necessários para determinar as reatâncias.

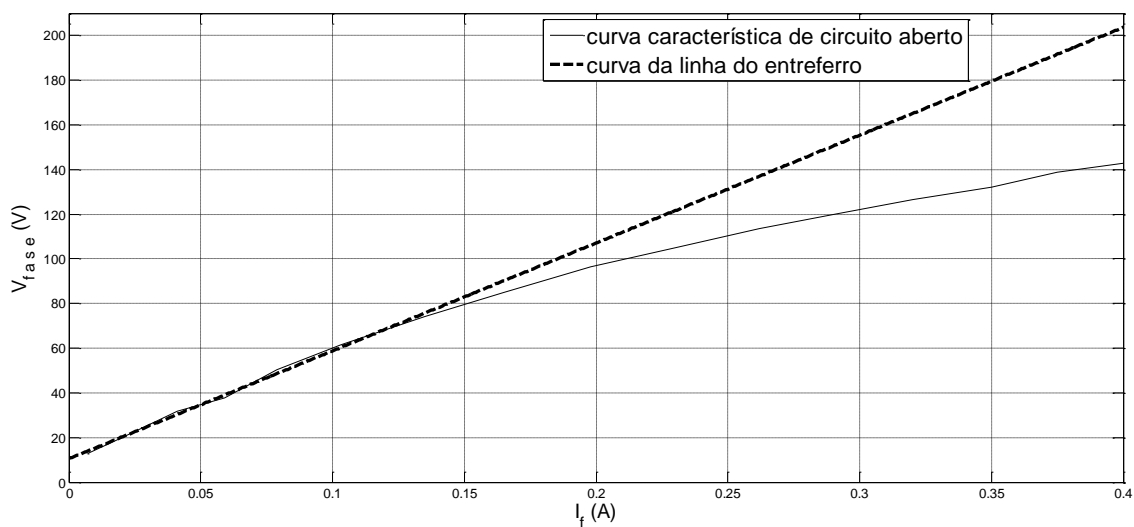


Figura 6.2: Curva experimental para o ensaio de circuito aberto.

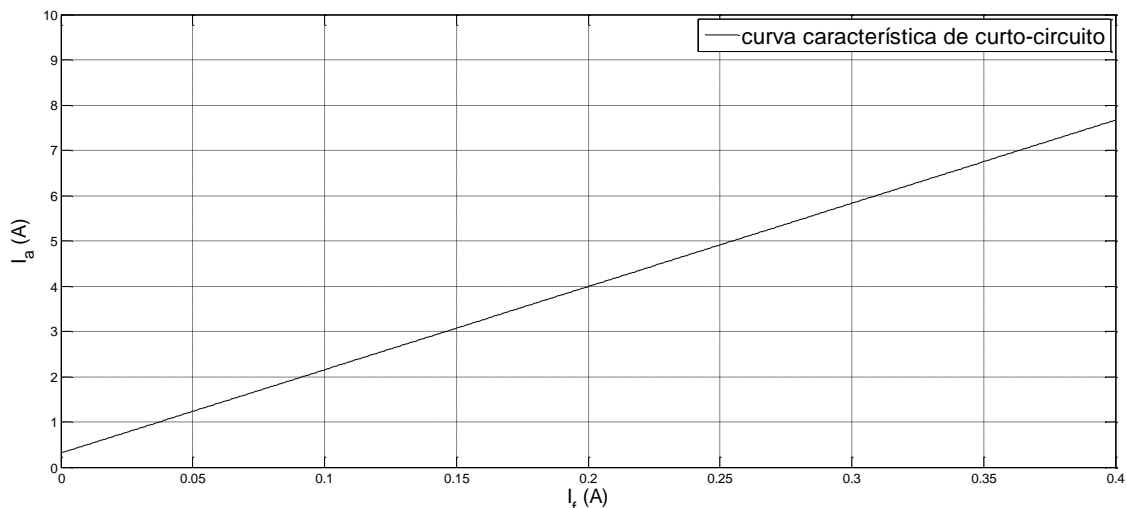


Figura 6.3: Curva experimental para o ensaio de curto-circuito.

Pela análise das curvas encontrou-se $I_f = 0,35$ A para tensão de fase nominal do gerador (132,8 V) e $I_a = 6,75$ A. Na linha do entreferro para a mesma corrente de campo encontra-se $V_{ae} = 179,5$ V. As reatâncias síncronas são dadas pelas equações (3.1) e (3.2).

$$X_{dns} = \frac{V_{ae}}{I_a} = \frac{179,5}{6,75} = 26,58 \Omega$$

$$X_{ds} = \frac{V_{an}}{I_a} = \frac{132,8}{6,75} = 19,67 \Omega$$

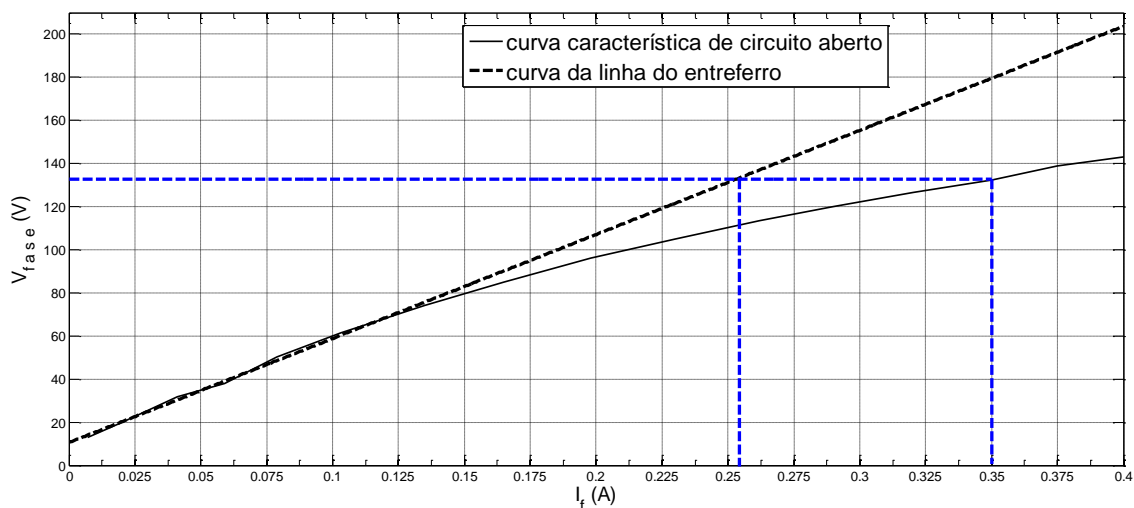


Figura 6.4: Identificação das correntes I_{fs} e I_{fns} .

Como descrito na seção 3.2, o fator de saturação é dado por:

$$k_s = \frac{I_{fs}}{I_{fns}} = \frac{0,35}{0,2546} = 1,375$$

6.2. Ensaio de curto-circuito brusco

Para realizar o ensaio de curto-circuito brusco trifásico colocou-se o gerador a velocidade nominal, aplicou-se corrente de campo de forma a obter alguma tensão de fase ($55,37 V_{rms}$) e o gerador foi colocado em curto-circuito. A figura 6.5 mostra as formas de onda das correntes obtidas pelo sistema de aquisição de dados durante o ensaio.

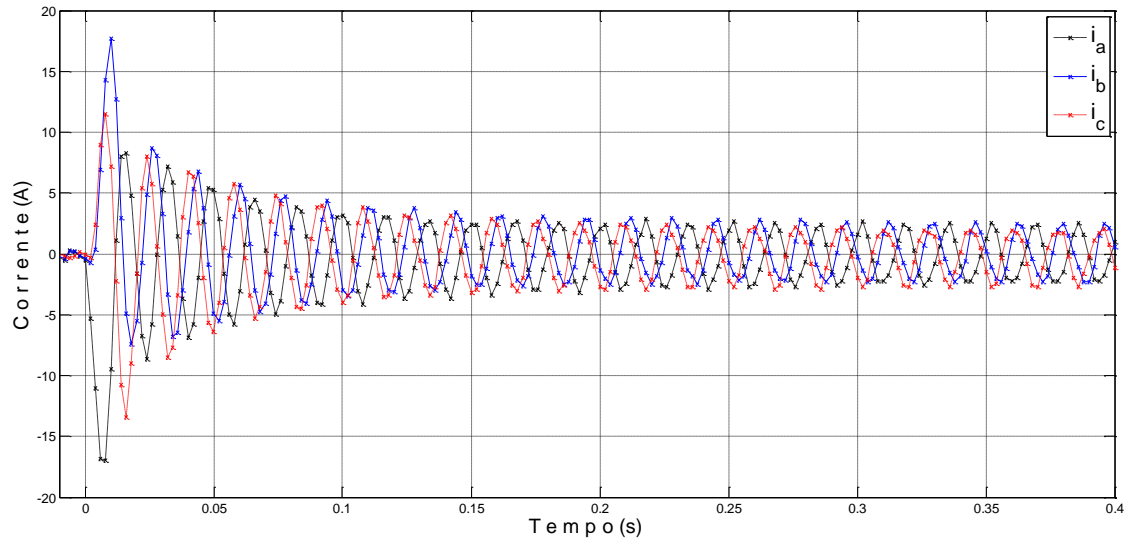


Figura 6.5: Curva experimental das correntes de curto-circuito.

A partir dos dados foram identificados os pontos de máximo e mínimo das três formas de onda (figura 6.6) e criado a curva da média das envoltórias determinada pela equação 6.1 e apresentada na figura 6.7, tal procedimento faz com que a componente DC (*Direct Current*) presente na envoltória desapareça.

$$I_{envoltória} = \frac{(I_{max} - I_{min})}{2} \quad (6.1)$$

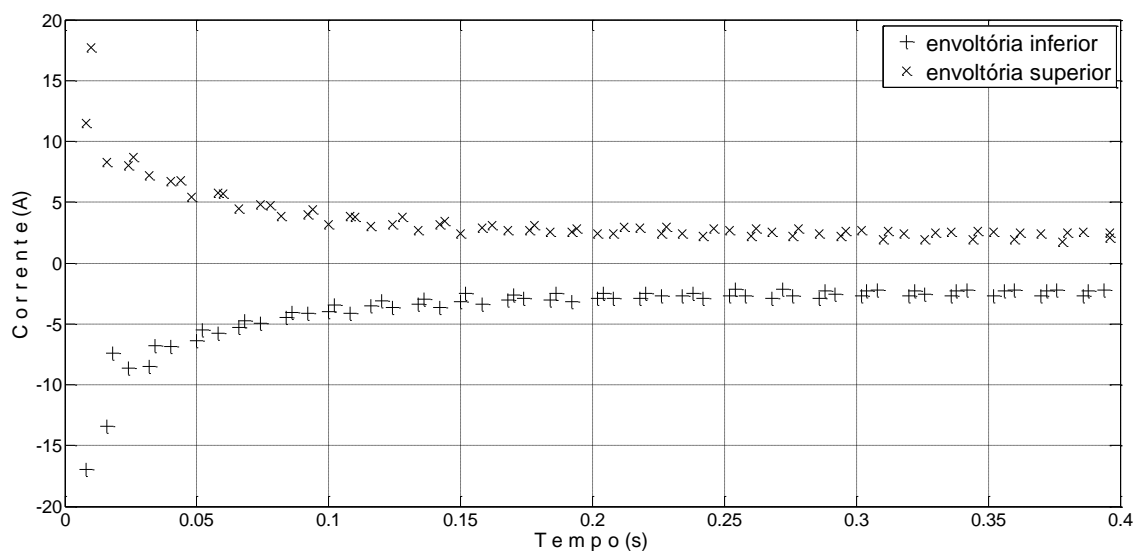


Figura 6.6: Valores de máximos e mínimos das correntes de curto-circuito.

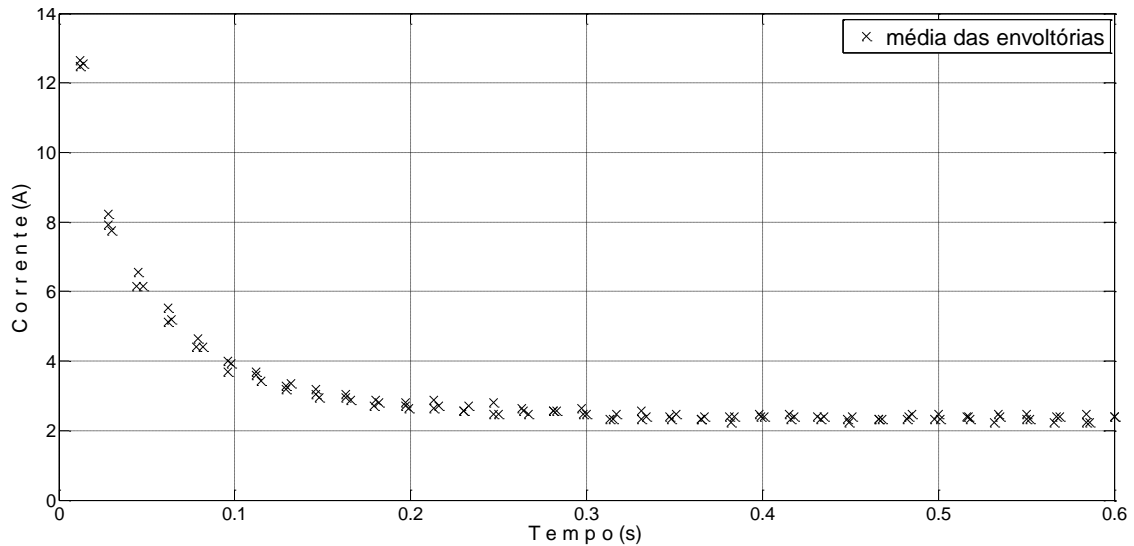


Figura 6.7: Média das envoltórias das correntes de curto-circuito.

Após encontrar a curva da média das envoltórias identifica-se o período em regime permanente, encontrando o tempo (T_I) em que este tem seu início e encontrando o valor da corrente em regime permanente ($2,56 A_{pico}$), a seguir subtrai-se da curva o valor em regime permanente. Após alguns ciclos o regime subtransitório não tem contribuição para o valor da corrente, devido ao seu rápido tempo de decaimento. Analisando a curva depois de alguns ciclos, obtém-se os valores do período transitório I' e T'_d conforme a equação (3.7). Depois de obtidos os valores do período transitório, subtrai-se ponto a ponto a contribuição do período transitório na curva durante os primeiros ciclos após o curto-circuito e determinam-se os valores de I'' e T''_d conforme a equação (3.8). Para este ensaio, os seguintes resultados foram obtidos:

$$I_{ss_pico} = 2,56 A$$

$$I'_{pico} = 10,114 A$$

$$I''_{pico} = 22,77 A$$

$$T'_d = 0,0537 s$$

$$T''_d = 0,0071 s$$

Conforme as equações (3.9), (3.12) e (3.13) os valores das reatâncias são apresentados abaixo, para tensão de fase e pico igual a $V_{fase_pico} = 78,30 V$.

$$X_d = \frac{U}{I_{ss}} = \frac{78,30}{2,56} = 30,59 \Omega$$

$$X'_d = \frac{U}{A} = \frac{78,30}{12,67} = 6,18 \Omega$$

$$X_d'' = \frac{U}{B} = \frac{78,30}{35,44} = 2,21 \Omega$$

Para verificar a confiabilidade dos parâmetros obtidos foi traçada a curva segundo a equação (3.6) pelo tempo e comparada com os dados do ensaio, mostrado na figura 6.8.

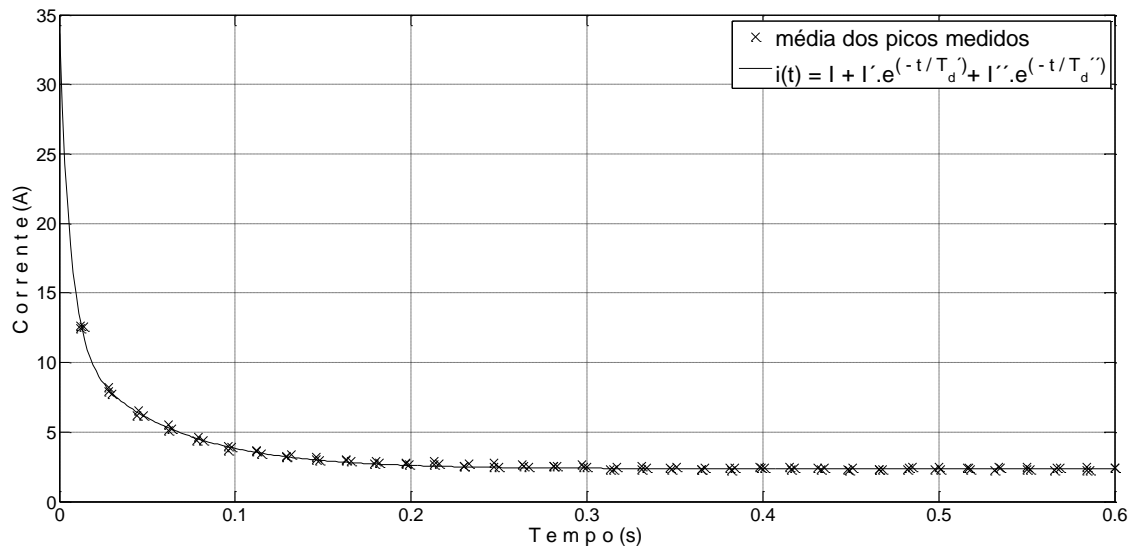


Figura 6.8: Comparação da curva do ensaio experimental com a curva característica.

Na figura 6.9 são mostrados os pontos I_{ss} , A, B que são as extrapolações dos períodos em regime, transitório e subtransitório usados para determinar os valores das reatâncias.

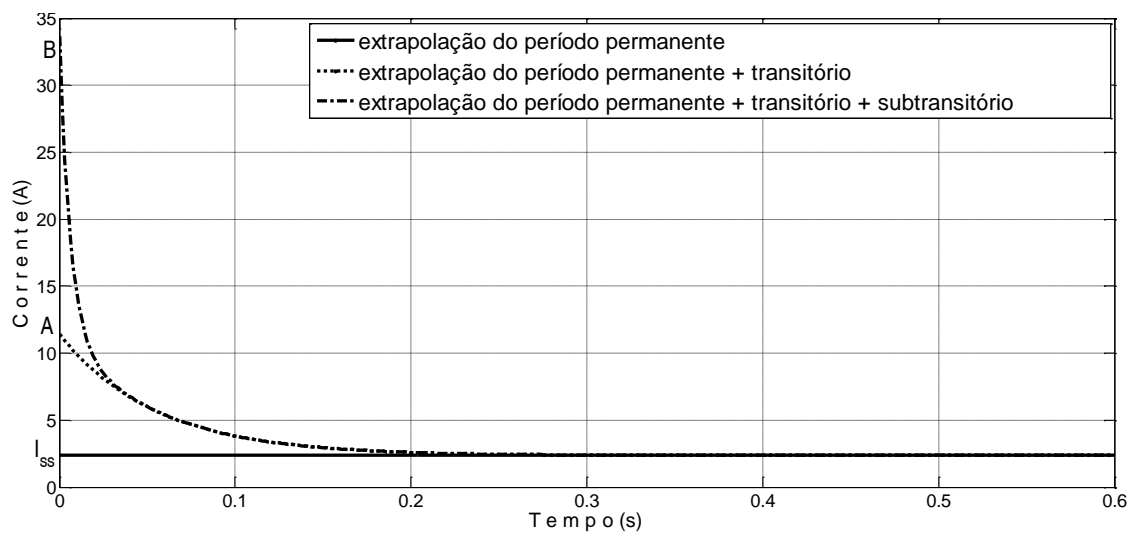


Figura 6.9: Curvas extrapoladas para os períodos em regime permanente, transitório e subtransitório.

6.3. Ensaio de abertura da corrente de curto-circuito

Para realização do ensaio da abertura da corrente de curto-circuito foi acionado o gerador em velocidade nominal, determinada a corrente de campo ($I_f = 0,314 \text{ A}$), em circuito aberto, que leva o gerador a tensão nominal. Com base nesses parâmetros foram colocados os terminais de armadura do gerador em curto-circuito. Mediu-se a corrente de armadura no momento antes da abertura do curto-circuito ($I_{cc} = 5,346 \text{ A}_{rms}$) e colocou-se o gerador em circuito aberto adquirindo os dados de tensão com o sistema de aquisição de dados. Com o uso de software foram analisados os dados, a figura 6.10 mostra a curva da tensão de fase em função do tempo adquiridos no ensaio.

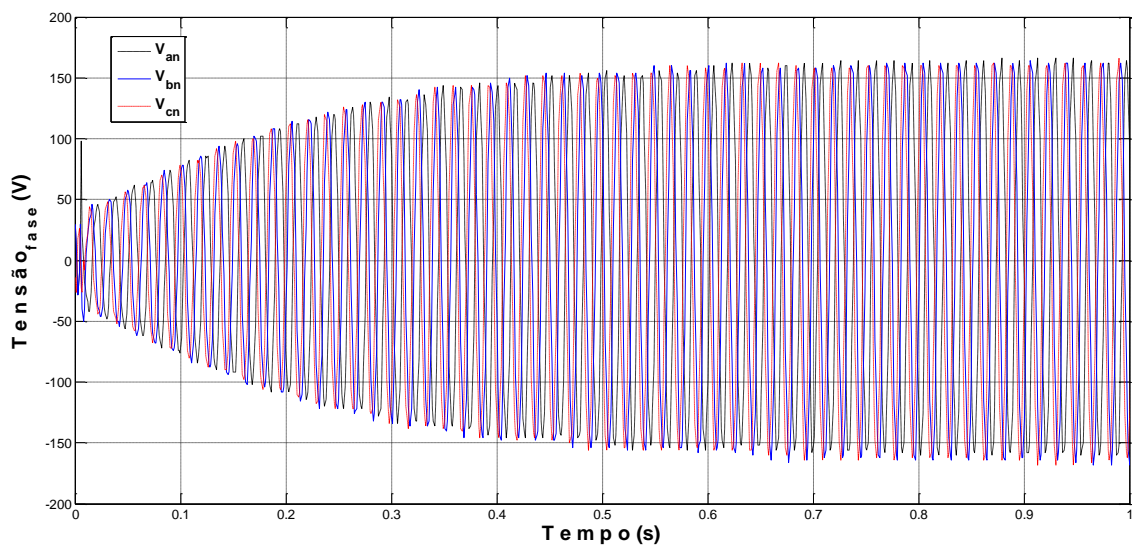


Figura 6.10: Tensões das fases a , b e c adquiridas no ensaio de abertura da corrente de curto-circuito.

Com base nos dados foram separados os picos de tensão de cada fase e feita à média das envoltórias (figura 6.11), necessária para determinar as reatâncias, graficamente extrapolam-se as curvas referentes aos períodos em regime permanente, transitório e subtransitário obtendo-se os valores de U_{a0} , u'_a e u''_a .

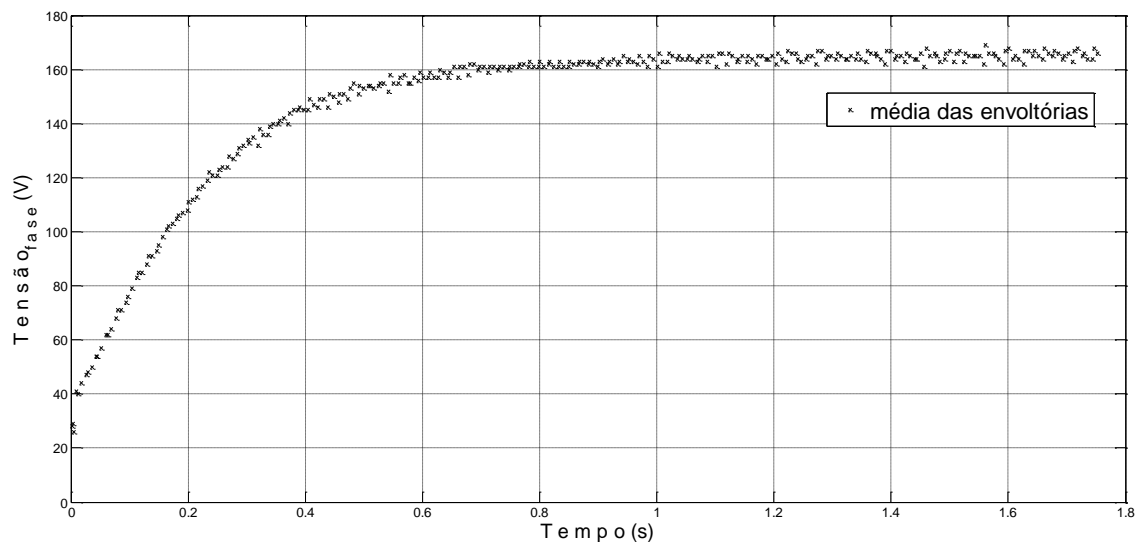


Figura 6.11: Média das envoltórias para o ensaio de abertura da corrente de curto-circuito.

Para este ensaio foram obtidos os valores mostrados abaixo, os valores apresentados são dos picos de tensões de fase e pico de corrente de armadura.

$$I_{cc} = 7,56 A$$

$$U_{a0} = 164,8 V$$

$$u'_a = 38,17 V$$

$$u''_a = 28 V$$

As reatâncias são determinadas conforme as equações (3.19), (3.20) e (3.21).

$$X_d = \frac{U_{a0}}{I_{cc}} = 21,8 \Omega$$

$$X'_d = \frac{u'_a}{I_{cc}} = 5,05 \Omega$$

$$X''_d = \frac{u''_a}{I_{cc}} = 3,7 \Omega$$

Através do segundo procedimento descrito na seção (3.4) será mostrada a forma alternativa para obter os valores das reatâncias e ainda as constantes de tempo de circuito aberto T'_{d0} e T''_{d0} . A figura 6.12 mostra os valores da tensão depois de se retirar do valor de regime permanente a curva da média das envoltórias.

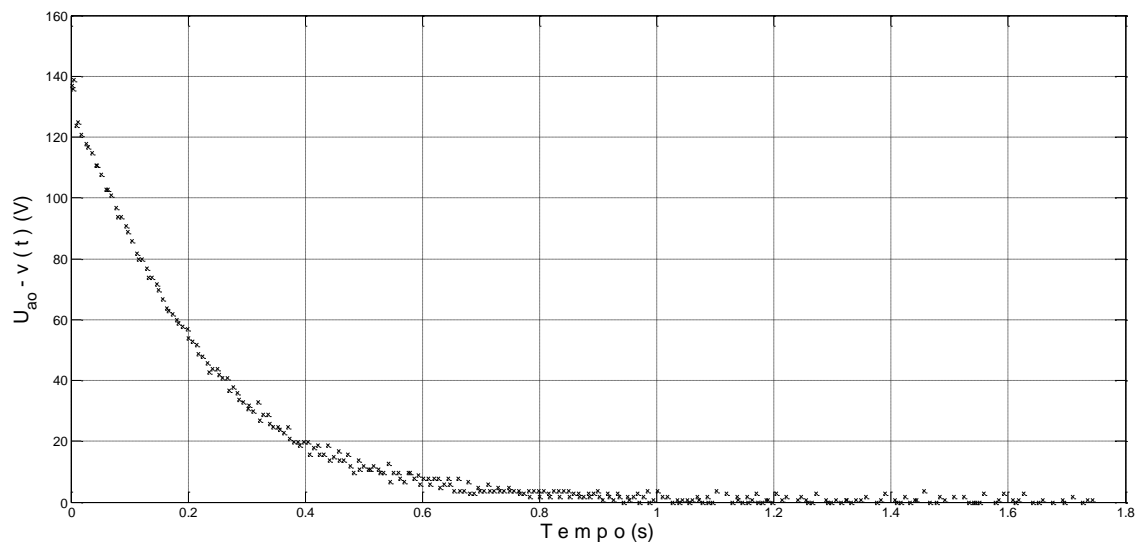


Figura 6.12: Curva resultante após a subtração do valor em regime.

Foram encontradas as duas equações das retas correspondentes aos períodos subtransitário e transitório, como descrito na seção (3.4), os valores encontrados para as constantes foram:

$$U_{a0} = U_{regime} = 164,8 \text{ V}$$

$$u'_a = U_{regime} - v' = 164,8 - 130,45 = 34,35 \text{ V}$$

$$u''_a = U_{regime} - v' - v'' = 164,8 - 130,45 - 10,08 = 24,27 \text{ V}$$

As reatâncias são determinadas conforme as equações (3.19), (3.20) e (3.21).

$$X_d = \frac{U_{a0}}{I_{cc}} = 21,8 \Omega$$

$$X'_d = \frac{u'_a}{I_{cc}} = 4,544 \Omega$$

$$X''_d = \frac{u''_a}{I_{cc}} = 3,21 \Omega$$

$$T'_{d0} = 0,2142 \text{ s}$$

$$T''_{d0} = 0,0112 \text{ s}$$

6.4. Ensaio de escorregamento

No ensaio de escorregamento foi realizado mais de um ensaio para confrontar os resultados obtidos e tomar a média dos parâmetros encontrados.

Primeiramente foram verificadas as sequências de fases do gerador e da fonte externa, deixando os dois com a mesma sequência. O gerador foi acionado próximo à velocidade síncrona (1740 rpm), a fonte externa foi ajustada ($V_a = 45 \text{ V}$) e foram adquiridos os valores de tensão (fase) e corrente de armadura, juntamente com a tensão de campo. As formas de onda das três medidas obtidas durante o ensaio estão ilustradas na figura 6.13.

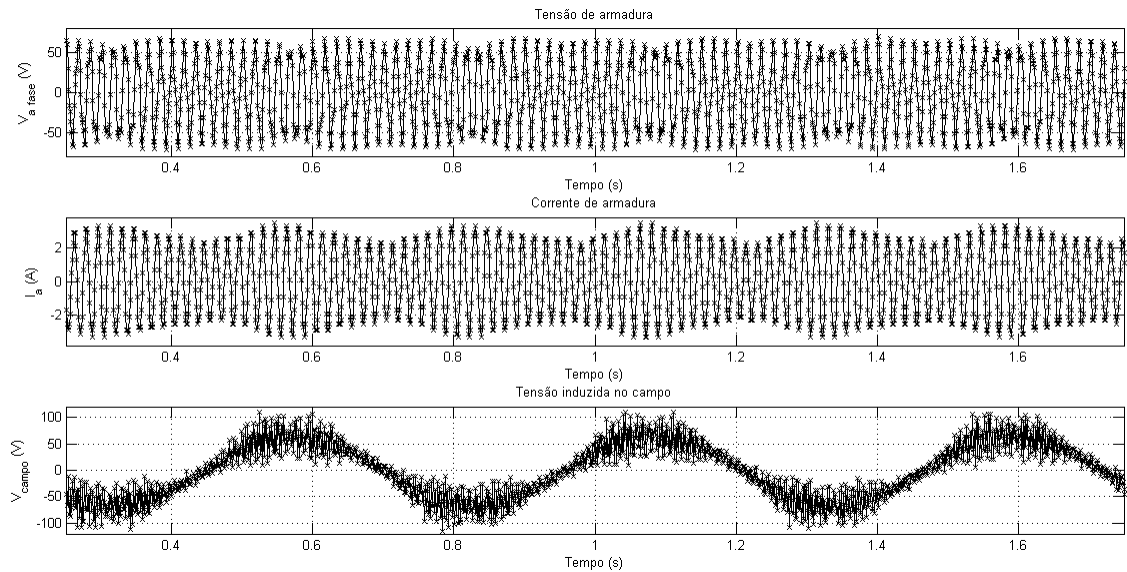


Figura 6.13: Curvas adquiridas no ensaio de escorregamento.

Foram encontrados os valores máximos e mínimos da corrente e tensão de armadura.

$$I_{a_max} = 3,13 \text{ A}$$

$$I_{a_min} = 2,3 \text{ A}$$

$$V_{a_max} = 64,3 \text{ V}$$

$$V_{a_min} = 55,7 \text{ V}$$

Conforme descrito na seção (3.5), as reatâncias são dadas pelas equações (3.29) e (3.30).

$$X_q = \frac{V_{a_min}}{I_{a_max}} = 17,9 \Omega$$

$$X_d = \frac{V_{a_max}}{I_{a_min}} = 28 \Omega$$

6.5. Ensaio da máxima corrente indutiva

Para realizar o ensaio da máxima corrente indutiva, a máquina síncrona foi acionada na configuração motor, com tensão de armadura nominal ($V_a = 220,8 \text{ V}$) e uma corrente de campo inicial de $I_f = 0,3 \text{ A}$ (o teste independe da escolha da corrente de campo inicial), diminuindo gradativamente a corrente de campo da máquina até $I_f = 0 \text{ A}$, inverteu-se a polaridade da corrente e gradativamente foi aumentada novamente. Foi usado no ensaio um amperímetro analógico, mais sensível à variação de corrente, para medir a corrente no instante do reajuste de posição do rotor e medida a tensão de armadura com um voltímetro digital. Os valores obtidos no ensaio e o cálculo da reatância, conforme a equação (3.31), seguem apresentados abaixo.

$$V_{fase} = 127,48 \text{ V}$$

$$I_{max} = 9,4 \text{ A}$$

$$X_{qs} = \frac{V_{a_fase}}{I_{max}} = \frac{127,48}{9,4} = 13,56 \Omega$$

6.6. Técnica de sensibilidade de trajetória

O eixo da máquina síncrona foi conectado ao eixo de um motor de corrente contínua, funcionando analogamente como as turbinas hidráulicas em uma usina hidrelétrica, para que máquina síncrona opere como gerador. Foram obtidas as formas de onda das tensões e correntes de armadura, corrente de campo e tensão de campo. O sistema de aquisição de dados usado foi a placa da *National Instruments NI6024E*, que representaria os relés digitais num sistema elétrico de potência, e por intermédio de um computador tem-se acesso aos dados gravados. Fez-se o uso de transformadores e divisores de tensão para adequar os níveis de tensão do sistema elétrico aos níveis suportados pela placa de aquisição.

Após conectar o gerador síncrono à carga através de um disjuntor, inicialmente aberto, acionou-se o gerador a velocidade síncrona com tensão terminal nominal. Logo após criou-se uma perturbação ao fechar o disjuntor, como exposto no diagrama unifilar apresentado na figura 6.14. Ao todo foram realizados 8 ensaios, adquiridas as formas de onda das correntes e tensões de armadura, corrente de campo e tensão de campo, em seguida os dados obtidos foram corrigidos, em seus níveis, e analisados. A figura 6.15 – 6.18 mostram as curvas adquiridas em um dos ensaios após as correções.

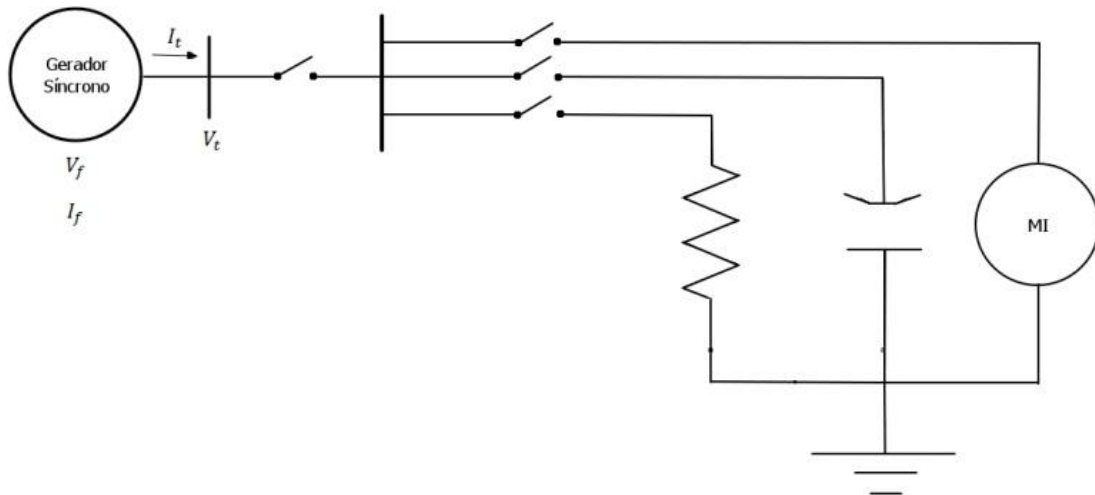


Figura 6.14: Diagrama unifilar para o ensaio experimental da técnica de análise de sensibilidade de trajetória.

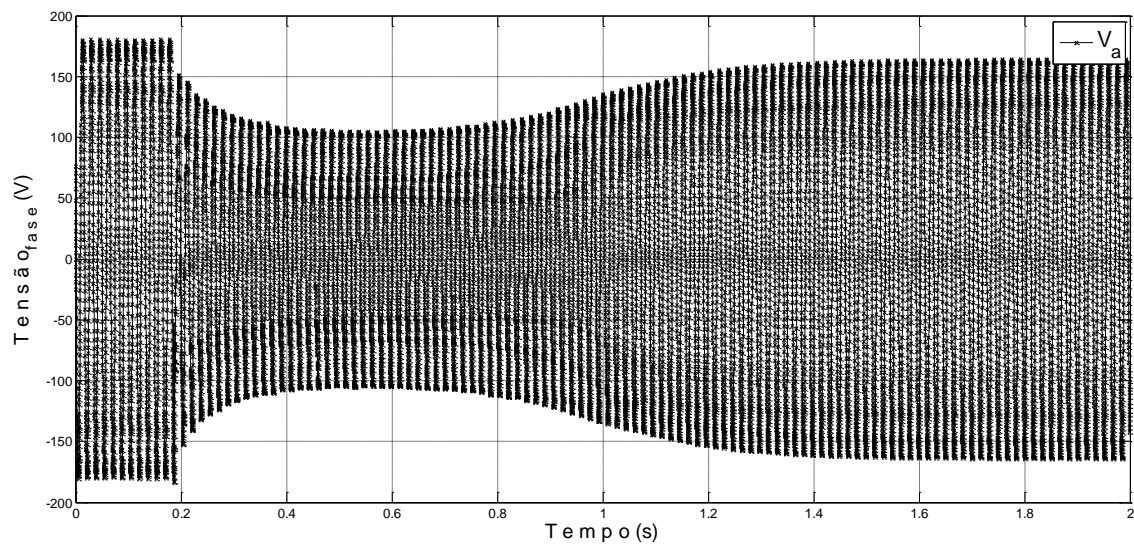


Figura 6.15: Tensão de fase durante a perturbação.

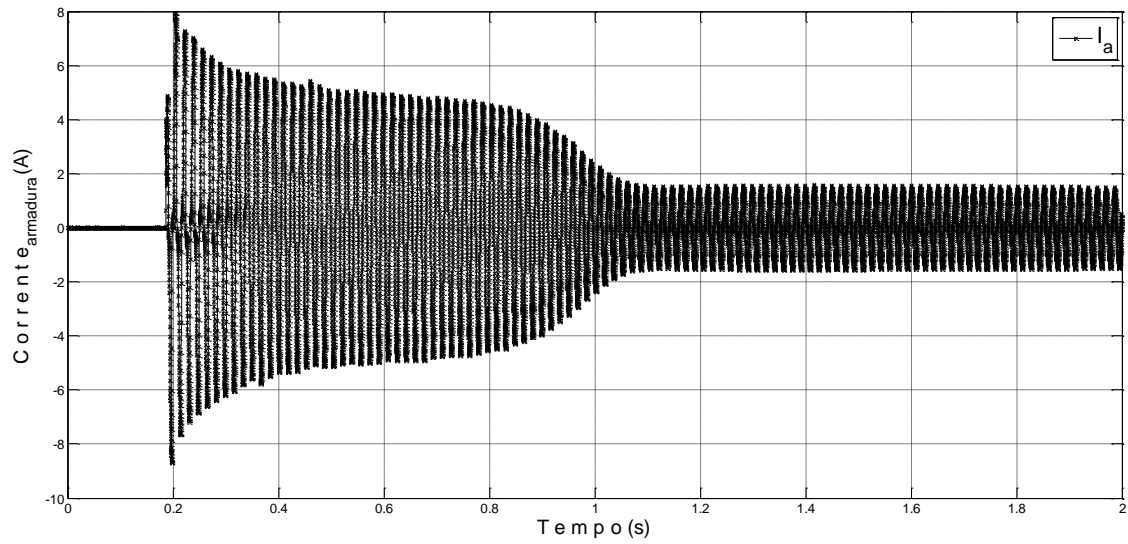


Figura 6.16: Corrente de armadura durante a perturbação.

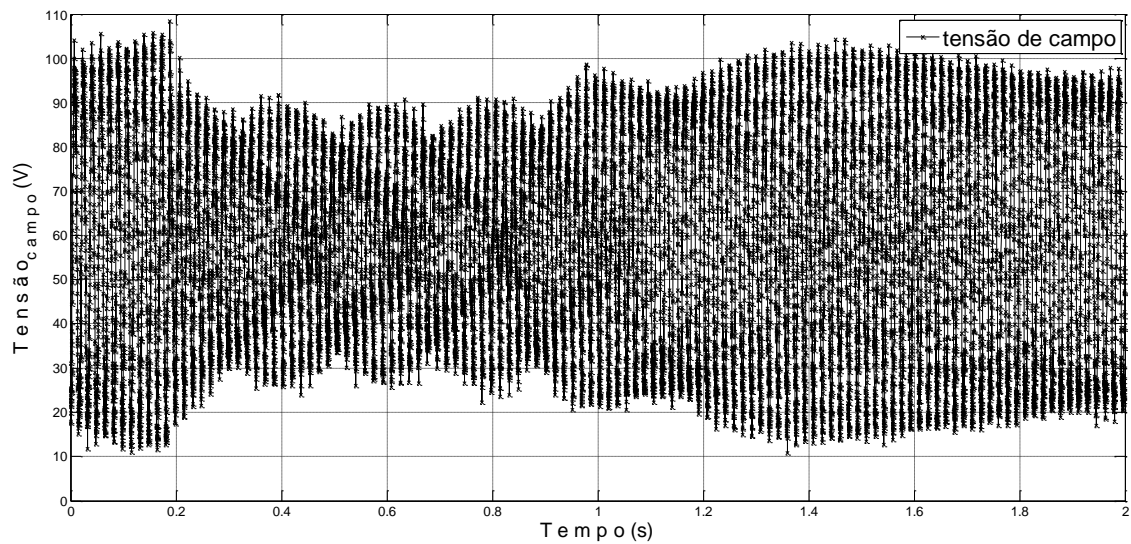


Figura 6.17: Tensão de campo durante a perturbação.

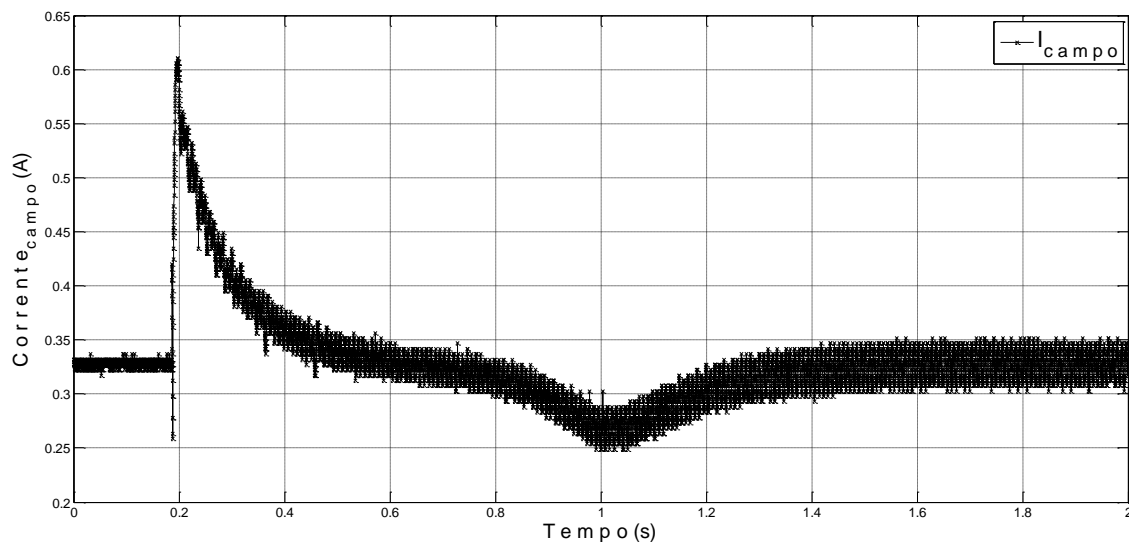


Figura 6.18: Corrente de campo durante a perturbação.

Verifica-se que, ao conectar a carga ao gerador as correntes de armadura se elevam, opondo-se a variação do fluxo concatenado, atingindo a seguir seu valor em regime permanente. Devido ao surgimento das correntes na armadura há uma queda da tensão terminal como pode ser visto na figura 6.15, a corrente de campo também apresenta uma elevação para opor-se a variação do fluxo.

Devido à excitatriz não fornecer tensão puramente contínua, a tensão de campo foi corrigida tomando a raiz quadrada do valor médio somado com o valor eficaz da componente AC (Alternating Current) da tensão (equação (6.2)).

$$V_{campo}(t) = \sqrt{(V_{m\u00e9dio})^2 + (V_{rms})^2} \quad (6.2)$$

A forma de onda da tensão de campo ao longo do tempo é mostrada na figura 6.19, após os cálculos descritos.

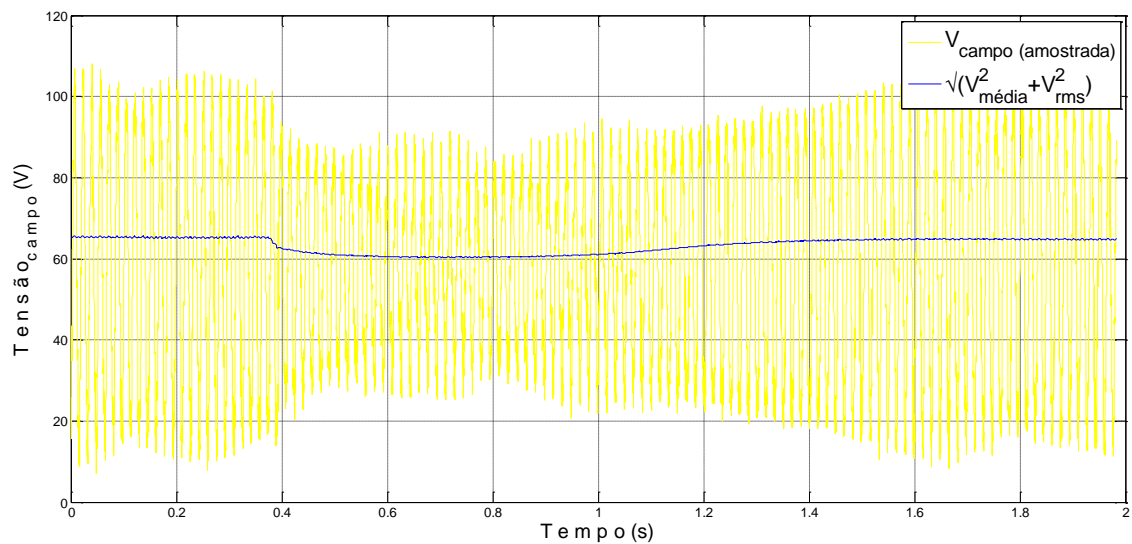


Figura 6.19: Tensão de campo calculada.

Após corrigir os valores das tensões e correntes de armadura, transformaram-se estes valores em grandezas fasoriais, compostas de magnitude e ângulo, decompondo estas em tensões e correntes de sequência positiva, negativa e zero, figuras 6.20 e 6.21 respectivamente, e em seguida calculam-se as potências ativa e reativa, obtendo o resultado mostrado na figura 6.22.

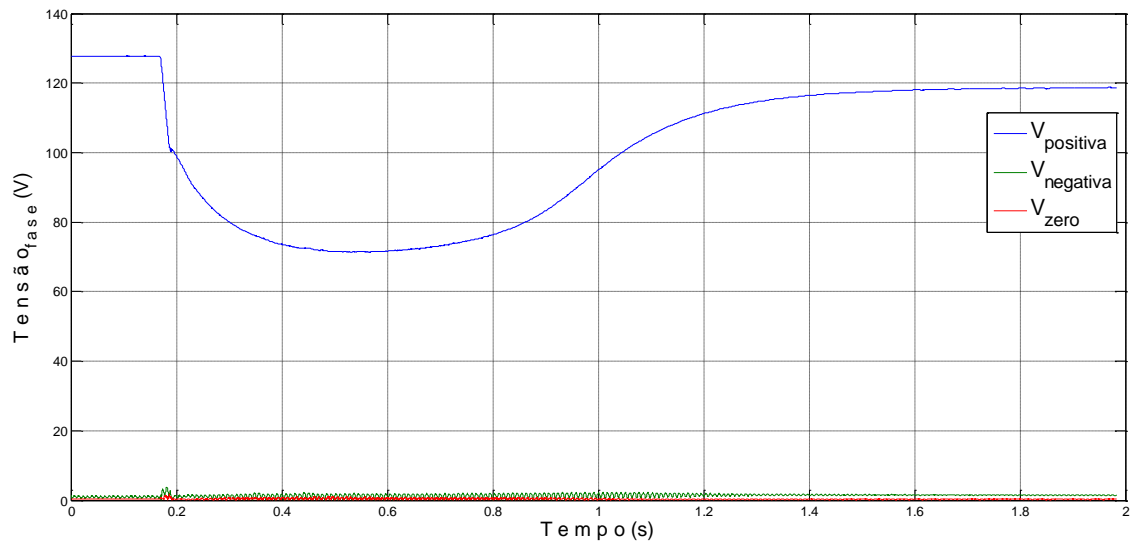


Figura 6.20: Componentes de sequência positiva, negativa e zero da tensão.

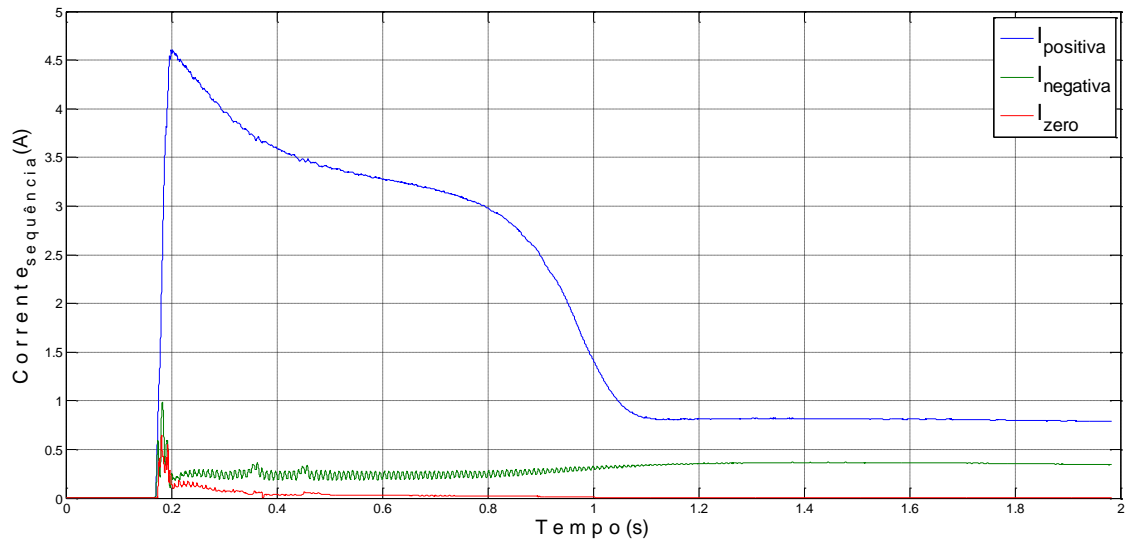


Figura 6.21: Componentes de sequência positiva, negativa e zero da corrente.

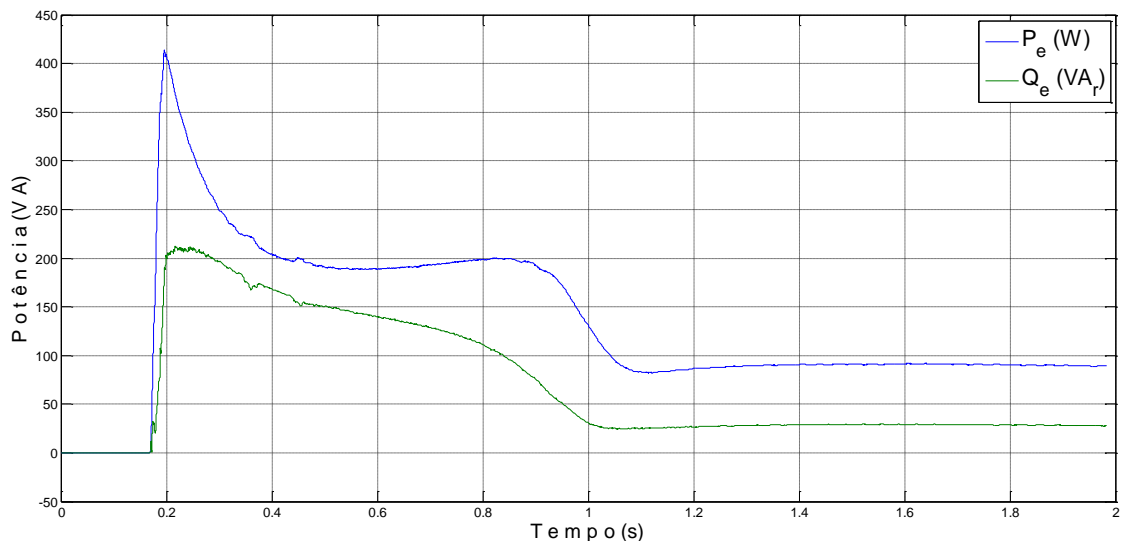


Figura 6.22: Potências ativa e reativa.

De posse dos dados calculados criou-se um vetor, h , com os seguintes dados:

$$h = [\text{tempo } P_e \text{ } Q_e \text{ } V_t \text{ } I_t \text{ } (\theta_v - \theta_i) \text{ } V_{campo}]$$

onde, P_e é a potência elétrica ativa, Q_e é potência elétrica reativa, V_t é a tensão terminal de armadura, I_t é a corrente terminal de armadura, $(\theta_v - \theta_i)$ é a defasagem entre a tensão e a corrente terminal e V_{campo} é a tensão de campo. Os dados utilizados no vetor são todos monofásicos, estes valores serão utilizados no modelo para a técnica de análise de sensibilidade de trajetória.

Até o momento os dados somente foram adequados e serão utilizados na técnica de análise de sensibilidade de trajetória na próxima seção.

6.6.1. Aplicação da técnica de análise de sensibilidade de trajetória

Para a aplicação da técnica escolhem-se os valores base para a potência, tensão, corrente e impedância. Para as análises feitas foram escolhidos os valores base conforme apresentados abaixo:

$$S_{base} = \frac{2000}{3} = 666,66 \text{ VA}$$

$$V_{base} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ V}$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} = 5,25 \text{ A}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = 24,19 \Omega$$

Sendo assim, dividem-se os valores do vetor h pelos seus respectivos valores base, obtendo valores das grandezas em p.u. A base para a tensão de campo não é a mesma da base usada para a tensão terminal. Em [3] considera-se que, a base para a tensão de campo é a tensão de campo, aplicada à máquina síncrona, que leva a tensão de armadura à tensão nominal, isto sem carga e sem saturação. Sendo assim, seria a tensão de campo correspondente à linha do entreferro no ensaio de circuito aberto, como ilustrado na figura 6.23.

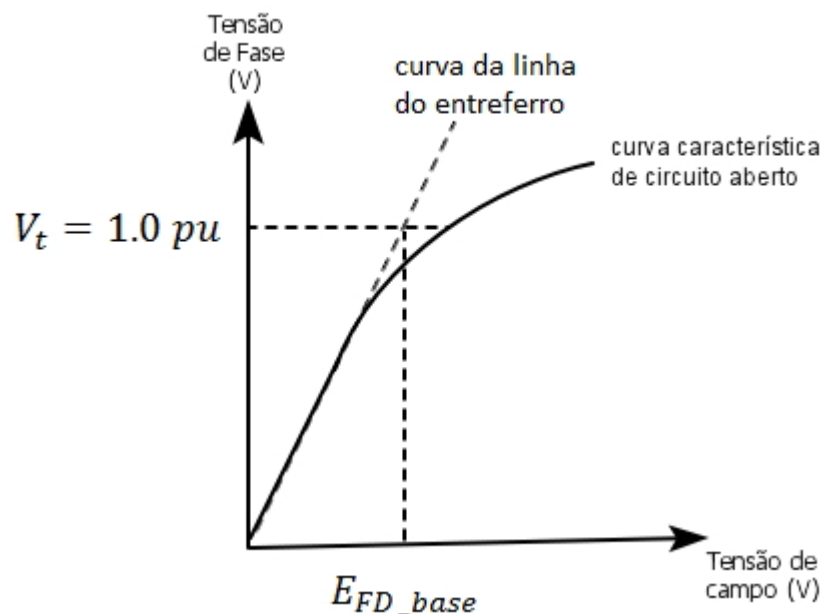


Figura 6.23: Referência para determinar a base para tensão de campo

O segundo passo é definir quais os valores iniciais para o vetor de parâmetros, em [1] foi verificado que valores distantes dos reais fazem com que o modelo não consiga diminuir o

erro entre as curvas das potências reais e modeladas e o sistema diverge. Os valores iniciais (em p.u.) utilizados no processo de estimação foram os valores encontrados através dos ensaios convencionais.

$$X_d = 0,9 \text{ p.u.}$$

$$X'_d = 0,2086 \text{ p.u.}$$

$$X_q = X'_q = 0,74 \text{ p.u.}$$

$$T'_{d0} = 0,2373 \text{ s}$$

$$T'_{q0} = 100 \text{ s}$$

$$E_{q0} = V_t(1)$$

onde, $V_t(1)$ é a tensão terminal inicial. Adotou-se um valor alto para T'_{q0} para que não interferisse nas equações do modelo, segundo [5] a constante não é aplicada às máquinas de polos salientes.

O vetor de parâmetros a ser estimado é $p = [x_d \ x'_d \ T'_{d0} \ x_q \ x'_q \ T'_{q0} \ E'_{q0} \ E'_{d0}]^T$, novamente são apresentadas as equações do modelo de dois eixos utilizadas.

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [E_{fd} - E'_q + (x_d - x'_d)I_d] \quad (6.3)$$

$$\dot{E}'_d = -\frac{1}{T'_{q0}} [E'_d + (x_q - x'_q)I_q] \quad (6.4)$$

$$0 = I_T^2 - I_q^2 - I_d^2 \quad (6.5)$$

$$P_e = E'_d I_d + E'_q I_q + (x'_d - x'_q) I_d I_q \quad (6.6)$$

$$Q_e = E'_d I_q - E'_q I_d - x'_q I_q^2 - x'_d I_d^2 \quad (6.7)$$

$$I_d = \frac{1}{x'_d} (V_T \cos(\beta) - E'_q) \quad (6.8)$$

$$I_q = \frac{1}{x'_q} (V_T \sin(\beta) + E'_d) \quad (6.9)$$

Conforme escrito para o modelo de um eixo no capítulo dois, para uma máquina síncrona de polos salientes as reatâncias x_q e x'_q são praticamente iguais, a tensão de excitação E e a tensão transitória nunca saem do eixo em quadratura. Embora possa ser considerada essa simplificação, foi verificado nas simulações que o valor inicial e constante da variável E'_d influi

nos resultados e na convergência dos parâmetros. Portanto, foi adotado nas simulações diferentes valores para E'_d e comparados os resultados.

De posse dessas informações inicia-se o procedimento para a técnica. Como visto no capítulo cinco, a estimação dos parâmetros se dá em duas etapas, estimando primeiramente os parâmetros bem condicionados e após algumas iterações (5) estima-se todos os parâmetros simultaneamente, isto faz com que a robustez do processo de estimação aumente. A influência dos parâmetros é dada pela matriz Γ .

Os parâmetros a serem estimados são x_d , x'_d , x'_q , T'_{do} e E'_{qo} , visto que E'_{do} e T'_{qo} são constantes e $x_q = x'_q$, a matriz Γ , gerada a partir do sistema auxiliar considerando a estimativa inicial do vetor de parâmetros elétricos adotada, é:

Tabela 6.4: Classificação dos parâmetros segundo sua influência na saída.

Γ	x_d	E'_{qo}	x'_d	T'_{do}	x'_q
	3,12	1,424	0,329	0,027	0,0176

Com base nos valores apresentados na tabela 6.4, temos que os parâmetros que mais influenciam na saída do modelo são x_d , x'_d e E'_{qo} , sendo estes parâmetros estimados na primeira fase e na segunda fase todos os parâmetros são estimados simultaneamente.

Nas figuras 6.24 – 6.27 são apresentados os resultados de um dos ensaios.

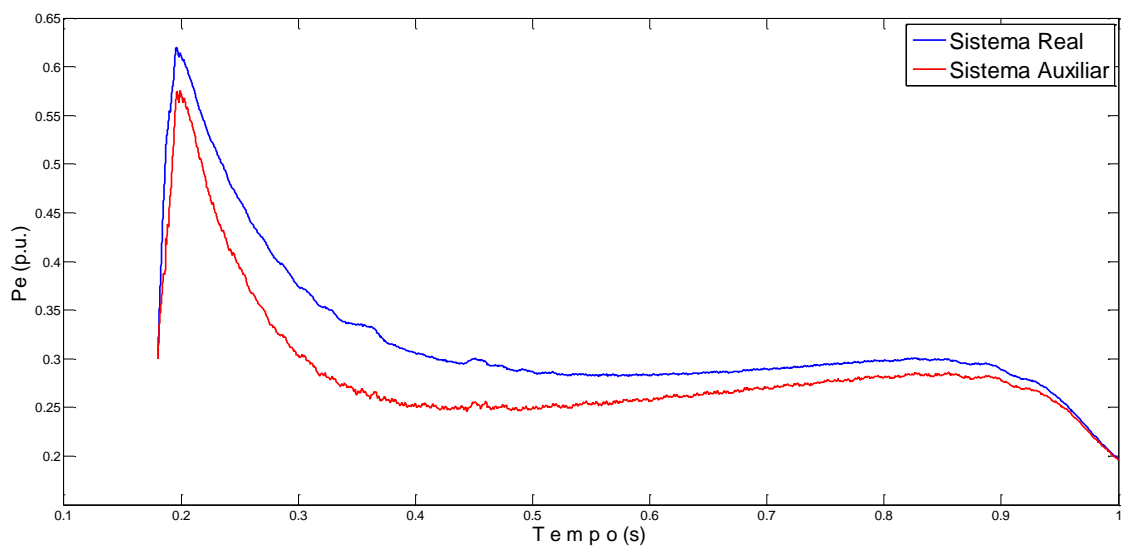


Figura 6.24: Potência ativa no início do processo de estimação.

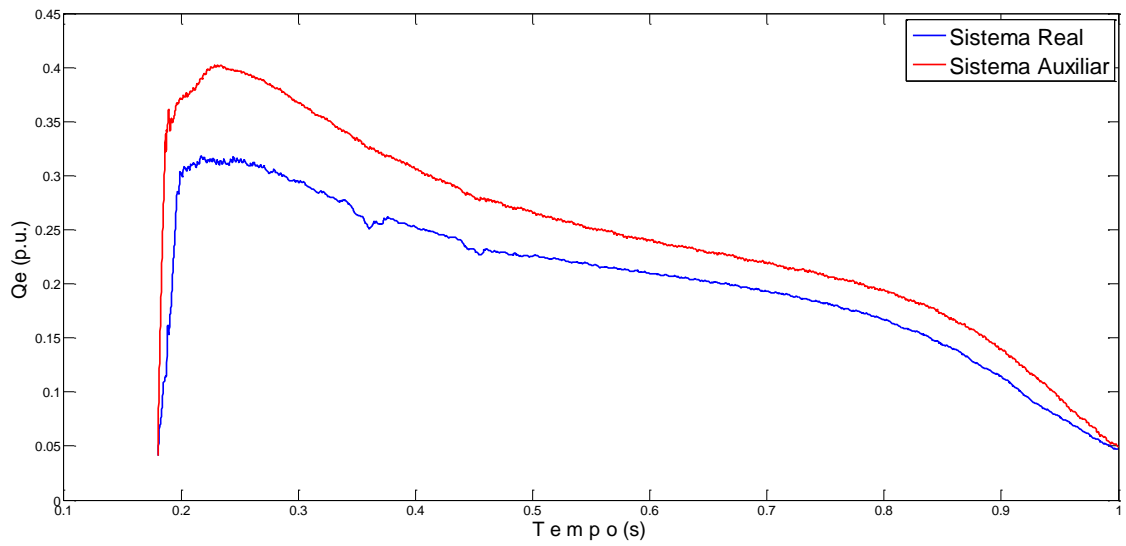


Figura 6.25: Potência reativa no início do processo de estimação.

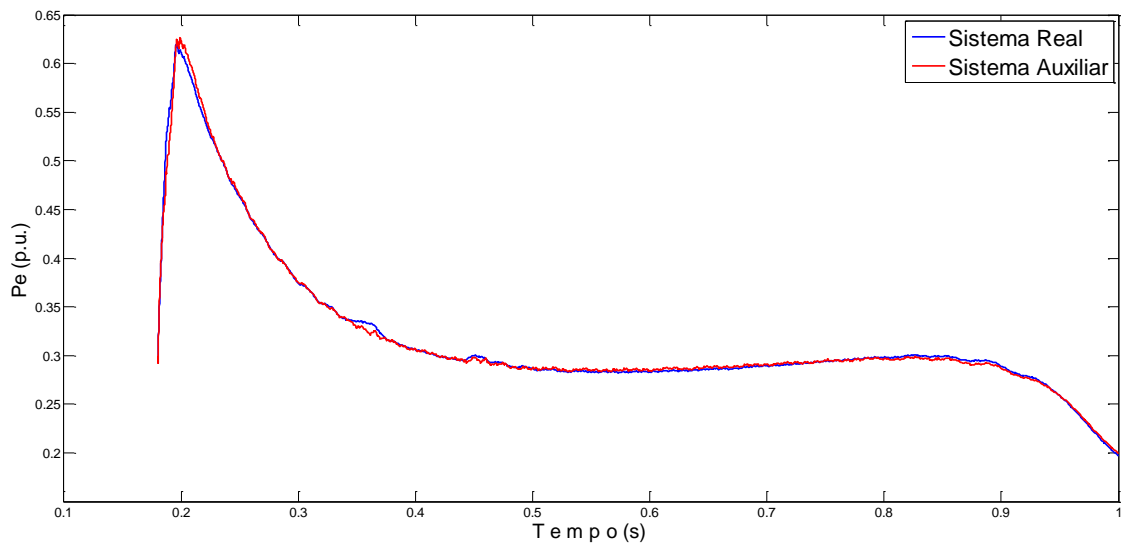


Figura 6.26: Potência ativa após a convergência dos parâmetros.

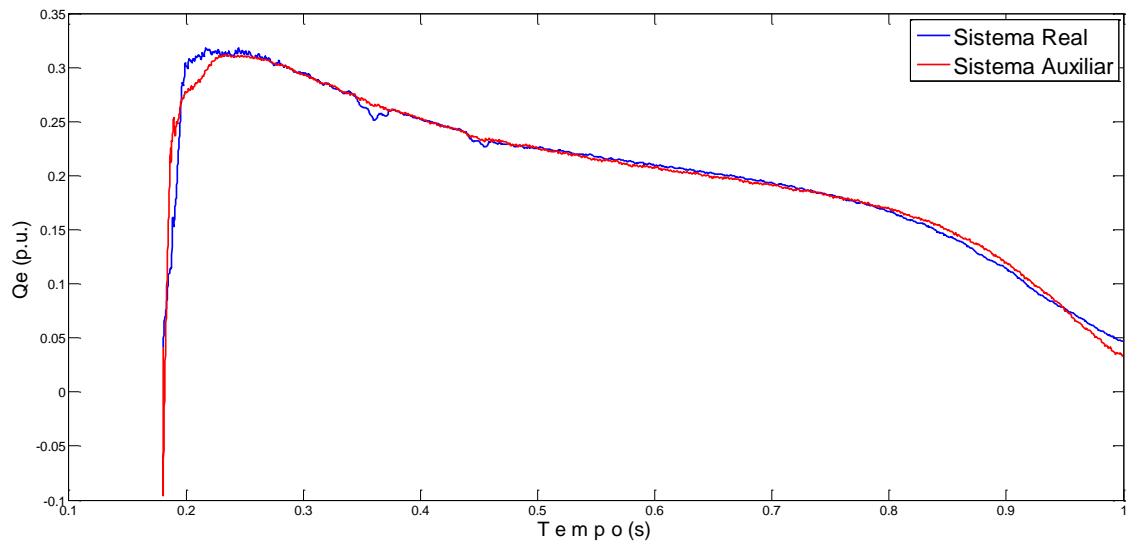


Figura 6.27: Potência reativa após a convergência dos parâmetros.

O sistema real corresponde aos dados reais das potências, ativa e reativa, obtidos experimentalmente e o sistema auxiliar corresponde aos valores das potências, ativa e reativa, calculadas pelo modelo.

Para este ensaio foram obtidos os seguintes valores finais para os parâmetros, onde foram considerados $E'_{do} = 0$ e $E'_{do} \neq 0$, apresentados na tabela 6.5, onde também foi adicionado o valor de E'_{qo} estimado comparando com seu valor inicialmente adotado como sendo igual a tensão terminal inicial. A parte superior da tabela traz o valor usado para a tensão de campo base utilizada. Foram utilizados vários valores para a base da tensão de campo e para E'_d e escolhidos os resultados que mais aproximaram o parâmetro x_d de seu valor inicial. O parâmetro x_d foi tomado como referência, pois seu valor foi determinado nos ensaios convencionais e apresentou pouca imprecisão.

Tabela 6.5: Valores dos parâmetros ao final do processo de estimação.

$E_{FD_base} = 59 V$		$E'_{do} = 0$		$E'_{do} = -0,1$		$E'_{do} = -0,125$	
Parâmetro	Valor Inicial	Valor Final	Diferença (%)	Valor Final	Diferença (%)	Valor Final	Diferença (%)
x_d	0,9000	0,9409	-4,54	0,9419	-4,66	0,9438	-4,87
x'_d	0,2086	0,208	0,29	0,201	3,64	0,1989	4,65
T'_{do}	0,2373	0,2287	3,62	0,2274	4,17	0,2274	4,17
x_q	0,7400	0,8387	-13,34	0,7207	2,61	0,6942	6,19
x'_q	0,7400	0,8387	-13,34	0,7207	2,61	0,6942	6,19
E'_{qo}	0,8759	0,8252	5,79	0,8084	7,71	0,8031	8,31

Analisando esta primeira comparação de resultados, vemos a influência de E'_{do} na estimação do parâmetro x_q e x'_q . Para x_d foi utilizado seu valor saturado, calculado no ensaio de circuito aberto e curto-circuito em regime permanente, e para x_q e x'_q valores não saturados, calculados no ensaio de escorregamento. A influência da saturação tende a diminuir o valor da reatância e, portanto, o melhor resultado é para $E'_{do} = -0,125$ que apresenta um valor para x_q e x'_q mais saturado. Ao usar o valor de $E'_{do} = 0$ seria obtido um valor não tão próximo do real para os dois parâmetros x_q e x'_q .

A tabela 6.6 mostra os valores encontrados para os parâmetros com tensão de campo base que leva o gerador síncrono à tensão nominal quando o mesmo estava desconectado da carga, porém com efeito da saturação. Observa-se que todos os parâmetros tiveram uma redução em seus valores, em [3] é mostrado uma relação para calcular a tensão de campo base, porém a mesma depende de um parâmetro, além de depender de parâmetros da fonte de excitação, e como este é um processo para estimação de parâmetros, seria ideal que o mesmo não dependesse de um parâmetro que não está sendo estimado. Como verificado na figura 6.23, o valor a ser usado como base para a tensão de campo é um valor abaixo do valor de tensão de campo com o gerador em operação.

Tabela 6.6: Valores dos parâmetros ao final do processo de estimação.

$E_{FD_base} = 65 V$		$E'_{do} = 0$		$E'_{do} = -0,1$		$E'_{do} = -0,125$	
Parâmetro	Valor Inicial	Valor Final	Diferença (%)	Valor Final	Diferença (%)	Valor Final	Diferença (%)
x_d	0,9000	0,7612	15,42	0,7578	15,80	0,7595	15,61
x'_d	0,2086	0,1972	5,47	0,1955	6,28	0,195	6,52
T'_{do}	0,2373	0,1762	25,75	0,1744	26,51	0,1747	26,38
x_q	0,7400	0,5812	21,46	0,4939	33,26	0,4798	35,16
x'_q	0,7400	0,5812	21,46	0,4939	33,26	0,4798	35,16
E'_{qo}	0,8759	0,8490	3,07	0,8366	4,49	0,8319	5,02

Uma solução para os dois problemas das escolhas de E_{FD_base} e E'_{do} seria incluí-los em um “loop” dentro do algoritmo nas simulações e verificar quais soluções encontrariam valores que mais aproximariam a curva modelada da curva real. Outro fator que gera erros na determinação dos parâmetros é a inexistência no algoritmo de um fator de saturação. Em alguns ensaios a tensão terminal cai muito abaixo do seu valor nominal, isto implica que, em algum momento alguns parâmetros passem para valores não saturados e, no processo de estimação, faça que o sistema modelado não convirja, ou forneça valores aproximados dos valores reais.

Como foi dito, outros valores de E_{FD_base} foram utilizados nas simulações, alguns destes valores fizeram com que o sistema divergisse, ou não representasse o valor real dos parâmetros. Em [4] é mostrada a magnitude de alguns parâmetros em relação a outros e esta ordem foi considerada para analisar os resultados obtidos nas simulações, sendo:

$$X_d \geq X_q > X'_q \geq X'_d > X''_q \geq X''_d \quad (6.10)$$

$$T'_{do} > T'_d > T''_{do} > T''_d \quad (6.11)$$

Foram realizados os ensaios experimentais, aplicou-se a técnica de análise de sensibilidade de trajetória aos dados adquiridos e buscaram-se os resultados que mais se aproximaram dos reais para cada ensaio, onde se variou o valor da tensão de campo base e o valor inicial e constante para E'_{do} , chegando aos seguintes resultados:

- Em aproximadamente 90% dos testes realizados os algoritmos de estimação de parâmetros convergiram.
- Em todos os ensaios o parâmetro x_d ficou entre $\pm 10\%$ do valor inicial.
- Em 50% dos testes notou-se que a aproximação de x_q , em relação ao valor inicial, está relacionada a não aproximação de T'_{do} e x'_d , dos seus valores iniciais.
- Em 50% dos testes os valores de x_q ficaram entre $\pm 15\%$ do inicial.
- Em 50% dos testes os valores de T'_{do} e x'_d ficaram abaixo de 20% de seus valores iniciais.
- Em aproximadamente 38% destes ensaios todos os parâmetros tiveram erro inferior a 15% comparado com seus valores iniciais.

Abaixo são apresentadas algumas possíveis soluções para os problemas no processo de estimação:

- Adicionar restrições físicas, como as apresentadas nas equações (6.10) e (6.11);
- Refazer experimento com velocidade controlada e/ou adicionar ao programa relação de transformação;
- Adicionar ao algoritmo fator de saturação;
- Adicionar filtros.
-

6.7. Quadro comparativo dos parâmetros

Foram realizados diversos ensaios para determinarem-se os parâmetros da máquina síncrona trifásica. A tabela 6.7 mostra todos os valores obtidos nos ensaios convencionais, as reatâncias estão em Ohms e as constantes de tempo em segundos.

Tabela 6.7: Valores obtidos nos ensaios realizados.

Parâmetros	Ensaio				
	Circuito Aberto/ Curto-circuito	Curto-circuito Brusco	Abertura da Corrente de Curto-circuito	Escorregamento	Máxima Corrente Indutiva
$X_{dns}(\Omega)$	26,58	30,59		28	
$X_{ds}(\Omega)$	19,67		21,8		
$X'_d(\Omega)$		6,18	4,544		
$X''_d(\Omega)$		2,21	3,21		
$X_{qs}(\Omega)$				17,9	13,56
$T'_d(s)$		0,0537			
$T''_d(s)$		0,0071			
$T'_{do}(s)$			0,2142		
$T''_{do}(s)$			0,0112		

Aplicando o fator de saturação, calculado no capítulo 3, às reatâncias X_{dns} e X_{qns} e calculando os valores de T'_{do} e T''_{do} , para o ensaio de curto-circuito brusco, através das equações (2.38) e (2.39). Temos uma nova tabela (6.8), com os dados para os ensaios convencionais, onde a letra *c* em frente ao parâmetro denota que o mesmo foi calculado. Novamente as reatâncias estão em Ohms e as constantes de tempo em segundos.

Tabela 6.8: Valores dos parâmetros corrigidos.

Parâmetros	Ensaio				
	Circuito Aberto/ Curto-circuito	Curto-circuito Brusco	Abertura da Corrente de Curto-circuito	Escorregamento	Máxima Corrente Indutiva
$X_{ds}(\Omega)$	19,67	22,25 ©	21,8	20,37 ©	
$X'_d(\Omega)$		6,18	4,544		
$X''_d(\Omega)$		2,21	3,21		
$X_{qs}(\Omega)$				17,9	13,56
$T'_{do}(s)$		0,2658 ©	0,2142		
$T''_{do}(s)$		0,0199 ©	0,0112		

Nota-se que ao aplicar o fator de saturação aos ensaios que foram realizados com tensões muito baixas, os valores das reatâncias são corrigidos e tornam-se bem próximos uns dos outros. Ao calcular as constantes de tempo de circuito aberto, T'_{do} e T''_{do} , para o ensaio de curto-circuito brusco, obtém-se um erro de 19% e 43% respectivamente, o fato se deve que, para o ensaio de curto-circuito brusco, as correntes subtransitórias de curto-circuito decaem muito rapidamente e poucos pontos (1 à 2) são obtidos dentro deste período, tornando imprecisa a determinação dos parâmetros T'_d e $X''_d(\Omega)$. As máquinas síncronas usadas para geração de energia elétrica são bem maiores que a utilizada nestes ensaios, possuindo valores das constantes de tempo bem maiores e não teriam este problema. A tabela 6.9 mostra os valores (em p.u.) dessas grandezas encontradas em geradores acionados por turbinas hidráulicas [4].

Tabela 6.9: Valores de parâmetros comumente encontrados em máquinas síncronas.

Parâmetro	Unidades Hidráulicas
X_d (pu)	0,6 – 1,5
X_q (pu)	0,4 – 1,0
X'_d (pu)	0,2 – 0,5
X'_q (pu)	-
X''_d (pu)	0,15 – 0,35
X''_q (pu)	0,2 – 0,45
T'_{do} (s)	1,5 – 9,0
T'_{qo} (s)	-
T''_{do} (s)	0,01 – 0,05
T''_{qo} (s)	0,01 – 0,09

Utilizando os valores bases adotados na seção 6.6.1, foram calculadas as médias dos valores apresentados na tabela 6.8 e convertidos em p.u. A tabela 6.10 traz estes valores juntamente com os resultados da estimação de parâmetros via técnica de análise de sensibilidade de trajetória.

Tabela 6.10: Comparação entre os valores encontrados.

Parâmetro	Ensaio Convencionais	Técnica baseada em análise de sensibilidade de trajetória	Diferença (%)
X_d (pu)	0,89	0,94	-6,1
X'_d (pu)	0,22	0,20	9,1
X''_d (pu)	0,12	-	
$X_q = X'_q$ (pu)	0,62	0,69	-11,3
T'_{do} (s)	0,2389	0,2274	4,8
T''_{do} (s)	0,0151	-	

Analisando a tabela 6.10, pode-se verificar que a estimação de parâmetros via técnica de análise de sensibilidade de trajetória apresenta resultados satisfatórios, nota-se certa diferença entre alguns parâmetros, pois a técnica precisa ser melhorada em alguns pontos, como:

- Incluir fator de saturação adequado ao nível de tensão durante a perturbação;
- Estimar a constante E'_{do} , que influi diretamente nos resultados;
- Encontrar E_{FD_base} adequado para realizar as simulações.
- Adicionar restrições físicas, como as apresentadas nas equações (6.10) e (6.11);
- Refazer experimento com velocidade controlada e/ou adicionar ao programa relação de transformação;
- Adicionar filtros para reduzir ruídos nas medidas.

Capítulo 7

7. Conclusões

Este trabalho tratou da determinação de parâmetros elétricos padronizados de um gerador síncrono de polos salientes, através de técnicas convencionais de determinação experimental e uma técnica baseada em análise de sensibilidade de trajetória. Os testes convencionais realizados foram:

- Ensaio de curto-circuito e circuito aberto em regime permanente
- Ensaio de curto-circuito brusco
- Ensaio de abertura da corrente de curto-circuito
- Ensaio de escorregamento
- Ensaio da máxima corrente indutiva

Os testes convencionais apresentaram boa proximidade nos valores encontrados, desse modo pode-se ter razoável confiança nos valores determinados.

A metodologia de sensibilidade de trajetória foi utilizada como algoritmo de ajuste de parâmetros, onde o objetivo é promover a sincronização das saídas do sistema real e do sistema auxiliar (modelo). Em [1] foram propostas algumas modificações para contornar alguns problemas como:

- Baixa robustez em relação aos valores iniciais e ruídos nas medidas, utilizando acoplamento mestre-escravo e algoritmo de estimação em duas fases.
- Desacoplamento das variáveis elétricas e mecânicas.
- Novo modelo para as equações do gerador, eliminando a dependência dos parâmetros da rede e necessidade de medidas especiais. Colocando ângulo de referência nos terminais do gerador, escolhendo potência elétrica e reativa como saídas, e escolhendo como entradas valores mensuráveis a qualquer sistema, tais como: correntes e tensões de armadura, tensão e corrente de campo.

Levando em consideração que o algoritmo busca o valor de um determinado parâmetro que minimize a diferença entre as curvas do sistema real e do sistema modelado, e que no algoritmo não há um fator que considere a saturação de alguns parâmetros durante a perturbação, pode-se dizer que o erro de 15% para os valores das reatâncias síncronas não é um desmotivador para o uso da técnica na determinação de parâmetros e pode-se dizer também que erros maiores, ou a não convergência dos parâmetros, sejam devidas a estas imprecisões.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se realizar os mesmos ensaios para a realização da técnica de análise de sensibilidade de trajetória e realizar os seguintes refinamentos:

- Incluir fator de saturação adequado ao nível de tensão durante a perturbação;
- Estimar a constante E'_{do} , que influi diretamente nos resultados;
- Encontrar E_{FD_base} adequado para realizar as simulações;
- Adicionar restrições físicas, como as apresentadas nas equações (6.10) e (6.11);
- Refazer experimento com velocidade controlada e/ou adicionar ao algoritmo relação de transformação;
- Adicionar filtros para reduzir ruídos nas medidas;
- Considerar modelo mais detalhado (modelo subtransitório) do gerador;
- Utilizar uma taxa de amostragem menor do que a utilizada nos ensaios;
- Estimar parâmetros particionando o tempo de análise e verificar o comportamento das funções de sensibilidade durante cada intervalo de tempo adotado.

Referências bibliográficas

- [1] Cari, E. P. T., “Metodologia de estimação de parâmetros de sistemas dinâmicos não-lineares com aplicação em geradores síncronos”, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.
- [2] Park, R. H., “two-reaction theory of synchronous machines – generalized method of analysis, part I”. Transactions AIEE, 1929.
- [3] Ramos, R.A., Alberto, L. F. C., Bretas, N. G., “Modelagem de Máquinas Síncronas Aplicada ao Estudo de Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência”, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- [4] Anderson, P. M., Fouad, A. A., “Power System Control and Stability”, IEEE Press, New York, 1995.
- [5] Kundur, P. S., “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [6] Kimbark, E. W., “Power System Stability – Vol. 3”, IEEE Press, 1995.
- [7] IEEE (1995). Guide test procedures for synchronous machines, Technical report, Std 115-1995, Power Engineering Society.
- [8] Jordão, R. G., “Máquinas Síncronas”, LTC/EDUSP, 1980.
- [9] de Mello, F. P., “Measurement of synchronous machine rotor angle from analysis of zero sequence harmonic components of machine terminal voltage”, IEEE Transaction on Power Delivery, 1994.

