



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DOMINGOS ROBSON SILVA COSTA

**ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS TRANSITÓRIOS E SUBTRANSITÓRIOS DE  
GERADORES SÍNCRONOS UTILIZANDO OS ALGORITMO *SIMULATED  
ANNEALING* E *FAST SIMULATED ANNEALING* COMBINADOS COM MÍNIMOS  
QUADRADOS**

SALVADOR  
2018

DOMINGOS ROBSON SILVA COSTA

**ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS TRANSITÓRIOS E SUBTRANSITÓRIOS DE  
GERADORES SÍNCRONOS UTILIZANDO OS ALGORITMO *SIMULATED  
ANNEALING* E *FAST SIMULATED ANNEALING* COMBINADOS COM MÍNIMOS  
QUADRADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, área de concentração: Processamento da Energia e da Informação, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Universidade Federal da Bahia.

Orientador: Prof. Dr. Niraldo Roberto Ferreira

SALVADOR  
2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Silva Costa, Domingos Robson  
Estimação de Parâmetros Transitórios e Subtransitórios  
de Geradores Síncronos Utilizando os Algoritmos  
Simulated Annealing e Fast Simulated Annealing  
Combinados com Mínimos Quadrados / Domingos Robson  
Silva Costa. -- Salvador, 2018.  
74 f. : il

Orientador: Niraldo Roberto Ferreira.  
Dissertação (Mestrado - Mestrado - Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica) -- Universidade  
Federal da Bahia, Escola Politécnica da Universidade  
Federal da Bahia, 2018.

1. Máquina Síncrona. 2. Simulated Annealing. 3.  
Estimação de Parâmetros. 4. Curto-Circuito Trifásico  
Brusco. I. Ferreira, Niraldo Roberto. II. Título.

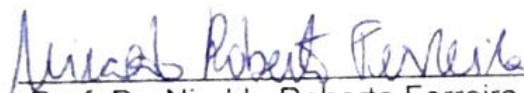
DOMINGOS ROBSON SILVA COSTA

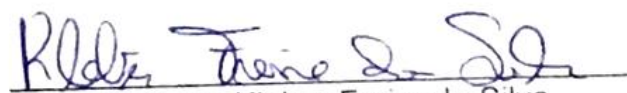
***Estimação de Parâmetros Transitórios e Subtransitórios de Geradores Síncronos Utilizando os Algoritmos Simulated Annealing e Fast Simulated Annealing Combinado Com Mínimos Quadrados.***

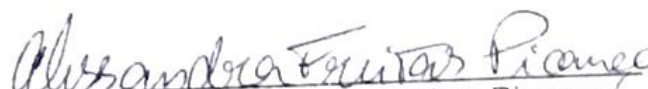
Dissertação apresentada à Universidade Federal da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de *Mestre*.

APROVADA em: 27 de Julho de 2018.

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof. Dr. Nivaldo Roberto Ferreira  
Orientador - UFBA

  
Prof. Dr. Kleber Freire da Silva  
UFBA

  
Prof. Dra. Alessandra Freitas Picanço  
IFBA

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por me impulsionar e me dar forças para realizar esse trabalho e por nunca me desamparar, mesmo nos momentos mais difíceis.

À orientação do professor Niraldo Roberto, ao empenho do colega Breno Avelar em me dar suporte tanto na conclusão dos créditos, como na implementação da pesquisa e por sua grande parceria na minha estadia em Salvador. Agradeço ao colega Igor Brasil por dedicar parte do seu tempo para tirar algumas dúvidas e aos amigos Renata e Államy Danilo por sempre estarem disponíveis me ajudando na elaboração dos artigos e dissertação.

À minha família, minha mãe Izafran, meu pai Francisco Armando, meus irmãos Taffarel e Yasmin, pelo apoio incondicional e por nunca me deixarem desanimar. Agradeço a colaboração de todos os professores e funcionários da PPGEE-UFBA, em especial à Ágatha pela disponibilidade e paciência de ajudar sempre que era solicitada.

*Não basta termos um bom espírito, o mais importante é aplicá-lo bem.*

*René Descartes*

## RESUMO

Neste estudo, propõe-se uma nova metodologia para a estimação dos parâmetros transitórios e subtransitórios de geradores síncronos de polos salientes, a partir de oscilogramas das correntes de armadura através do ensaio de curto-circuito trifásico brusco, aplicado nos terminais da máquina em vazio e com rotação nominal. Para isso utiliza-se o método *Simulated Annealing* e a variante *Fast Simulated Annealing*, que são meta-heurísticas para otimização não-linear, consistindo numa técnica de busca local probabilística, fundamentada numa analogia com a termodinâmica. A estimação dos referidos parâmetros também foi realizada utilizando o método gráfico descrito na norma IEEE-115, o Método de *Prony* e o método dos mínimos quadrados, para realizar uma análise comparativa com os resultados obtidos pelos métodos *Simulated Annealing*. As técnicas propostas foram aplicadas a sinais sintéticos construídos a partir da equação característica da corrente de armadura, obtida quando se realiza um ensaio de curto-circuito trifásico brusco, válido para modelar na região linear de operação. Os métodos clássicos citados requerem o pré-processamento de dividir o intervalo de tempo do registro de corrente de curto em três subintervalos, com dinâmicas claramente distintas: subtransitório, transitório e estacionário. O método *Simulated Annealing* revelou não requerer o referido pré-processamento, e ainda assim obteve bons resultados, que puderam ser refinados com o uso do método dos mínimos quadrados no final do processo.

**Palavras-chave:** máquina síncrona, *Simulated Annealing*, estimação de parâmetros, curto-circuito trifásico brusco.

## ABSTRACT

In this study, a new methodology is proposed for the estimation of transient and subtransient parameters of salient poles synchronous generators, by oscillograms of the armature currents through the sudden three phase short circuit test applied to the terminals of the machine in vacuo and with nominal rotation. For this, the Simulated Annealing method and the Fast Simulated Annealing variant are used, which are meta-heuristics for non-linear optimization, consisting of a probabilistic local search technique based on an analogy with thermodynamics. The estimation of these parameters was also performed using the graphic method described in the IEEE-115 standard, the Prony Method and the least squares method, to perform a comparative analysis with the results obtained by the Simulated Annealing methods. The proposed techniques were applied to synthetic signals constructed from the characteristic equation of the armature current, obtained when performing a sudden three phase short circuit test, valid for modeling in the linear region of operation. The classical methods cited require the preprocessing of dividing the time interval of the short current register into three subintervals, with distinct dynamics: subtransient, transient and stationary. The Simulated Annealing method did not require preprocessing, but still obtained good results, which could be refined using the least squares method at the end of the process.

**Keywords:** synchronous machines, Simulated Annealing, parameter estimation, sudden Three phase short-circuit.



## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>	<b>13</b>
1.1 Objetivos .....	16
1.2 Organização do trabalho.....	17
<b>Capítulo 2 - Modelagem da Máquina Síncrona .....</b>	<b>18</b>
2.1 Modelo da Máquina Síncrona de Polos Salientes .....	19
2.2 Ensaio de Curto-Circuito Brusco Aplicado à Máquina Síncrona.....	27
<b>Capítulo 3 - Métodos de Estimação de Parâmetros da Máquina Síncrona .....</b>	<b>35</b>
3.1 Método Gráfico .....	33
3.2 Método de <i>Prony</i> .....	38
3.3 Método dos Mínimos Quadrados .....	43
3.4 Simulated Annealing .....	<b>50</b>
3.4.1 Representação da solução .....	53
3.4.2 Estrutura de vizinhança .....	53
3.4.3 Função objetivo .....	54
3.5 <i>Fast Simulated Annealing</i> .....	55
<b>Capítulo 4 - Resultados e Discussões .....</b>	<b>57</b>
4.1 Parâmetros e Algoritmos Utilizados .....	57
4.2 Método Gráfico .....	58
4.3 Método de <i>Prony</i> .....	59
4.4 Método dos Mínimos Quadrados .....	60
4.5 <i>Simulated Annealing</i> Básico .....	61
4.6 <i>Simulated Annealing</i> Básico Combinado com Mínimos Quadrados .....	62
4.7 <i>Simulated Annealing</i> Clássico .....	63
4.8 <i>Simulated Annealing</i> Clássico Combinado com Mínimos Quadrados .....	64
4.9 <i>Fast Simulated Annealing</i> .....	64
4.10 <i>Fast Simulated Annealing</i> Combinado com Mínimos Quadrados .....	65
4.11 Acurácia dos Parâmetros .....	66
<b>Capítulo 5 - Conclusões .....</b>	<b>67</b>
<b>Propostas de Trabalhos Futuros .....</b>	<b>69</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>70</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1 – Representação do rotor .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2.2 – Máquina síncrona de polos salientes representada segundo os eixos direto e em quadratura com dois enrolamentos amortecedores .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 2.3 – Representação de um curto-circuito trifásico em uma máquina síncrona .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 2.4 – corrente de curto-circuito trifásico súbito na fase a.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 2.5– Representação do componente simétrico da corrente de curto-circuito trifásico súbito .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 2.6 – Representação do componente DC da corrente de curto-circuito trifásico súbito.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 2.7 – Representação do componente de segundo harmônico da corrente de curto-circuito trifásico súbito.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 3.1 – Envoltórias da corrente simétrica de curto-circuito trifásico .....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 3.2 – Representação do método gráfico .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 3.3 – Representação do Algoritmo de Estimação de <i>Prony</i> .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 3.4: Estratégia para fuga do mínimo local .....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 3.5: Fluxograma do Algoritmo SA .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 3.6: Fluxograma Simulated Annealing para estimação de parâmetros .....</b>	<b>57</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$r_a$  - Resistência do enrolamento de armadura (estator) [ $\Omega$ ]

$r_f$  - Resistência do enrolamento de campo (rotor) [ $\Omega$ ]

$r_{kd}$  - Resistência do enrolamento amortecedor do eixo direto [ $\Omega$ ]

$r_{kq}$  - Resistência do enrolamento amortecedor do eixo em quadratura [ $\Omega$ ]

$\psi$  - Fluxo [Wb]

$\psi_d$  - Fluxo magnético no eixo direto [Wb]

$\psi_q$  - Fluxo magnético no eixo em quadratura [Wb]

$\psi_f$  - Fluxo magnético no enrolamento de campo [Wb]

$\psi_{kd}$  - Fluxo magnético no enrolamento amortecedor do eixo direto [Wb]

$\psi_{kq}$  - Fluxo magnético no enrolamento amortecedor do eixo em quadratura [Wb]

$X_f$  - Reatância do enrolamento de campo [ $\Omega$ ]

$X_d$  - Reatância Síncrona do eixo direto [ $\Omega$ ]

$X_q$  - Reatância Síncrona do eixo em quadratura [ $\Omega$ ]

$X'_d$  - Reatância Transitória do eixo direto [ $\Omega$ ]

$X'_q$  - Reatância Transitória do eixo em quadratura [ $\Omega$ ]

$X''_d$  - Reatância Subtransitória do eixo direto [ $\Omega$ ]

$X''_q$  - Reatância Subtransitória do eixo em quadratura [ $\Omega$ ]

$X_{kd}$  - Reatância do enrolamento amortecedor do eixo direto [ $\Omega$ ]

$X_{kq}$  - Reatância do enrolamento amortecedor do eixo em quadratura [ $\Omega$ ]

$X_{md}$  - Reatância de magnetização do eixo direto [ $\Omega$ ]

$X_{mq}$  - Reatância de magnetização do eixo em quadratura [ $\Omega$ ]

$T'_{d0}$  - Constante de tempo transitória do eixo direto em circuito aberto [s]

$T''_{d0}$  - Constante de tempo subtransitória do eixo direto em circuito aberto [s]

$T'_{q0}$  - Constante de tempo transitória do eixo em quadratura em circuito aberto [s]

$T''_{q0}$  - Constante de tempo subtransitória do eixo em quadratura em circuito aberto [s]

$T'_d$  - Constante de tempo transitória do eixo direto em curto-circuito [s]

$T''_d$  - Constante de tempo subtransitória do eixo direto em curto-circuito [s]

$T'_q$  - Constante de tempo transitória do eixo em quadratura em curto-circuito [s]

$T''_q$  - Constante de tempo subtransitória do eixo em quadratura em curto-circuito [s]

$T_a$  - Constante de tempo de armadura em curto-circuito [s]

$u_f$  - Tensão de alimentação do enrolamento de campo [V]

$u_d$  - Tensão da armadura no eixo direto [V]

$u_q$  - Tensão da armadura no eixo em quadratura [V]

$\omega$  - Frequência angular da máquina [rad/s]

$s$  - Operador de Laplace

$i_a$  - Corrente na fase a [A]

$i_d$  - Corrente da armadura do eixo direto [A]

$i_q$  - Corrente da armadura do eixo em quadratura [A]

$i_f$  - Corrente de campo [A]

$i_{kd}$  - Corrente do enrolamento amortecedor do eixo direto [A]

$i_{kq}$  - Corrente do enrolamento amortecedor do eixo e quadratura [A]

$T$  - Matriz de Transformação de Park

$L_q$  - Indutância Síncrona do eixo em quadratura [H]

$L_d$  - Indutância Síncrona do eixo direto [H]

$L_{kq}$  - Indutância do enrolamento amortecedor do eixo quadratura [H]

$L_{kd}$  - Indutância do enrolamento amortecedor do eixo direto [H]

$L_{ii}$  - Indutância própria do enrolamento  $i$  [H]

$L_{ij}$  - Indutância mútua entre os enrolamentos  $i$  e  $j$  [H]

$L_S$  - Indutância do estator [H]

$L_m$  - Indutância de magnetização do estator [H]

$L_{md}$  - Indutância de magnetização do eixo direto [H]

$L_{mq}$  - Indutância de magnetização do eixo em quadratura [H]

$L_f$  - Indutância do enrolamento de campo [H]

$l_a$  - Indutância de dispersão da armadura [H]

$l_f$  - Indutância de dispersão do rotor [H]

$l_{kd}$  - Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor do eixo direto [H]

$l_{kq}$  - Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor do eixo em quadratura [H]

$y[n]$  - Sinal analisado no domínio do tempo discreto

$\hat{y}[n]$  - Sinal estimado obtido através de um modelo discreto

$p$  - Ordem do modelo

$N$  - Número de amostras do sinal

$\omega_i$  -  $i$ -ésima frequência angular do  $i$ -ésimo componente senoidal do sinal analisado [rad/s]

$f_i$  -  $i$ -ésima frequência do  $i$ -ésimo componente senoidal do sinal analisado [Hz]

$A_i$  - Amplitude do  $i$ -ésimo componente senoidal do sinal analisado

$h_i$  - Amplitude complexa do  $i$ -ésimo componente senoidal do sinal analisado

$\theta_i$  - Fase do  $i$ -ésimo componente senoidal do sinal analisado

$\alpha_i$  - Coeficiente de amortecimento do  $i$ -ésimo componente senoidal do sinal analisado

$z_i$  - Polos do modelo de Prony

$a_i$  - Coeficientes do polinômio de Prony

$\lambda$  - ângulo de incidência

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Analogia entre os processos .....	51
Tabela 3.2 - Relação entre os processos .....	53
Tabela 3.2 - Relação entre os processos .....	57
Tabela 4.2 - Resultados para o método gráfico .....	58
Tabela 4.3 - Resultados para o método de <i>Prony</i> .....	59
Tabela 4.4 - Resultados para o método dos mínimos quadrados .....	60
Tabela 4.5 - Resultados para o método dos mínimos quadrados com ruído aditivo .....	61
Tabela 4.6 - Resultados para o método de <i>Prony</i> com ruído aditivo .....	61
Tabela 4.7 - Resultados para o método <i>Simulated Annealing</i> básico .....	61
Tabela 4.8 - comparativo de desempenho dos métodos Gráfico e <i>Simulated Annealing</i> básico .....	62
Tabela 4.9 - Resultados para o método <i>Simulated Annealing</i> básico combinado com mínimos quadrados .....	62
Tabela 4.10 - Resultados para o método <i>Simulated Annealing</i> clássico .....	63
Tabela 4.11 - Resultados para o método <i>Simulated Annealing</i> clássico combinado combinado com mínimos quadrados .....	64
Tabela 4.12 - Resultados para o método <i>Fast simulated annealing</i> .....	64
Tabela 4.13 - Resultados para o método <i>Fast simulated annealing</i> combinado com mínimos quadrados .....	65

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

Para que o sistema elétrico de potência (SEP) funcione de forma estável e eficaz, é necessário que sejam realizadas inúmeras simulações envolvendo os mecanismos que compõem o sistema. Simulações que predizem o desempenho do SEP no estado estacionário por exemplo, são consideráveis nos estudos de estabilidade, diagnósticos de contingências e esquemas de proteção. Portanto é indispensável que os parâmetros de geradores síncronos sejam estimados com acurácia, a fim de que as representações dos modelos sejam as mais fiéis possíveis, garantindo que o sistema atue dentro dos padrões necessários (SANTANA, 2012).

O consumo de energia elétrica cresce anualmente devido ao crescimento econômico, ao progresso tecnológico e ao aumento populacional. Por isso o setor elétrico precisa ultrapassar os obstáculos progressivos relativos às formas de geração e utilização de energia diante de consumidores altamente dependentes e intolerantes a faltas no sistema. Portanto a remodelagem e atualização são indispensáveis para que haja aperfeiçoamento na conjuntura de funcionamento do SEP (COSTA, 2014). Diversos métodos já foram implementados para modelar e estimar os parâmetros das máquinas síncronas até hoje, pois o gerador síncrono é um dos componentes mais significativos do SEP, com larga faixa de desempenho dinâmico e que demanda modelos eficazes.

Os geradores síncronos são as principais fontes de energia no sistema elétrico de potência. Alimentam as cargas elétricas, fornecem reativos necessários à regulação das tensões das barras e se adéquam às condições operativas na presença de distúrbios. Diversas condições operativas do sistema elétrico podem ser investigadas através de computadores que simulam o comportamento do sistema via equações físico-matemáticas dos diversos componentes integrados. Assim comportamentos específicos podem ser previstos e medidas corretivas antecipadas. Para isto os geradores, por exemplo, devem ter seus parâmetros característicos determinados com boa precisão.

Assim que são construídas as máquinas síncronas, os fabricantes utilizam softwares através de alguns parâmetros, como por exemplo as reatâncias e as constantes de tempo

estimadas graficamente com o intuito de analisar estruturalmente os detalhes das máquinas (MOUNI *et al.*, 2008).

Por apresentarem boa regulação de frequência e tensão, além de rendimento elevado, os geradores síncronos são amplamente utilizados nos sistemas de geração de energia elétrica. Em casos que demandem baixas velocidades, são empregados geradores síncronos de polos salientes. Eles têm rotor com o diâmetro de valor elevado devido a possibilidade de alojar uma grande quantidade de polos (BOLDEA, 2006).

Quando se opera em velocidades mais elevadas, o diâmetro do rotor é menor e a máquina possui polos lisos, como no caso dos turbogeradores utilizados em usinas termoelétricas (KYRIAKIDES *et al.*, 2002).

A modelagem dos geradores síncronos ocorre pela construção de circuitos equivalentes associados aos eixos direto e em quadratura. A estimativa dos parâmetros das máquinas está incluso nesse processo de modelagem. Os ensaios de curto circuito são um dos métodos mais empregados nesta estimação de parâmetros, dentre outros métodos normatizados que viabilizam a obtenção prática destes (AL-HAMADI e EL-NAGGAR, 2010).

Na modelagem das máquinas síncronas, estas simplificações podem ser feitas ignorando problemas advindos de fenômenos físicos como a saturação (aplicar tensão entre 10 a 40% de tensão normal no ensaio), e a distribuição irregular do fluxo nas extremidades do circuito magnético. Isto é, devido à geometria complexa que faz com que os parâmetros obtidos não tenham níveis confiáveis de aceitação (SANTANA, 2014).

Outros fatores colaboram para níveis baixos de precisão na obtenção dos parâmetros das máquinas, como por exemplo, perda dos dados originais da máquina pelas concessionárias de serviços de geração elétrica, ou variação de seus valores normais devido ao envelhecimento do equipamento, ou ainda rebobinamento por queima dos equipamentos (LLERENA e RUPPERT FILHO, 2010).

Os dados dos parâmetros advêm das características dependentes do desempenho dos geradores. Estas características podem admitir diferentes aspectos, por exemplo, dados de medições oriundos de testes realizados no equipamento e dados analíticos provenientes de estudos de simulação dos fenômenos eletromagnéticos que ocorrem no interior da máquina (FARD *et al.*, 2005).

A norma IEEE 115 (2009) emprega o ensaio de curto-circuito trifásico brusco aplicado aos terminais da máquina. A norma explica como estimar diversos parâmetros através da



corrente de curto-circuito utilizando métodos gráficos. Em Soliman e Al-Kandari (1996) foi sugerida a aplicação do método de mínimos quadrados utilizando três intervalos de tempo, relativos aos regimes subtransitório, transitório e permanente. Inicialmente são encontradas as reatâncias e constantes de tempo do eixo direto, em seguida, a partir dos resultados determinados, a componente fundamental da corrente de curto-circuito pode ser encontrada. A componente fundamental é então subtraída da corrente de curto brusco. O resultado encontrado é intitulado de componente DC da corrente de curto-circuito. Através da componente DC observada, é empregada a técnica dos mínimos quadrados para a determinação da constante de tempo de armadura e a reatância subtransitória do eixo em quadratura.

O método de *Prony* conta com boa aplicabilidade quando o assunto é estimação de frequências (NAIDU, 2005). Este método também apresenta bom desempenho na análise de harmônicos e inter-harmônicos em relação ao *Fast Fourier Transform* (FFT), (COSTA *et al.*, 2005). No método de *Prony* são utilizadas amostras de sinais senoidais ou exponenciais de dados de séries temporais por intermédio da solução de equações lineares (OSBORNE; SMYTH, 1995). Entretanto o método de *Prony* é conhecido por não apresentar resultados satisfatórios na presença de ruídos.

Mouni *et al.* (2008) sugeriram também empregar a técnica dos mínimos quadrados aos dados de ensaio de curto-circuito trifásico brusco, fundamentado na norma tradicional IEEE 115. Em Xingang *et al.* (2004) foi sugerido a aplicação do algoritmo de *Prony* para a estimação dos parâmetros subtransitórios da máquina síncrona. No processo de estimação dos parâmetros transitórios e subtransitórios da máquina, é aplicada a Transforma *Wavelet* para dividir o sinal de corrente de curto-circuito com o intuito de obter as componentes DC e fundamental. Através da componente DC, é usada a técnica de mínimos quadrados, capaz de encontrar a constante de tempo de armadura e a soma dos inversos das reatâncias subtransitória do eixo direto e em quadratura. Utilizando o envelope da componente fundamental da corrente encontra-se a reatância transitória do eixo direto e a constante de tempo transitória do eixo direto. O último passo é utilizar a técnica de *Prony* à componente fundamental, estimando os parâmetros subtransitórios, a reatância subtransitória do eixo direto e a constante de tempo subtransitória do eixo direto. A reatância subtransitória do eixo em quadratura é encontrada de forma indireta através das soluções encontradas pelas técnicas de mínimos quadrados e o método de *Prony*.

Em Santana (2012) é sugerida a aplicação do método de *Prony* para a estimação de todos os parâmetros transitórios e subtransitórios de um gerador síncrono através de ensaios de curto-circuito trifásico brusco. Os dados são processados com o método de *Prony* e com o método tradicionalmente aplicado na estimação dos parâmetros, que é o método gráfico da norma IEEE-115, onde em seguida faz-se um estudo comparativo das soluções encontradas.

Outro teste utilizado, pelo qual se faz possível estimar os parâmetros da máquina síncrona, é o ensaio de recuperação de tensão que também é realizado no domínio do tempo. Pode ser realizado juntamente com o teste de curto-circuito trifásico súbito, no entanto, vem sendo pouco utilizado por empresas e pesquisadores. O ensaio é realizado da seguinte forma: estando a máquina inicialmente em curto-circuito, aplica-se um degrau nas correntes de armadura com a finalidade de provocar um transitório na máquina, o que possibilita a estimação dos parâmetros da máquina. Este processo para estimação, se baseia na análise da recuperação da tensão da armadura, por isso esse teste recebe esse nome (BERNARDES JÚNIOR, 2015).

Algumas metodologias estimam os parâmetros das máquinas utilizando medições coletadas com o gerador interligado ao sistema. Os testes de rejeição de carga são usados para a estimação de parâmetros de eixo direto e em quadratura, no entanto, essa técnica demanda que o gerador atue em condições especiais e seja desligado do sistema durante o ensaio para a obtenção das medidas (CARI *et al.*, 2012).

O *Simulated Annealing* já foi utilizado em outras aplicações, como por exemplo na reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica (ANDRADE, 2018). Neste trabalho, contudo, é sugerida a utilização do algoritmo *Simulated Annealing* para a determinação de todos os parâmetros transitórios e subtransitórios de um gerador síncrono que podem ser adquiridos por meio de dados de ensaios de curto-circuito trifásico brusco. Os dados foram processados com o *Simulated Annealing*, com o método gráfico da norma IEEE-115, com algoritmo de Prony e com o método dos mínimos quadrados. Por fim, fez-se uma análise comparativa dos resultados obtidos.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo fornecer um método alternativo e eficaz para a determinação dos parâmetros transitórios e subtransitórios de geradores síncronos utilizando o

algoritmo *Simulated Annealing*, que é uma meta-heurística para otimização que consiste numa técnica de busca local probabilística, fundamentada numa analogia com a termodinâmica.

No método proposto, todos os parâmetros transitórios e subtransitórios são estimados, e representa uma contribuição inovadora aos procedimentos de estimação de parâmetros de máquinas síncronas, pois não foram encontradas aplicações do *Simulated Annealing* para a prática de estimação de parâmetros de máquinas síncronas. Os resultados obtidos são comparados aos obtidos através da aplicação do método gráfico da norma IEEE-115, do método de *Prony* e do método de mínimos quadrados.

Neste trabalho, são usadas três tipos de distribuição de probabilidade, sendo elas as distribuições uniforme e de *Gauss* para o *Simulated Annealing* básico e de *Cauchy* para o *Fast Simulated Annealing*.

## 1.2 Organização do Trabalho

O capítulo 1 apresentou uma breve introdução ao problema da identificação de parâmetros transitórios e subtransitórios em máquinas síncronas.

No capítulo 2 são explanadas as equações da modelagem dinâmica da máquina síncrona e o ensaio de curto circuito trifásico brusco.

No capítulo 3 são determinados e caracterizados os métodos de estimação de parâmetros da Máquina Síncrona que foram usados. O método gráfico da norma IEEE-115, o método de *Prony*, o método dos mínimos quadrados, *Simulated Annealing* e o *Fast Simulated Annealing*.

No capítulo 4 são apresentados os estudos realizados, testes e resultados das simulações. Os métodos serão comparados a partir das análises dos resultados obtidos.

No capítulo 5 são desenvolvidas as conclusões a respeito da metodologia proposta e da sua implementação computacional e são apresentadas também sugestões para pesquisas futuras.

# Capítulo 2

## MODELAGEM DA MÁQUINA SÍNCRONA

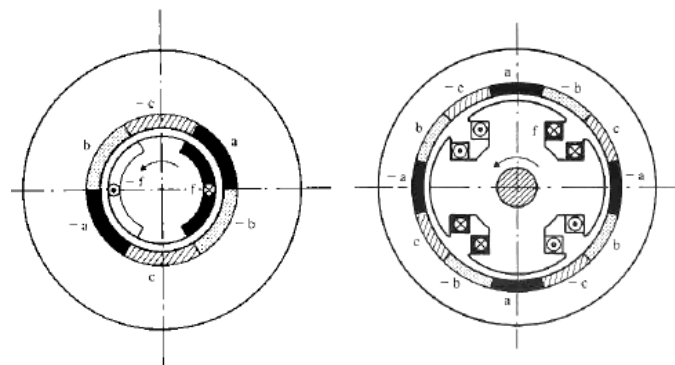
As máquinas síncronas são componentes significativos do sistema elétrico, recebem esse nome porque têm seu campo criado no rotor alinhado e em mesma velocidade que o campo girante concebido em sua armadura. Apresentam uma parte fixa intitulada de estator ou armadura e uma parte girante cercada pela armadura, chamada de rotor. O estator é formado essencialmente por um núcleo ferromagnético e por enrolamentos. Os enrolamentos, na grande maioria dos casos são de cobre, contendo três fases denominadas de a,b e c, tendo seus eixos magnéticos defasados de 120 graus. O núcleo ferromagnético do estator é constituído pelo empilhamento de lâminas de pequena relutância, para fugir de correntes parasitas. Os enrolamentos do estator encontram-se alojados no interior do núcleo ferromagnético.

Quando a máquina síncrona funciona como gerador, o rotor é conectado a uma máquina primária que supre energia mecânica no eixo. A frequência da tensão induzida nos enrolamentos do estator é diretamente proporcional à velocidade angular do eixo, bem como ao número de pares de polos magnéticos do rotor. Ainda que seja alimentado por corrente contínua e não padecerem devido às correntes parasitas, o núcleo do rotor em condições normais deve ser laminado (BERNARDES JUNIOR, 2015). Em condições anormais, por exemplo com cargas desbalanceadas e com a presença de harmônicos, essa laminação diminui o efeito das correntes parasitas induzidas no rotor.

As máquinas síncronas podem ser de dois tipos, polos lisos e polos salientes. A máquina de polos lisos têm um rotor cilíndrico com pouquíssimos polos e quase nenhuma saliência, portanto o entreferro mantém-se praticamente constante. A máquina de polos salientes por sua vez contém muitos polos, conseqüentemente saliência visível e entreferro variável.

Na Figura 2.1 tem-se a ilustração de um rotor de polos lisos e outro de polos salientes. Neste trabalho, a estimação de parâmetros é voltada para as máquinas síncronas de polos salientes, já que são largamente utilizadas nas usinas hidrelétricas brasileiras.

Figura 2.1 – Representação do rotor: (a) rotor de polos lisos; (b) rotor de polos salientes



(a) Rotor de polos lisos (b) Rotor de polos salientes

Fonte: (FERNANDES, 2006).

## 2.1 Modelo da Máquina Síncrona de Polos Salientes

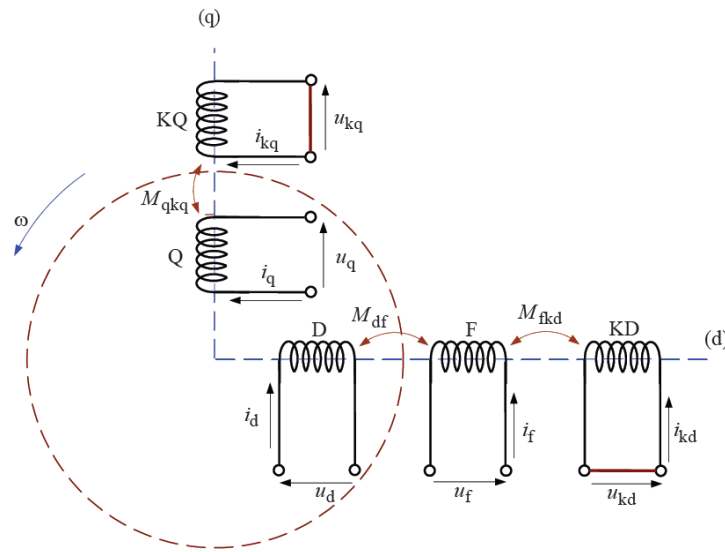
Os geradores que possuem 4 ou mais polos são de polos salientes e realizam suas atividades com velocidade menor do que 1800 rpm e são geralmente usados em usinas hidrelétricas. O gerador síncrono trifásico de polos salientes, produz tensões trifásicas, senoidais balanceadas defasadas de 120 graus elétricos uma da outra por conta de sua composição, constituídos de três enrolamentos divididos trifasicamente no estator, portanto têm seus eixos magnéticos defasados de 120 graus entre si. Esses enrolamentos conduzem correntes elétricas alternadas senoidais de frequência igual a do sistema elétrico em que estejam interligados, dessa forma, verifica-se a produção de um campo magnético girante em toda a extensão do entreferro (FAJONI, 2010).

O gerador síncrono apresenta três enrolamentos no rotor. O enrolamento de campo é o mais importante, pois sua função é gerar um campo magnético com corrente contínua. Devido o movimento de rotação do rotor, gera-se uma alteração do fluxo magnético nas bobinas da armadura, criando dessa forma, Forças eletromotrizes (fem) nesses enrolamentos. Os outros dois enrolamentos são conhecidos como enrolamentos amortecedores, suas funções são neutralizar oscilações eletromecânicas no eixo do gerador síncrono.

Nos geradores síncronos de polos salientes, esses enrolamentos de amortecimento são barras de cobre curto-circuitadas estabelecidas em ranhuras realizadas nas faces dos polos montando uma gaiola similar às dos rotores da máquina de indução. É comum a utilização de

circuitos elétricos equivalentes a parâmetros concentrados para a caracterização de máquinas síncronas, sendo a teoria de park uma das referências mais populares. As grandezas trifásicas do estator são convertidas a um sistema ortogonal de eixo direto (d) e quadratura (q). Um gerador com dois enrolamentos amortecedores, um em cada eixo, pode ser representado pela figura 2.2, onde D e Q são os enrolamentos da armadura, F é o enrolamento de campo, KD é enrolamento amortecedor do eixo direto e KQ é o enrolamento amortecedor do eixo em quadratura (SANTANA, 2012).

Figura 2.2 – Máquina síncrona de polos salientes representada segundo os eixos direto e em quadratura com dois enrolamentos amortecedores.



Fonte: (FERNANDES, 2006).

Mota (2006), define as equações das tensões induzidas nos enrolamentos da armadura para cada fase nos geradores síncronos de polos salientes, como segue:

$$\begin{aligned}
 u_a &= -r_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\
 u_b &= -r_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\
 u_c &= -r_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Já para o rotor, as tensões induzidas são definidas pela equação 2.2, como segue:

$$\begin{aligned}
u_f &= r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\
0 &= r_{kd} i_{kd} + \frac{d\psi_{kd}}{dt} \\
0 &= r_{kq} i_{kq} + \frac{d\psi_{kq}}{dt}
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Dessa forma,  $r_j$  é a resistência do enrolamento correspondente ao índice  $j$ ,  $\psi_j$  é o fluxo concatenado no enrolamento correspondente ao índice  $j$ ,  $i_j$  é a corrente no enrolamento correspondente ao índice  $j$ ,  $u_j$  é a tensão no enrolamento  $j$  e  $r_a = r_b = r_c = r$ , pois a resistência dos enrolamentos de cada fase são iguais.

A *Transformação de Park* é usada para representar tensões, correntes e fluxos relativos aos eixos direto e em quadratura, conforme a equação 2.3.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \bar{T} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_o \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

Na equação 2.3,  $\bar{T}$  é a matriz de *Transformação de Park*, que é determinada como:

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Na qual equação 2.4,  $\theta$  representa o ângulo entre o eixo  $d$  e a fase  $a$ . Inversamente, tem-se:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_o \end{bmatrix} = \bar{T}^{-1} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

Com,

$$\bar{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Portanto, as tensões segundo os eixos  $d$  e  $q$ , resultam em:

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} - r i_d - \omega \psi_q \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} - r i_q - \omega \psi_d \end{cases} \tag{2.7}$$

Para cada enrolamento, os fluxos concatenados são definidos como:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{aa} & -L_{ab} & -L_{ac} \\ -L_{ba} & -L_{bb} & -L_{bc} \\ -L_{ca} & -L_{cb} & -L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{af} & L_{akd} & L_{akq} \\ L_{bf} & L_{bkd} & L_{bkq} \\ L_{cf} & L_{ckd} & L_{ckq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_f \\ \psi_{kd} \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} \\ L_{kda} & L_{kdb} & L_{kdc} \\ L_{kqa} & L_{kqb} & L_{kqc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fkd} & L_{fkq} \\ L_{kdf} & L_{kdkd} & L_{kdkq} \\ L_{kqf} & L_{kqkd} & L_{kqkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

As indutâncias próprias são determinadas pela equação 2.10:

$$\begin{cases} L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta \\ L_{bb} = L_s + L_m \cos 2(\theta - 120^\circ) \\ L_{cc} = L_s + L_m \cos 2(\theta + 120^\circ) \end{cases} \quad (2.10)$$

Em que,  $L_s$  é a indutância do estator e  $L_m$  é a indutância de magnetização do estator.

Emprega-se a *Transformação de Park* nas equações (2.8) e (2.9), o que resulta em:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_o \end{bmatrix} = \bar{T}^{-1} \begin{bmatrix} -L_{aa} & -L_{ab} & -L_{ac} \\ -L_{ba} & -L_{bb} & -L_{bc} \\ -L_{ca} & -L_{cb} & -L_{cc} \end{bmatrix} \bar{T} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \bar{T}^{-1} \begin{bmatrix} L_{af} & L_{akd} & L_{akq} \\ L_{bf} & L_{bkd} & L_{bkq} \\ L_{cf} & L_{ckd} & L_{ckq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_f \\ \psi_{kd} \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} \\ L_{kda} & L_{kdb} & L_{kdc} \\ L_{kqa} & L_{kqb} & L_{kqc} \end{bmatrix} \bar{T} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fkd} & L_{fkq} \\ L_{kdf} & L_{kdkd} & L_{kdkq} \\ L_{kqf} & L_{kqkd} & L_{kqkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Julgando que, para correntes balanceadas na armadura da máquina, tem-se  $i_o = 0$ , e depois de alguma operações, as equações de fluxo do modelo dinâmico da máquina são representadas como:

$$\begin{cases} \psi_d = -L_d i_d + L_{md} i_f + L_{md} i_{kd} \\ \psi_q = -L_q i_q + L_{mq} i_{kq} \\ \psi_f = -L_{md} i_d + L_f i_f + L_{md} i_{kd} \\ \psi_{kd} = -L_{md} i_d + L_{md} i_f + L_{kd} i_{kd} \\ \psi_{kq} = -L_{mq} i_q + L_{kq} i_{kq} \end{cases} \quad (2.13)$$

Onde, o  $L_d$  é a indutância síncrona do enrolamento do eixo direto,  $L_q$  é a indutância síncrona do enrolamento do eixo em quadratura,  $L_{md}$  é a indutância de magnetização do eixo direto,  $L_{mq}$  é a indutância de magnetização do eixo em quadratura,  $L_{kd}$  a indutância do enrolamento amortecedor do eixo direto e  $L_{kq}$  é a indutância do enrolamento amortecedor do eixo em quadratura.



Portanto, os parâmetros decorrentes dos eixos  $d$  e  $q$  são determinados pela equação seguinte (FERNANDES, 2006):

$$\begin{cases} L_d = L_{md} + l_a \\ L_f = L_{md} + l_f \\ L_{kd} = L_{md} + l_{kd} \\ L_q = L_{mq} + l_a \\ L_{kq} = L_{mq} + l_{kq} \end{cases} \quad (2.14)$$

Onde, o  $l_a$  é a indutância de dispersão da armadura,  $l_f$  é a indutância de enrolamento de campo,  $l_{kd}$  é a indutância de dispersão do enrolamento amortecedor do eixo direto e,  $l_{kq}$  é a indutância de dispersão do enrolamento amortecedor do eixo em quadratura.

Através das equações do modelo da máquina síncrona, empregando-se a *Transformada de Laplace*, resulta o seguinte sistema de equações:

• Para o eixo direto:

$$\begin{cases} U_f(s) = [r_f + (L_{md} + l_f)s]I_f(s) + L_{md}sI_{kd}(s) - L_{md}sI_d(s) \\ U_{kd}(s) = 0 = L_{md}sI_f(s) + [r_{kd} + (L_{md} + l_{kd})s]I_{kd}(s) + L_{md}sI_d(s) \\ \psi_d(s) = L_{md}I_f(s) + L_{md} + l_{kd}(s) - (L_{md} + l_a)I_d(s) \end{cases} \quad (2.15)$$

Em forma de matriz:

$$\begin{bmatrix} U_f(s) \\ 0 \\ \psi_d(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f + (L_{md} + l_f) & L_{md}s & -L_{md}s \\ L_{md}s & r_{kd} + (L_{md} + l_{kd})s & -L_{md}s \\ L_{md} & L_{md} & -(L_{md} + l_a) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_f(s) \\ I_{kd}(s) \\ I_d(s) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

A partir da regra de *Cramer*, é possível obter a expressão de  $I_d(s)$  por meio da razão entre os determinantes  $Det(Num1)$  e  $Det(Den1)$  :

$$I_d(s) = \frac{\begin{vmatrix} r_f + (L_{md} + l_f) & L_{md}s & U_f(s) \\ L_{md}s & r_{kd} + (L_{md} + l_{kd})s & 0 \\ L_{md} & L_{md} & \psi_d(s) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} r_f + (L_{md} + l_f)s & L_{md}s & -L_{md}s \\ L_{md}s & r_{kd} + (L_{md} + l_{kd})s & -L_{md}s \\ L_{md} & L_{md} & -(L_{md} + l_a) \end{vmatrix}} = \frac{Det(Num1)}{Det(Den1)} \quad (2.17)$$

Calculando o determinante do numerador, seguido de algumas operações, tem-se:

$$\begin{aligned} Det(Num1) = r_f r_{kd} \left[ 1 + \left( \frac{L_{md} + l_f}{r_f} + \frac{L_{md} + l_{kd}}{r_{kd}} \right) s + \left( \frac{L_{md} l_{kd} + L_{md} l_f + l_f l_{kd}}{r_f r_{kd}} \right) s^2 \right] \psi_d(s) - \\ L_{md} r_{kd} \left( 1 + \frac{L_{kd} s}{r_{kd}} \right) U_f(s) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Dessa forma, para simplificar a forma do determinante do numerador da equação 2.18,

determina-se as constantes de tempo fundamentais a seguir:

(a) Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto:

$$T_1 = T'_{d0} = \frac{L_{md} + l_f}{r_f} = \frac{1}{\omega r_f} (X_{md} + X_f) \quad (2.19)$$

Onde o  $X_{md}$  é a reatância de magnetização do eixo direto,  $X_f$  é a reatância do enrolamento de campo  $\omega$  é a frequência angular da máquina.

(b) Constante de tempo transitória de eixo em quadratura de circuito aberto:

$$T_2 = T'_{d0} = \frac{L_{md} + l_{kd}}{r_{kd}} = \frac{1}{\omega r_{kd}} (X_{md} + X_{kd}) \quad (2.20)$$

Onde o  $X_{kd}$  a reatância de dispersão do enrolamento amortecedor do eixo direto.

(c) Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto:

$$T_3 = T''_{d0} = \frac{1}{r_{kd}} \left( l_{kd} + \frac{L_{md} l_f}{L_{md} + l_f} \right) = \frac{1}{\omega r_{kd}} \left( X_{kd} + \frac{X_{md} X_f}{X_{md} + X_f} \right) \quad (2.21)$$

(d) Constante de tempo do enrolamento amortecedor do eixo direto em circuito aberto:

$$T_{kd} = \frac{l_{kd}}{r_{kd}} = \frac{X_{kd}}{\omega r_{kd}} \quad (2.22)$$

As constantes de tempo são substituídas na equação (2.18) e resulta na equação (2.23)

$$A = r_f r_{kd} [1 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_3 s^2] \psi_d(s) - L_{md} r_{kd} (1 + T_{kd} s) U_f(s) \quad (2.23)$$

para o cálculo do determinante do denominador,  $Det(Den1)$  de (1.27), seguido de algumas operações matemáticas resulta em :

$$B = r_f r_{kd} L_d \left[ 1 + \left( \frac{1}{r_f} \frac{L_{md} l_f + L_{md} l_a + l_f l_a}{L_{md} + l_a} + \frac{1}{r_{kd}} \frac{L_{md} l_{kd} + L_{md} l_a + l_{kd} l_a}{L_{md} + l_a} \right) s \right] + r_f r_{kd} L_d \left[ \frac{L_{md} l_f + L_{md} l_a + l_f l_a}{r_f (L_{md} + l_a)} \frac{L_{md} l_f l_a + L_{md} l_f l_{kd} + l_f l_a l_{kd}}{r_{kd} (L_{md} l_f + L_{md} l_a + l_f l_a)} \right] s^2 \quad (2.24)$$

A fim de simplificar a forma do determinante do denominador na equação (2.24), determina-se também as seguintes constantes de tempo fundamentais:

(a) Constante de tempo transitória de eixo direto em curto-circuito.

$$T_4 = T'_d = \frac{1}{r_f} \left( \frac{1}{r_f} \frac{L_{md} l_f + L_{md} l_a + l_f l_a}{L_{md} + l_a} \right) = \frac{1}{r_f} \frac{L_{md} l_a}{L_{md} + l_a} = \frac{1}{\omega r_f} \left( X_f + \frac{X_{md} X_a}{X_{md} + X_a} \right) \quad (2.25)$$

Onde  $X_a$  é a reatância de armadura.

(b) Constante de tempo do enrolamento amortecedor do eixo direto, em curto-circuito:

$$T_5 = \frac{1}{r_{kd}} \frac{L_{md}l_{kd} + L_{md}l_a + l_{kd}l_a}{L_{md} + l_a} = \frac{1}{r_{kd}} \left( l_{kd} \frac{L_{md}l_a}{L_{md} + l_a} \right) = \frac{1}{\omega r_{kd}} \left( X_{kd} + \frac{X_{md}X_a}{X_{md} + X_a} \right) \quad (2.26)$$

(c) Constante de tempo subtransitória de eixo direto em curto-circuito:

$$T_6 = T''_d = \frac{1}{\omega r_{kd}} \left( X_{kd} + \frac{X_{md}X_fX_a}{X_{md}X_f + X_{md}X_a + X_fX_a} \right) \quad (2.27)$$

Dessa forma, a equação (2.24) pode ser reescrita como segue:

$$B = r_f r_{kd} L_d [1 + (T_4 + T_5)s + T_4 T_6 s^2] \quad (2.28)$$

Assim, ao substituir as equações (2.23) e (2.28) na equação (2.17), obtém-se:

$$I_d(s) = \frac{Det(Num1)}{Det(Den1)} = \frac{r_f r_{kd} [1 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_3 s^2] \psi_d(s) - L_{md} L_{kd} (1 + T_{kd}s) U_f(s)}{r_f r_{kd} r_f L_d [1 + (T_4 + T_5)s + T_4 T_6 s^2]} \quad (2.29)$$

Dessa forma, a partir da equação (2.29), encontra-se  $\Psi_d(s)$ :

$$\Psi_d(s) = \left[ \frac{1 + (T_4 + T_5)s + T_4 T_6 s^2}{1 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_3 s^2} \right] L_d I_d(s) + \left[ \frac{1 + T_{kd}s}{1 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_3 s^2} \right] \frac{L_{md} U_f(s)}{r_f} \quad (2.30)$$

Já que  $X = \omega L$  é possível que a equação (2.30) possa ser reescrita na forma seguinte:

$$\Psi_d(s) = \frac{1}{\omega} X_d(s) I_d(s) + \frac{1}{\omega} G(s) U_f(s) \quad (2.31)$$

Onde:

$$X_d(s) = \frac{1 + (T_4 + T_5)s + T_4 T_6 s^2}{1 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_3 s^2} X_d \quad (2.32)$$

$$G(s) = \frac{1 + T_{kd}s}{1 + (T_1 + T_2)s + T_1 T_3 s^2} \frac{X_{md}}{r_f} \quad (2.33)$$

Sendo  $X_d$  a reatância síncrona de eixo direto.

Para o eixo em quadratura, utilizando a transformada de Laplace, encontra-se:

$$\begin{cases} U_{kq}(s) = 0 = [r_{kq} + (L_{mq} + l_{kq})s] I_{kq}(s) - L_{md} s I_q(s) \\ \psi_q(s) = L_{mq} I_{kq}(s) - (L_{mq} + l_a) I_q(s) \end{cases} \quad (2.34)$$

Do sistema de equações (2.34), adquire-se  $I_q(s)$ , aplicando-se a regra de *Cramer* por meio da razão entre os determinantes  $Det(Num2)$  e  $Det(Den2)$ :

$$I_q(s) = \frac{\begin{vmatrix} r_{kd} + (L_{kq} + l_{mq})s & 0 \\ L_{mq} & \psi_q(s) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} r_{kd} + (L_{kq} + l_{mq})s & -L_{mq}s \\ L_{mq} & -(L_{mq} + l_a) \end{vmatrix}} = \frac{Det(Num2)}{Det(Den2)} \quad (2.35)$$

Ao calcular o determinante do numerador,  $Det(Num2)$ , encontra-se:

$$Det(Num2) = [r_{kq} + (L_{mq} + l_{kq})s] \Psi_q(s) \quad (2.36)$$

já o determinante do denominador,  $Det(Den2)$ , é dado por:

$$Det(Den2) = -r_{kq}(L_{mq} + l_a) - (L_{mq}l_a + L_{mq}l_{kq} + l_{kq}l_a)s \quad (2.37)$$

Assim, a corrente do eixo em quadratura:

$$I_q(s) = \frac{Det(Num1)}{Det(Den1)} = - \frac{[r_{kq} + (L_{mq} + l_{kq})s] \psi_q(s)}{r_{kq} + (L_{mq} + l_{kq}) + (L_{mq}l_a + L_{mq}l_{kq} + l_{kq}l_a)s} \quad (2.38)$$

A partir de algumas operações matemáticas, consegue-se a equação (2.39):

$$\psi_q(s) = L_q \frac{1 + \frac{1}{r_{kq}}(l_{kq} + \frac{L_{mq}l_a}{L_{mq} + l_a})}{1 + \frac{1}{r_{kq}}(l_{kq} + L_{mq})s} \quad (2.39)$$

Depois determina-se as constantes de tempo.

Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura, em curto-circuito:

$$T''_q = \frac{1}{r_{kq}} \left( l_{kq} + \frac{L_{mq}l_a}{L_{mq} + l_a} \right) = \frac{1}{\omega r_{kq}} \left( X_{kq} + \frac{X_{mq} X_a}{X_{mq} + X_a} \right) \quad (2.40)$$

Onde o  $X_{mq}$  é a reatância de magnetização do eixo em quadratura e  $X_{kq}$  é a reatância de dispersão do enrolamento amortecedor do eixo em quadratura.

Constante subtransitória de eixo em quadratura de circuito aberto:

$$T''_{q0} = \frac{1}{r_{kq}} (l_{kq} + L_{mq}) = \frac{1}{\omega r_{kq}} (X_{kq} + X_{mq}) \quad (2.41)$$

Ao Substituir (2.40) e (2.41) em (2.39), encontra-se:

$$\psi_q(s) = \frac{1 + T''_q}{1 + T''_{q0}} L_q I_q(s) \quad (2.42)$$

A partir de onde se obtém:

$$\psi_q(s) = \frac{1}{\omega} X_q(s) I_q(s) \quad (2.43)$$

No qual:

$$X_q(s) = \frac{1 + T''_q s}{1 + T''_{q0} s} X_q \quad (2.44)$$

Onde o  $X_q$  é a reatância síncrona do eixo em quadratura. Aqui foram definidas as equações que retratam o comportamento da máquina síncrona de polos salientes, suas reatâncias e constantes de tempo transitórias e subtransitórias.

## 2.2 Ensaio de Curto-Circuito Brusco Aplicado à Máquina Síncrona

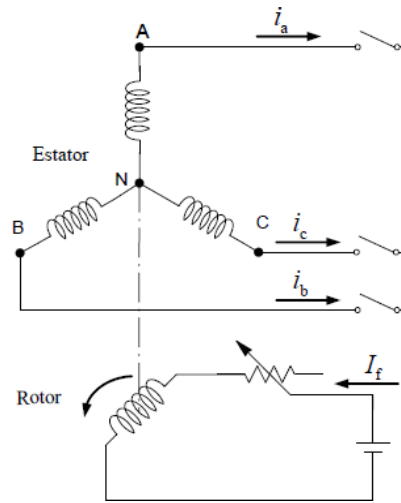
A máquina é posta em velocidade nominal e sem carga até que o sistema alcance o regime permanente. Durante o regime permanente, um curto-circuito é aplicado em suas três fases e, logo após, as correntes e a tensão são registradas. Este teste permite determinar os parâmetros da máquina síncrona e validar ou não o modelo alcançado (MOUNI et al, 2008). Os ensaios de curto-circuito brusco geralmente são empregados quando se deseja confirmar que o projeto mecânico da máquina é apropriado para suportar os esforços advindos de curtos-circuitos e de condições de operações irregulares. Diversos parâmetros da máquina síncrona sofrem modificações com a saturação magnética, daí as condições de teste são então articuladas pelo problema para o qual se deseja os valores dos parâmetros. Geralmente estes valores ou condizem à corrente nominal de armadura, ou à tensão nominal de armadura em vazio, exatamente antes do curto-circuito (SANTANA, 2012).

Devido ao curto circuito trifásico, as correntes de armadura de curto circuito trifásico resultante manterão o fluxo magnético de entreferro nos valores que eles tinham no momento do curto circuito. Também imediatamente após o curto circuito trifásico brusco o gerador deverá ainda estar girando na velocidade síncrona. Durante o ensaio de curto trifásico brusco as correntes elétricas de armadura e de campo devem ser alcançadas utilizando-se um sistema de obtenção e tratamento de dados. Por meio desse sistema é possível obter valores instantâneos das correntes, conceber gráficos e tratá-los (FAJONI, 2010).

O ensaio de curto circuito trifásico brusco, como usualmente efetuado, apresenta como desvantagem primordial o fato do gerador síncrono ser sujeito a grandes esforços mecânicos por causa das altas correntes do ensaio. Ademais, o procedimento de determinação de parâmetros por meio do teste de curto circuito não concedem informação sobre os parâmetros de eixo em quadratura (LLERENA, 2011).

No decorrer da eventualidade do curto-circuito trifásico simétrico em um gerador síncrono, em vazio, a corrente de armadura é constituída pelas seguintes componentes: componente AC, componente DC e o componente de segundo harmônico. Para determinar as correntes geradas por um curto-circuito trifásico brusco, é preciso usar algumas reatâncias de valores distintos, para simbolizar os valores da corrente de curto-circuito no instante inicial, conhecido como regime subtransitório, alguns ciclos depois da aplicação do curto, conhecido como regime transitório, e ainda o estado estacionário da corrente de curto-circuito.

Figura 2.3 – Representação de um curto-circuito trifásico em uma máquina síncrona



Fonte: (FERNANDES, 2006).

As reatâncias de regime subtransitório são definidas como segue:

$$X''_d = X_a + \frac{X_{md} X_{kd} X_f}{X_{kd} X_f + X_{md} X_f + X_{md} X_{kd}} \quad (2.45)$$

$$X''_q = X_a + \frac{1}{\frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X_{kq}}} X_a + \frac{X_{mq} X_{kq}}{X_{mq} + X_{kq}} \quad (2.46)$$

A taxa de amortecimento da corrente no regime transitório é mais lenta e é conferida às variações das correntes dos enrolamentos de campo do rotor. As reatâncias transitórias do eixo direto e do eixo em quadratura podem ser definidas como:

$$X'_d = X_a + \frac{X_{md} X_f}{X_{md} + X_f} \quad (2.47)$$

$$X'_q = X_a + X_{mq} \quad (2.48)$$

No estado estacionário, o fluxo não varia nem pelo enrolamento de campo, nem pelo enrolamento amortecedor, dessa forma, as reatâncias são determinadas como segue:

$$X_d = X_a + X_{md} \quad (2.49)$$

$$X_q = X_a + X_{mq} = X'_q \quad (2.50)$$

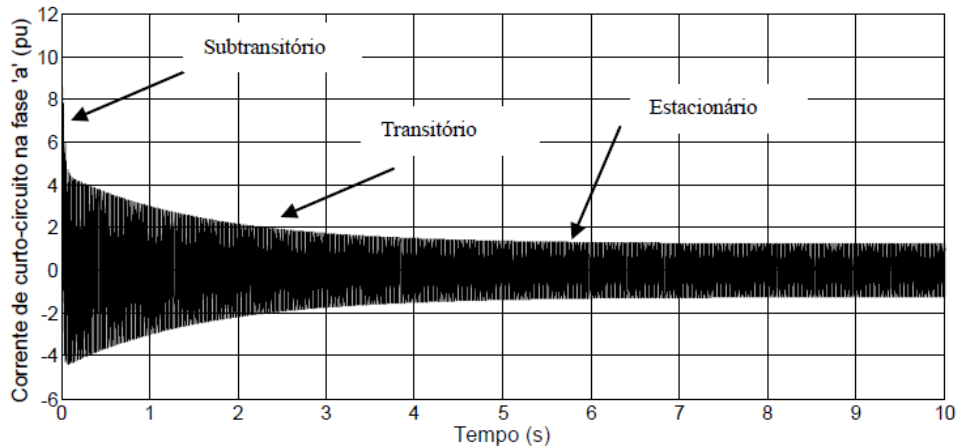
As constantes de tempo de circuito aberto e de curto-circuito possuem as relações a seguir (IEEE, 2009) :

$$\frac{T'_{do}}{T'_d} = \frac{X_d}{X'_d} \quad (2.51)$$

$$\frac{T''_{do}}{T''_d} = \frac{X'_d}{X''_d} \quad (2.52)$$

A resposta característica da corrente de curto-circuito trifásico brusco para cada fase é representada na Figura 2.4, na qual são indicados os períodos subtransitório, transitório e estado estacionário (SANTANA, 2012).

Figura 2.4 – corrente de curto-circuito trifásico súbito na fase ‘a’.



A constante de tempo de armadura orienta um amortecimento na componente DC e pode ser definida como se segue (ALTINO, 1984):

$$T_a = \frac{X''_h}{\omega \cdot r_a} \quad (2.53)$$

$X''_h$  é média harmônicas entre as reatâncias subtransitórias de eixo direto e quadratura e pode ser determinado como segue:

$$\frac{1}{X''_h} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right) \quad (2.54)$$

Na Figura 2.5, observar-se a representação da componente DC da corrente de curto-circuito (SANTANA,2012).

Figura 2.5– Representação da componente simétrica da corrente de curto-circuito trifásico súbito.

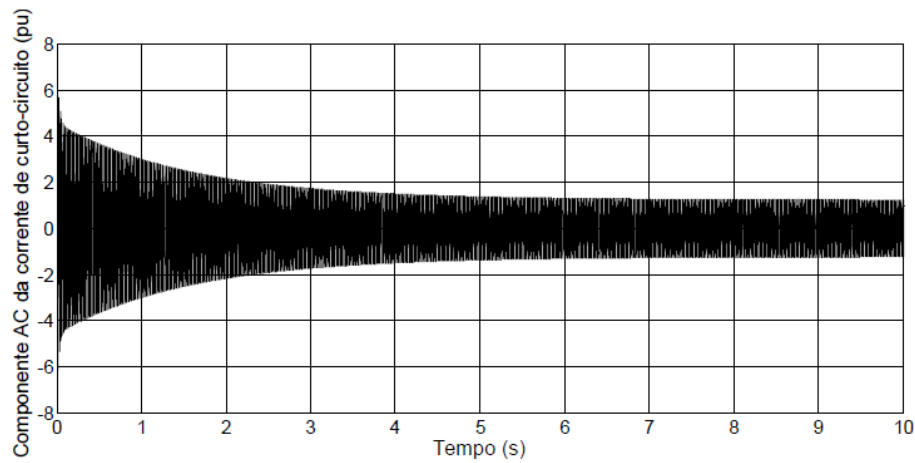
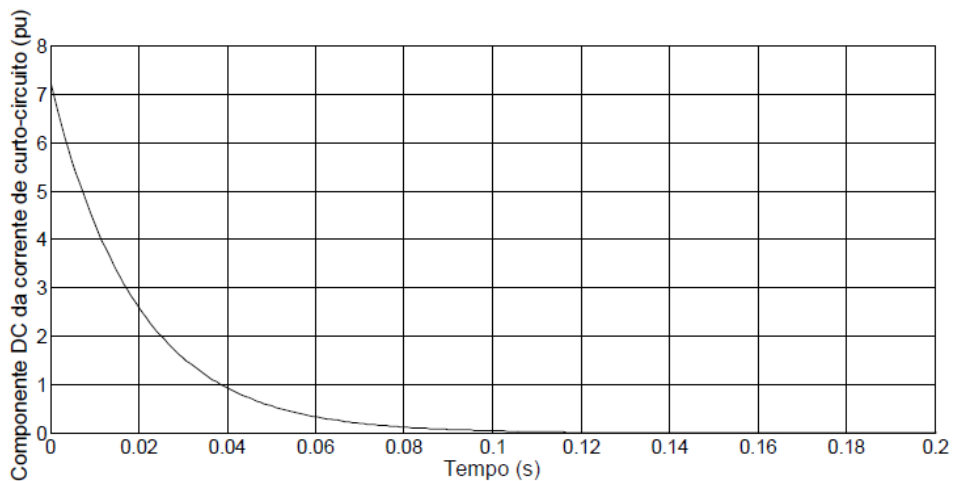


Figura 2.6 – Representação do componente DC da corrente de curto-circuito trifásico súbito.

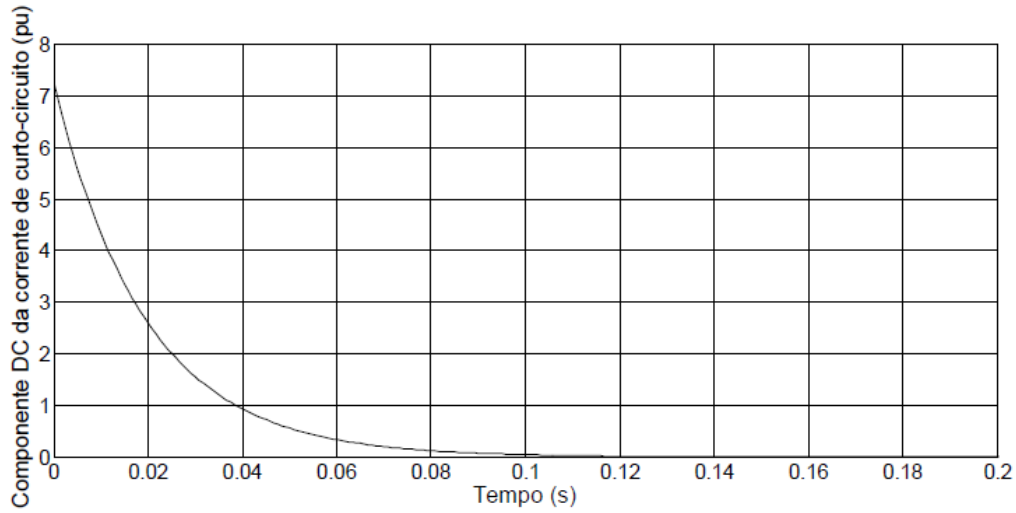


O aparecimento da componente DC na corrente de armadura cria um componente alternado de frequência fundamental no campo da máquina, que apresenta a mesma constante de tempo de decaimento da componente DC da armadura. A corrente alternada induzida no campo produz um campo de excitação monofásico, que pode ser separado em dois componentes, que giram com velocidade síncrona, com sentidos opostos, um componente direto que gira com frequência que é duas vezes maior que a fundamental, e um componente inverso, estacionário em relação ao estator (ALTINO, 1984).

O componente de segundo harmônico que surge na armadura pode ser representado pela forma de onda apresentada na Figura 2.7 (SANTANA, 2012).



Figura 2.7 – Representação do componente de segundo harmônico da corrente de curto-circuito trifásico súbito.



Depois de ocorrer um curto-circuito trifásico brusco, a corrente em cada fase pode ser descrita conforme a equação a seguir (XINGANG et al, 2004):

$$i_a = \frac{\sqrt{2}.E_0}{2} \left( \frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\lambda) + \frac{\sqrt{2}.E_0}{2} \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(2\omega_0 t + \lambda) - \sqrt{2}E_0 \left[ \frac{1}{X_d} + \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) \quad (2.55)$$

Onde  $i_a$  representa o valor instantâneo da corrente de armadura no instante “t” na fase a,  $E_0$  refere-se ao valor eficaz da tensão de circuito aberto antes da aplicação do curto-circuito,  $\omega_0$  é a frequência angular em rad/s,  $\lambda$  refere-se ao ângulo de incidência que depende do ponto do ciclo em que foi aplicado o curto,  $X_d, X'_d, X''_d$ , pertencem as reatâncias de eixo direto nos regimes estacionário, transitório, subtransitório, respectivamente,  $X''_q$  é a reatância subtransitória no eixo em quadratura,  $T_a, T'_d, T''_d$ , são as constantes de tempo de armadura, transitória e subtransitória de curto-circuito, respectivamente.

Para conseguir as correntes também nas outras fases, basta modificar o ângulo  $\lambda$  para  $(\lambda - 2\pi/3)$  e  $(\lambda + 2\pi/3)$ , representando a fase ‘b’ e a fase ‘c’, respectivamente.

Neste capítulo foi exposto a ocorrência de um curto-circuito trifásico brusco em um gerador síncrono, os componentes presentes na corrente, a equação que retrata a atuação da corrente de armadura depois da ocorrência do curto-circuito trifásico brusco, e as equações

das reatâncias da máquina no decorrer do curto-circuito. Por meio da estimação das reatâncias e constantes de tempo da máquina, pode ser conhecida a sua performance diante de uma falta e as consequências delas advindas.

# Capítulo 3

## MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA

As metodologias para estimação de parâmetros de geradores síncronos seguem vários critérios de especificações, como por exemplo: permanente ou transitório no que diz respeito ao regime de operação dos testes; on-line ou off-line, no que diz respeito aos procedimentos dos testes; domínio do tempo ou domínio da frequência, em relação ao domínio no qual os testes são efetuados; linear e não-linear, relativo às técnicas empregadas para estimação.

Na norma IEEE-115, o método de estimação é feito no domínio do tempo, usando oscilogramas da corrente de curto-circuito alcançadas por ensaios de curto-circuito brusco aplicado aos terminais da máquina operando em vazio. Em 2009 a norma foi revisada, sendo inserido um capítulo relativo ao ensaio de resposta em frequência com rotor travado, efetuado no domínio da frequência (IEEE-115, 2009).

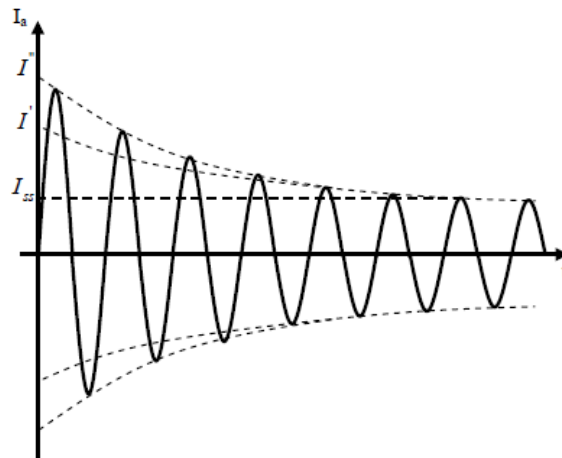
Os métodos utilizados para a estimação dos parâmetros da máquina síncrona, a partir dos ensaios de curto circuito trifásico brusco, serão descritos neste capítulo.

### 3.1 Método Gráfico

A metodologia básica para estimar os parâmetros de uma máquina síncrona por meio do ensaio de curto-circuito brusco é bastante difundida e compreende a técnica de envelope gráfico (IEEE 115, 2009).

Na figura 3.1 é possível identificar a corrente subtransitória inicial ( $I''$ ), a corrente transitória inicial ( $I'$ ) e a corrente de regime permanente  $I_{SS}$ .

Figura 3.1 – Envoltórias da corrente simétrica de curto-circuito trifásico



Fonte: (SANTANA, 2012)

A equação da envoltória da corrente simétrica pode ser definida como (IEEE 115, 2009):

$$I_{env} = \sqrt{2}E \left[ \frac{1}{X_d} + \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, o primeiro termo é constante, correspondente ao regime permanente, seguido do termo transitório com queda exponencial e por fim o termo subtransitório, com decaimento maior que o segundo termo.

Para estimar os parâmetros da máquina síncrona conforme a norma IEEE-115 (2009), deve-se obter a envoltória da curva do traço simétrico do defeito, ou envelope, através do qual é possível determinar as reatâncias e constantes de tempo.

A determinação da reatância transitória do eixo direto, é realizada através da relação entre a tensão de circuito aberto e o valor da corrente da armadura, que pode ser encontrada por meio da extrapolação do envelope do componente AC da onda de corrente da armadura no instante de aplicação do curto-circuito, ignorando a rápida variação dos primeiros ciclos, relativo ao estado subtransitório (SANTANA, 2012).

A reatância subtransitória do eixo direto é encontrada por meio das mesmas formas de onda de corrente aplicadas para encontrar a reatância transitória. Para cada fase, os valores dos parâmetros transitórios podem ser encontrados através do método gráfico, o

procedimento, é detalhado como segue (IEEE 115, 2009):

1. Adquirir o envelope da corrente de curto-circuito trifásico brusco. O primeiro passo é a detecção de picos, posteriormente, determina-se  $Env_{sup}$  (envelope superior) e  $Env_{inf}$  (envelope inferior) por meio de interpolação.
2. Encontrar a corrente de estado, isso é possível através da extração da média dos valores relativos aos últimos picos do sinal. Por meio da corrente de regime permanente, obter a reatância síncrona de eixo direto:

$$X_d = \frac{E}{I_{ss}} \text{ (permanente)} \quad (3.2)$$

3. Definir o componente DC por meio dos envelopes superior e inferior:

$$I_{dc} = \frac{(Env_{sup} + Env_{inf})}{2\sqrt{2} I_n} \quad (3.3)$$

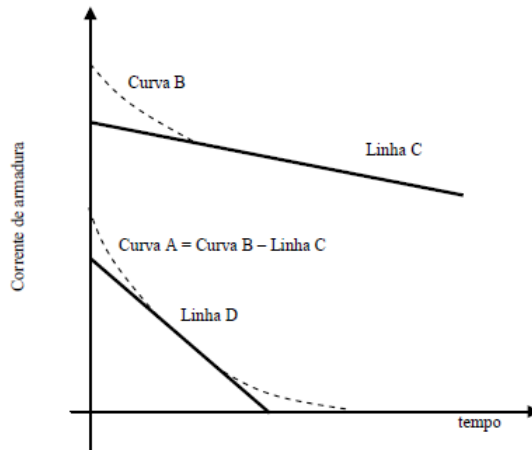
Em que  $I_n$  é a corrente de base da máquina. Se o sinal tiver sido filtrado ir para a quinta etapa.

4. Subtrair a corrente DC do sinal.
5. Retirar o termo relativo ao regime permanente, dessa forma, os componentes da corrente de curto-circuito restantes serão o regime subtransitório e o regime transitório:

$$I_{env} - I_{ss} = \sqrt{2}E \left[ \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \quad (3.4)$$

6. A partir da equação 3.4, esboçar a corrente obtida em função do tempo em escala semi-logarítmica. A porção de rápido decaimento da curva é a parcela subtransitória, já a linha reta corresponde a parte transitória. A curva criada corresponderá à curva B, conforme indicado pela figura 3.2:

Figura 3.2 – Representação do método gráfico.



7. Ignorar os primeiros ciclos, relativos à porção subtransitória, dessa forma, a diferença entre  $I_{env} - I_{ss}$ , será correspondente à parcela transitória:

$$I_{env} - I_{ss} \approx \sqrt{2}E \left[ \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \right] \quad (3.5)$$

8. Esboçar a linha reta que mais se ajuste à porção transitória, extrapolando até o instante de tempo  $t = 0$ . A reta resultante corresponderá à linha C. A reta obtida aproxima-se da curva obtida em escala semi-logarítmica, da qual são obtidos os coeficientes  $A$  e  $B$ .  $A$  é o coeficiente angular e  $B$  o coeficiente linear, quando a corrente estiver no instante de tempo  $t = 0$ .

$$\ln(I_{env} - I_{ss}) \approx A.t + B \quad (3.6)$$

9. Se for utilizado o método gráfico computacional, os parâmetros transitórios podem, então, ser obtidos por:

$$T'_d = -\frac{1}{A} \quad (3.7)$$

$$\ln\left(\sqrt{2}E \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right)\right) = B \quad (3.8)$$

10. A partir da extrapolação da linha C para o instante de aplicação do curto-circuito, é possível obter o componente transitório inicial,  $B$ , e somando-se este ao componente de estado estacionário é determinado o componente transitório inicial da corrente de curto-circuito. A reatância transitória é então obtida pela relação entre a tensão de circuito aberto e o valor da corrente de armadura.

$$X'_d = \frac{E}{I'} \text{ (transitório)} \quad (3.9)$$

11. Subtrair os valores entre a curva B e a linha C, para traçar a curva A. A curva A é relativa à corrente subtransitória, determinada por:

$$I_{env} - I_{ss} - I_{trans} \approx \sqrt{2}E \left[ \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \quad (3.10)$$

12. Esboçar a linha reta que mais se ajuste a curva A, extrapolando até o instante inicial. A reta obtida corresponderá à linha D. A reta obtida aproxima-se da curva obtida em escala semi-logarítmica. Na equação (3.11) A' é o coeficiente angular e B' é o coeficiente linear para t = 0.

$$\ln(I_{env} - I_{ss} - I_{trans}) \approx A't + B' \quad (3.11)$$

13. Utilizado o método gráfico computacional, os parâmetros subtransitórios serão determinados por:

$$T''_d = -\frac{1}{A'} \quad (3.12)$$

$$\ln\left(\sqrt{2}E \left[ \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right]\right) = B' \quad (3.13)$$

14. Por meio da extrapolação da linha D para o instante de tempo t = 0, obtém-se o componente subtransitório inicial e somando-se este ao componente transitório da corrente de armadura, é determinado o componente inicial AC da corrente de curto-circuito. A reatância subtransitória é obtida pela relação entre a tensão de circuito aberto e o valor da corrente.

$$X''_d = \frac{E}{I''} \text{ (subtransitório)} \quad (3.14)$$

15. Utilizando o método gráfico manual para se obter a constante de tempo transitória do eixo direto, deve-se encontrar o tempo em que a corrente de curto-circuito atinge o valor relativo ao tempo útil afim de que o componente transitório da corrente de curto circuito (linha C) atinja o valor de 0,368 vezes o seu valor inicial.

16. Utilizado o método gráfico manual para se obter a constante de tempo subtransitória do eixo direto, deve-se determinar o tempo em que a corrente de curto-circuito alcança o valor relativo ao tempo, afim de que o componente subtransitório da corrente de curto-circuito alcance o valor de 0,368 vezes o seu valor inicial.

17. Esboçar o gráfico do componente DC e obter a constante de tempo de armadura

relativa ao tempo necessário para que a corrente DC atinja o valor de 0,368 vezes o seu valor inicial.

### 3.2 Método de Prony

O método de *Prony* foi criado pelo matemático francês Gaspard Riche de Prony no ano de 1795. Ele consiste em um modelo de estimação de parâmetros que tem condições de ajustar uma soma de senóides exponencialmente amortecidas a um conjunto de N amostras de um sinal (Costa, 2005).

De acordo com Chen et al. (1987), o método pode ser detalhado em três partes:

Primeira parte: identificar os coeficientes de um modelo de predição linear que modela as amostras.

Segunda parte: Identificar as raízes do polinômio característico incorporadas à equação de predição linear.

Terceira parte: Estimação das amplitudes e fase inicial de cada termo exponencial.

Assim, o método de *Prony* considera o modelo a seguir:

$$\hat{y}[n] = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} \quad (3.15)$$

Em que  $h_k$  e  $z_k$  são definidos como:

$$h_k = A_k e^{j\theta_k} \quad (3.16)$$

$$z_k = e^{[(\alpha_k + j2\pi f_k)\Delta T]} \quad (3.17)$$

Onde  $p$  é a ordem do modelo,  $z_k$  os polos,  $h_k$  a amplitude complexa,  $A_k$  a amplitude da senóide,  $\theta_k$  a fase inicial da senóide de frequência  $f_k$ ,  $\alpha_k$  o amortecimento da senóide e  $\Delta T$  o intervalo de amostragem.

Em cada exponencial amortecida há duas incógnitas,  $h_i$  e  $z_i$ . Assim no método original de *Prony* há  $2p$  parâmetros a determinar e são usadas  $2p$  amostras de sinal, produzindo um sistema perfeitamente determinado.

Porém, normalmente utiliza-se um número de amostras  $N \gg 2p$ , resultando em um sistema sobredeterminado, com muito mais equações que incógnitas.

Uma senóide pode ser vista como uma combinação linear de duas exponenciais complexas conjugadas e a equação (3.15) pode ser revista como:



$$\hat{y}[n] = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1} + \sum_{k=1}^p h_k^* (z_k^{n-1})^* \quad (3.18)$$

Onde (\*) significa complexo conjugado e a equação acima pode ser escrita na forma matricial :

$$\begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 \dots & z_p^0 & z_1^0 & z_2^0 & \dots & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 \dots & z_p^1 & z_1^{-1} & z_2^{-1} & \dots & z_p^{-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{n-1} & z_1^{n-2} \dots & z_p^{n-1} & z_1^{-n+1} & z_2^{-n+1} & \dots & z_p^{-n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_p^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y[1] \\ \vdots \\ y[N] \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Reescrevendo (3.19), tem-se:

$$zh = y \quad (3.20)$$

Portanto, a contribuição de Prony é definir um polinômio  $\phi(z)$ , cujas raízes sejam os parâmetros  $z_1, \dots, z_p$ .

$$\phi(z) = \sum_{m=0}^p a_m z^{p-m} \quad (3.21)$$

Onde  $a_i$  são os coeficientes do polinômio e as raízes são os valores  $z_i$ . Comumente é estabelecido que  $a_0$  faça-se unitário. Se  $z_i$  é raiz,  $1/z_i$  também será, indicando que os coeficientes carecem ser simétricos em relação a  $a_p$  (COSTA, 2005).

Dessa forma, determina-se um polinômio, referido por:

$$z^{2p} + a_1 z^{2p-1} + \dots + a_{p-1} z^{p+1} + a_p z^p + a_{p-1} z^{p-1} + \dots + a_1 z + 1 = 0 \quad (3.22)$$

Da equação (3.22) define-se o vetor a:

$$a = [1 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{p-1} \ a_p \ a_{p-1} \ \dots \ a_1 \ 1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \quad (3.23)$$

Multiplicando-se (3.20) por (3.23) tem-se o seguinte sistema de equações:

$$aZh = ay = 0 \quad (3.24)$$

Com base em (3.24), chega-se no seguinte sistema de equações:

$$y[n] + a_1 y[n+1] + a_2 y[n+2] + \dots + a_p y[n+p] + a_{p-1} y[n+2p+1] + \dots + a_2 y[n+2p-2] + a_1 y[n+2p-1] + y[n+2p] = 0 \quad (3.25)$$

$$n=1, 2, \dots, N-2p$$

Visto que o sistema é sobredeterminado, um algoritmo de mínimos quadrados é utilizado para a estimação dos coeficientes do polinômio. As raízes deste polinômio são aplicadas na estimação dos coeficientes de amortecimento  $\alpha_i$  e das frequências  $f_i$  do sinal, nas seguintes equações:

$$\alpha_i = \frac{\ln|z_i|}{\Delta T} \quad (3.26)$$

$$f_i = \frac{\tan^{-1}\left[\frac{\Im(z_i)}{\Re(z_i)}\right]}{2\pi\Delta T} \quad (3.27)$$

Identificando os pólos  $z_i$ , é possível calcular os valores de  $h_i$  através do sistema de equações descrito em (5). E por fim, a partir dos valores de  $h_i$  é factível definir os valores das amplitudes  $A_i$  e das fases iniciais  $\theta_i$ :

$$A_i = |h_i| \quad (3.28)$$

$$\theta_i = \tan^{-1}\left[\frac{\Im(h_i)}{\Re(h_i)}\right] \quad (3.29)$$

Devido a equação clássica de curto-circuito conter diversas variáveis, a convergência para todos os parâmetros sobre o período inteiro do sinal da corrente de curto-circuito não é de fácil manipulação. Dessa forma, aplica-se o método de Prony a três intervalos correspondentes aos estados subtransitório, transitório e de regime permanente.

Como critério de escolha da ordem do método de Prony, considera-se o número de senóides de interesse em cada regime, onde cada seno precisa ter dois polos complexos conjugados. Dessa forma, na análise da ordem do método, a corrente de curto-circuito é vista como uma superposição de sinais.

O período subtransitório é relativo aos primeiros ciclos do sinal e contém porções da componente DC, segundo harmônico, componente subtransitório e transitório. A ordem do modelo é 7 devido às três cossenóides e um sinal exponencialmente amortecido, onde as três frequências do sinal estão presentes. A relação entre os parâmetros do gerador e o método de *Prony* pode ser feita identificando as frequências e amplitudes associadas estimadas por *Prony*. As frequências presentes no regime subtransitório são 120Hz, 60 Hz e 0 Hz relativo ao componente DC (SANTANA, 2012).

No período subtransitório, a relação entre os parâmetros da máquina e os parâmetros

de *Prony* acontecem conforme as equações seguintes:

$$T_{a=} = 1/\alpha_3 \quad (3.30)$$

$$T''_d = 1/\alpha_4 \quad (3.31)$$

$$x''_d = \frac{2}{\left(\frac{2A_1}{\sqrt{2}E} + \frac{\sqrt{2}A_3}{E}\right)} \quad (3.32)$$

$$x''_q = \frac{1}{\left(\frac{\sqrt{2}A_3}{E} - \frac{1}{X''_d}\right)} \quad (3.33)$$

$$x'_d = \frac{1}{\left(\frac{A_4}{\sqrt{2}E} - \frac{1}{X''_d}\right)} \quad (3.34)$$

No período transitório, as porções correspondentes ao período subtransitório, componente DC e segundo harmônico já foram extintas devido suas constantes de tempo serem rápidas, restando tão somente a porção relativa à componente fundamental. Portanto, no período transitório considera-se a porção equivalente ao regime permanente, um cosseno, e a porção relativa ao transitório, uma cossenóide. Dessa forma a ordem do modelo é 4.

A constante de tempo transitória pode ser determinada por:

$$T'_d = \frac{1}{\alpha_1} \quad (3.35)$$

Para o período permanente, considera-se somente a presença do componente do período permanente, já que os regimes subtransitório e transitório já foram eliminados. Como o componente de regime permanente é um cosseno amortecido, a ordem do modelo é 2. O único parâmetro a ser obtido é a reatância síncrona de eixo direto, determinada como segue:

$$x_d = \frac{1}{\frac{A_1}{\sqrt{2}E}} \quad (3.36)$$

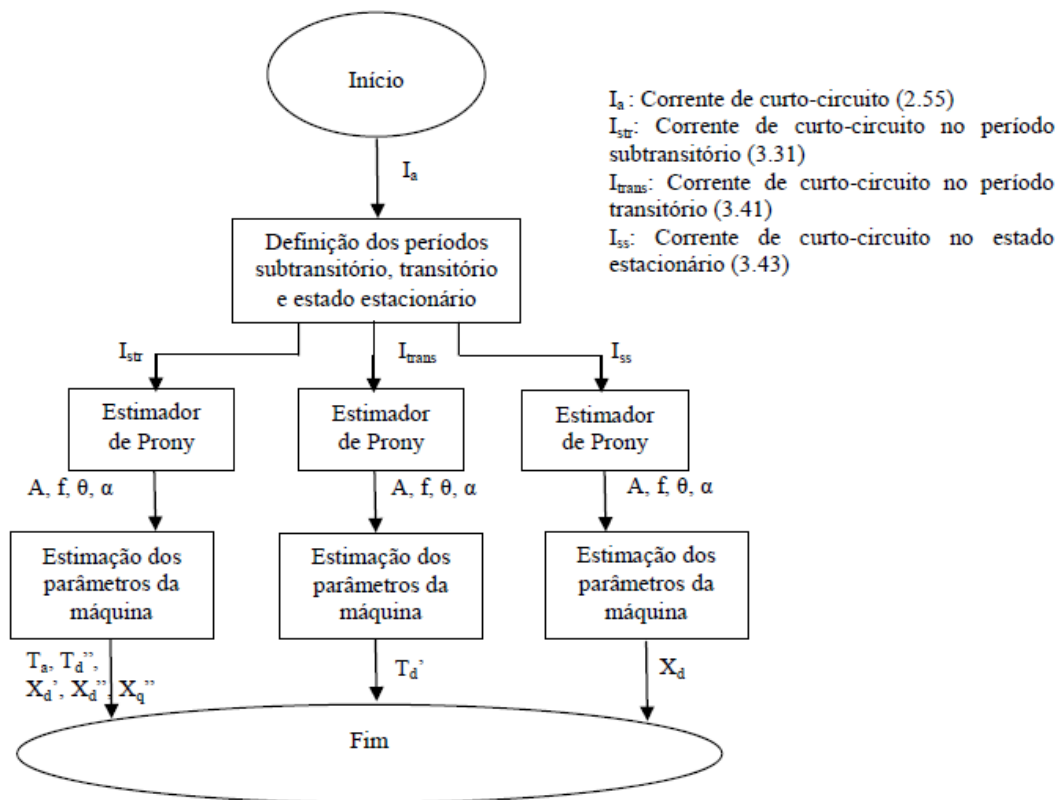
As etapas para a estimação dos parâmetros do gerador síncrono podem ser feitas como segue (SANTANA, 2012):

1. Admitir intervalos de tempo relativos aos regimes subtransitório, transitório e de estado estacionário.
2. Usar para o regime subtransitório a ordem do modelo igual a 7, para o regime transitório, a ordem do modelo igual a 4 e para o estado estacionário, a ordem igual a 2.
3. Para cada regime do sinal, usar o algoritmo de *prony*, onde, inicialmente é solucionado o sistema descrito em (3.25).

4. Calcular as raízes do polinômio e aplicar por meio dos valores das raízes, as frequências inclusas no sinal, a partir de (3.27).
5. Obter as amplitudes complexas agregadas a cada frequência por meio do método de mínimos quadrados.
6. Obter as amplitudes e fases iniciais agregadas a cada frequência por meio de (3.28) e (3.29).
7. Determinar os parâmetros do gerador síncrono por meio dos parâmetros de Prony, usando as equações descritas nesta seção.

O algoritmo de Prony é representado na figura a seguir:

Figura 3.3 – Representação do Algoritmo de Estimação de Prony



Fonte: (SANTANA, 2012).

### 3.3 Método dos Mínimos Quadrados

Fornece uma estimativa ótima dos parâmetros do gerador síncrono a partir de amostras digitalizadas da corrente de curto-circuito súbito. Da mesma forma que acontece no método de Prony, a técnica proposta divide a corrente de armadura em três componentes, relativas aos regimes subtransitório, transitório e estacionário. Também são analisados os efeitos críticos do algoritmo neste trabalho (Al-Kandari et al, 2015).

A equação da corrente de armadura durante curto-circuito súbito é não-linear e pode ser escrita como:

$$i_a(x,t)=f(x,t) \quad (3.37)$$

Onde X é um vetor de parâmetros 8x1 a ser estimado e é dado por:

$$\underline{X}=(x_d, x'_d, x''_d, x''_q, T'_d, T''_d, T_a, \lambda)^T \quad (3.38)$$

A equação (3.37) é altamente não linear. Então o problema é reformulado para superar a não-linearidade.

Admita que m amostras da corrente de curto-circuito estão acessíveis para o período curto-circuitado, que deve ser suficientemente grande a fim de englobar os regimes subtransitório, transitório e permanente (Al-Kandari et al, 2015).

No regime estacionário a corrente de curto-circuito de armadura pode ser escrita na forma a seguir:

$$i_{ass}(t)=\sqrt{2}\frac{E_0}{X_d}\cos(\omega_0 t+\lambda) \quad (3.39)$$

Na equação (3.39) não há corrente transitória, subtransitória ou d.c. Ela pode então ser reescrita após a expressão do cosseno como:

$$i_{ass}(t)=\left(\frac{\cos\lambda}{X_d}\right)E_0\sqrt{2}\cos(\omega_0 t)-\left(\frac{\sin\lambda}{X_d}\right)E_0\sqrt{2}\sin(\omega_0 t) \quad (3.40)$$

Os parâmetros  $X_1$  e  $X_2$  são definidos como:

$$X_1=\frac{\cos\lambda}{X_d} \quad (3.41)$$

$$X_2=\frac{\sin\lambda}{X_d} \quad (3.42)$$

As funções sujeitas ao tempo  $h_1(t)$  e  $h_2(t)$  serão definidas como:

$$h_1(t) = \sqrt{2} E_0 \cos(\omega_0 t) \quad (3.43)$$

$$h_2(t) = -\sqrt{2} E_0 \sin(\omega_0 t) \quad (3.44)$$

A equação (3.40) torna-se então:

$$i_{ass}(t) = X_1 h_1(t) + X_2 h_2(t) \quad (3.45)$$

Se caso a corrente de armadura, no regime permanente, for amostrada a uma taxa pré-selecionada, chamada  $\Delta T$ , então  $m$  amostras seriam obtidas em  $t_1, t_1 + \Delta T, \dots, t_1 + (m-1)\Delta T$ . Dessa forma a equação (3.45) se torna:

$$\begin{bmatrix} i_{ass}(t_1) \\ \vdots \\ i_{ass}(t_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(t_1) & h_2(t_1) \\ \vdots & \vdots \\ h_1(t_m) & h_2(t_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

No formato vetorial, a equação (3.46) transforma-se em:

$$I_{ass} = H \underline{X} + \xi \quad (3.47)$$

Onde  $I_{ass}$  é o vetor de amostras  $m \times 1$  da corrente estacionária,  $H$  é a matriz  $m \times 2$  medida,  $\underline{X}$  é o vetor de parâmetros  $2 \times 1$  a ser estimado, e  $\xi$  é vetor de erros  $m \times 1$  a ser minimizado. Se  $m > 2$ , a equação (3.47) torna-se um conjunto de equações sobredeterminada. A solução para (3.47) com base em mínimos quadrados é:

$$\underline{X} = [H^T H]^{-1} H^T I_{ass}(t) \quad (3.48)$$

Tendo identificado os parâmetros do vetor  $\underline{X}$ , então  $X_d$  e  $\lambda$  podem ser determinados como:

$$X_1^2 + X_2^2 = \frac{(\cos^2 \lambda + \sin^2 \lambda)}{X_d^2} = \frac{1}{X_d^2} \quad (3.49)$$

$$X_d = [X_1^2 + X_2^2]^{-\frac{1}{2}}$$

$$\tan \lambda = \frac{\sin \lambda}{\cos \lambda} = \frac{X_d X_2}{X_d X_1} = \frac{X_2}{X_1} \quad (3.50)$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{X_2}{X_1} \right)$$

Desta forma, os parâmetros  $X_d$  e  $\lambda$  são identificados usando a corrente de armadura de curto-circuito de estado estacionário.

No regime transitório, a corrente de curto-circuito de armadura pode ser escrita como:

$$i_{atr}(t) = \sqrt{2} E_0 \left[ \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right] e^{\frac{-t}{T'_d}} \cos(\omega_0 t + \lambda) \quad (3.51)$$

Observe que os valores de  $X_d$  e  $\lambda$  são os identificados no procedimento anterior. Usando os primeiros quatro termos de expansão das séries de Taylor para o termo exponencial  $e^{\frac{-t}{T'_d}}$  e definindo  $(\frac{1}{X'_d})_T = \left[ \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right]$ , teremos:

$$\begin{aligned} i_{atr}(t) = & \left[ \frac{\sqrt{2} E_0}{(X'_d)_T} \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) - \left[ \frac{\sqrt{2} E_0 t}{(X'_d)_T T'_d} \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) + \\ & \left[ \frac{0.5 \sqrt{2} E_0 t^2}{(X'_d)_T T'^2_d} \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) - \left[ \frac{\sqrt{2} E_0 t^3}{6 (X'_d)_T T'^3_d} \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) \end{aligned} \quad (3.52)$$

Os parâmetros são definidos como:

$$\begin{aligned} y_1 &= \left( \frac{1}{X'_d} \right)_T = \left[ \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right] \\ y_2 &= \frac{1}{T'_d (X'_d)_T} \\ y_3 &= \frac{1}{T'^2_d (X'_d)_T} \\ y_4 &= \frac{1}{T'^3_d (X'_d)_T} \end{aligned} \quad (3.53)$$

E as funções dependentes do tempo:

$$\begin{aligned} b_1(t) &= \sqrt{2} E_0 \cos(\omega_0 t + \lambda) \\ b_2(t) &= -\sqrt{2} E_0 \cos(\omega_0 t + \lambda) \\ b_3(t) &= 0,5 \sqrt{2} E_0 t^2 \cos(\omega_0 t + \lambda) \\ b_4(t) &= -\frac{\sqrt{2}}{6} E_0 t^3 \cos(\omega_0 t + \lambda) \end{aligned} \quad (3.54)$$

Então, a equação (3.52) torna-se:

$$i_{atr}(t) = b_1(t)y_1 + b_2(t)y_2 + b_3(t)y_3 + b_4(t)y_4 \quad (3.55)$$

Para  $m_1$  amostras da corrente de indução de curto-circuito disponível. Então (3.55) pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} i_{atr}(t_1) \\ \vdots \\ i_{atr}(t_{ml}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1(t_1) & \cdots & b_4(t_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_1(t_{ml}) & \cdots & b_4(t_{ml}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Que na forma vetorial se torna:

$$I_{atr} = B \underline{Y} + \underline{\psi} \quad (3.57)$$

Onde  $I_{atr}$  são as amostras de regime permanente e transitório  $m_1 \times 1$ ,  $B$  é matriz  $m_1 \times 4$  medida,  $\underline{Y}$  é o vetor de parâmetros  $4 \times 1$  a ser estimado e  $\underline{\psi}$  é o vetor de erro  $m_1 \times 1$  a ser minimizado. A solução para (3.57) com base em mínimos quadrados é dada por:

$$Y = [B^T B]^{-1} B^T I_{atr} \quad (3.58)$$

Tendo identificado o vetor de parâmetros  $\underline{Y}$ , então os parâmetros transientes  $X'_d$  e  $T'_d$  podem ser calculados como:

$$X'_d = \frac{1}{\left[ y_1 + \frac{1}{X'_d} \right]} \quad (3.59)$$

$$T'_d = \left[ \frac{y_1}{y_2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.60)$$

No regime subtransitório, os primeiros ciclos da corrente de curto-circuito de armadura apresentam a corrente subtransitória, sobreposto nesta corrente está o componente d.c da corrente da armadura. Isso pode ser expresso como:

$$i_{astr}(t) = \sqrt{2} E_0 \left[ \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X''_d} \right] e^{\frac{-t}{T'_d}} \cos(\omega_0 t + \lambda) + i_{dc} \quad (3.61)$$

Do ponto de vista de estimação,  $i_{dc}$  pode ser considerado como um ruído sobreposto à corrente subtransitória. Seguindo os passos explicados anteriormente, substituindo o termo



exponencial  $e^{\frac{-t}{T''_d}}$  pelos quatro primeiros termos da série de Taylor e definindo  $(\frac{1}{X''_d})_T = \left[ \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right]$ , obtemos:

$$i_{astr}(t) \left[ \frac{\sqrt{2} E_0}{(X''_d)_T} \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) - \left[ \frac{\sqrt{2} E_0 t}{T''_d (X''_d)_T} \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) + \left[ \frac{0.5 \sqrt{2} E_0 t^2}{T''_d{}^2 (X''_d)_T} \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) - \left[ \frac{\sqrt{2} E_0 t^3}{6 T''_d{}^3 (X''_d)_T} \right] \cos(\omega_0 t + \lambda) \quad (3.62)$$

Os parâmetros podem ser definidos da seguinte maneira:

$$\theta_1 = \frac{1}{(X''_d)_T} = \left[ \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right] \quad (3.63)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{T''_d (X''_d)_T} \quad (3.64)$$

$$\theta_3 = \frac{1}{(T''_d)^2 (X''_d)_T} \quad (3.65)$$

$$\theta_4 = \frac{1}{(T''_d)^3 (X''_d)_T} \quad (3.66)$$

Então, a equação (3.61) torna-se:

$$i_{astr}(t) = b_1(t)\theta_1 + b_2(t)\theta_2 + b_3(t)\theta_3 + b_4(t)\theta_4 \quad (3.67)$$

Se caso  $m_2$  amostras da corrente de curto-circuito de armadura amostrada em  $t_1, t_2 = t_1 + \Delta T, \dots, t_1 + (m_2 - 1) \Delta T$  estão disponíveis, então (53) pode ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} i_{astr}(t_1) \\ \vdots \\ i_{astr}(t_{m_2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1(t_1) & \cdots & b_4(t_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_1(t_{m_2}) & \cdots & b_4(t_{m_2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_4 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

Na forma vetorial, (3.68) pode ser reescrita como:

$$\underline{I}_{astr} = B \underline{\theta} + \zeta \quad (3.69)$$

Onde  $I_{astr}$  é  $m_2 \times 1$  amostras atuais disponíveis no período em estudo, B é  $m_2 \times 4$  matriz de medição,  $\underline{\theta}$  é o vetor de parâmetros  $4 \times 1$  a ser estimado e  $\underline{\zeta}$  é  $m_2 \times 1$  vetor de erro a ser minimizado. Este vetor de erros contém a corrente d.c atual. A solução para (3.69) em mínimos quadrados é:

$$\underline{\theta} = [B^T B]^{-1} B^T I_{astr} \quad (3.70)$$

Tendo identificado o vetor de parâmetros  $\underline{\theta}$ , então os parâmetros do período subtransitório  $X'_d$  e  $T''_d$  podem ser calculados como:

$$X''_d = \frac{1}{\theta_1 + \frac{1}{X'_d}} \quad (3.71)$$

$$T''_d = \frac{\theta_1}{\theta_2} \quad (3.72)$$

Tendo identificado  $X_d$ ,  $X'_d$ ,  $X''_d$ ,  $T'_d$  e  $T''_d$  então a componente d.c. da corrente de curto-circuito pode ser obtida como:

$$\begin{aligned} i_\alpha(t) - i_{sts}(t) = & -E_0 \left[ \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right] e^{-\frac{t}{T_\alpha}} (0.5\sqrt{2} \cos \lambda) \\ & + E_0 \left[ \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right] e^{-\frac{t}{T_\alpha}} [0.5\sqrt{2} \cos(2\omega_0 t + \lambda)] \end{aligned} \quad (3.73)$$

Onde  $i_{sts}(t)$  é a corrente a.c. de armadura subtransitória, transitória e estacionária calculada no tempo t usando os parâmetros estimados nas seções anteriores. O lado esquerdo da equação (3.73) é a corrente de armadura d.c.

$$\begin{aligned} i_{dc}(t) = & -E_0 \left[ \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right] \left[ 1 - \frac{t}{T_\alpha} + \frac{t^2}{2T_\alpha^2} \right] (0.5\sqrt{2} \cos \lambda) E_0 \left[ \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right] \left[ 1 - \frac{t}{T_\alpha} + \frac{t^2}{2T_\alpha^2} \right] \\ & [0.5\sqrt{2} \cos(2\omega_0 t + \lambda)] \end{aligned} \quad (3.74)$$

$$\theta_s = \left[ \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right] \quad (3.75)$$

$$\theta_d = \left[ \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right] \quad (3.76)$$

Os parâmetros são definidos como

$$\phi_1 = \theta_s; \quad \phi_4 = \theta_d \quad (3.77)$$

$$\phi_2 = \theta_s/T_\alpha; \quad \phi_5 = \theta_d/T_\alpha \quad (3.78)$$

$$\phi_3 = \theta_s/T_\alpha^2; \quad \phi_6 = \theta_d/T_\alpha^2 \quad (3.79)$$

$$c_1(t) = -0,5\sqrt{2} E_0 \cos \lambda \quad (3.80)$$

$$c_2(t) = 0,5\sqrt{2} t E_0 \cos \lambda \quad (3.81)$$

$$c_3(t) = -0,25\sqrt{2} t^2 E_0 \cos \lambda \quad (3.82)$$

$$c_4(t) = -0,5\sqrt{2} E_0 \cos(2\omega_0 t + \lambda) \quad (3.83)$$

$$c_5(t) = 0,5\sqrt{2} t E_0 \cos(2\omega_0 t + \lambda) \quad (3.84)$$

$$c_6(t) = -0,25\sqrt{2} t^2 E_0 \cos(2\omega_0 t + \lambda) \quad (3.85)$$

Então, a equação (3.55) torna-se:

$$i_{dc}(t) = \phi_1 c_1(t) + \phi_2 c_2(t) + \phi_3 c_3(t) + \phi_4 c_4(t) + \phi_5 c_5(t) + \phi_6 c_6(t) \quad (3.86)$$

Se M amostras da corrente d.c estiverem disponíveis em ,  $t_1, t_1 + \Delta T, \dots, \dots t_1 + (M-1)\Delta T$ . Então, equação(3.86) pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} i_{dc}(t_1) \\ \vdots \\ i_{dc}(tM) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(t_1) & \cdots & c_6(t_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_1(tM) & \cdots & c_6(tM) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_6 \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

Que na forma vetorial pode ser reescrita como:

$$I_{dc} = C \underline{\phi} + \underline{y} \quad (3.88)$$

A solução para (3.88) no método dos mínimos quadrados é:

$$\underline{\phi}^* = [C^T C]^{-1} C^T I_{dc} \quad (3.89)$$

Tendo identificado o vetor de parâmetros  $\underline{\phi}^*$ , então os parâmetros  $X''_q$  e  $T_\alpha$  podem ser calculados como:

$$X''_q = 2/(\phi_1 - \phi_4) \quad (3.90)$$

$$T_\alpha = \phi_1/\phi_2 \quad (3.91)$$

### 3.4 Simulated Annealing

Annealing é o procedimento aplicado para fundir um metal, que deve ser aquecido a alta temperatura e logo após resfriado pausadamente, a fim de que o resultado final obtido seja uma massa homogênea. Este processo termodinâmico pode ser estruturado como um método para procurar respostas aceitáveis para problemas complexos de otimização (HAESER, 2008).

O simulated annealing fundamentalmente se comporta como um algoritmo de descida que obtém soluções com um custo mais reduzido, nos casos de minimização, do que o custo da solução atual. O algoritmo na fase inicial do processo, permite soluções piores como tática para fugir de mínimos locais (ANDRADE, 2018).

O método é aplicado a problemas de otimização combinatória,  $\min_x f(x)$ ,  $x \in S$ , em que  $f: S \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $S$  finito. O processo de otimização acontece em camadas, simulando os níveis de temperatura no resfriamento. Para cada nível, dado um ponto  $u \in S$ , diversos pontos na vizinhança de  $u$  são gerados e o valor de  $f$  equivalente é calculado. Qualquer ponto gerado é admitido ou recusado conforme dada probabilidade. A probabilidade de aceitação decai conforme o nível do processo, de acordo com a temperatura.

O procedimento físico de recozimento pode ser modelado com êxito através de algoritmos de simulação da física da matéria condensada. Em torno de 1953, METROPOLIS et al. (1953) desenvolveram um método simples para simular o aumento da temperatura de um sólido até que alcance estabilidade térmica. Quando os átomos estão em uma dada

temperatura  $T$ , a possibilidade que a energia do sistema seja  $E$ , é correspondente a  $e^{-E/kT}$ , em que  $k$  é a constante de Boltzmann (ARAÚJO, 2001).

A tabela (3.1) exprime a relação análoga entre o processo físico e o problema de otimização:

Tabela 3.1: Analogia entre os processos

Processo físico	Problema de otimização
Estado	Solução
Energia	Custo
Estado de transição	Soluções Vizinhas
Temperatura	Parâmetro de controle
Ponto de energia mínima	Solução final

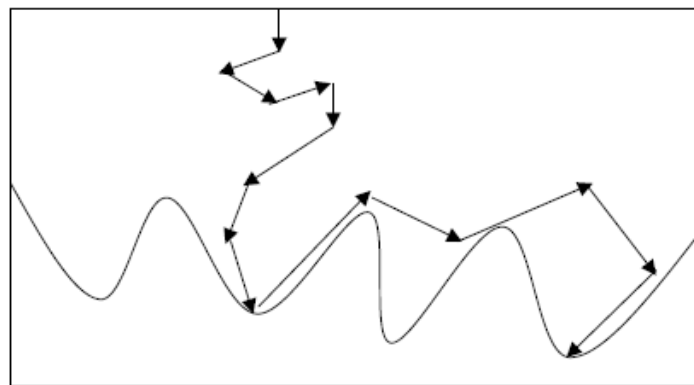
A função a seguir representa os sólidos no estado  $i$  com energia  $E_i$  na temperatura  $T$ :

$$P_T\{X = i\} = \frac{1}{Z(T)} \exp\left(\frac{-E_i}{k_b T}\right) \quad (3.92)$$

$X$  é uma variável estocástica indicando o estado corrente do sólido e  $Z(T)$  é a função partição.

De início, o *simulated annealing* começa com um valor bastante alto de temperatura  $T$ , como dito anteriormente, a fim de escapar de um mínimo local. O algoritmo segue tentando uma dada quantidade de movimento na vizinhança para cada temperatura, enquanto a temperatura é reduzida gradativamente. A figura a (3.4) ilustra o comportamento do *Simulated annealing* para fugir de um mínimo local.

Figura 3.4: Estratégia para fuga do mínimo local



Fonte: (ARAÚJO, 2001).

Seja  $S$  um conjunto finito que abrange todos os possíveis arranjos que simbolizam as respostas factíveis para o problema. Seja  $f$  uma função de valores reais estabelecida sobre  $S$ ,

na forma  $f : S \rightarrow R$ .  $R$  que é o contradomínio, ou seja, os valores de  $f$ . O problema está em buscar uma solução  $i \in S$ , tal que  $f(i)$  seja mínimo.

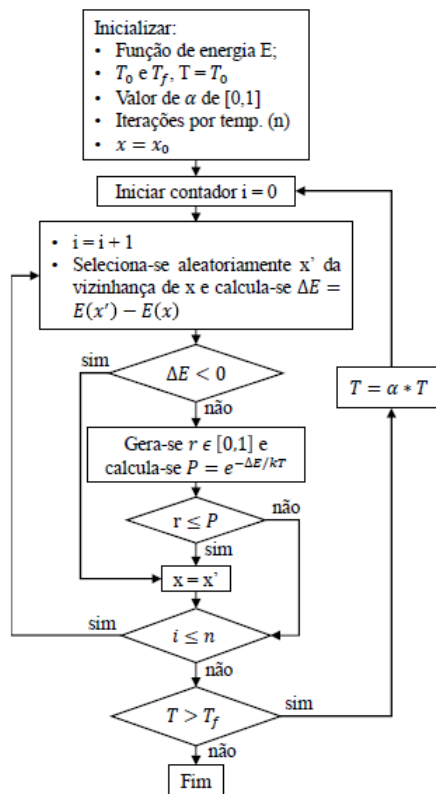
O *Simulated annealing* procura se esquivar de mínimos locais, permitindo, às vezes, uma nova solução criada, ainda que a mesma incremente o valor de  $f$ . Permitir ou excluir uma nova solução que incrementará  $\delta$  em  $f$ , em uma dada temperatura  $T$ , é definido por um critério probabilístico, por intermédio de uma função  $g$  denominada função de aceite e pode ser expressa da seguinte forma.

$$g(\delta, T) = e^{-\delta/T} \quad (3.93)$$

Se  $\delta = f(j) - f(i)$ , for menor que zero, a solução  $j$  será aceita como a nova solução. Se isso não ocorrer, a solução para nova solução seguirá a seguinte condição:  $g(\delta, T) > \text{random}(0,1)$ .

De forma resumida, o algoritmo SA está representado no fluxograma da figura 3.5.

Figura 3.5: Fluxograma do Algoritmo SA



Fonte: (ANDRADE, 2018).

### 3.4.1 Representação da solução

A tabela 3.2 ilustra a analogia entre o processo físico e o problema de estimação de parâmetros do gerador síncrono de polos salientes.

Tabela 3.1: Relação entre os processos

Processo físico	Problema de Estimação
Estado	Valor dos Parâmetros
Energia	Função Objetivo
Estado de transição	Valor Próximo ao Atual
Temperatura	Parâmetro de controle
Ponto de energia mínima	Parâmetros Reais/Ideais

O problema de identificação torna-se um problema de otimização através da minimização dos erros quadráticos entre a corrente medida e a corrente calculada expressa em (2.55). O que leva à identificação do vetor de parâmetros dado na equação (3.94):

$$\theta^T = [T_a \ T'_a \ T''_a \ X_d \ X'_d \ X''_d \ X''_q] \quad (3.94)$$

### 3.4.2 Estrutura de vizinhança

Escolha aleatória de um parâmetro dentro do vetor de parâmetros para ser alterado.

Variar o valor do parâmetro escolhido mediante uma distribuição uniforme ou uma distribuição de Gauss. Nesta pesquisa o método foi implementado com ambas as distribuições. Supondo para um parâmetro  $x$ , que um vizinho  $x'$  pode ser gerado adicionando ao parâmetro  $x$  um valor aleatório entre  $-0,5$  e  $0,5$ . Devido às limitações da variação da função `rand` do software MATLAB pelos valores  $0$  e  $1$ , onde a escolha desses valores, limitam a busca do mínimo global somente para valores crescentes, sendo assim, a escolha da variação entre  $-0,5$  e  $0,5$  permite que o algoritmo consiga visitar um vizinho maior ou menor. A temperatura é o desvio padrão da distribuição de Gauss, tendo média zero.

Seja  $X$  a variável com distribuição uniforme contínua no intervalo de “a” até “b”. Então:

$$f(x) = \frac{1}{b-a} \quad (3.95)$$

Se  $X$  for uma variável aleatória normal com  $E[X]=\mu$  e  $V(X)=\sigma^2$ , a variável aleatória será uma variável aleatória normal, com  $E[Z]=0$  e  $V(Z)=1$ . Ou seja,  $Z$  é uma variável aleatória gaussiana padrão.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (3.96)$$

Cada parâmetro deve ser limitado dentro de um intervalo. A principal razão para estabelecer esses limites é garantir que o processo seja mais eficiente reduzindo seu espaço de busca.

### 3.4.3 Função objetivo

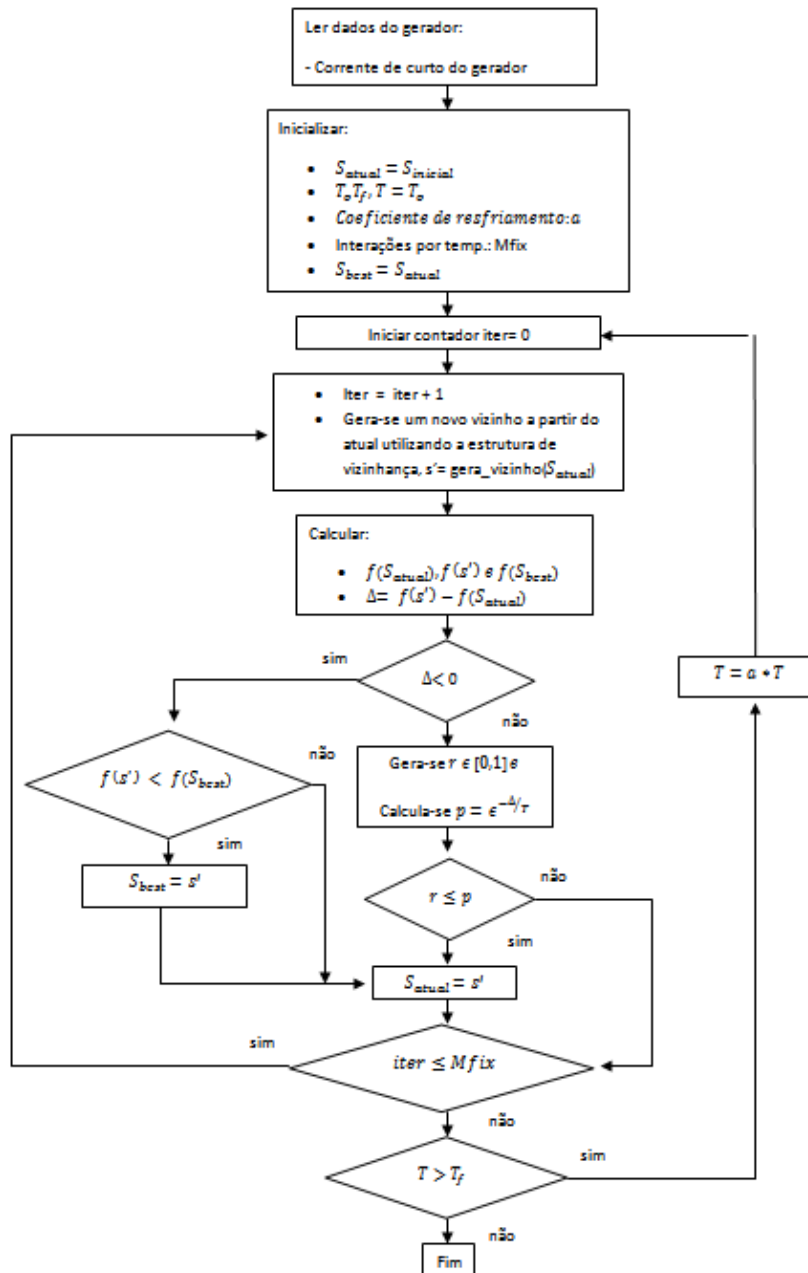
$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N (I_m^k - I_c^k(\theta))^2 \quad (3.97)$$

$I_m$  é corrente medida (dados),  $I_c$  é a corrente de curto-circuito calculada através da equação (2.55).

$I_m$  e  $I_c$  são vetores que devem conter a mesma quantidade de amostras ( $N$ ).  $\theta$  é o vetor de parâmetros a ser estimado.



Figura 3.6: Fluxograma Simulated Annealing para estimação de parâmetros



### 3.5 Fast Simulated Annealing

O *Fast Simulated Annealing* (FSA) é um método de pesquisa semi-local dotado de saltos longos ocasionais. O esquema de resfriamento do algoritmo FSA é inversamente linear no tempo, que é mais rápido em relação *Simulated Annealing* clássico, sendo basicamente uma pesquisa local e necessita que o esquema de resfriamento seja inversamente proporcional à função logarítmica no tempo (GUO et al, 1991).

O FSA utiliza uma distribuição *Cauchy* ao invés de uma distribuição plana para os parâmetros do modelo a fim de gerar os modelos que serão avaliados utilizando o critério de Metropolis. A distribuição do tipo Cauchy é uma função de temperatura e pode ser definida como segue:

$$f(x) = \frac{1}{\beta \Pi \left( 1 + \left( \frac{x-\alpha}{\beta} \right)^2 \right)} \quad (3.97)$$

A distribuição de *Cauchy* tem mais chance de se esquivar de mínimos locais, isso acontece por apresentar uma cauda mais plana do que a equivalente distribuição Gaussiana. O FSA apresenta o mesmo critério de aceitação do SA clássico, mas critérios de geração de modelos distintos (BERNAL, 2014). o esquema de esfriamento necessário para a convergência não é logarítmico, mas inversamente proporcional ao número da iteração como segue (Szu and Hartley, 1987):

$$T(k) = \frac{T_0}{k} \quad (3.98)$$

A implementação do *Fast Simulated Annealing* segue os mesmos passos da implementação do *Simulated Annealing* básico, exceto para a estrutura de vizinhança, onde o FSA utiliza a distribuição de *Cauchy*, diferentemente do SA básico, que utiliza distribuição uniforme ou gaussiana, conforme mencionado anteriormente. A distribuição de *Cauchy* possui dois parâmetros, alfa e beta, onde na implementação o beta é a temperatura e o alfa é zero.

# Capítulo 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A proposta deste trabalho é estimar os parâmetros transitórios, subtransitórios e estacionário de geradores síncronos utilizando os algoritmos *Simulated Annealing* e *Fast Simulated Annealing*. A metodologia utilizada foi a implementação do método de Prony, do método Gráfico, do método dos Mínimos Quadrados, do *Simulated Annealing* e do *Fast Simulated Annealing* em MATLAB. Em seguida, foi realizada a simulação de correntes de teste de curto-circuito trifásico brusco no gerador, para comparar os resultados obtidos na estimação de parâmetros com estes métodos. Finalmente foi avaliado o desempenho dos métodos SA e FSA. Para a estimação utilizando o *Simulated Annealing* e o *Fast Simulated Annealing*, também foi utilizada a rotina *lsqnonlin* do MATLAB a fim de minimizar os erros de estimação.

### 4.1 Parâmetros e Algoritmos Utilizados

Sinais sintéticos foram criados por meio da equação da corrente de curto-circuito trifásico súbito, para várias frequências de amostragem. Foram usados os parâmetros relativos a um gerador consultado em Santana (2012). O parâmetro  $\lambda$ , que é o ângulo entre o eixo da fase 'a' e o eixo direto no instante da aplicação do curto-circuito, foi considerado como sendo zero.

Os valores nominais do gerador são: 90 MVA, 8 polos, 13,8 kV, 60 Hz, 280 A (Corrente de Campo). A tabela 4.1 contém os parâmetros transitórios e subtransitórios reais do gerador.

Tabela 4.1 – Valores dos parâmetros transitórios e subtransitórios dos Geradores

$x_d$	5,341 ( $\Omega$ )
$x'_d$	0,5976 ( $\Omega$ )
$x''_d$	0,3243 ( $\Omega$ )
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )
$T'_d$	0,182 s
$T''_d$	0,00822 s
$T_a$	0,0162 s
$\lambda$	0

Fonte: (SANTANA, 2012)

## 4.2 Método Gráfico

Tabela 4.2 - Resultados para o método gráfico

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	5,3516	0,1977%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	0,6089	1,8849%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,6088	87,7370%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	S.E.	S.E.
$T'_d$	0,182 s	0,179998364	1,0998%
$T''_d$	0,00822 s	0,0054259809	66,0095%
$T_a$	0,0162 s	0,0098758278	39,0381%

\*S.E: sem estimação

O método gráfico foi implementado de acordo com as recomendações da norma IEEE 115, conforme foi detalhado no capítulo 3 item 3.1 correspondente ao método em questão. Foi realizada uma rotina de detecção de picos, logo após, determinou-se as envoltórias superior e inferior da corrente de curto-circuito por meio de interpolação por *splines* cúbicas, conforme sugerido na norma IEEE-115, Resumidamente, uma spline cúbica é uma função polinomial por partes, contínua, onde cada parte é um polinômio de grau 3, na qual os valores de suas duas primeiras derivadas coincidem com as amostras do envelope.

Por meio dos envelopes, determina-se o componente DC do sinal, que possibilita encontrar a constante de tempo de armadura (0,0098758278 s). O próximo passo foi subtrair o componente DC do sinal original, seguindo os passos do método, como linearização, interpolação e extrapolação, objetivando determinar os parâmetros do gerador síncrono em questão.

Como dito anteriormente, foram testadas diversas frequências (800 Hz, 1200 Hz, 1800 Hz, 2000 Hz e 2300 Hz) para a estimação dos parâmetros do gerador síncrono, na tabela 4.2 estão os resultados para frequência de amostragem de 2000 Hz utilizando 30000 amostras do sinal.

Os piores resultados, foram relativos à estimação dos parâmetros subtransitórios e constante de tempo de armadura, sendo que por intermédio dos ensaios de curto-circuito brusco, não é possível estimar a reatância subtransitória de eixo em quadratura, devido a ordem do modelo adotada, que não permite a reprodução fiel do eixo em quadratura. Observa-se maior precisão de estimação na reatância síncrona de eixo direto, reatância transitória de eixo direto e constante de tempo transitória de eixo direto. A partir desses resultados, pode-se

perceber que o método gráfico apresenta dificuldades na estimação de parâmetros subtransitórios e de eixos em quadratura.

### 4.3 Método de Prony

Tabela 4.3 - Resultados para o método de Prony

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	5,341	0%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	0,596930688	0,1120%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,324298033	0,00060651%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	0,45979576	0,0444%
$T'_d$	0,182 s	0,181902812	0,0534%
$T''_d$	0,00822 s	0,00821819982	0,0219%
$T_a$	0,0162 s	0,016199899	0,00061886%

O método de Prony foi implementado dividido em três partes, cada uma relativa aos períodos do sinal, subtransitório, transitório e permanente. Devido à complexidade de se considerar para esse algoritmo uma corrente de armadura de curto-circuito completa, para todos os regimes. Várias frequências de amostragem foram testadas (800 Hz, 1200 Hz, 1800 Hz, 2000 Hz e 2300 Hz), essa diversidade de frequências de amostragem foi aplicada visando compreender os efeitos críticos decorrentes para os resultados de estimação. Para os resultados da tabela 4.3 também foi utilizada frequência de amostragem de 2000 Hz e foram utilizadas 30.000 amostras do sinal.

O método de Prony apresentou bons resultados de estimação, não apresentou dificuldades de estimação pra nenhum dos parâmetros desejados, inclusive os parâmetros subtransitórios e de eixo em quadratura que o método gráfico foi incapaz de estimar com precisão. no entanto esse método é bastante conhecido por sua sensibilidade excessiva à presença de ruídos.

Foram realizados testes com ruídos gaussianos variáveis ( uma escala de 0,0000001% a 5%) para entender seus efeitos críticos sobre a estimação no método de Prony. Na tabela 4.6 podem ser observadas as alterações que um ruído injetado no sinal da corrente de curto-circuito podem ocasionar. Foram utilizados os mesmos padrões de estimação para Prony com e sem ruído e o que pode ser observado é que o alto desempenho do método para os resultados da tabela 4.3 foram totalmente distorcidos se comparados com os resultados da tabela 4.6.

#### 4.4 Método dos Mínimos Quadrados

Tabela 4.4 - Resultados para o método dos mínimos quadrados

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	5,341	0%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	0,5976	0%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,324252003	0,0148%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	0,46	0%
$T'_d$	0,182 s	0,182	0%
$T''_d$	0,00822 s	0,00821735316	0,0322%
$T_a$	0,0162 s	0,0162	0%

O método dos mínimos quadrados também foi dividido por períodos do sinal, relativo aos regimes subtransitário, transitório e permanente. Foram testadas várias frequências de amostragem (800 Hz, 1200 Hz, 1800 Hz, 2000 Hz e 2300 Hz) a fim de entender seus efeitos críticos sobre os resultados de estimação dos parâmetros do gerador escolhido como exemplo. Para os resultados da tabela 4.4, utilizou-se também 30.000 amostras do sinal, frequência de amostragem de 2000 Hz. A tensão utilizada foi de 40 % da nominal a fim de evitar saturação, o método dos mínimos quadrados também apresenta bons resultados, inclusive para os parâmetros subtransitórios e de eixo enquadatura.

O método dos mínimos quadrados é menos sensível aos ruídos do que o método de Prony, como pode ser observado através das tabela 4.5 e 4.6, onde é injetado um ruído aditivo gaussiano ao sinal da corrente equivalente a 5%. Para o método dos mínimos quadrados os resultados não foram satisfatórios apenas para a reatância subtransitória de eixo direto e para a constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura, para os demais parâmetros o erro foi bem inferior a 1 %, confirmando a robustez do método na presença de ruído aditivo no sinal da corrente de curto-circuito trifásico brusco.

O método de Prony não apresenta resultados satisfatórios para nenhum dos parâmetros desejados, comprovando sua sensibilidade na presença de ruídos. A constante de tempo de armadura apresenta erro de estimação de aproximadamente 74%, para todos os outros parâmetros o erro de estimação ultrapassa 100 %.

Tabela 4.5 - Resultados para o método dos mínimos quadrados com ruído aditivo

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	5,341198902236572	0%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	0,59750082269770088	0,0166%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,21581558028322062	50,2642%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	0,46000029998890779	0%
$T'_d$	0,182 s	0,18203290227375665	0,0181%
$T''_d$	0,00822 s	0,017228041159859004	52,2871%
$T_a$	0,0162 s	0,01619999999999999	0,0014%

Tabela 4.6 - Resultados para o método de Prony com ruído aditivo

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	10,682	100%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	1,25448192	109,92%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,88816041	173,87%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	1,01108	119,8%
$T'_d$	0,182 s	0,366760212	101,5166%
$T''_d$	0,00822 s	0,036496742	243,9993%
$T_a$	0,0162 s	0,0041232564	74,5478%

#### 4.5 Simulated Annealing Básico

Tabela 4.7 - Resultados para o método Simulated Annealing básico.

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	5,3083	0,61224%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	0,5993	0,28447%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,3421	5,4887%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	0,4726	2,7391%
$T'_d$	0,182 s	0,1805	0,82418%
$T''_d$	0,00822 s	0,0099	20,732%
$T_a$	0,0162 s	0,0171	5,5556%

Para o Simulated Annealing básico (SAB), foram utilizadas também várias frequência de amostragem. Para os resultados da tabela 4.7 a frequência de amostragem adotada foi de 2000 Hz e a distribuição adotada para esse método foi a uniforme. o desempenho do método foi menos satisfatório para os parâmetros subtransitórios (reatância subtransitória de eixo direto, reatância subtransitória de eixo em quadratura e constante de tempo subtransitória de eixo direto) e para a constante de tempo de armadura, semelhantemente ao método gráfico, no entanto com maior precisão, como pode ser visto na tabela 4.8.

Para a reatância síncrona e transitória de eixo direto, assim como para a constante de tempo transitória de eixo direto, os resultados adquiridos tiveram erros inferiores a 1 %, o que para o método gráfico só ocorreu para a reatância síncrona de eixo direto. Os parâmetros do SA foram os mesmos para todas as variantes, sendo eles: temperatura inicial 10, temperatura final 0.01, taxa de decaimento 0.9 e número de iterações por temperatura 500.

Tabela 4.8 - comparativo de desempenho dos métodos Gráfico e Simulated Annealing básico

Parâmetros	Real	Erro método Gráfico	Erro método SA básico
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	0,1977%	0,61224%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	1,8849%	0,28447%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	87,7370%	5,4887%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	S.E.	2,7391%
$T'_d$	0,182 s	1,0998%	0,82418%
$T''_d$	0,00822 s	66,0095%	20,732%
$T_a$	0,0162 s	39,0381%	5,5556%

#### 4.6 Simulated Annealing Básico Combinado com Mínimos Quadrados

Tabela 4.9 - Resultados para o método Simulated Annealing básico combinado com mínimos quadrados.

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	5,341( $\Omega$ )	0%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	0,5976( $\Omega$ )	0%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,3243( $\Omega$ )	0%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	0,46 ( $\Omega$ )	0%
$T'_d$	0,182 s	0,182 s	0%
$T''_d$	0,00822 s	0,00822 s	0%
$T_a$	0,0162 s	0,0162 s	0%

A solução obtida com o método Simulated Annealing é usada como ponto de partida para o método dos mínimos quadrados, melhorando o resultado obtido e reduzindo o erro de estimativa, conforme a tabela 4.8. Todos os parâmetros tiveram erros inferiores a 1%, demonstrando que o desempenho do SAB combinado com mínimos quadrados é bem mais eficiente que o SAB isoladamente. Isso acontece porque o método dos mínimos quadrados tem a habilidade de refinar as soluções recebidas diretamente do SAB, diminuindo a diferença entre a corrente de armadura de curto-circuito medida e a real.



O SAB combinado com mínimos quadrados consegue estimar com precisão inclusive os parâmetros subtransitórios que os métodos anteriores tiveram mais dificuldade de estimação. Foram testadas diversas frequências de amostragem, mas para os resultados da tabela 4.9 os resultados expostos são relativos à frequência de amostragem de 2000 Hz.

#### 4.7 Simulated Annealing Clássico

Tabela 4.10 - Resultados para o método Simulated Annealing clássico

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	5,3539( $\Omega$ )	0,24153%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	0,6026( $\Omega$ )	0,83668%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,3313( $\Omega$ )	2,1585%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	0,4632( $\Omega$ )	0,69565%
$T'_d$	0,182 s	0,1838s	0,98901%
$T''_d$	0,00822 s	0,0091s	10,976%
$T_a$	0,0162 s	0,0165 s	1,8519%

Para o Simulated Annealing clássico (SAC) também foi utilizada frequência de amostragem de 2000 Hz, no entanto a distribuição aqui utilizada foi a de Gauss, diferentemente da distribuição uniforme utilizado no SAB. Percebe-se pela tabela 4.10 que os resultados são melhores, no entanto, para a constante de tempo subtransitória de eixo direto o erro excede 10%.

O desempenho do SAC é melhor que o do SAB, atribui-se esse fenômeno ao tipo de distribuição adotada. A distribuição de Gauss possibilita uma redução nos erros de estimação. Os parâmetros melhor estimados foram a reatância síncrona e transitória de eixo direto, a constante de tempo transitória de eixo direto e a reatância subtransitória de eixo em quadratura ( esse foi o único parâmetro subtransitório estimado com erro inferior a 1%).

#### 4.8 Simulated Annealing Clássico Combinado com Mínimos Quadrados

Tabela 4.11 - Resultados para o método Simulated Annealing clássico combinado com mínimos quadrados.

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	5,341( $\Omega$ )	0%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	0,5976( $\Omega$ )	0%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,3243( $\Omega$ )	0%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	0,46 ( $\Omega$ )	0%
$T'_d$	0,182 s	0,182 s	0%
$T''_d$	0,00822 s	0,00822 s	0%
$T_a$	0,0162 s	0,0162 s	0%

O Simulated Annealing clássico com mínimos quadrados (SACMMQ) foi implementando nas mesmas condições que o (SAC). O método dos mínimos quadrados foi utilizado para reduzir os erros também para esse algoritmo o que funcionou como visto na tabela 4.11. Da mesma forma que ocorreu com o SAB combinado com mínimos quadrados, o SAC envia as soluções para o método dos mínimos quadrados que as recebe e refina, reduzindo os erros de estimação.

Através da tabela 4.11, percebe-se que todos os erros encontrados foram inferiores a 1%, inclusive para os parâmetros subtransitórios que o SAC isolado não foi capaz de estimar com precisão. Isso ocorre devido ao bom desempenho da distribuição de Gauss adotada, que melhora o desempenho do método, restando ao método dos mínimos quadrados refinar apenas a reatância subtransitória de eixo direto, a constante de tempo subtransitória de eixo direto e a constante de tempo de armadura.

#### 4.9 Fast Simulated Annealing

Tabela 4.12- Resultados para o método Fast simulated annealing

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	5,3283( $\Omega$ )	0,23778%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	0,5935( $\Omega$ )	0,68608%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,3236( $\Omega$ )	0,21585%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	0,4557( $\Omega$ )	0,93478%
$T'_d$	0,182 s	0,1807s	0,71429%
$T''_d$	0,00822 s	0,0081s	1,2195%
$T_a$	0,0162 s	0,0162s	0%

O Fast Simulated Annealing (FSA) foi implementado também para diversas frequências de amostragem, da mesma forma que os demais métodos, para entender os efeitos decorrentes nos resultados de estimação. Para a tabela 4.12, foi utilizada uma frequência de amostragem de 2000 Hz. A distribuição utilizada no Fast Simulated Annealing é a de Cauchy, essa forma de distribuição consegue fazer com que o método encontre resultados mais precisos, com uma margem de erro bem menor, se comparado com os demais métodos.

A constante de tempo subtransitória de eixo direto foi o único parâmetro com erro superior a 1%. O método consegue estimar com precisão os parâmetros subtransitórios e o de eixo em quadratura, que alguns dos métodos tiveram dificuldade de estimação. O parâmetro com melhor estimação adquirida foi a constante de tempo de armadura, que teve erro de estimação de 0%.

#### 4.10 Fast Simulated Annealing Combinado com Mínimos Quadrados

Tabela 4.13 - Resultados para o método Fast simulated annealing combinado com mínimos quadrados

Parâmetros	Real	Estimado	Erro
$x_d$	5,341( $\Omega$ )	5,341( $\Omega$ )	0%
$x'_d$	0,5976( $\Omega$ )	0,5976( $\Omega$ )	0%
$x''_d$	0,3243( $\Omega$ )	0,3243( $\Omega$ )	0%
$x''_q$	0,46 ( $\Omega$ )	0,46 ( $\Omega$ )	0%
$T'_d$	0,182 s	0,182 s	0%
$T''_d$	0,00822 s	0,00822 s	0%
$T_a$	0,0162 s	0,0162 s	0%

O Fast Simulated Annealing combinado com mínimos quadrados foi implementado nas mesmas condições do FSA, ou seja, também foi utilizada a distribuição de *Cauchy*. Da mesma forma que ocorreu com os métodos anteriores, o método dos mínimos quadrados foi agregado a fim de reduzir os erros. O FSA estima os parâmetros e envia a solução para o método dos mínimos quadrados os refinarem e reduzirem os erros.

O resultado alcançado pela união dos métodos reduz o erro de estimação a 0%, conforme aconteceu com as outras variantes do Simulated Annealing, o que torna o método dos mínimos quadrados combinados com as variantes do Simulated uma forma viável de estimação.

#### 4.11 Acurácia dos Parâmetros

A estimação dos parâmetros do gerador síncrono em questão foi realizada por meio da criação de sinais sintéticos relativos à corrente de curto-circuito. Para se averiguar a acurácia dos parâmetros estimados, os erros relativos foram calculados na forma seguinte:

$$\text{Erro (\%)} = \left| \frac{(\text{Valor verdadeiro}) - (\text{valor estimado})}{\text{valor verdadeiro}} \right| \cdot 100\% \quad (4.1)$$

O método gráfico apresentou dificuldades na estimação dos parâmetros por demonstrar uma distorção bem acentuada do valor estimado em relação ao valor real, seu tempo de processamento computacional para executar as linhas de código gira em torno de 10 segundos. O método de Prony apresenta bons resultados de estimação, no entanto é extremamente sensível a ruídos, seu tempo de cpu para executar as linhas de código gira em torno de 5 segundos. O método dos mínimos quadrados apresenta boa estimação e é mais robusto a ruídos do que o método de Prony, seu tempo de processamento computacional para executar as linhas de código gira em torno de 5 segundos.

O Simulated Annealing e suas variações detém certa dificuldade em estimar os parâmetros subtransitórios da máquina síncrona, exceto o Fast Simulated Annealing. No entanto com a combinação entre as variadas formas do Simulated Annealing apresentadas nessas dissertação com o método dos mínimos quadrados, os resultados de estimação são melhorados e apresentam ótima acurácia, seu tempo de processamento computacional para executar as linhas de código gira em torno de 169 segundos, e 66 foram o número de iterações diante dos parâmetros do método, que são temperatura inicial, temperatura final e taxa de decaimento.

A partir das simulações realizadas, pode-se verificar que os métodos *Simulated Annealing* e o *Fast Simulated Annealing* combinados com o método dos mínimos quadrados podem ser aplicados à estimação dos parâmetros transitórios e subtransitórios da máquina síncrona diretamente a partir dos dados de teste de curto-circuito trifásico súbito, apresentando bons resultados. Neste caso não foi preciso dividir o vetor de dados em três intervalos, nem realizar linearizações.

# Capítulo 5

## CONCLUSÕES

Este trabalho investiga a aplicação dos métodos de otimização não-linear *Simulated Annealing* (SA) e *Fast Simulated Annealing* (FSA), simples ou combinado com o método dos mínimos quadrados, na estimação de parâmetros transitórios e subtransitórios de geradores síncronos de polos salientes.

Para investigar o gerador utilizou-se o ensaio de curto-circuito trifásico brusco aplicado nos terminais da máquina funcionando em vazio, com rotação nominal e sob tensão apropriada para operação linear sem saturação. Nestas condições, a corrente de armadura possui solução analítica e dados aplicados na equação da corrente referida.

O tempo de aquisição abrange os regimes subtransitório, transitório e estacionário da corrente de curto.

A metodologia clássica para obtenção dos parâmetros é fazer a estimação por etapas, nos três subintervalos acima referidos. Em cada um deles uma parte dos parâmetros desejados são avaliados explorando o comportamento da corrente e a estratégia particular de cada método. Usando esta estratégia três processos clássicos foram também aplicados no processamento dos dados nessa pesquisa.

O primeiro foi o método gráfico, descrito na norma IEEE-115, que usa a curva do envelope de corrente de curto e considerações gráficas. O segundo foi o método de Prony, que explora o fato de a solução analítica da corrente de curto ser uma soma de senóides amortecidas. Pode então ser representada por uma soma de exponenciais complexas, cujas incógnitas passam a ser suas amplitudes e fases, que são obtidas por técnicas de processamento de sinais. O terceiro foi o método dos mínimos quadrados, neste caso as exponenciais amortecidas da solução analítica são aproximadas por expansões em séries de Taylor. Mudanças de variáveis são introduzidas alterando a forma de equação e permitindo aplicação do método dos mínimos quadrados nos três subintervalos.

Na presente pesquisa para estimação de parâmetros de geradores síncronos de polos salientes com o SA e o FSA, observou-se não ser preciso decompor os dados em três subintervalos, como requerido nos outros três métodos, nem foi preciso fazer a linearização como no caso do método dos mínimos quadrados. Os dados foram processados em bloco,

agilizando o processo de cálculo.

É importante frisar que a implementação do SA com as distribuições de Gauss e Cauchy produziram melhores resultados do que usando a distribuição uniforme. Também a combinação do SA ou FSA com o método dos mínimos quadrados produz bons resultados.

A razão é que o SA explora o espaço de busca e encontra uma boa solução nas proximidades do ótimo. Esta solução é usada como inicialização dos mínimos quadrados que refina o resultado obtido, explorando as virtudes dos dois métodos e evitando suas limitações.

O SA apresentou melhor resultado que o método gráfico, que não consegue estimar a reatância subtransitória do eixo em quadratura e tem dificuldades para estimar os demais parâmetros subtransitórios da máquina. Observou-se também que o SA é bem menos sensível à presença de ruídos nos dados do que o método de Prony. Por exemplo, com 5 por cento de ruídos gaussianos nos dados o SA só apresenta dificuldades na estimação dos parâmetros subtransitórios, mesmo assim com erro bem menor que o método de Prony.

Devido aos resultados obtidos para os métodos adotados na pesquisa, espera-se que o trabalho apresentado possa contribuir como uma técnica alternativa e robusta de identificação de parâmetros em geradores síncronos de polos salientes, haja vista ser um equipamento de fundamental importância para a operação do sistema elétrico de potência.

## **PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS**

- Estimacão de parâmetros a partir de dados reais obtidos no ensaio de curto-circuito trifásico brusco.
- Investigao de taxa de amostragem ótima na aquisio de dados.
- Aprofundar a investigao sobre a robustez do método em dados com ruído aditivo e investigar técnicas de processamento que reduzam seu impacto.
- Desenvolvimento de algoritmos combinados mais eficientes.
- Modelagem da máquina no processo de saturao.
- Estimacão de parâmetros usando outros tipos de ensaios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-HAMADI, H. M. and EL-NAGGAR, K. M. Measurement of synchronous machine parameters using Kalman filter based fuzzy logic estimator - **Measurement**, V.43, p.1327-1335, 2010.
- AL-KANDARI, A. M., MADOUH, J. Y., ALKANDARI, B. A., SOLIMAN, S. A. Modeling and Estimation of Synchronous Machine Parameters from Digitized Sudden Short-Circuit Armature Current. **J. Electrical Systems**, V.11, n.2, p.230-248, 2015.
- ALTINO, L. **Máquinas Síncronas: Teoria e Aplicações**. Recife: Editora Universitária UFPE, 1984.
- ANDRADE, B. A. A. **Reconfiguração de Redes de Distribuição Utilizando Simulated Annealing e Busca Tabu**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia elétrica e Computação, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- ARAUJO, H. A. **Algoritmo Simulated Annealing: Uma Nova Abordagem**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BERNAL. L. G. **Método da Têmpera Simulada (Simulated-Annealing)**. 2004. Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- BERNARDES JUNIOR, J. V. **Determinação de parâmetros de Máquina Síncrona através de abertura e fechamento de curto-circuito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- BOLDEA, I. **The Electric Generators Handbook: Synchronous Generators**. Romênia: Taylor & Francis, 2006.
- CARI, E., ALBERTO, L. F.C., BRETAS, N. G. Metodologia prática para estimação de parâmetros de geradores síncronos a partir de medidas de perturbações. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 23, n. 4, p. 453-464, 2012.
- COSTA, F.F., FERNANDES, D.A., ALMEIDA, L.A.L. and NAIDU, S.R. Prony's Method versus FFT for Analyzing Power Converters Signals. **European Conference on Power Electronics and Applications**. Dresden-Germany: [s.n.], 2005.
- COSTA, T. B., TARANTO, G. N., ASSIS, T. M. L. . Estimação das Formas Modais em Sistemas de Energia Elétrica com Sinais Sincronizados. **V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2014**, 2014.
- FAJONI, F. C. **Estudo Sobre Determinação de Parâmetros Elétricos de Geradores Síncronos de Polos Salientes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Campinas, Campinas, 2010.



FARD, R. D. and KARRARI, M. and MALIK, O. P. Synchronous Generator Model Identification for Control Application Using Volterra series, Energy Conversion. **IEEE Transactions on**, Vol. 20, no. 4, pp. 852-858, 2005

FERNANDES, J. L. **Máquina Síncrona em Regime Transitório após Brusco Curto-Circuito no Estator**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2006.

GUO, H. A Fast Algorithm for Simulated Annealing. **Physica Scripta**, v. 1991, n. T38, p. 40, 1991.

IEEE 115. [S.l.]. **Guide for Test Procedures for Synchronous Machines**. 2009.

HAESER, G.; RUGGIERO, M. G. Aspectos Teóricos de Simulated Annealing e um Algoritmo duas Fases em Otimização Global. **Trends in Applied and Computational Mathematics**, v. 9, n. 3, p. 395-404, 2008.

KYRIAKIDES, E. and HEYDT, G. T. and VITTAL, V. On-Line Estimation of Synchronous Generator Parameters Using a Damper Current Observer and a Graphic User Interface - **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 19, no. 3, 2004.

LLERENA, M. T. M. and RUPPERT FILHO, E. Estimation of Synchronous Generators Parameters using Gauss-Newton Methods for Different Models and Operation Conditions. **Intercon**, Puno- Perú, 2010.

METROPOLIS, N. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. **The journal of chemical physics**, AIP, v. 21, n. 6, p. 1087-1092, 1953.

MOTA, W. S. **Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência**. Campina Grande: EPGRAF, 2006.

MOUNI, E.; TNANI, S. and CHAMPENOIS, G. Synchronous Generator Modelling and Parameters Estimation Using Least Squares Method. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Vol. 16, pp. 678-689, 2008.

NAIDU, S.R.; COSTA, F.F. A Novel Technique for Estimating Harmonic and Inter-Harmonic Frequencies in Power System Signals. **European Conference on Circuit Theory and Design**. Vol. 3, p. III/461 - III/464, 2005.

OSBORNE, M. R.; SMYTH, G. K. A modified Prony Algorithm for Exponential Function Fitting. **Siam Journal on Scientific Computing**, v. 16, n. 1, p. 119-138, 1995.

SANTANA, D. M. M.; FERREIRA, N. R.; COSTA F. F.; LIMA, A. C. C. Estimação de Parâmetros Transitórios e Subtransitórios de Geradores Síncronos Utilizando o Algoritmo de Prony. **IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, Goiânia, 2012.

SANTANA, D. M. M.; FERREIRA, N. R.; COSTA, F. F.; LIMA, A. C. C. A Novel Prony Approach for Synchronous Generator Parameter Estimation. **Przeglad Elektrotechniczny**, Vol. 1, pp. 50-54, 2014.

SOLIMAN, S. A. and AL-KANDARI, A. M. Optimal Parameter Estimation of Synchronous Machines From The Digitized Sudden Short-Circuit Armature Current. **IEEE AFRICON 4th**, Vol. 1, p. 188-199, Sep. 1996.

XINGANG, C.; LUMING, J.; XUSHENG, W.; KAISHENG, Y. and ZHIFEI, W. A New Approach to Determine Parameters of Synchronous Machine Using Wavelet Transform and Prony Algorithm. **International Conference on Power System Technology**, Vol. 2, p. 1096-1099, Nov. 2004.

# Anexos

```

%% MINIMOS QUADRADOS utilizando a FUNÇÃO do MATLAB

clear, close all
% Freqüencia de amostragem
fa = ;
Taxa_a = 1/fa;
t = (0:Taxa_a:2)';

% Frenquencia de operacao
f = ; %% HZ
Vm = ;
w0 = 2*pi*f;

% Valores Reais
Xd = ;
Xdlinha = ;
Tdlinha = ;
Xdduaslinha = ;
Tdduaslinha = ;
Xqduaslinha = ;
Ta = ;
lambda = ;

% Vetor parametros
parametros(1) = Xd;
parametros(2) = Xdlinha;
parametros(3) = Xdduaslinha;
parametros(4) = Xqduaslinha;
parametros(5) = Tdlinha;
parametros(6) = Tdduaslinha;
parametros(7) = Ta;
parametros(8) = lambda;

% Corrente medida / Dados do gerador
porcentagemruído = ; % valor de [0,100]
ruído = (porcentagemruído/100)*randn(size(t));
iam = corrente_curto(parametros, t, Vm, w0) + ruído;

% Define a função objetivo para o MMQ
funcao = @(p) (corrente_curto(p,t,Vm,w0) - iam);
% Solucao inicial
inicial = [1 1 1 1 1 1 1 1];
% Define o algoritmo utilizado na funcao
options = optimoptions(@lsqnonlin, 'Algorithm', 'levenberg-
marquardt'); % Levenberg

```

```

% options = optimoptions(@lsqnonlin,'Algorithm','trust-region-
reflective');
% Padrão MMQ

% Executa o MMQ
p_best = lsqnonlin(funcao,inicial,[],[],options);

% Plota um comparativo entre a corrente "medida" e a corrente
com os
% parametros estimados
figure();
iac = corrente_curto(p_best,t,Vm,w0);
plot(t,iac,'.',t,iac)
legend('Corrente Medida', 'Corrente Estimada')
grid

% Calcula o erro dos paramentos em relação aos parametros
reais e plota
erro = abs(parametros - p_best)./parametros;
resultados = [parametros' p_best'];
figure();
bar(resultados)
% Monta uma tabela com os resultados
Parametros = {'Xd'; 'Xd''; 'Xd'''; 'Xq'''; 'Td'''; 'Td''';
'Ta'; 'Lambda'};
Real = parametros';
Estimados = p_best';
Erro = erro*100;
table(Parametros,Real,Estimados,Erro)

```