

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA**

BRUCI DE PAULA CABRERA

**IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS
FUNDAMENTAIS DE GERADORES SÍNCRONOS DE
POLOS SALIENTES A PARTIR DA OPERAÇÃO EM
REGIME PERMANENTE**

Florianópolis

2017

BRUCI DE PAULA CABRERA

**IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS
FUNDAMENTAIS DE GERADORES SÍNCRONOS DE
POLOS SALIENTES A PARTIR DA OPERAÇÃO EM
REGIME PERMANENTE**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elé-
trica para a obtenção do Grau de Mes-
tre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Aguinaldo Silveira e Silva
Universidade Federal de Santa Cata-
rina: Prof. Ph.D.

Florianópolis

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

de Paula Cabrera, Bruci
Identificação dos Parâmetros Fundamentais de
Geradores Síncronos de Polos Salientes a Partir da
Operação em Regime Permanente / Bruci de Paula
Cabrera ; orientador, Aguinaldo Silveira e Silva,
2017.
138 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

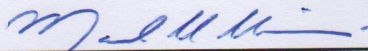
1. Engenharia Elétrica. 2. Identificação de
parâmetros. 3. Geradores síncronos de polos
salientes. 4. Operação em regime permanente. I.
Silveira e Silva, Aguinaldo. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica. III. Título.

BRUCI DE PAULA CABRERA

**IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS
FUNDAMENTAIS DE GERADORES SÍNCRONOS DE
POLOS SALIENTES A PARTIR DA OPERAÇÃO EM
REGIME PERMANENTE**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

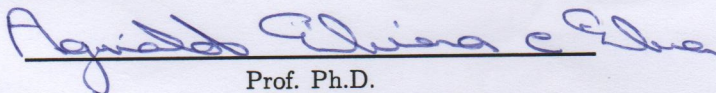
Florianópolis, 29 de setembro 2017.



Prof. Ph.D.

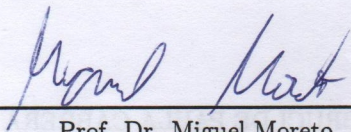
Coordenador: Marcelo Lobo Heldwein
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

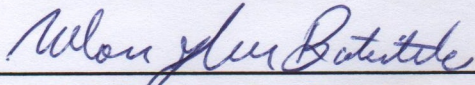


Prof. Ph.D.

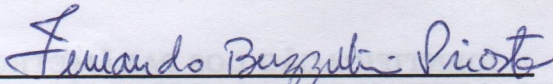
Orientador: Aginaldo Silveira e Silva
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Miguel Moreto
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Fernando Buzzulini Prioste
Universidade do Estado de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais,
Izaura e Quintino, a minha irmã Izabela
e a minha namorada Ana Kamila.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família pelo apoio incondicional em todas as fases da minha vida, inclusive nessa.

Um agradecimento muito especial a minha namorada, Ana Kamila, minha melhor amiga e companheira para todas as horas.

Aos meus grandes amigos, Cassio e Rogério, pela parceria, por serem sempre solícitos para tirar dúvidas e pelas longas noites de estudo.

Ao pessoal do LABSPOT e do LABPLAN pela troca diária de ideias. Ao Luis Otavio, principalmente, que sempre me ajudou quando solicitado.

Agradeço aos professores que tive contato durante meu tempo pela UFSC, que além de transmitir o conhecimento, inspiram os seus alunos. O Prof. Antonio Simões Costa, o Prof. Ildemar Cassana Decker, o Prof. Roberto de Souza Salgado, a Prof. Katia Campos de Almeida, o Prof. Erlon Cristian Finardi e o Prof. Ivo Barbi. Ao meu orientador e professor, Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, pelos incontáveis aprendizados durante a orientação.

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e a AQTech - Engenharia e Instrumentação S. A. pelo suporte financeiro.

“A verdadeira viagem de descobrimento
não consiste em procurar novas paisagens,
e sim em ter novos olhos.”

(Marcel Proust)

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um método de identificação de parâmetros de geradores síncronos de polos salientes utilizando dados sintéticos coletados a partir de um sistema teste operando em regime quase que permanente. Para uma melhor estruturação do método foram desenvolvidos cinco módulos. Cada módulo possui como função principal identificar um conjunto de parâmetros e todos os módulos se complementam. Foram desenvolvidos modelos simplificados para representar a corrente de campo e para representar a tensão de campo do gerador síncrono. Com esses modelos foi possível identificar os parâmetros $R_{s(pu)}$, $L_{q(pu)}$, $L_{d(pu)}$, $L_{ls(pu)}$ e $R_{f(pu)}$. A partir do conhecimento desses parâmetros foi possível desenvolver observadores não convencionais para estimar as correntes de amortecimento, possibilitando identificar os parâmetros $R_{D(pu)}$, $R_{Q(pu)}$, $L_{D(pu)}$, $L_{Q(pu)}$ e $L_{f(pu)}$. Para identificar os parâmetros foi utilizado o método dos mínimos quadrados (linear e não-linear). O método de identificação proposto foi validado pois identificou com baixo erro de estimação todos os parâmetros do gerador síncrono de polos salientes utilizados no sistema teste, com exceção dos parâmetros $R_{Q(pu)}$ e $L_{Q(pu)}$ que apresentaram alto erro de estimação.

Palavras-chave: Identificação de parâmetros. Gerador síncrono de polos salientes. Regime permanente.

ABSTRACT

The present work had the objective of developing and validating a method of identification of parameters of synchronous generators of salient poles using synthetic data collected from a test system operating in almost permanent regime. Five modules were developed for a better structuring of the method. Each module has as main function to identify a set of parameters and all modules complement each other. Simplified models were developed to represent the field current and to represent the field voltage of the synchronous generator. With these models it was possible to identify the parameters $R_{s(pu)}$, $L_{q(pu)}$, $L_{d(pu)}$, $L_{ls(pu)}$, $R_{f(pu)}$. From the knowledge of these parameters it was possible to develop non-conventional observers to estimate the damping currents, making it possible to identify the parameters $R_{D(pu)}$, $R_{Q(pu)}$, $L_{D(pu)}$, $L_{Q(pu)}$ and $L_{f(pu)}$. To identify the parameters, the least squares method (linear and non-linear) was used. The proposed identification method was validated because it identified with low estimation error all the parameters of the synchronous generator of salient poles used in the test system, except for the parameters $R_{Q(pu)}$ and $L_{Q(pu)}$ which presented high estimation error.

Keywords: Parameters identification. Salient pole synchronous generator. Steady state.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama Fasorial de Tensão e Corrente Terminal nos Eixos $d - q$	47
Figura 2	Distâncias verticais dos erros entre os pontos medidos e a curva $f(x; \mathbf{P})$	63
Figura 3	Exemplificação do Algoritmo com um Diagrama de Fluxo.	66
Figura 4	Sinais de Entrada e Saída do Gerador Síncrono.	67
Figura 5	Coleta da Amostra e Discretização do Sinal de Tensão e Corrente de Campo.	67
Figura 6	Coleta das Amostras e Discretização dos Sinais de Tensão e Corrente Instantâneas das Fases a, b e c	68
Figura 7	Transformando os Sinais de Fase em Corrente Terminal, Tensão Terminal, Potência Ativa e Potência Reativa.	68
Figura 8	Módulo 1 - Identificação dos Parâmetros $R_s(pu)$, $L_q(pu)$ e $L_d(pu)$	69
Figura 9	Módulo 2 - Identificação dos Parâmetros $R_f(pu)$ e $L_{ls}(pu)$	70
Figura 10	Módulo 3 - Identificação dos Parâmetros $L_{md}(pu)$, $L_{mq}(pu)$ e Estimação dos Sinais δ , ϕ , i_d , i_q , v_d e v_q	72
Figura 11	Módulo 4 - Identificação do Parâmetro $L_f(pu)$ e Estimação dos Sinais i'_D e i'_Q	73
Figura 12	Módulo 5 - Identificação dos Parâmetros $L_D(pu)$, $R_D(pu)$, $L_Q(pu)$ e $R_Q(pu)$	76
Figura 13	Síntese do Processo de Identificação dos Parâmetros do Gerador Síncrono de Polos Salientes.	78
Figura 14	Erro de Tendência e Espalhamento.	80
Figura 15	Máquina Síncrona de Polos Salientes Conectada a um Barramento Infinito por um Transformador Elevador.	83
Figura 16	Comparativo entre o Modelo da Corrente de Campo (Equação (4.31)) e o Valor Simulado, com Fragmento Ampliado.	86
Figura 17	Comparativo entre o Modelo da Tensão de Campo (Equação (4.33)) e o Valor Simulado, com Fragmento Ampliado.	87
Figura 18	Comparativo entre o Modelo do Ângulo de Carga (Equação (4.27)) e o Valor Simulado, com Fragmento Ampliado.	88
Figura 19	Comparativo entre os Modelos de Corrente de Amortecimento de Eixo em Quadratura (Equação (4.50) - Modelo e Equação	

(4.54) - Observado) e o Valor Simulado, com Fragmento Ampliado.	89
Figura 20 Comparativo entre os Modelos de Corrente de Amortecimento de Eixo Direto (Equação (4.47) - Modelo e Equação (4.53) - Observado) e o Valor Simulado, com Fragmento Ampliado.....	90
Figura 21 Comparativo das Correntes $d - q$ da Amostra 1.....	92
Figura 22 Comparativo das Tensões $d - q$ da Amostra 1.....	93
Figura 23 Ângulo de Carga e Fator de Potência da Amostra 1....	93
Figura 24 Comparativo das Correntes $d - q$ da Amostra 2.....	94
Figura 25 Comparativo das Tensões $d - q$ da Amostra 2.....	95
Figura 26 Ângulo de Carga e Fator de Potência da Amostra 2....	95
Figura 27 Comparativo das Correntes $d - q$ da Amostra 3.....	96
Figura 28 Comparativo das Tensões $d - q$ da Amostra 3.....	96
Figura 29 Ângulo de Carga e Fator de Potência da Amostra 3....	97
Figura 30 Comparativo das Correntes $d - q$ da Amostra 4.....	98
Figura 31 Comparativo das Tensões $d - q$ da Amostra 4.....	98
Figura 32 Ângulo de Carga e Fator de Potência da Amostra 4....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores Mínimos, Máximos e Médios de Geradores Síncronos de Polos Salientes para o Módulo 1.	70
Tabela 2	Valores Mínimos, Máximos e Médios de Geradores Síncronos de Polos Salientes para o Módulo 2.	71
Tabela 3	Valores Mínimos, Máximos e Médios de Geradores Síncronos de Polos Salientes para o Módulo 5.	76
Tabela 4	Intervalo de Tempo das Amostras.	91
Tabela 5	Parâmetros Identificados na Amostra 1.	91
Tabela 6	Parâmetros Identificados na Amostra 2.	93
Tabela 7	Parâmetros Identificados na Amostra 3.	95
Tabela 8	Parâmetros Identificados na Amostra 4.	97
Tabela 9	Parâmetros Identificados.	100
Tabela 10	Análise Estatística.	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PMU	Phasor Measurement Units
SSFR	Standstill Frequency Response
ROCFR	Running Open Circuit Frequency Response
EKF	Filtro de Kalman Estendido
UKF	Filtro de Kalman Unscented
RNA	Redes Neurais Artificiais
GA	Algoritmo Genético
RML	Recursive Maximum Likelihood
OEM	Output Error Estimation
RELS	Recursive Extended Least Squares
RIV	Recursive Instrumental Variable
PEM	Prediction Error Method

LISTA DE SÍMBOLOS

R_s	Resistência de fase do estator
R_f	Resistência de campo
R_D	Resistência do enrolamento amortecedor do eixo direto
R_Q	Resistência do enrolamento amortecido do eixo em quadratura
L_{ls}	Indutância de dispersão do estator
L_d	Indutância própria do estator do eixo direto
L_q	Indutância própria do estator do eixo em quadratura
L_{md}	Indutância de magnetização do eixo direto
L_{mq}	Indutância de magnetização do eixo em quadratura
L_{lf}	Indutância de dispersão do campo
L_{lD}	Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor do eixo direto
L_{lQ}	Indutância de dispersão do enrolamento amortecedor do eixo em quadratura
L_f	Indutância própria do campo
L_D	Indutância própria do enrolamento amortecedor do eixo direto
L_Q	Indutância própria do enrolamento amortecedor do eixo em quadratura
ψ_d	Enlace instantâneo dos fluxos de eixo direto
ψ_q	Enlace instantâneo dos fluxos de eixo em quadratura
ψ_f	Enlace instantâneo dos fluxos do campo
ψ_D	Enlace instantâneo dos fluxos de amortecimento de eixo direto
ψ_Q	Enlace instantâneo dos fluxos de amortecimento de eixo em quadratura
v_d	Tensão instantânea do estator do eixo direto
v_q	Tensão instantânea do estator do eixo em quadratura
v_f	Tensão instantânea do campo
v_d	Tensão instantânea do estator do eixo direto
i_d	Corrente instantânea do estator do eixo direto
i_q	Corrente instantânea do estator do eixo em quadratura
i_f	Corrente instantânea do campo
i_D	Corrente instantânea de amortecimento do eixo direto

i_Q	Corrente instantânea de amortecimento do eixo direto
p	Operador derivada
$\frac{N_s}{N_f}$	Razão de transformação entre o número de espiras do estator e do campo
ω_r	Velocidade síncrona da máquina síncrona
f_n	Frequência nominal
$V_{s(base)}$	Tensão base do estator
$I_{s(base)}$	Corrente base do estator
$Z_{s(base)}$	Impedância base do estator
ω_{base}	Frequência angular base do estator
$L_{s(base)}$	Indutância base do estator
$I_{f(base)}$	Corrente base do campo
$V_{f(base)}$	Tensão base do campo
$Z_{f(base)}$	Impedância base do campo
$L_{f(base)}$	Indutância base do campo
$\hat{i}_{f(nominal)}$	Corrente de campo nominal
V_n	Tensão nominal fase-fase RMS
S_n	Potência trifásica nominal
v_a	Tensão instantânea da fase a
v_b	Tensão instantânea da fase b
v_c	Tensão instantânea da fase c
V_t	Tensão terminal do estator
I_t	Corrente terminal do estator
γ	Ângulo do fasor da barra infinita
θ_0	Velocidade angular do rotor da máquina síncrona
δ	Ângulo de carga
ϕ	Ângulo do fator de potência
P_t	Potência trifásica ativa
Q_t	Potência trifásica reativa
FP	Fator de potência
i_f^{modelo}	Modelo simplificado que representa a corrente de campo
v_f^{modelo}	Modelo simplificado que representa a tensão de campo
Δt	Intervalo de tempo da coleta dos sinais
α	Parâmetro auxiliar do modelo da corrente de amortecimento de eixo direto

β Parâmetro auxiliar do modelo da corrente de amortecimento
de eixo em quadratura

EP Erro percentual

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	29
1.2	OBJETIVOS	31
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2	REVISÃO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE GERADORES SÍNCRONOS 33	
2.1	MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO OFF-LINE	33
2.1.1	Ensaio no Domínio do Tempo	33
2.1.1.1	Ensaio para identificar parâmetros que influenciam no regime permanente	34
2.1.1.2	Ensaio que determinam parâmetros com influência no regime permanente e transitório	35
2.1.2	Ensaio no Domínio da Frequência	36
2.1.2.1	Ensaio estático	36
2.1.2.2	Ensaio dinâmico	36
2.2	MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO ON-LINE	37
2.2.1	Métodos de Identificação Baseados em Modelos de Referência	37
2.2.1.1	Minimização do erro entre sinais medidos e modelados ...	37
2.2.1.2	Utilização de filtro de Kalman	39
2.2.1.3	Auxílio de inteligência artificial	40
2.2.2	Métodos de Identificação Diversos	40
2.3	JUSTIFICATIVA PARA DESENVOLVER UM NOVO MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS ..	42
3	MODELO DO GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES	43
3.1	MODELO COM PARÂMETROS EM UNIDADES FÍSICAS	43
3.2	SISTEMA POR UNIDADE	45
3.2.1	Bases do Estator	45
3.2.2	Bases do Campo	46
3.3	RELAÇÕES FASORIAIS	47
4	MÉTODO PROPOSTO DE IDENTIFICAÇÃO ON-LINE DOS PARÂMETROS DE GERADORES SÍNCRONOS DE POLOS SALIENTES	51
4.1	ANÁLISES E SIMPLIFICAÇÕES NO MODELO DO GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES	51
4.1.1	Formulação do Ângulo de Carga	54

4.1.2	Formulação da Corrente de Campo sem o Ângulo de Carga	55
4.1.3	Formulação da Tensão de Campo sem Ângulo de Carga	55
4.1.4	Síntese das Análises e Simplificações	56
4.2	DESENVOLVIMENTO DOS OBSERVADORES NÃO CONVENCIONAIS DAS CORRENTES DE AMORTECIMENTO	57
4.2.1	Observador Não Convencional a Partir dos Parâmetros $R_{D(pu)}$, $R_{Q(pu)}$, $L_{D(pu)}$, $L_{Q(pu)}$, $L_{md(pu)}$ e $L_{mq(pu)}$.	57
4.2.2	Observador Não Convencional a Partir dos Parâmetros $R_{s(pu)}$, $L_{q(pu)}$, $L_{d(pu)}$ e $L_{ls(pu)}$	60
4.2.3	Síntese do Desenvolvimento dos Observadores Não Convencionais das Correntes de Amortecimento...	61
4.3	MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS NÃO LINEAR CONVENCIONAL COM RESTRIÇÕES - MMQNL	61
4.3.1	Solução do Problema de Otimização Não Linear ..	63
4.4	MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS LINEAR CONVENCIONAL - MMQL	64
4.4.1	Solução do Problema de Otimização Linear	65
4.5	VISÃO GERAL DO MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂ-METROS	65
4.6	DETALHES DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS	66
4.6.1	Definição do Módulo 1	69
4.6.2	Definição do Módulo 2	70
4.6.3	Definição do Módulo 3	72
4.6.4	Definição do Módulo 4	73
4.6.5	Definição do Módulo 5	75
4.6.6	Síntese do Processo de Identificação dos Parâmetros do Gerador Síncrono de Polos Salientes	78
4.6.7	Análise do Erro de Estimção e Análise Estatística	78
5	RESULTADOS	83
5.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE	83
5.1.1	Parâmetros da Máquina Síncrona e Bases para Simulação	84
5.2	AVALIAÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS	85
5.2.1	Análise Quantitativa dos Erros	85
5.2.2	Comparativo entre Corrente de Campo Simulada e Calculada	85
5.2.3	Comparativo entre Tensão de Campo Simulada e Calculada	87

5.2.4	Comparativo entre Ângulo de Carga Simulado e Calculado	88
5.2.5	Comparativo entre os Observadores Não Convencionais das Correntes de Amortecimento	88
5.3	IDENTIFICAÇÃO UTILIZANDO DADOS SINTÉTICOS NO SISTEMA TESTE.....	90
5.3.1	Identificação dos Parâmetros Utilizando a Amostra 1	91
5.3.2	Estimação dos Sinais da Amostra 1	92
5.3.3	Identificação dos Parâmetros Utilizando a Amostra 2	93
5.3.4	Estimação dos Sinais da Amostra 2	94
5.3.5	Identificação dos Parâmetros Utilizando a Amostra 3	95
5.3.6	Estimação dos Sinais da Amostra 3	96
5.3.7	Identificação dos Parâmetros Utilizando a Amostra 4	97
5.3.8	Estimação dos Sinais da Amostra 4	97
5.3.9	Síntese do Processo de Identificação dos Parâmetros Utilizando as Amostras 1, 2, 3 e 4.....	99
5.3.10	Análise Estatística dos Parâmetros Estimados.....	99
6	CONCLUSÃO	103
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
6.2	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	103
	REFERÊNCIAS	105
	APÊNDICE A – PONTOS INTERIORES PRIMAL-DUAL	117
	APÊNDICE B – DERIVADAS DAS EQUAÇÕES DOS MÓDULOS QUE APLICAM O MMQNL ..	125
	APÊNDICE C – RELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS FUNDAMENTAIS E PADRÃO	135

1 INTRODUÇÃO

As máquinas síncronas começaram a ser utilizadas e documentadas no início de 1900 (CARVALHO, 2011). Devido ao grande potencial de transformar energia mecânica em energia elétrica com um alto rendimento, tais equipamentos, denominados aqui de geradores síncronos, tornaram-se fundamentais aos sistemas de potência (CARVALHO, 2011). Para fins de estudo, era necessário modelar matematicamente os aspectos construtivos da máquina síncrona, ou seja, definir parâmetros que refletem o comportamento real destes equipamentos de forma eficiente. Assim, em 1929, foi apresentado o “Modelo de Park” (PARK, 1929). Quando concebido, este modelo foi consagrado como um dos métodos mais práticos para modelagem de máquinas em condições ideais (PARK, 1929, 1933). Ao longo dos anos, o “Modelo de Park” foi amplamente estudado e atualmente é utilizado tanto para estudos em regime permanente quanto para estudos de comportamento dinâmico (DINELEY; MORRIS, 1973; DANDENO; HAUTH; SCHULZ, 1973; DANDENO; KUNDUR; SCHULZ, 1974).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Devido à grande ocorrência de geradores síncronos em um sistema de potência, deve-se identificar os parâmetros que descrevem de forma satisfatória o comportamento desses, assegurando a modelagem correta nos estudos de desempenho dos sistemas de potência (CARVALHO, 2011).

Ao ser instalado para operação comercial, é necessário realizar testes no gerador síncrono que comprovem a integridade dos principais componentes que formam a estrutura da máquina. Dessa maneira, é possível determinar se os parâmetros fornecidos pela empresa que desenvolveu a máquina estão corretos. Estes testes são chamados de Ensaios de Comissionamento e são realizados seguindo normas e diretrizes específicas de cada empresa (MACHADO, 2008).

Com o passar do tempo, os parâmetros de um gerador síncrono, determinados nos Ensaios de Comissionamento, tornam-se imprecisos se não houver acompanhamento. Tal fato decorre do desgaste natural do equipamento ao longo da sua vida útil (RODRÍGUEZ, 2015). Dessa forma, ensaios periódicos, envolvendo a parada da máquina ou não, são necessários para manter os parâmetros atualizados e detectar faltas

incipientes¹(FREITAS et al., 2016b, 2016a).

Tradicionalmente, os parâmetros dos geradores síncronos são determinados através de métodos de identificação off-line. O padrão IEEE Std 115-2009 (2010) sugere uma variedade de testes off-line, mecânicos e elétricos, para capturar as características e comportamentos fundamentais de uma determinada máquina. Essas características e comportamentos são descritos na forma de parâmetros e podem ser usados para desenvolver e compreender modelos de máquinas que refletem com precisão seu desempenho. Para realizar tais testes, é necessário que a máquina seja removida de serviço, resultando em perdas econômicas devido ao tempo de inatividade, despesas de mão-de-obra, et cetera. Essas perdas podem ser mitigadas pela implementação de métodos de identificação on-line. Historicamente, diferentes abordagens foram tomadas para desenvolver métodos de cálculo dos parâmetros de uma máquina sem retirá-la de serviço (KYRIAKIDES, 2003). Com a utilização de dados de entrada e saída de uma máquina combinados com um algoritmo numérico, os parâmetros de uma máquina podem ser determinados (KYRIAKIDES; HEYDT; VITTAL, 2004).

Diversos métodos de identificação de parâmetros são propostos na literatura, cada um com suas vantagens e desvantagens para aplicação em sistemas reais (FREITAS et al., 2016b). Entretanto, poucos são adequados para realizar a identificação de parâmetros do gerador em operação (FREITAS et al., 2016a, 2016b).

Avanços tecnológicos recentes, datados de 1980, permitiram que a identificação on-line de parâmetros a partir da observação de sinais coletados, sem a necessidade de desconectar equipamentos da empresa geradora, se tornasse um campo de estudo em ascensão (FREITAS et al., 2016b). A fim de obter máximo desempenho na geração, o paradigma atual obriga as plantas geradoras a possuírem sistemas supervisórios para avaliar e melhorar constantemente o desempenho de seus sistemas de geração de energia elétrica a partir da coleta, armazenamento e observação de uma grande quantidade de sinais (FERREIRA et al., 2015).

Em decorrência do atual cenário do setor elétrico em conjunto com os avanços tecnológicos, propõe-se, aqui, um método de identificação on-line de parâmetros de geradores síncronos, com estes funcionando em regime quase que permanente, com variações lentas de carga e pequenas perturbações naturais intrínsecas aos sistemas de potência. O método foi avaliado a partir dos softwares MATLAB e Simulink, com

¹Pequenas faltas que vão gradativamente evoluindo para faltas mais graves (MANDERS et al., 2000)

o auxílio do *Toolbox* SimPowerSystems (MATHWORKS, 2013).

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa são:

- Desenvolver um método de identificação on-line dos parâmetros do gerador síncrono utilizando medições de fácil acesso (tensões e correntes);
- Validar com dados sintéticos o método de identificação on-line dos parâmetros do gerador síncrono.

Para atingir os objetivos, os seguintes passos foram seguidos:

- Realizar um levantamento bibliográfico dos métodos de identificação de parâmetros de geradores síncronos;
- Compreender métodos numéricos para determinar com precisão os parâmetros do modelo do gerador síncrono com base em dados de entrada e saída da máquina;
- Desenvolver formulações matemáticas baseadas no “Modelo de Park” que utilizem medições de fácil acesso para a identificação de parâmetros;
- Aplicar métodos numéricos capazes de realizar a identificação on-line dos parâmetros do gerador síncrono a partir de sinais de entrada e saída;
- Realizar uma abordagem estatística, pois o modelo matemático é apenas uma representação aproximada do sistema real, e o método desenvolvido deve ser robusto e capaz de aproximar os parâmetros identificados aos valores que mais se aproximem dos valores verdadeiros.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação é dividida em 6 capítulos. Discorre-se no Capítulo 2 sobre os métodos de identificação on-line e off-line de máquinas síncronas presentes na literatura. No Capítulo 3 é apresentada a modelagem da máquina síncrona utilizada como base para desenvolver o método proposto. Descreve-se, no Capítulo 4, o desenvolvimento do método de identificação on-line, analisa-se o conceito de observadores não convencionais e são abordadas noções de estatística. No Capítulo 5 são apresentados os resultados dos observadores não convencionais e o resultado

do método de identificação proposto. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Os Apêndices A e B são utilizados para abordar os métodos numéricos envolvidos no processo de otimização não linear utilizado. O Apêndice C é utilizado para desenvolver um formulário e complementar os tipos de parâmetros utilizados em geradores síncronos.

2 REVISÃO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE GERADORES SÍNCRONOS

Os métodos de identificação de parâmetros encontrados na literatura são classificados aqui como métodos de identificação off-line ou on-line. Nos métodos off-line, as medidas são obtidas com o gerador submetido a uma condição especial de operação e a máquina deve estar desconectada da rede elétrica, resultando em interrupção de geração. Nos métodos on-line, as medidas dos sinais de entrada e saída do gerador, em operação normal ou em condições específicas, são empregadas. Dentro do campo de pesquisa dos métodos on-line existe, também, a abordagem por *Phasor Measurement Units* (PMUs) . Estes são equipamentos robustos de medição, capazes de medir fasores.

Verifica-se uma série de nomenclaturas diferentes para os parâmetros dos geradores. Isto ocorre, pois dependendo de quais sinais que se deseja observar, a máquina é modelada de acordo com os parâmetros fundamentais¹ ou padrão. Salienta-se que os parâmetros padrão surgem após uma série de manipulações algébricas dos parâmetros fundamentais (KUNDUR, 1994). As equações de transformações entre estas grandezas são apresentadas no Apêndice C.

2.1 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO OFF-LINE

Os parâmetros determinados a partir dos métodos de identificação off-line são obtidos a partir de ensaios. Para uma melhor visualização, os métodos de identificação off-line são separados em ensaios no domínio do tempo e ensaios no domínio da frequência.

2.1.1 Ensaios no Domínio do Tempo

Estes ensaios podem ser divididos em duas categorias básicas: os ensaios que fornecem informações sobre os parâmetros que influenciam no regime permanente e os ensaios que fornecem os parâmetros que têm influência tanto no regime permanente quanto no regime transitório (IEEE Std 115-2009, 2010).

As técnicas aplicadas nos ensaios no domínio do tempo apresentam métodos de cálculo muito bem definidos e de fácil execução (IEEE

¹Também chamado de parâmetros básicos ou construtivos (KUNDUR, 1994)

Std 115-2009, 2010). Para estas técnicas, a complexidade matemática envolvida no tratamento dos sinais medidos é baixa, normalmente são necessárias apenas algumas operações algébricas para determinar os parâmetros.

2.1.1.1 Ensaios para identificar parâmetros que influenciam no regime permanente

- **Ensaio de Saturação em Circuito Aberto e de Curto-Circuito:** para realizar o ensaio de saturação em circuito aberto é necessário acionar o gerador na velocidade síncrona (sem carga), aumentar a corrente de campo e coletar os valores de tensão do estator em circuito aberto. O ensaio de curto-circuito é feito com os terminais do estator curto circuitados (o gerador deve operar na velocidade síncrona) e a corrente de campo é aumentada até que o valor da corrente do estator atinja o valor nominal. A combinação dos ensaios de saturação em circuito aberto e curto-circuito fornece o valor das reatâncias síncronas de eixo direto saturada e não saturada (KUNDUR, 1994; IEEE Std 115-2009, 2010);
- **Ensaio de Baixo Escorregamento:** o básico deste ensaio é acionar o gerador síncrono a uma velocidade diferente da síncrona. Para realizar este ensaio os enrolamentos de campo devem estar em circuito aberto e uma fonte variável trifásica externa deve ser conectada aos terminais do gerador. A partir deste ensaio é possível identificar as reatâncias de eixo direto e em quadratura (IEEE Std 115-2009, 2010);
- **Outros Ensaios:** o ensaio da máxima corrente indutiva determina a reatância síncrona de eixo em quadratura. Este ensaio consiste em acionar a máquina síncrona como motor operando sem carga, com tensão terminal nominal, desexcitando o enrolamento de campo gradativamente até que a máquina opere como motor de relutância (corrente de campo nula). Também é possível calcular o valor da reatância de eixo em quadratura medindo as tensões e correntes do estator em conjunto com o ângulo de carga (IEEE Std 115-2009, 2010).

2.1.1.2 Ensaios que determinam parâmetros com influência no regime permanente e transitório

- **Ensaio de Curto-Circuito Trifásico Abrupto:** consiste em aplicar um curto-circuito de maneira abrupta nos enrolamentos do estator quando a máquina está sem carga. Este ensaio permite que os parâmetros de eixo direto da máquina síncrona sejam identificados (HALLINGSTAD, 1980; MOUNI; TNANI; CHAMPENOIS, 2008; IEEE Std 115-2009, 2010; BRKOVIC; PETROVIC; VASIC, 2015);
- **Ensaio de Recuperação de Tensão:** este ensaio é uma alternativa ao ensaio de curto-circuito abrupto. Ou seja, são utilizadas técnicas de análise análogas às aplicadas no ensaio de curto-circuito trifásico abrupto. Mas, neste caso, analisa-se o comportamento transitório do reestabelecimento da tensão. Novamente, só se obtém informações dos parâmetros de eixo direto da máquina (IEEE Std 115-2009, 2010);
- **Ensaio de Rejeição de Carga:** este ensaio é realizado no comissionamento do gerador síncrono. A partir dele, verifica-se se há um equilíbrio na velocidade de fechamento do distribuidor quando a máquina tende à sobrevelocidade com mudanças repentinas de carga (MACHADO, 2008; RODRÍGUEZ; SILVA; ZENI, 2017). Existem métodos que identificam todos os parâmetros a partir de sinais adquiridos durante este tipo de ensaio (RODRÍGUEZ, 2015; RODRÍGUEZ; SILVA; ZENI, 2017);
- **Outros Ensaios:** os ensaios no domínio do tempo que determinam os parâmetros que têm influência no regime transitório impõe a necessidade da máquina operar a vazio, ou seja, ângulo de carga nulo, não permitindo obter informações sobre o eixo em quadratura da máquina. Para determinar as reatâncias transitórias e subtransitórias do eixo em quadratura devem ser realizados testes mais complexos, porém, de difícil implementação. Estes testes exigem a realização de ensaios dinâmicos sob carga, com monitoramento em tempo real do ângulo de carga e aplicação de curto-circuito abrupto em instantes de tempo adequados (IEEE Std 115-2009, 2010).

Verificando as dificuldades apresentadas nos ensaios do domínio do tempo, principalmente para obter informações sobre o eixo em quadratura, os testes de resposta em frequência, atualmente, apresentam uma alternativa relativamente simples para obtenção de todos os parâmetros de uma máquina síncrona, tanto no eixo direto quanto no

eixo em quadratura. Estes ensaios são descritos na sequência.

2.1.2 Ensaios no Domínio da Frequência

Pode-se dizer que os ensaios no domínio da frequência possuem uma complexidade matemática maior na implementação, pois é necessário utilizar ferramentas matemáticas que requerem um alto nível computacional. Porém, devido à evolução das tecnologias de processamento digital nas últimas décadas, a aplicação de tais técnicas não é uma barreira (IEEE Std 115-2009, 2010).

Existem vantagens nos ensaios no domínio da frequência em relação aos ensaios tradicionais no domínio do tempo. A principal vantagem é a realização de testes com sinais de baixa potência. Esses não levam a máquina às condições extremas de operação que prejudicam os seus componentes momentaneamente, como ocorre nos ensaios de curto-circuito trifásico abrupto (IEEE Std 115-2009, 2010).

Outra característica que vale destaque é a possibilidade de obter diversos parâmetros simultaneamente, tanto no eixo direto quanto no eixo em quadratura (KUNDUR, 1994; IEEE Std 115-2009, 2010).

2.1.2.1 Ensaios estáticos

Existem os ensaios chamados de *Standstill Frequency Response* (SSFR). Esses coletam dados com a máquina síncrona parada, variando-se a frequência da tensão aplicada ao gerador (COULTES; WATSON, 1981; HURLEY; SCHWENK, 1981; HASNI et al., 2007; OTEAFY; CHIASSON; AHMED-ZAID, 2016). A partir deste ensaio é possível obter os valores das reatâncias nos regimes permanente e transitório analisando as funções de transferência da máquina síncrona (KUNDUR, 1994; BORTONI; JARDINI, 2004; HASNI et al., 2007; IEEE Std 115-2009, 2010).

2.1.2.2 Ensaios dinâmicos

Incluem-se na categoria de ensaios dinâmicos os ensaios que a máquina síncrona opera em circuito aberto (máquina operando sem carga), denominados *Running Open Circuit Frequency Response* (ROCFR). Neste ensaio, a resposta do gerador no domínio da frequência é verificada quando se varia a tensão de excitação (MINNICH, 1986; KUNDUR, 1994). Este ensaio agrega informações em relação ao SSFR,

pois permite verificar as influências que a rotação da máquina traz aos parâmetros identificados (KUNDUR, 1994).

2.2 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO ON-LINE

Existe uma variedade de métodos de identificação on-line na literatura que determinam os parâmetros de geradores síncronos sem a necessidade de desconectá-los dos sistemas de potência.

A maioria destes métodos dependem de perturbações externas. Apenas alguns partem do pressuposto que a máquina opera em regime quase que permanente. E a maioria dos métodos necessita do conhecimento do ângulo de carga.

2.2.1 Métodos de Identificação Baseados em Modelos de Referência

Os métodos de identificação baseados em modelos de referência usam um modelo matemático do sistema que se deseja identificar.

2.2.1.1 Minimização do erro entre sinais medidos e modelados

Uma variedade de métodos que utilizam a comparação entre sinais medidos e modelados são observados na literatura. Algumas contribuições e particularidades de cada método são verificadas na sequência.

A identificação dos parâmetros de um gerador síncrono pode ser realizada utilizando o método dos mínimos quadrados linear (KYRIAKIDES; HEYDT, 2001; KYRIAKIDES, 2003; KYRIAKIDES; HEYDT; VITTAL, 2004; KYRIAKIDES; HEYDT, 2004; RADMANESH; SHAKOURI; NAZARZADEH, 2007; SAIED et al., 2007, 2008; AHMADI; KARRARI; MALIK, 2015) ou não linear (BURTH; VERGHESE; VELEZ-REYES, 1999; GHAREMANI; KARRARI; MALIK, 2008). Isso é possível partindo do pressuposto de que existe um modelo para os sinais que são medidos.

Existem métodos de identificação que partem do pressuposto que não há conhecimento do ângulo de carga (GHAREMANI; KARRARI; MALIK, 2008). Então, propõe-se um método para estimá-lo (GHAREMANI et al., 2008). No entanto, para utilizar este método, é necessário conhecer a indutância de dispersão do estator.

Caso seja possível obter a medição do ângulo de carga, possibilita-

se identificar os parâmetros de um gerador aplicando o método dos mínimos quadrados linear. Para isso, as equações diferenciais do modelo do gerador síncrono são aproximadas por equações algébricas (KYRIAKIDES, 2003) e utilizam-se observadores não convencionais para as correntes de amortecimento (KYRIAKIDES; HEYDT, 2001; KYRIAKIDES; HEYDT; VITTAL, 2004; KYRIAKIDES; HEYDT, 2004).

Se as funções que descrevem a máquina do domínio do tempo forem alteradas para o domínio da frequência é possível lidar com os ruídos (RADMANESH; SHAKOURI; NAZARZADEH, 2007).

As correntes de amortecimento são grandezas não mensuráveis (KYRIAKIDES; HEYDT; VITTAL, 2004). Pode-se eliminar a necessidade de medir estas correntes realizando-se uma série de manipulações algébricas que tornam possível introduzir as equações que calculam estas correntes nas equações do estator decompostas nos eixos $d - q$ (SAIED et al., 2007, 2008).

Em alguns métodos é utilizado o modelo de resposta incremental da máquina síncrona, que considera as dinâmicas transitórias e sub-transitórias para pequenas perturbações para identificar os parâmetros padrão (ZHAO et al., 1995; BURTH; VERGHESE; VELEZ-REYES, 1999). Em outros métodos é utilizado o modelo de Heffron-Phillips (HEFFRON; PHILLIPS, 1952) com equações algébricas modificadas no tempo discreto (AHMADI; KARRARI; MALIK, 2015).

Existem métodos que propõe um algoritmo recursivo de mínimos quadrados (*Generalized Least Squares*). Este tipo de método utiliza sinais de entrada e saída, incluindo um observador adaptativo que estima sinais não mensuráveis (correntes de amortecimento) para identificar os parâmetros de um gerador síncrono de polos lisos (KEYHANI; MIRI, 1986).

Pode-se identificar alguns parâmetros de um gerador síncrono de polos lisos da seguinte maneira: aplica-se o método dos mínimos quadrados não linear para encontrar a reatância transitória de eixo direto com os sinais interceptados por uma PMU. Feito isso, encontra-se o ângulo de carga a partir da relação fasorial entre tensão de campo e tensão terminal. Por fim, identifica-se a constante de inércia do gerador com o método dos mínimos quadrados linear (WEHBE; FAN; MIAO, 2012).

Existem métodos que tornam possível identificar a reatância de eixo em quadratura de um gerador de polos lisos a partir de registros dos fasores de tensão e corrente coletados via PMU. Para isso, utiliza-se uma variação do método dos mínimos quadrados recursivo (XUE et al., 2013; ZIHUA et al., 2015).

Alguns métodos consistem em converter as equações que descrevem o comportamento dinâmico do gerador síncrono do tempo contínuo para o tempo discreto utilizando o método ZOH e o método de Tustin. A partir dos modelos obtidos no tempo discreto, utiliza-se o método dos mínimos quadrados para identificar os parâmetros com dados obtidos de PMUs (MOGHARBEL; FAN; MIAO, 2015).

Existe um método para validar modelos de geradores síncronos baseado em sinais de PMUs adquiridos durante perturbações no sistema elétrico. Este utiliza o método dos mínimos quadrados estendido para corrigir parâmetros identificados que possuem estimativas não muito confiáveis. O método foi testado com dados reais e apresentou resultados que melhoram a coerência dos modelos (GOMEZ; DECKER, 2015).

Finalmente, identificam-se parâmetros de geradores síncronos de polos lisos com base no método dos mínimos quadrados recursivo. Para utilizá-lo é necessário encontrar uma função de transferência utilizando as equações de tensões e fluxos instantâneos decompostas nos eixos $d-q$ (HUANG; ZHANG, 2016).

2.2.1.2 Utilização de filtro de Kalman

Existem métodos de identificação que utilizam o filtro de Kalman linear em conjunto com PMUs. Para aplicar este tipo de método, é fundamental coletar os sinais durante uma grande perturbação (por exemplo: curto-circuito trifásico próximo ao gerador). Os parâmetros são identificados com o auxílio de observadores não convencionais das correntes de amortecimento (LIN et al., 2010).

O filtro de Kalman estendido (EKF) é utilizado para estimar o ângulo do rotor de um gerador síncrono de polos lisos a partir do conhecimento da velocidade do rotor. Além disso, este método identifica todos os parâmetros fundamentais (FALLAH; ASIABAN, 2012).

Pode-se utilizar o filtro de Kalman *Unscented* (UKF) nas seguintes aplicações: caso o ângulo de carga seja conhecido é possível identificar os parâmetros fundamentais dos geradores síncronos de polos lisos, incluindo a identificação dos parâmetros sujeitos à saturação (VALVERDE et al., 2011a, 2011b) e, caso tenha disponibilidade de adquirir medições via PMUs, torna-se possível identificar o ângulo de carga, a reatância de eixo em quadratura, a constante de inércia, o amortecimento do sistema, a potência mecânica, os parâmetros relacionados ao controle da turbina e os parâmetros dos controles de frequência primário e secundário (WEHBE; FAN; MIAO, 2012; AGHAMOLKI, 2016;

CHOWDHURY; SENROY, 2016).

2.2.1.3 Auxílio de inteligência artificial

Nesta seção são relatados métodos de identificação que utilizam Redes Neurais Artificiais (RNAs) (TSAI et al., 1995b; PILLUTLA; KEYHANI; KAMWA, 1999; KARAYAKA et al., 2000, 2003) e Algoritmo Genético (GA) (HUANG; CORZINE; BELKHAYAT, 2009; BERHAUSEN; PASZEK, 2016). Todos os métodos apresentados aqui necessitam do ângulo de carga e de perturbações externas.

São conhecidas duas formas de utilizar as RNAs: captar o comportamento não linear das indutâncias de magnetização quando estas estão em zonas de saturação da máquina síncrona (TSAI et al., 1995b; KARAYAKA et al., 2000, 2003) e observar as correntes de amortecimento (grandezas não mensuráveis) a partir do mapeamento de entradas e saídas mensuráveis (PILLUTLA; KEYHANI; KAMWA, 1999).

As RNAs devem ser associadas com outros métodos numéricos para identificar todos os parâmetros de um gerador síncrono. Por exemplo, necessita-se do método *Recursive Maximum Likelihood* (RML) para identificar os parâmetros do estator (utiliza-se RNAs para corrigir os) e então aplica-se a técnica *Output Error Estimation* (OEM) para determinar os parâmetros do rotor (KARAYAKA et al., 1999a, 1999b, 2000, 2003).

Existe também a possibilidade de aplicar o método RML para identificar os parâmetros do estator (utiliza-se RNAs para corrigir estes parâmetros, caso estejam em zonas de saturação) e determinar os parâmetros do rotor, utilizando as correntes de amortecimento observadas por RNAs. (TSAI et al., 1995a, 1995b; PILLUTLA; KEYHANI; KAMWA, 1999).

Para finalizar, têm-se métodos de inteligência artificial que utilizam GA para identificar os parâmetros fundamentais (HUANG; CORZINE; BELKHAYAT, 2009) e existem métodos de identificação de parâmetros que utilizam algoritmos híbridos, que consiste em utilizar GA com o método do gradiente (BERHAUSEN; PASZEK, 2016).

2.2.2 Métodos de Identificação Diversos

Alguns métodos utilizam o modelo de Heffron-Phillips (HEFFRON; PHILLIPS, 1952), com perturbações significativas no sistema de

excitação, para identificar alguns parâmetros padrão de geradores síncronos de polos lisos. Para isso, aplicam-se técnicas de identificação por subespaço, *Recursive Extended Least Squares* (RELS) , *Recursive Instrumental Variable* (RIV) e *Prediction Error Method* (PEM) (KARRARI; MALIK, 2004a, 2004b).

No modelo de Heffron-Phillips também são analisadas estruturas para identificar os parâmetros do gerador no tempo contínuo e discreto. Os modelos discretos apresentaram maiores erros na identificação. A aplicação do método dos momentos de Poisson no tempo contínuo em simulações se provou mais efetivo que no tempo discreto (GALLEHDARI; DEGHANI; NIKRAVESH, 2014).

Pode-se identificar on-line os parâmetros de um gerador ao coletar sinais durante uma perturbação em um sistema de potência real que faz o regulador de tensão atuar significativamente. Para isso, utiliza-se o método dos elementos finitos para obter o comportamento dinâmico dos sinais nos eixos $d-q$. A identificação é realizada aplicando o método do gradiente (BERHAUSEN; PASZEK, 2015).

Existem métodos para estimar os parâmetros padrão a partir de sinais coletados durante uma falta trifásica na linha em um ponto do sistema elétrico próximo ao gerador, quando este se encontra em operação. Tais propostas consistem em aplicar um método baseado na análise de sensibilidade de trajetória. Para utilizar este método são necessárias medições simples (correntes, tensões e velocidade do rotor) (CARI; ALBERTO; BRETAS, 2006, 2009, 2012; LANDGRAF; CARI; ALBERTO, 2016; CARI; LANDGRAF; ALBERTO, 2017).

Existe um método gráfico que utiliza as equações de potência ativa e reativa obtidas pela curva de capacidade da máquina síncrona capaz de identificar o ângulo de carga e a indutância de eixo em quadratura simultaneamente (BORTONI; ARAUJO; JARDINI, 2016).

Por último, é possível utilizar o método LASSO de regressão não linear com algumas modificações para estimar os sinais nos eixos $d-q$ e identificar os parâmetros fundamentais de geradores síncronos de polos lisos ou salientes. O processo de identificação é melhorado se alguns parâmetros forem fixados com valores já conhecidos (RASOULI; LAGOA, 2017).

2.3 JUSTIFICATIVA PARA DESENVOLVER UM NOVO MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

Os critérios utilizados nesta dissertação para definir bons métodos de identificação de parâmetros foram: método de identificação on-line; utilização de dados de entrada e saída em regime quase que permanente; equipamento de medição simples para coleta de sinais elétricos (necessita medir apenas tensões e correntes). Observou-se na literatura um número muito reduzido de pesquisas que preenchem tais critérios.

Nota-se que há uma quantidade reduzida de métodos on-line que utilizam medidas simples e em regime quase que permanente. O método em que se observa tais características necessita de uma grande perturbação externa (CARI; LANDGRAF; ALBERTO, 2017).

Outro ponto a ser observado são os métodos que utilizam dados em regime quase que permanente, sem perturbação externa, mas que necessitam do ângulo de carga (KEYHANI; MIRI, 1986; VALVERDE et al., 2011a, 2011b).

Notam-se métodos que não necessitam de perturbações externas, mas utilizam dados coletados por PMUs (CHOWDHURY; SENROY, 2016; AGHAMOLKI, 2016). Também é constatado que alguns procedimentos partem do princípio que existe conhecimento prévio de alguns parâmetros (KYRIAKIDES; HEYDT; VITTAL, 2004; GHAREMANI; KAR-RARI; MALIK, 2008; GHAREMANI et al., 2008).

Com o levantamento bibliográfico, nota-se que a identificação dos parâmetros de geradores síncronos é um assunto de interesse para a engenharia elétrica e é amplamente estudado, seja em métodos de identificação off-line ou on-line. A partir da análise de algumas deficiências nos métodos presentes na literatura, propõe-se aqui um método novo, que necessita apenas de medidas simples (tensões e correntes) coletadas em regime quase que permanente e sem necessidade do conhecimento prévio dos parâmetros.

O método de identificação de parâmetros proposto nesta dissertação tem como principal requisito conhecer o modelo que se deseja identificar. Então, na sequência é apresentada a modelagem do gerador síncrono de polos salientes como ponto de partida para iniciar o desenvolvimento do método.

3 MODELO DO GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES

O modelo do gerador síncrono de polos salientes utilizado é expresso no domínio do tempo e descrito em termos dos parâmetros fundamentais que fazem referência às características elétricas e construtivas representadas nas resistências e indutâncias referidas nos eixos direto e em quadratura (KUNDUR, 1994; KRAUSE et al., 2002; ANDERSON; FOUAD, 2003).

3.1 MODELO COM PARÂMETROS EM UNIDADES FÍSICAS

O desenvolvimento do modelo com parâmetros em unidades físicas é baseado na reflexão das quantidades do rotor no estator; as seguintes nomenclaturas são definidas (ANDERSON; FOUAD, 2003; MATHWORKS, 2017):

- N : número de espiras;
- s : quantidades referentes ao estator;
- D : quantidades referentes ao enrolamento amortecedor de eixo direto;
- Q : quantidades referentes ao enrolamento amortecedor de eixo em quadratura;
- f : quantidades referentes ao campo.

Na sequência estão as equações desenvolvidas para referenciar as quantidades elétricas do rotor no estator (KRAUSE et al., 2002):

$$i'_j = \left(\frac{2}{3}\right) \left(\frac{N_j}{N_s}\right) i_j \quad (3.1)$$

$$v'_j = \left(\frac{N_s}{N_j}\right) v_j \quad (3.2)$$

$$\psi'_j = \left(\frac{N_s}{N_j}\right) \psi_j \quad (3.3)$$

Define-se i , v e ψ como correntes instantâneas, tensões instantâneas e enlace instantâneo dos fluxos, respectivamente.

Para referenciar os parâmetros fundamentais do rotor no estator, têm-se as seguintes equações (KRAUSE et al., 2002):

$$R'_j = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{N_s}{N_j}\right)^2 R_j \quad (3.4)$$

$$L'_{lj} = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{N_s}{N_j}\right)^2 L_{lj} \quad (3.5)$$

Define-se R e L como resistência e indutância, respectivamente. O subscrito l indica dispersão e j pode ser D , Q ou f . O sobrescrito ($'$) identifica as quantidades do rotor que estão refletidas no estator (KRAUSE et al., 2002).

As equações que determinam o comportamento dinâmico do gerador síncrono de polos salientes são apresentadas na sequência.

$$v_d(t) = -R_s i_d(t) + p\psi_d(t) - \omega_r \psi_q(t) \quad (3.6)$$

$$v_q(t) = -R_s i_q(t) + p\psi_q(t) + \omega_r \psi_d(t) \quad (3.7)$$

$$\psi_d(t) = -L_d i_d(t) + L_{md} \left(i'_f(t) + i'_D(t) \right) \quad (3.8)$$

$$\psi_q(t) = -L_q i_q(t) + L_{mq} i'_Q(t) \quad (3.9)$$

$$v'_f(t) = R'_f i'_f(t) + p\psi'_f(t) \quad (3.10)$$

$$v'_D(t) = R'_D i'_D(t) + p\psi'_D(t) = 0 \quad (3.11)$$

$$v'_Q(t) = R'_Q i'_Q(t) + p\psi'_Q(t) = 0 \quad (3.12)$$

$$\psi'_f(t) = \left(L_{md} + L'_{lf} \right) i'_f(t) + L_{md} \left(i'_D(t) - i_d(t) \right) \quad (3.13)$$

$$\psi'_D(t) = \left(L_{md} + L'_{lD} \right) i'_D(t) + L_{md} \left(i'_f(t) - i_d(t) \right) \quad (3.14)$$

$$\psi'_Q(t) = \left(L_{mq} + L'_{lQ} \right) i'_Q(t) - L_{mq} i_q(t) \quad (3.15)$$

O operador derivada $\frac{d}{dt}$ foi simplificado pela notação p e ω_r é a velocidade síncrona da máquina. Como são consideradas perturbações muito pequenas, o valor de ω_r foi fixado em $\omega_r = 2\pi f_n$. Define-se f_n como a frequência nominal da rede elétrica (KUNDUR, 1994). O subscrito m indica magnetização, os subscritos d e q indicam quantidades do estator que estão no eixo direto ou em quadratura, respectivamente (KRAUSE et al., 2002; ANDERSON; FOUAD, 2003).

Para dar sequência à formulação é apresentado o sistema por unidade ($p.u.$). A transformação para o sistema $p.u.$ das quantidades refletidas no estator ocorre de maneira igual às quantidades do estator.

Ou seja, para transformar essas quantidades, basta saber as bases do estator (KRAUSE et al., 2002; ANDERSON; FOUAD, 2003). Daqui em diante sempre que aparecer o subscrito *p.u.* a quantidade está dividida pela respectiva base. Caso não apareça o subscrito *p.u.*, a quantidade está em unidades físicas.

3.2 SISTEMA POR UNIDADE

Para converter as quantidades da máquina síncrona que estão em unidades físicas para o sistema por unidade (*p.u.*), deve-se ter conhecimento das bases do estator e do campo (KRAUSE et al., 2002; MATHWORKS, 2017).

3.2.1 Bases do Estator

Obtêm-se as bases do estator tendo conhecimento da Potência Trifásica Nominal (S_n) em VA, da Tensão Nominal (V_n) Fase-Fase RMS em Volts e da Frequência Nominal (f_n) em Hertz.

$$V_{s(base)} = \frac{\sqrt{2}V_n}{\sqrt{3}} \quad (3.16)$$

$$I_{s(base)} = \frac{\sqrt{2}S_n}{\sqrt{3}V_n} \quad (3.17)$$

$$Z_{s(base)} = \frac{V_{sbase}}{I_{sbase}} \quad (3.18)$$

$$\omega_{base} = 2\pi f_n \quad (3.19)$$

$$L_{s(base)} = \frac{Z_{sbase}}{\omega_{base}} \quad (3.20)$$

- $V_{s(base)}$, dada em [V], é a tensão base do estator;
- $I_{s(base)}$, dada em [A], é a corrente base do estator;
- $Z_{s(base)}$, dada em [Ω], é a impedância base do estator;
- ω_{base} , dada em [$\frac{rad}{s}$], é a frequência angular base;
- $L_{s(base)}$, dada em [H], é indutância base do estator.

3.2.2 Bases do Campo

Para calcular as bases do campo é necessário ter conhecimento da Corrente de Campo Nominal ($i_{f(nominal)}$)¹ em Amperes, da Indutância de Magnetização de Eixo Direto ($L_{md(pu)}$) em *p.u.*, da Potência Trifásica Nominal (S_n) e da Frequência Angular Base (ω_{base}) em $\frac{rad}{s}$.

$$I_{f(base)} = i_{f(nominal)} L_{md(pu)} \quad (3.21)$$

$$V_{f(base)} = \frac{S_n}{I_{f(base)}} \quad (3.22)$$

$$Z_{f(base)} = \frac{V_{f(base)}}{I_{f(base)}} \quad (3.23)$$

$$L_{f(base)} = \frac{Z_{f(base)}}{\omega_{base}} \quad (3.24)$$

- $I_{f(base)}$, dada em [A], é a corrente base de campo;
- $V_{f(base)}$, dada em [V], é a tensão base de campo;
- $Z_{f(base)}$, dada em [Ω], é a impedância base de campo;
- $L_{f(base)}$, dada em [H], é a indutância base de campo.

Complementa-se o equacionamento com a Equação (3.25), que é a razão de transformação entre número de espiras do estator e do campo (MATHWORKS, 2017).

$$\left(\frac{N_s}{N_f} \right) = \left(\frac{2}{3} \right) L_{md} \left(\frac{i_{f(nominal)} \omega_{base}}{V_{s(base)}} \right) \quad (3.25)$$

Salienta-se que o sistema *p.u.* traz algumas relações importantes (Equações (3.26)–(3.30)) (KUNDUR, 1994), que são utilizadas para simplificar as equações do gerador síncrono de polos salientes.

$$L_{d(pu)} = L_{md(pu)} + L_{ls(pu)} \quad (3.26)$$

$$L_{f(pu)} = L_{md(pu)} + L_{lf(pu)} \quad (3.27)$$

$$L_{D(pu)} = L_{md(pu)} + L_{lD(pu)} \quad (3.28)$$

$$L_{q(pu)} = L_{mq(pu)} + L_{ls(pu)} \quad (3.29)$$

$$L_{Q(pu)} = L_{mq(pu)} + L_{lQ(pu)} \quad (3.30)$$

¹Valor da corrente de campo que o gerador operando sem carga necessita para que a tensão do estator atinja o valor nominal (MATHWORKS, 2017)

3.3 RELAÇÕES FASORIAIS

Em condições de equilíbrio a tensão terminal do gerador é uma fonte trifásica balanceada (KUNDUR, 1994), então:

$$v_a = V_t \cos(\omega_r t + \gamma) \quad (3.31)$$

$$v_b = V_t \cos\left(\omega_r t - \frac{2\pi}{3} + \gamma\right) \quad (3.32)$$

$$v_c = V_t \cos\left(\omega_r t + \frac{2\pi}{3} + \gamma\right) \quad (3.33)$$

Tem-se que γ é o ângulo do fasor da barra infinita que o gerador está conectado.

Aplica-se a transformada de Park (PARK, 1929) nas Equações (3.31)–(3.33).

$$v_d = V_t \cos(\gamma - \theta_0) \quad (3.34)$$

$$v_q = V_t \sin(\gamma - \theta_0) \quad (3.35)$$

Define-se θ_0 como a velocidade angular do rotor da máquina síncrona.

Baseado nas Equações (3.34) e (3.35), os diagramas fasoriais com a tensão e a corrente terminal decompostos nos eixos direto e em quadratura são apresentados:

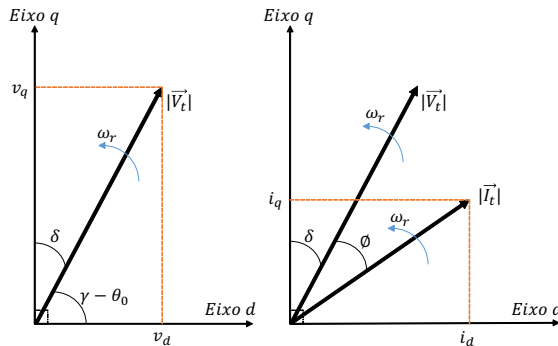


Figura 1 – Diagrama Fasorial de Tensão e Corrente Terminal nos Eixos $d - q$.

A partir da Figura 1, pode-se formular as seguintes equações para os eixos $d - q$:

$$v_d = V_t \text{sen}(\delta) \quad (3.36)$$

$$v_q = V_t \text{cos}(\delta) \quad (3.37)$$

$$i_d = I_t \text{sen}(\delta + \phi) \quad (3.38)$$

$$i_q = I_t \text{cos}(\delta + \phi) \quad (3.39)$$

Designa-se δ como o ângulo de carga. Tem-se que ϕ é o ângulo do Fator de Potência e é calculado a partir do triângulo de potências (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003):

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Q_t}{P_t} \right) \quad (3.40)$$

O Fator de Potência (FP) é calculado de acordo com a Equação (3.41) (KUNDUR, 1994).

$$FP = \cos(\phi) \quad (3.41)$$

P_t e Q_t são, respectivamente, as potências ativa e reativa do gerador síncrono. Para determinar o valor da tensão terminal (V_t), corrente terminal (I_t), potência ativa (P_t) e potência reativa (Q_t) da máquina, utilizam-se as Equações (3.42)–(3.48) (TSAI et al., 1995a; KARAYAKA et al., 1999b).

$$v_{ab} = v_a - v_b \quad (3.42)$$

$$v_{bc} = v_b - v_c \quad (3.43)$$

$$v_{ca} = v_a - v_c \quad (3.44)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2}{1,5}} \quad (3.45)$$

$$I_t = \sqrt{\frac{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2}{1,5}} \quad (3.46)$$

$$P_t = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.47)$$

$$Q_t = \frac{v_{ab} i_c + v_{bc} i_a + v_{ca} i_b}{\sqrt{3}} \quad (3.48)$$

As quantidades i_a , i_b , i_c , v_a , v_b e v_c são os valores instantâneos

das fases a , b e c de corrente e tensão do estator, respectivamente. Além disso, v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} são as tensões instantâneas de linha.

Como a operação não considera faltas, pode-se utilizar a Equação (3.48) para calcular a potência reativa do gerador síncrono.

Nota-se que para determinar v_d , v_q , i_d e i_q é necessário o conhecimento de correntes e tensões instantâneas de fase, além do conhecimento do ângulo de carga δ .

4 MÉTODO PROPOSTO DE IDENTIFICAÇÃO ON-LINE DOS PARÂMETROS DE GERADORES SÍNCRONOS DE POLOS SALIENTES

O objetivo do método é identificar todos os parâmetros fundamentais do gerador síncrono de polos salientes a partir de medições simples (correntes e tensões), quando este opera em regime quase que permanente e conectado ao sistema elétrico. Em uma primeira etapa, devido às diversas simplificações iniciais, o método proposto identifica apenas alguns parâmetros. Para determinar os outros parâmetros é necessário desenvolver observadores não convencionais que utilizam os parâmetros identificados previamente para estimar as correntes de amortecimento.

O método proposto nesta dissertação desconsidera a dinâmica do sistema de excitação. Isto é justificado devido ao fato do gerador síncrono operar em regime quase que permanente e em um sistema teste controlado que não considera grandes variações dinâmicas no sistema de excitação. Entretanto, sabe-se que em um sistema de potência real, o comportamento dinâmico do sistema de excitação pode influenciar nos resultados. Dessa forma, em trabalhos futuros, o método proposto será aplicado levando em consideração a dinâmica do sistema de excitação.

4.1 ANÁLISES E SIMPLIFICAÇÕES NO MODELO DO GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES

Como visto no Capítulo 2, diversos métodos que permitem o monitoramento de parâmetros de uma máquina síncrona partem do pressuposto de que o ângulo de carga é um sinal conhecido. Na prática, este sinal não é de fácil medida. Portanto, é necessário obter fórmulas independentes de $\delta(t)$ (GHAHREMANI et al., 2008). Na sequência é apresentado o desenvolvimento para obtenção destas fórmulas.

Supondo que o gerador está conectado à rede elétrica e opera com variações lentas de carga, as dinâmicas do estator, do campo e as correntes de amortecimento são desconsideradas (KUNDUR, 1994). O conjunto de Equações (3.6)–(3.15) é reduzido para três equações:

$$v_d(t) = -R_s i_d(t) + \omega_r L_q i_q(t) \quad (4.1)$$

$$v_q(t) = -R_s i_q(t) - \omega_r L_d i_d(t) + \omega_r L_{md} i_f'(t) \quad (4.2)$$

$$v'_f(t) = R'_f i'_f(t) \quad (4.3)$$

Assume-se que os sinais estão em unidades físicas e os parâmetros estão em *p.u.* Dessa forma, as Equações (4.1)–(4.3) são reescritas da seguinte maneira:

$$v_d(t) = -R_{s(pu)} i_d(t) Z_{s(base)} + L_{q(pu)} i_q(t) Z_{s(base)} \quad (4.4)$$

$$v_q(t) = \left\{ -R_{s(pu)} i_q(t) Z_{s(base)} - L_{d(pu)} i_d(t) Z_{s(base)} + \frac{i_f(t)}{i_{f(nominal)}} V_{s(base)} \right\} \quad (4.5)$$

$$v_f(t) = R_{f(pu)} i_f(t) \frac{S_n}{(L_{md(pu)} i_{f(nominal)})^2} \quad (4.6)$$

Agora, substituem-se as relações fasoriais das Equações (3.36)–(3.39) nas Equações (4.4) e (4.5):

$$V_t(t) \text{sen}[\delta(t)] = \left\{ -R_{s(pu)} I_t(t) \text{sen}[\delta(t) + \phi(t)] Z_{s(base)} + L_{q(pu)} I_t(t) \text{cos}[\delta(t) + \phi(t)] Z_{s(base)} \right\} \quad (4.7)$$

$$V_t(t) \text{cos}[\delta(t)] = \left\{ -R_{s(pu)} I_t(t) \text{cos}[\delta(t) + \phi(t)] Z_{s(base)} - L_{d(pu)} I_t(t) \text{sen}[\delta(t) + \phi(t)] Z_{s(base)} + \frac{i_f(t)}{i_{f(nominal)}} V_{s(base)} \right\} \quad (4.8)$$

Duas identidades trigonométricas são necessárias agora (GELFAND; SAUL, 2001):

$$\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) = \text{sen}(\theta_1) \text{cos}(\theta_2) + \text{sen}(\theta_2) \text{cos}(\theta_1) \quad (4.9)$$

$$\text{cos}(\theta_1 + \theta_2) = \text{cos}(\theta_1) \text{cos}(\theta_2) - \text{sen}(\theta_1) \text{sen}(\theta_2) \quad (4.10)$$

As identidades trigonométricas apresentadas anteriormente são utilizadas para expandir as Equações (4.7) e (4.8).

Por fim, agrupam-se os termos semelhantes. Dessa forma, tem-se a seguinte igualdade na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} t_1(t) & t_2(t) \\ t_4(t) & t_5(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{sen}[\delta(t)] \\ \text{cos}[\delta(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_3(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$t_1(t) = \{-I_t(t)\text{sen}[\phi(t)]R_{s(pu)}Z_{s(base)} + I_t(t)\text{cos}[\phi(t)]L_{d(pu)}Z_{s(base)}\} \quad (4.12)$$

$$t_2(t) = \{I_t(t)\text{cos}[\phi(t)]R_{s(pu)}Z_{s(base)} + I_t(t)\text{sen}[\phi(t)]L_{d(pu)}Z_{s(base)} - V_t(t)\} \quad (4.13)$$

$$t_3(t) = -\left(\frac{i_f(t)}{i_{f(nominal)}}\right)V_{s(base)} \quad (4.14)$$

$$t_4(t) = \{I_t(t)\text{cos}[\phi(t)]R_{s(pu)}Z_{s(base)} + I_t(t)\text{sen}[\phi(t)]L_{q(pu)}Z_{s(base)} - V_t(t)\} \quad (4.15)$$

$$t_5(t) = \{I_t(t)\text{sen}[\phi(t)]R_{s(pu)}Z_{s(base)} + I_t(t)\text{cos}[\phi(t)]L_{q(pu)}Z_{s(base)}\} \quad (4.16)$$

A partir do cálculo da matriz inversa da Equação (4.11), encontram-se equações para $\text{sen}[\delta(t)]$ e $\text{cos}[\delta(t)]$:

$$\text{sen}[\delta(t)] = a \left(\frac{a_1(t)}{b(t)}\right) i_f(t) \quad (4.17)$$

$$\text{cos}[\delta(t)] = a \left(\frac{a_2(t)}{b(t)}\right) i_f(t) \quad (4.18)$$

$$a = \left(\frac{V_{sbase}}{i_{f(nominal)}}\right) \quad (4.19)$$

$$a_1(t) = \{I_t(t)\text{cos}[\phi(t)]L_{q(pu)}Z_{s(base)} + I_t(t)\text{sen}[\phi(t)]R_{s(pu)}Z_{s(base)}\} \quad (4.20)$$

$$a_2(t) = \{V_t(t) + I_t(t)\text{sen}[\phi(t)]L_{q(pu)}Z_{s(base)} + I_t(t)\text{cos}[\phi(t)]R_{s(pu)}Z_{s(base)}\} \quad (4.21)$$

$$b(t) = \{V_t(t)^2 + I_t(t)^2 (R_{s(pu)}^2 + L_{d(pu)}L_{q(pu)})Z_{s(base)} + 2V_t(t)I_t(t)\text{cos}[\phi(t)]R_{s(pu)}Z_{s(base)} + V_t(t)I_t(t)\text{sen}[\phi(t)](L_{d(pu)} + L_{q(pu)})Z_{s(base)}\} \quad (4.22)$$

As equações para potência ativa e reativa trifásica são (KARAYAKA et al., 2000):

$$P_t(t) = \frac{3}{2}V_t(t)I_t(t)\text{cos}[\phi(t)] \quad (4.23)$$

$$Q_t(t) = \frac{3}{2}V_t(t)I_t(t)\text{sen}[\phi(t)] \quad (4.24)$$

As Equações (4.23) e (4.24) são utilizadas para tornar a Equação (4.22) mais compacta:

$$\begin{aligned}
 b(t) = & \{V_t(t)^2 + I_t(t)^2 \left(R_{s(pu)}^2 + L_{d(pu)}L_{q(pu)} \right) Z_{s(base)} + \\
 & + \left(\frac{4}{3} \right) P_t(t)R_{s(pu)}Z_{s(base)} + \\
 & + \left(\frac{2}{3} \right) Q_t(t) (L_{d(pu)} + L_{q(pu)}) Z_{s(base)} \}
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Com a utilização de relações trigonométricas nas equações desenvolvidas de $sen[\delta(t)]$ e $cos[\delta(t)]$ (Equações (4.17) e (4.18)) é possível estimar o ângulo de carga com conhecimento prévio de parâmetros e obter uma formulação independente do ângulo de carga, evitando a necessidade de sua medição. As formulações necessárias para isso são apresentadas na sequência.

4.1.1 Formulação do Ângulo de Carga

A partir das Equações (4.17) e (4.18) é possível utilizar a relação trigonométrica obtida de Gelfand e Saul (2001) e calcular o ângulo de carga (Equação (4.26)).

$$\frac{sen[\delta(t)]}{cos[\delta(t)]} = tan[\delta(t)] = \left(\frac{a_1(t)}{a_2(t)} \right) \tag{4.26}$$

Multiplica-se o numerador e o denominador da Equação (4.26) por $V_t(t)$ e então são utilizadas as relações de potência ativa e reativa apresentadas nas Equações (4.23) e (4.24). Por fim, obtém-se:

$$\delta^{modelo}(t) = tan^{-1} \left(\frac{m_1(t)}{m_2(t)} \right) \tag{4.27}$$

$$\begin{aligned}
 m_1(t) = & \left\{ \frac{2}{3} P_t(t) L_{q(pu)} Z_{s(base)} + \right. \\
 & \left. - \frac{2}{3} Q_t(t) R_{s(pu)} Z_{s(base)} \right\}
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

$$\begin{aligned}
 m_2(t) = & \{V_t(t)^2 + \frac{2}{3} Q_t(t) L_{q(pu)} Z_{s(base)} + \\
 & + \frac{2}{3} P_t(t) R_{s(pu)} Z_{s(base)} \}
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

A partir da Equação (4.27), se houver conhecimento dos parâmetros $R_{s(pu)}$ e $L_{q(pu)}$, das medidas $P_t(t)$, $Q_t(t)$, $I_t(t)$ e $V_t(t)$, e do valor de $Z_{s(base)}$ é possível calcular o ângulo de carga.

4.1.2 Formulação da Corrente de Campo sem o Ângulo de Carga

Para encontrar uma equação da corrente de campo independente do ângulo de carga, a identidade trigonométrica presente na Equação (4.30) é utilizada (GELFAND; SAUL, 2001).

$$[\text{sen}(\theta)]^2 + [\text{cos}(\theta)]^2 = 1 \quad (4.30)$$

Aplica-se a identidade trigonométrica dada pela Equação (4.30) nas Equações (4.17) e (4.18). Realizadas todas as manipulações algébricas, obtém-se a Equação (4.31).

$$i_f^{modelo}(t) = \left(\frac{1}{a}\right) \left(\frac{b(t)}{\sqrt{c(t)}}\right) \quad (4.31)$$

$$c(t) = \{V_t(t)^2 + I_t(t)^2 (R_{s(pu)}^2 + L_{q(pu)}^2) Z_{s(base)} + \left(\frac{4}{3}\right) P_t(t) R_{s(pu)} Z_{s(base)} + \left(\frac{4}{3}\right) Q_t(t) L_{q(pu)} Z_{s(base)}\} \quad (4.32)$$

Para facilitar aplicações práticas, os sinais da Equação (4.31) são em unidades físicas e os parâmetros são dados em *p.u.*, pois sabe-se que os parâmetros possuem uma provável faixa de valores quando são transformados neste sistema (KUNDUR, 1994).

A Equação (4.31) permite o cálculo da corrente de campo $i_f^{modelo}(t)$ a partir dos parâmetros $R_{s(pu)}$, $L_{q(pu)}$ e $L_{d(pu)}$ em conjunto com as medidas de $V_t(t)$, $I_t(t)$, $P(t)$ e $Q(t)$. Também é necessário o conhecimento de $i_{f(nominal)}$, V_{sbase} e Z_{sbase} .

4.1.3 Formulação da Tensão de Campo sem Ângulo de Carga

A Equação (4.6) pode ser simplificada para conseguir calcular a tensão de campo $v_f^{modelo}(t)$ a partir dos parâmetros $R_{f(pu)}$ e $L_{md(pu)}$ em conjunto com a medida de $i_f(t)$ e os valores de $i_{f(nominal)}$ e S_n .

Na literatura não é atribuída uma possível faixa de valores ao

parâmetro $L_{md(pu)}$. No entanto, $L_{ls(pu)}$ possui uma provável faixa de valores (KUNDUR, 1994). Dessa forma, opta-se por utilizar a relação apresentada na Equação (3.26) para modificar a Equação (4.6) e obter a Equação (4.33):

$$v_f^{modelo}(t) = R_{f(pu)} i_f(t) \left[\frac{S_n}{(L_{d(pu)} - L_{ls(pu)})^2 (i_{f(nominal)})^2} \right] \quad (4.33)$$

4.1.4 Síntese das Análises e Simplificações

Nas seções anteriores, um modelo simplificado foi desenvolvido para estimar o comportamento dinâmico da corrente de campo (Equação (4.31)). Nota-se que este modelo necessita apenas de sinais simples (tensões e correntes).

A partir da coleta de sinais com o gerador em operação, é possível realizar a comparação entre o sinal obtido pelo modelo simplificado da corrente de campo (Equação (4.31)) e a corrente de campo medida utilizando um método de otimização. Desta forma, possibilita-se identificar os valores dos parâmetros $R_{s(pu)}$, $L_{q(pu)}$ e $L_{d(pu)}$.

Com o parâmetro $L_{d(pu)}$ identificado é possível determinar os valores de $L_{ls(pu)}$ e $R_{f(pu)}$. Dessa forma, compara-se os sinais de v_f^{modelo} (Equação (4.33)) e os sinais da tensão de campo obtidos com o gerador em operação e utiliza-se um método de otimização.

A partir do conhecimento dos parâmetros identificados $R_{s(pu)}$ e $L_{q(pu)}$ é possível estimar o comportamento quase que em regime permanente do ângulo de carga com a Equação (4.27).

As simplificações propostas nesta seção eliminam uma série de parâmetros que também devem ser identificados. Por isso, propõe-se utilizar outras abordagens, sem muitas simplificações, a fim de conseguir identificar os parâmetros que ainda faltam.

Com o conhecimento do ângulo de carga, é possível determinar $i_d(t)$, $i_q(t)$, $v_d(t)$ e $v_q(t)$. Então, resta determinar as correntes de amortecimento ($i'_D(t)$ e $i'_Q(t)$) para conseguir reproduzir o comportamento quase que em regime permanente do gerador síncrono de polos salientes modelado pelas equações apresentadas no Capítulo 3.

As correntes de amortecimento são determinadas nesta dissertação por observadores não convencionais, que necessitam de conhecimento prévio de parâmetros. O desenvolvimento destes observadores é apresentado na sequência.

4.2 DESENVOLVIMENTO DOS OBSERVADORES NÃO CONVENCIONAIS DAS CORRENTES DE AMORTECIMENTO

Para identificar os outros parâmetros do gerador síncrono é necessário não simplificar muito o modelo. A partir dessa premissa, as correntes de amortecimento devem ser conhecidas. Como essas correntes não são mensuráveis é proposto o desenvolvimento de observadores não convencionais.

4.2.1 Observador Não Convencional a Partir dos Parâmetros $R_D(pu)$, $R_Q(pu)$, $L_D(pu)$, $L_Q(pu)$, $L_{md}(pu)$ e $L_{mq}(pu)$

Na literatura, encontra-se que é possível desenvolver observadores não convencionais para as correntes de amortecimento a partir das Equações (3.11)–(3.15) (KYRIAKIDES; HEYDT; VITTAL, 2004). Para isso, é necessário realizar uma aproximação algébrica nas derivadas das correntes. A seguinte aproximação (*Forward Difference*) pode ser utilizada satisfatoriamente (KYRIAKIDES, 2003):

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(t + \Delta t) - i(t)}{\Delta t} \quad (4.34)$$

Define-se Δt como o período de amostragem.

As Equações (3.11) e (3.12) são apresentadas nas Equações (4.35) e (4.36) na sua forma expandida.

$$0 = R'_D i'_D(t) + \frac{d}{dt} \left[\left(L_{md} + L'_{lD} \right) i'_D(t) + L_{md} \left(i'_f(t) - i_d(t) \right) \right] \quad (4.35)$$

$$0 = R'_Q i'_Q(t) + \frac{d}{dt} \left[\left(L_{mq} + L'_{lQ} \right) i'_Q(t) - L_{mq} i_q(t) \right] \quad (4.36)$$

Assim, empregando a Equação (4.34), a Equação (4.35), torna-se:

$$0 = R'_D i'_D(t) + \left(L_{md} + L'_{lD} \right) \left(\frac{i'_D(t + \Delta t) - i'_D(t)}{\Delta t} \right) + L_{md} \left(\frac{i'_f(t + \Delta t) - i'_f(t)}{\Delta t} - \frac{i_d(t + \Delta t) - i_d(t)}{\Delta t} \right) \quad (4.37)$$

E a Equação (4.36) é transformada na seguinte equação:

$$0 = R'_Q i'_Q(t) + (L_{mq} + L'_{lQ}) \left(\frac{i'_Q(t + \Delta t) - i'_Q(t)}{\Delta t} \right) + \quad (4.38)$$

$$- L_{mq} \left(\frac{i_d(t + \Delta t) - i_d(t)}{\Delta t} \right)$$

Observa-se que as Equações (4.37) e (4.38) são equações de diferenças (OGATA, 1994).

A seguir, realizam-se manipulações algébricas e a conversão dos parâmetros ao sistema *p.u.*:

$$i'_D(k+1) = \left(1 - \frac{R_{D(pu)} \omega_{base} \Delta t}{L_{D(pu)}} \right) i'_D(k) + \quad (4.39)$$

$$+ \left(\frac{L_{md(pu)}}{L_{D(pu)}} \right) [i_d(k+1) - i_d(k)] +$$

$$- \left(\frac{1}{L_{D(pu)} i_{f(nominal)}} \right) [i_f(k+1) - i_f(k)]$$

$$i'_Q(k+1) = \left(1 - \frac{R_{Q(pu)} \omega_{base} \Delta t}{L_{Q(pu)}} \right) i'_Q(k) + \quad (4.40)$$

$$+ \left(\frac{L_{mq(pu)}}{L_{Q(pu)}} \right) [i_q(k+1) - i_q(k)]$$

$k = 0, \dots, n$ e n representa a dimensão do vetor de medidas.

A partir do conhecimento dos parâmetros $R_{D(pu)}$, $R_{Q(pu)}$, $L_{D(pu)}$, $L_{Q(pu)}$, $L_{md(pu)}$, $L_{mq(pu)}$ e $i_{f(nominal)}$, além das medidas de $i_f(t)$, $i_d(t)$ e $i_q(t)$ é possível utilizar as Equações (4.39) e (4.40) recursivamente para observar as correntes de amortecimento. Para isso é necessário admitir $i'_D(0) = i'_Q(0) = 0$. Esta inicialização é válida se o gerador está operando em regime quase que permanente (KYRIAKIDES; HEYDT; VITTAL, 2004).

Os observadores não convencionais cumprem seu objetivo se houver conhecimento prévio de parâmetros que neste trabalho são considerados desconhecidos (KYRIAKIDES; HEYDT; VITTAL, 2004). Aqui, opta-se por uma abordagem diferente, sendo necessário que as Equações (4.39) e (4.40) sejam transformadas a partir da Transformada Z (OGATA, 1994). Então, as seguintes equações no domínio Z são obtidas:

$$\begin{aligned}
i'_D(z)z - i'_D(0)z &= \left(1 - \frac{R_{D(pu)}\omega_{base}\Delta t}{L_{D(pu)}}\right) i'_D(z) + \\
&+ \left(\frac{L_{md(pu)}}{L_{D(pu)}}\right) [i_d(z)z - i_d(0)z - i_d(z)] + \\
&- \left(\frac{1}{L_{D(pu)}i_{f(nominal)}}\right) [i_f(z)z - i_f(0)z - i_f(z)]
\end{aligned} \tag{4.41}$$

$$\begin{aligned}
i'_Q(z)z - i'_Q(0)z &= \left(1 - \frac{R_{Q(pu)}\omega_{base}\Delta t}{L_{Q(pu)}}\right) i'_Q(z) + \\
&+ \left(\frac{L_{mq(pu)}}{L_{Q(pu)}}\right) [i_q(z)z - i_q(0)z - i_q(z)]
\end{aligned} \tag{4.42}$$

Ao agrupar os termos semelhantes, fazendo $i'_D(0) = i'_Q(0) = 0$ e realizando todas as manipulações algébricas necessárias para isolar $i'_D(z)$ e $i'_Q(z)$, obtêm-se:

$$\begin{aligned}
i'_D(z) &= \left(\frac{1}{L_{D(pu)}}\right) \left(\frac{z-1}{z-\alpha}\right) \left[L_{md(pu)}i_d(z) - i_f(z) \frac{I_s(base)}{i_{f(nominal)}} \right] + \\
&+ \left(\frac{1}{L_{D(pu)}}\right) \left(\frac{z}{z-\alpha}\right) \left[i_f(0) \frac{I_s(base)}{i_{f(nominal)}} - L_{md(pu)}i_d(0) \right]
\end{aligned} \tag{4.43}$$

$$\alpha = 1 - \frac{R_{D(pu)}\omega_{base}\Delta t}{L_{D(pu)}} \tag{4.44}$$

$$\begin{aligned}
i'_Q(z) &= \left(\frac{1}{L_{Q(pu)}}\right) \left(\frac{z-1}{z-\beta}\right) [L_{mq(pu)}i_q(z)] \\
&- \left(\frac{1}{L_{Q(pu)}}\right) \left(\frac{z}{z-\beta}\right) [L_{mq(pu)}i_q(0)]
\end{aligned} \tag{4.45}$$

$$\beta = 1 - \frac{R_{Q(pu)}\omega_{base}\Delta t}{L_{Q(pu)}} \tag{4.46}$$

A Transformada Z Inversa é aplicada nas Equações (4.43) e (4.45).

$$i'_D(k) = \left(\frac{1}{L_{D(pu)}} \right) [(\alpha^k - \alpha^{k-1}) * i_{df}(k)] + \left(\frac{1}{L_{D(pu)}} \right) \left(\frac{1}{\alpha} \right) i_{df}(k) - \left(\frac{\alpha^k}{L_{D(pu)}} \right) i_{df}(0) \quad (4.47)$$

$$i_{df}(k) = L_{md(pu)} i_d(k) - i_f(k) \frac{I_{s(base)}}{i_{f(nominal)}} \quad (4.48)$$

$$i_{df}(0) = L_{md(pu)} i_d(0) - i_f(0) \frac{I_{s(base)}}{i_{f(nominal)}} \quad (4.49)$$

$$i'_Q(k) = \left(\frac{L_{mq(pu)}}{L_{Q(pu)}} \right) [(\beta^k - \beta^{k-1}) * i_q(k)] + \left(\frac{L_{mq(pu)}}{L_{Q(pu)}} \right) \left(\frac{1}{\beta} \right) i_q(k) - \beta^k \left(\frac{L_{mq(pu)}}{L_{Q(pu)}} \right) i_q(0) \quad (4.50)$$

(*), presente nas Equações (4.47) e (4.50), é o operador da convolução discreta (OGATA, 1994). Os valores de $i_d(0)$, $i_q(0)$ e $i_f(0)$ são as condições iniciais das correntes do eixo direto do estator, do eixo em quadratura do estator e do campo, respectivamente.

4.2.2 Observador Não Convencional a Partir dos Parâmetros

$R_s(pu)$, $L_q(pu)$, $L_d(pu)$ e $L_{ls(pu)}$

Outra maneira possível de observar as correntes de amortecimento com conhecimento prévio de parâmetros é utilizando as Equações (3.6)–(3.9). Para simplificar, os transitórios do estator podem ser desconsiderados sem haver grandes perdas no equacionamento quando o gerador opera em regime quase que permanente (KUNDUR, 1994):

$$v_d(t) = -R_s i_d(t) - \omega_r \left(-L_q i_q(t) + L_{mq} i'_Q(t) \right) \quad (4.51)$$

$$v_q(t) = -R_s i_q(t) + \omega_r \left(-L_d i_d(t) + L_{md} \left(i'_f(t) + i'_D(t) \right) \right) \quad (4.52)$$

Isola-se $i'_D(t)$ na Equação (4.52), $i'_Q(t)$ na Equação (4.51) e os parâmetros são convertidos ao sistema $p.u.$ Devido ao fato da consideração da máquina estar operando quase que em regime permanente, é admitido que $\omega_r = \omega_{base}$ (KUNDUR, 1994).

$$i'_D(t) = \frac{1}{L_{md(pu)}} \left[\frac{v_q(t)}{Z_{s(base)}} + R_{s(pu)}i_q(t) + L_{d(pu)}i_d(t) - \frac{I_{s(base)}}{i_{f(nominal)}}i_f(t) \right] \quad (4.53)$$

$$i'_Q(t) = \frac{1}{L_{mq(pu)}} \left[L_{q(pu)}i_q(t) - \frac{v_d(t)}{Z_{s(base)}} - R_{s(pu)}i_d(t) \right] \quad (4.54)$$

4.2.3 Síntese do Desenvolvimento dos Observadores Não Convencionais das Correntes de Amortecimento

Os modelos simplificados de corrente e tensão de campo (Equações (4.31) e (4.33), respectivamente) são utilizados para identificar os parâmetros $L_{d(pu)}$, $L_{q(pu)}$, $R_{s(pu)}$ e $L_{ls(pu)}$. Com estes parâmetros, possibilita-se utilizar as Equações (4.53) e (4.54) para observar as correntes de amortecimento.

Para identificar os parâmetros dos enrolamentos amortecedores ($R_{D(pu)}$, $R_{Q(pu)}$, $L_{D(pu)}$ e $L_{Q(pu)}$), compara-se as correntes de amortecimento obtidas pelos observadores não convencionais (Equações (4.53) e (4.54)) com as Equações (4.47) e (4.50).

Além do observador não convencional, proposto por Kyriakides (2003), abordou-se aqui quatro novas equações para se observar as correntes de amortecimento com o conhecimento prévio de parâmetros: Equações (4.47), (4.50), (4.53) e (4.54).

Na sequência, são explicados os métodos de otimização utilizados neste trabalho para comparar os sinais e identificar os parâmetros do gerador síncrono de polos salientes.

4.3 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS NÃO LINEAR CONVENCIONAL COM RESTRIÇÕES - MMQNL

Neste método, supõe-se que um par de pontos (x_i, y_i) está relacionado por meio de uma função contínua suave, f . x_i é a variável independente (entrada) e y_i é a variável dependente (saída) do modelo. $i = 1, \dots, n$, n é o número total de pontos (RODRÍGUEZ, 2015).

$$y_i = f(x_i; \mathbf{P}) \quad (4.55)$$

Na Equação (4.55), $\mathbf{P} \in \mathfrak{R}^m$ é o vetor que contém os parâmetros que devem ser identificados. A Equação (4.55) não apresenta erro nas

variáveis x_i e y_i , dessa forma seria possível obter o valor exato de \mathbf{P} . No entanto, se os dados apresentarem erros, o valor de \mathbf{P} é estimado de maneira aproximada.

O método parte do princípio que x_i é conhecido de maneira exata e y_i é uma grandeza medida com erro associado. Sabe-se que x_i apresenta erro associado, mas é desconsiderado caso seja admitido que a magnitude do erro associado a y_i seja muito superior (ZWOLAK; BOGGS; WATSON, 2004). Então, admitindo que há erro associado a y_i , a formulação torna-se a seguinte:

$$\begin{aligned} y_i + \epsilon_i &= f(x_i; \mathbf{P}) \\ \epsilon_i &= f(x_i; \mathbf{P}) - y_i \\ i &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (4.56)$$

Pode-se encontrar um valor aproximado de \mathbf{P} resolvendo o problema convencional de mínimos quadrados mostrado na Equação (4.57).

$$\min_{\mathbf{P}} \|\epsilon_i\|_2^2 \quad (4.57)$$

Para um melhor entendimento, pode-se reescrever a Equação (4.57) da seguinte maneira:

$$\min_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^n [f(x_i; \mathbf{P}) - y_i]^2 \quad (4.58)$$

Demonstra-se graficamente na Figura 2 que o método dos mínimos quadrados não linear convencional é visto como a minimização da soma dos quadrados das distâncias verticais entre os pontos medidos (x_i, y_i) e a curva $f(x; \mathbf{P})$ (NOCEDAL; WRIGHT, 2006).

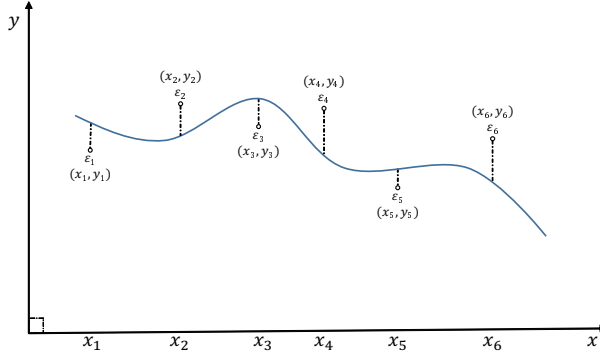


Figura 2 – Distâncias verticais dos erros entre os pontos medidos e a curva $f(x; \mathbf{P})$.

A formulação da Equação (4.58) pode ser modificada para que sejam incluídas restrições aos parâmetros contidos em \mathbf{P} (COSTA, 2017). A formulação final é apresentada na Equação (4.59).

$$\left[\begin{array}{l} \min_{\mathbf{P}} \sum_{i=1}^N [f(x_i; \mathbf{P}) - y_i]^2 \\ G(\mathbf{P}) \leq 0 \\ \mathbf{P}_{min} \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{max} \end{array} \right] \quad (4.59)$$

Define-se:

- $G(\mathbf{P})$: Vetor com Restrições de Relação entre Parâmetros;
- \mathbf{P}_{min} e \mathbf{P}_{max} : Valores Mínimos e Máximos dos Parâmetros, respectivamente;
- \mathbf{P} : Vetor de Parâmetros.

4.3.1 Solução do Problema de Otimização Não Linear

Faz-se uso do Método dos Pontos Interiores *Primal-Dual* para resolver o problema de otimização apresentado na Equação (4.59). O método transforma um problema de otimização com restrições de desigualdade em um problema de otimização composto apenas por restrições de igualdade. Para isso é necessário a utilização de variáveis de folga e a inclusão de uma função penalidade (COSTA, 2017).

A partir de um problema com restrições de igualdade, pode-se gerar a função Lagrangeana do problema de otimização modificado, aplicar o método de Newton e satisfazer as condições de Karush-

Kuhn-Tucker (KKT) (NOCEDAL; WRIGHT, 2006; COSTA, 2017). No Apêndice A é exemplificada a aplicação do método nos problemas de minimização não linear propostos neste trabalho. No Apêndice B são apresentadas as derivadas dos modelos dos sinais utilizados.

O MMQNL é amplamente utilizado desde a década de 90 na solução de problemas não lineares de grande porte quando condições de restrições são impostas. A versão *Primal-Dual* é caracterizada pela rapidez de convergência, robustez e confiabilidade (GRANVILLE, 1994; WU; DEBS; MARSTEN, 1994; EL-BAKRY et al., 1996).

Esse método é utilizado para identificar os parâmetros $R_{s(pu)}$, $L_{q(pu)}$ e $L_{d(pu)}$ com a equação de $i_f^{modelo}(t)$. Utiliza-se, também, para identificar $R_{f(pu)}$ e $L_{ls(pu)}$ com a equação de $v_f^{modelo}(t)$. E, por fim, este método é utilizado para determinar $L_{D(pu)}$, $L_{Q(pu)}$, $R_{D(pu)}$ e $R_{Q(pu)}$ a partir das Equação (4.47) e (4.50).

O Método dos Mínimos Quadrados Linear (MMQL) sem restrições é suficiente para determinar o parâmetro $L_{f(pu)}$. Por isso, o MMQL é apresentado na sequência. Na subseção 4.6.4, será formulado de maneira mais clara o desenvolvimento do equacionamento para identificar o parâmetro $L_{f(pu)}$ baseado no MMQL.

4.4 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS LINEAR CONVENCIONAL - MMQL

O princípio de formulação é semelhante ao MMQNL. No entanto, como as relações são lineares, o problema pode ser expresso na forma matricial de acordo com a Equação (4.60).

$$\begin{aligned} [H]_{i \times m} [\mathbf{P}]_{m \times 1} &= [Z]_{i \times 1} \\ i &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (4.60)$$

A matriz $[H]$ possui as características de x_i , o vetor $[Z]$ possui as características de y_i e o vetor $[\mathbf{P}]$ contém os parâmetros. $[H]$ tem dimensão $(n \times m)$, $[\mathbf{P}]$ tem dimensão $(m \times 1)$ e $[Z]$ tem dimensão $(n \times 1)$. n é o número de pontos utilizados e m é o número de parâmetros que se deseja determinar.

Os erros estão associados ao vetor $[Z]$. Então é necessário reescrever a Equação (4.60):

$$\begin{aligned} [H]_{n \times m} [\mathbf{P}]_{m \times 1} &= [Z]_{n \times 1} + [\epsilon]_{n \times 1} \\ [\epsilon]_{n \times 1} &= [H]_{n \times m} [\mathbf{P}]_{m \times 1} - [Z]_{n \times 1} \end{aligned} \quad (4.61)$$

Deve-se minimizar o erro (ϵ) da Equação (4.61) como é mostrado na Equação (4.57). A partir disso, a Equação (4.62) é desenvolvida.

$$\min_{\mathbf{P}} \left(([H][\mathbf{P}] - [Z])_{1 \times n}^T ([H][\mathbf{P}] - [Z])_{n \times 1} \right) \quad (4.62)$$

Na sequência é explicada a solução da Equação (4.62).

4.4.1 Solução do Problema de Otimização Linear

A solução do problema de otimização linear é mais simples quando não são impostas restrições (KYRIAKIDES; HEYDT, 2001).

A função objetivo que se deseja minimizar é definida por:

$$J = \left(([H][\mathbf{P}] - [Z])_{1 \times n}^T ([H][\mathbf{P}] - [Z])_{n \times 1} \right) \quad (4.63)$$

A solução ótima para o problema de minimização é encontrada derivando a Equação (4.63) em relação a \mathbf{P} e igualando a zero (primeira condição de KKT):

$$\frac{dJ}{d[\mathbf{P}]} = 0 \quad (4.64)$$

Encontra-se a seguinte solução para $[\mathbf{P}]_{m \times 1}$:

$$[\mathbf{P}]_{m \times 1} = [(H^T H)^{-1} H^T]_{m \times n} [Z]_{n \times 1} \quad (4.65)$$

Com isso é possível identificar os parâmetros contidos no vetor $[\mathbf{P}]_{m \times 1}$.

4.5 VISÃO GERAL DO MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

Dois métodos de otimização foram explicados nas Seções 4.3 e 4.4 para identificar parâmetros. Na Figura 3 está exemplificado o algoritmo de identificação aplicando tais métodos.

Vale salientar que os únicos sinais necessários para inicializar o método de identificação são tensões e correntes.

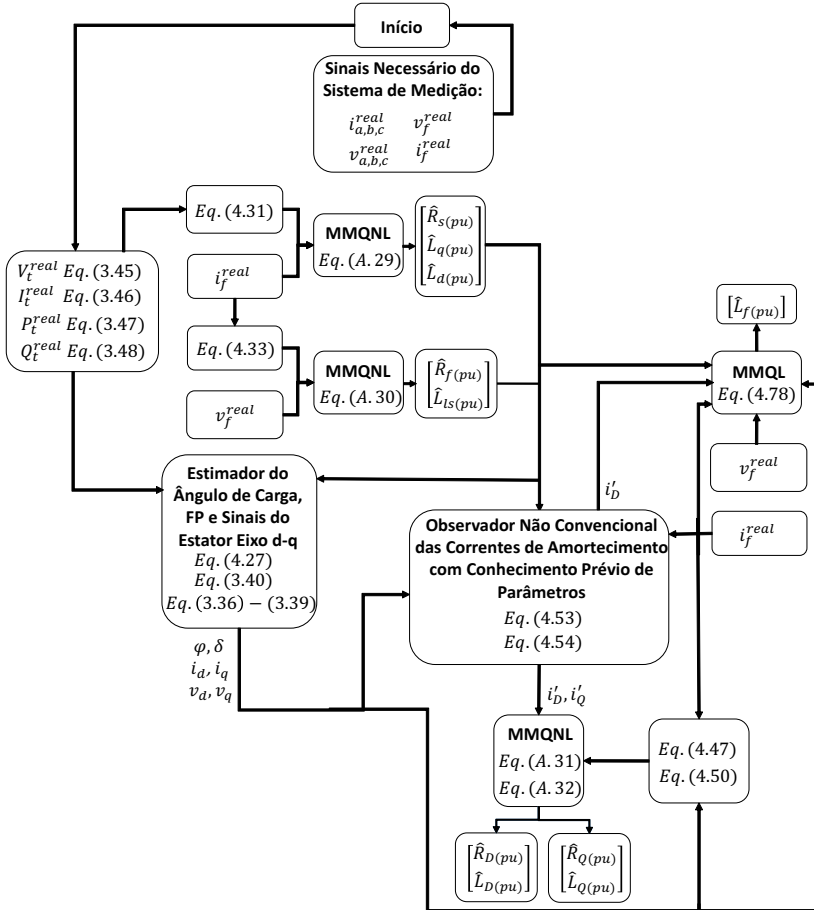


Figura 3 – Exemplicação do Algoritmo com um Diagrama de Fluxo.

Os detalhes de implementação do método proposto são apresentados na seqüência.

4.6 DETALHES DE IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

Para iniciar o método é necessário coletar os sinais e transformá-los da maneira que o algoritmo requiere. Primeiramente, os sinais coletados (Figura 4) devem ser armazenados em um banco de dados. Feito

isso, necessita-se separar uma amostra (t_1, \dots, t_n) e discretizar os sinais a partir de um período de tempo Δt , como é visto nas Figuras 5 e 6.

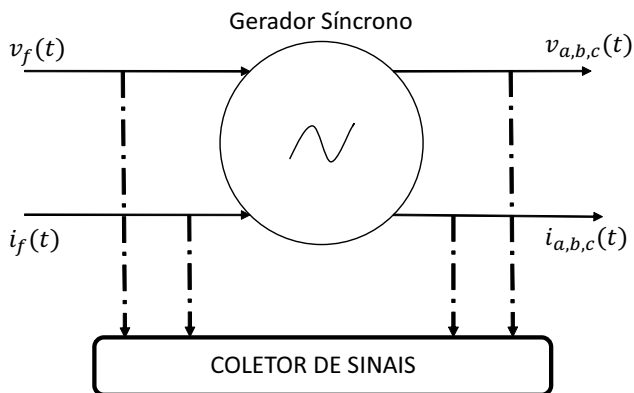


Figura 4 – Sinais de Entrada e Saída do Gerador Síncrono.

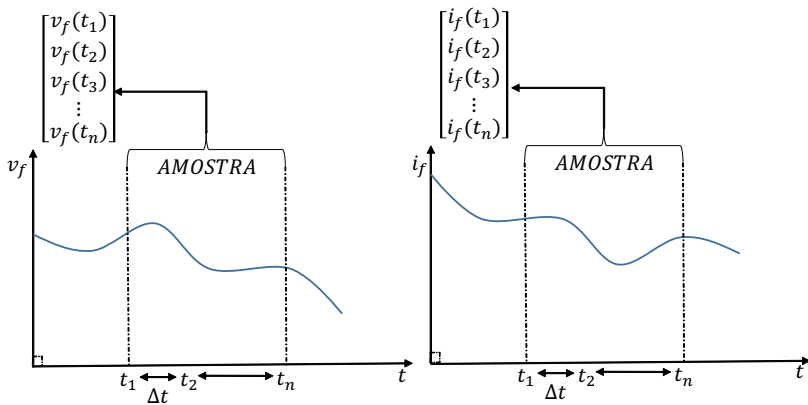


Figura 5 – Coleta da Amostra e Discretização do Sinal de Tensão e Corrente de Campo.

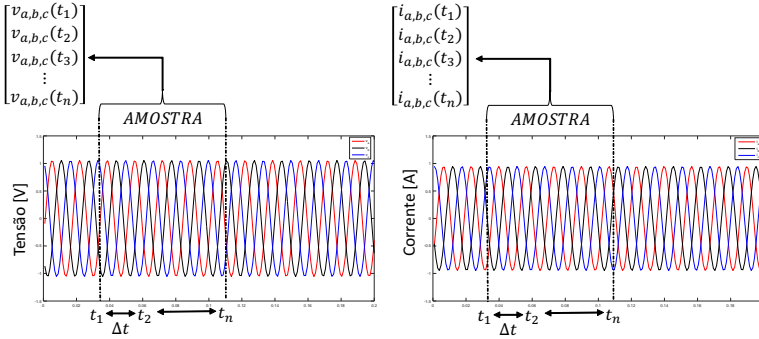


Figura 6 – Coleta das Amostras e Discretização dos Sinais de Tensão e Corrente Instantâneas das Fases a , b e c .

Deve-se, então, trabalhar com as amostras dos sinais coletados de tensão e corrente instantâneas da Figura 6.

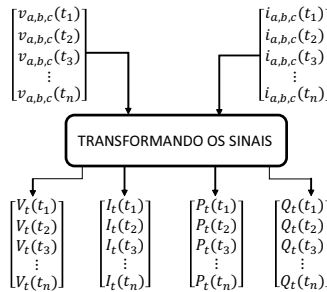


Figura 7 – Transformando os Sinais de Fase em Corrente Terminal, Tensão Terminal, Potência Ativa e Potência Reativa.

Utiliza-se as Equações (3.45)–(3.48) no bloco “TRANSFORMANDO OS SINAIS” (Figura 7) para obter os sinais de V_t , I_t , P_t e Q_t discretizados em um intervalo de tempo (t_1, \dots, t_n) . Dessa forma é possível iniciar o processo de identificação. Optou-se por criar cinco módulos para sistematizar o processo, estes são apresentados na sequência.

4.6.1 Definição do Módulo 1

O Módulo 1 (Figura 8) consiste em identificar os parâmetros $R_{s(pu)}$, $L_q(pu)$ e $L_d(pu)$.

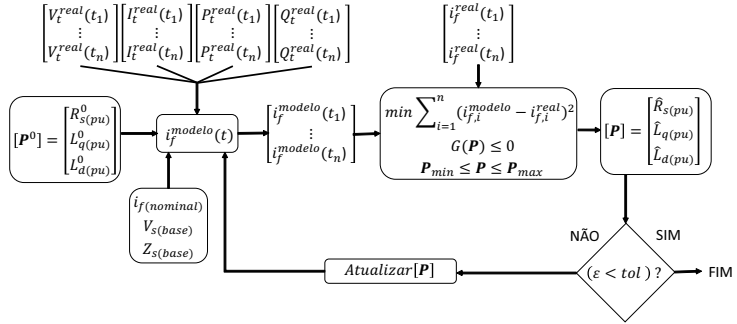


Figura 8 – Módulo 1 - Identificação dos Parâmetros $R_{s(pu)}$, $L_q(pu)$ e $L_d(pu)$.

Em um primeiro momento, deve-se inicializar o vetor de parâmetros $[P]$ com prováveis valores de $R_{s(pu)}$, $L_q(pu)$ e $L_d(pu)$. Sabe-se que os parâmetros do gerador síncrono estão contidos em uma faixa de valores quando convertidos ao sistema $p.u.$ (KUNDUR, 1994). Na Tabela 1 são mostrados os valores mínimos, máximos e médios para cada parâmetro. Os valores médios são os valores iniciais para o vetor $[P^0]$.

Na sequência, conhecendo os valores de $i_f^{(nominal)}$, $V_s^{(base)}$ e $Z_s^{(base)}$ em conjunto com os sinais obtidos do sistema de medição V_t^{real} , I_t^{real} , P_t^{real} e Q_t^{real} , cria-se um vetor para i_f^{modelo} com a Equação (4.31).

Os valores obtidos em i_f^{modelo} são comparados com os valores de i_f^{real} obtidos a partir do sistema de medição. O erro (ϵ) entre os sinais é minimizado com o MMQNL, obtendo-se um novo valor para $[P]$.

No processo de minimização são estabelecidas algumas restrições baseadas nas relações entre os parâmetros e na Tabela 1 (KUNDUR, 1994). Os valores mínimos e máximos de P são:

$$\begin{aligned} P_{min} &= [0,002 \quad 0,4 \quad 0,6]^T \\ P_{max} &= [0,020 \quad 1,0 \quad 1,5]^T \end{aligned} \quad (4.66)$$

Tabela 1 – Valores Mínimos, Máximos e Médios de Geradores Síncronos de Polos Salientes para o Módulo 1.

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
$R_s(pu)$	0,002	0,02	0,011
$L_q(pu)$	0,4	1,0	0,7
$L_d(pu)$	0,60	1,50	1,05

Fonte: Adaptado de Kundur (1994)

$$[G(\mathbf{P})] = \begin{bmatrix} R_s(pu) - L_q(pu) \\ R_s(pu) - L_d(pu) \\ L_q(pu) - L_d(pu) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

Se o erro for menor que um valor de tolerância estabelecido ($\epsilon < tol$), o Módulo 1 é finalizado e os valores encontrados em $[\mathbf{P}]$ são admitidos corretos. Caso contrário, o algoritmo continua atualizando $[\mathbf{P}]$ até que $\epsilon < tol$ (o valor de ϵ foi definido no Apêndice A).

4.6.2 Definição do Módulo 2

Realizada a identificação dos parâmetros $R_s(pu)$, $L_q(pu)$ e $L_d(pu)$ com o Módulo 1, o algoritmo segue para o Módulo 2 (Figura 9), o qual tem o propósito de identificar os parâmetros $R_f(pu)$ e $L_{ls}(pu)$.

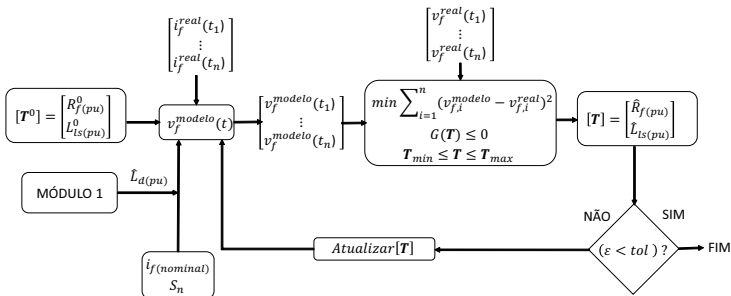


Figura 9 – Módulo 2 - Identificação dos Parâmetros $R_f(pu)$ e $L_{ls}(pu)$.

Os valores encontrados em Kundur (1994) são utilizados para determinar os valores mínimos, máximos e médios de $R_f(pu)$ e $L_{ls}(pu)$.

Na Tabela 2 são mostrados os valores necessários para o Módulo 2. Os valores médios são os valores iniciais para o vetor $[\mathbf{T}^0]$.

Com o conhecimento dos valores de $i_{f(nominal)}$, S_n , do parâmetro $\hat{L}_{d(pu)}$ dado pelo Módulo 1 e do sinal i_f^{real} obtido do sistema de medição, monta-se um vetor para v_f^{modelo} com a Equação (4.33).

Tabela 2 – Valores Mínimos, Máximos e Médios de Geradores Síncronos de Polos Salientes para o Módulo 2.

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
$R_{f(pu)}$	1×10^{-20}	0, 10	0, 05
$L_{ls(pu)}$	0, 10	0, 20	0, 15

Fonte: Adaptado de Kundur (1994)

Os valores obtidos em v_f^{modelo} são comparados com os valores de v_f^{real} obtidos a partir do sistema de medição e, então, o erro (ϵ) entre os sinais é minimizado com o MMQNL, obtendo-se um novo valor para \mathbf{T} a cada iteração.

No processo de minimização são estabelecidas algumas restrições baseadas nas relações entre os parâmetros e na Tabela 2 (KUNDUR, 1994).

$$\mathbf{T}_{min} = [1 \times 10^{-20} \quad 0, 1]^T \quad (4.68)$$

$$\mathbf{T}_{max} = [0, 1 \quad 0, 2]^T$$

$$[G(\mathbf{T})] = [R_{f(pu)} - L_{ls(pu)}] \leq [0] \quad (4.69)$$

Se o erro for menor que um valor de tolerância estabelecido ($\epsilon < tol$), o Módulo 2 é finalizado e os valores encontrados em \mathbf{T} são admitidos corretos, caso contrário o algoritmo continua até que $\epsilon < tol$.

4.6.3 Definição do Módulo 3

Este Módulo consiste em utilizar os resultados obtidos nos Módulos 1 e 2 para identificar os parâmetros $L_{md(pu)}$ e $L_{mq(pu)}$. Outro propósito do Módulo 3 é estimar o comportamento dinâmico do ângulo de carga (δ), do ângulo do fator de potência (ϕ) e consequentemente estimar i_d , i_q , v_d e v_q para o período de amostra escolhido.

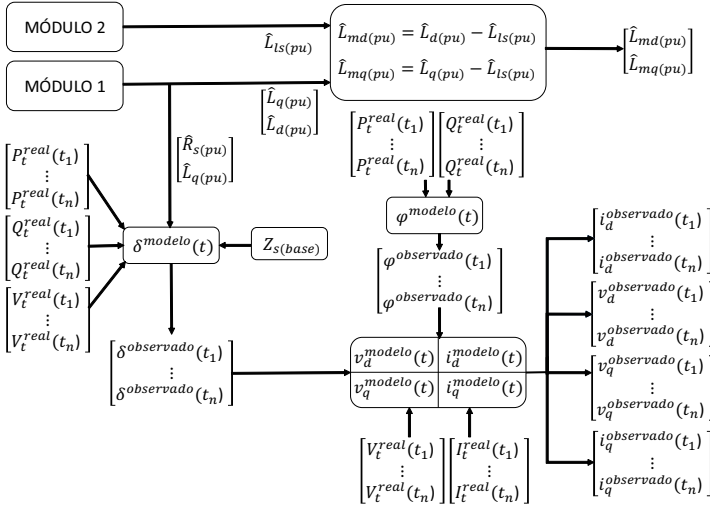


Figura 10 – Módulo 3 - Identificação dos Parâmetros $L_{md(pu)}$, $L_{mq(pu)}$ e Estimação dos Sinais δ , ϕ , i_d , i_q , v_d e v_q .

O ângulo do Fator de Potência (ϕ) é calculado pela Equação (3.40). A partir da identificação dos parâmetros $R_s(pu)$ e $L_q(pu)$ é possível utilizar a Equação (4.27) e estimar o comportamento dinâmico do ângulo de carga (δ). Com isso é possível aplicar as Equações (3.36)–(3.39) e estimar v_d , v_q , i_d , i_q .

A identificação dos parâmetros $L_q(pu)$ e $L_d(pu)$ com o Módulo 1 e do parâmetro $L_{ls(pu)}$ com o Módulo 2 possibilita utilizar as relações expostas pelas Equações (3.26) e (3.29) e identificar os parâmetros $L_{md(pu)}$ e $L_{mq(pu)}$ no Módulo 3.

4.6.4 Definição do Módulo 4

O Módulo 4 (Figura 11) utiliza os resultados obtidos pelos Módulos 1, 2 e 3. Aqui é identificado o parâmetro $L_f(pu)$, além disso, as correntes de amortecimento i'_D e i'_Q são estimadas para o período de amostra escolhido.

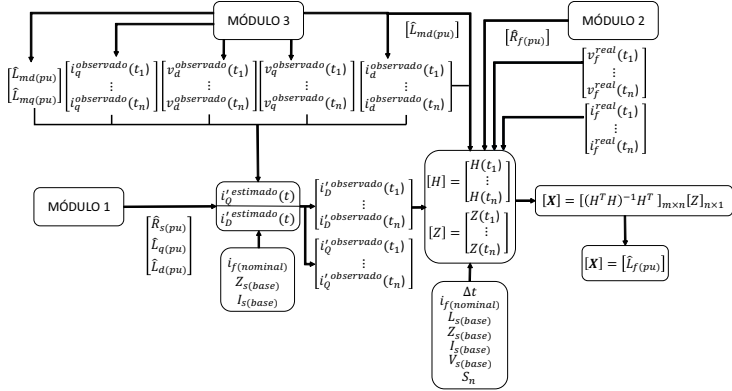


Figura 11 – Módulo 4 - Identificação do Parâmetro $L_f(pu)$ e Estimação dos Sinais i'_D e i'_Q .

As correntes de amortecimento $i'_D^{estimado}(t)$ e $i'_Q^{estimado}(t)$ são obtidas a partir das Equações (4.53) e (4.54), respectivamente. O cálculo dessas correntes é possível por causa dos Módulos 1 e 3.

Para identificar $L_f(pu)$ é necessário modificar as Equações (3.10) e (3.13) para que adquiram a seguinte forma:

$$\begin{aligned} [H]_{i \times m} [\mathbf{X}]_{m \times 1} &= [Z]_{i \times 1} \\ i &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (4.70)$$

Para isso, substituiu-se a Equação (3.13) na Equação (3.10) e a seguinte equação é obtida:

$$v'_f(t) = R'_f i'_f(t) + \frac{d}{dt} \left(\left(L_{md} + L'_{lf} \right) i'_f(t) + L_{md} \left(i'_D(t) - i_d(t) \right) \right) \quad (4.71)$$

Utiliza-se a aproximação mostrada na Equação (4.34) (*Forward Difference*) devido a presença das derivadas na Equação (4.71) (KYRI-

AKIDES; HEYDT; VITTAL, 2004).

$$v'_f(t) = R'_f i'_f(t) + (L_{md} + L'_{lf}) \left(\frac{i'_f(t + \Delta t) - i'_f(t)}{\Delta t} \right) + \quad (4.72)$$

$$+ L_{md} \left(\frac{i'_D(t + \Delta t) - i'_D(t)}{\Delta t} - \frac{i_d(t + \Delta t) - i_d(t)}{\Delta t} \right)$$

Na Equação (4.72), Δt é o período de amostragem.

Deve-se, agora, converter os parâmetros ao sistema *p.u.* e utilizar as transformações necessárias nos sinais. Dessa forma, a Equação (4.72) é transformada na Equação (4.73) e nesta, para apresentar uma estética melhor, troca-se o sobrescrito “observado” por “obs”.

$$k_1 v_f^{real}(t) = k_2 i_f^{real}(t) + k_3 (i_f^{real}(t + \Delta t) - i_f^{real}(t)) + \quad (4.73)$$

$$+ k_4 (i_D^{obs}(t + \Delta t) - i_D^{obs}(t)) +$$

$$- k_4 (i_d^{obs}(t + \Delta t) - i_d^{obs}(t))$$

$$k_1 = \frac{V_{s(base)} i_{f(nominal)} \hat{L}_{md(pu)}}{S_n} \quad (4.74)$$

$$k_2 = \left(\frac{Z_{s(base)} I_{s(base)}}{i_{f(nominal)} \hat{L}_{md(pu)}} \right) \hat{R}_{f(pu)} \quad (4.75)$$

$$k_3 = \left(\frac{L_{md(pu)} + L_{lf(pu)}}{\Delta t} \right) \left(\frac{I_{s(base)} L_{s(base)}}{i_{f(nominal)} \hat{L}_{md(pu)}} \right) \quad (4.76)$$

$$k_4 = \frac{\hat{L}_{md(pu)} L_{s(base)}}{\Delta t} \quad (4.77)$$

A Equação (3.27) é introduzida na Equação (4.76) e a Equação (4.73) é adaptada na forma matricial:

$$[H][L_{f(pu)}] = [Z_1] - [Z_2] - [Z_3] + [Z_4] \quad (4.78)$$

$$[H] = \frac{I_{s(base)} L_{s(base)}}{\hat{L}_{md(pu)} i_{f(nominal)} \Delta t} \left(\begin{bmatrix} i_f^{real}(t_2) \\ \vdots \\ i_f^{real}(t_n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_f^{real}(t_1) \\ \vdots \\ i_f^{real}(t_{n-1}) \end{bmatrix} \right) \quad (4.79)$$

$$[Z_1] = k_1 \begin{bmatrix} v_f^{real}(t_1) \\ \vdots \\ v_f^{real}(t_{n-1}) \end{bmatrix} \quad (4.80)$$

$$[Z_2] = k_2 \begin{bmatrix} i_f^{real}(t_1) \\ \vdots \\ i_f^{real}(t_{n-1}) \end{bmatrix} \quad (4.81)$$

$$[Z_3] = k_4 \left(\begin{bmatrix} i_D^{\prime obs}(t_2) \\ \vdots \\ i_D^{\prime obs}(t_n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_D^{\prime obs}(t_1) \\ \vdots \\ i_D^{\prime obs}(t_{n-1}) \end{bmatrix} \right) \quad (4.82)$$

$$[Z_4] = k_4 \left(\begin{bmatrix} i_d^{obs}(t_2) \\ \vdots \\ i_d^{obs}(t_n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_d^{obs}(t_1) \\ \vdots \\ i_d^{obs}(t_{n-1}) \end{bmatrix} \right) \quad (4.83)$$

Observa-se que a Equação (4.78) está na forma da Equação (4.70). Então é possível utilizá-la no Módulo 4, aplicar o MMQL e identificar o parâmetro $L_{f(pu)}$.

4.6.5 Definição do Módulo 5

A Figura 12 representa o Módulo 5 e tem como função identificar os parâmetros $L_{D(pu)}$, $L_{Q(pu)}$, $R_{D(pu)}$ e $R_{Q(pu)}$ a partir dos resultados obtidos pelos Módulos 3 e 4.

Deve-se inicializar os vetores de parâmetros $[D]$ e $[Q]$ com prováveis valores de α (Equação (4.44)), $L_{D(pu)}$, β (Equação (4.46)) e $L_{Q(pu)}$. Não se encontrou na literatura informações para prováveis valores iniciais, então são admitidas faixas de valores baseadas nas considerações a seguir.

Para determinar uma provável faixa numérica para $L_{D(pu)}$ e $L_{Q(pu)}$ foram analisados valores típicos encontrados na literatura (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003). Ao final da análise, optou-se por utilizar uma faixa numérica bem ampla (0,1 até 2). Para atribuir valores aos parâmetros $L_{D(pu)}^0$ e $L_{Q(pu)}^0$ utilizou-se o valor médio apresentado na Tabela 3.

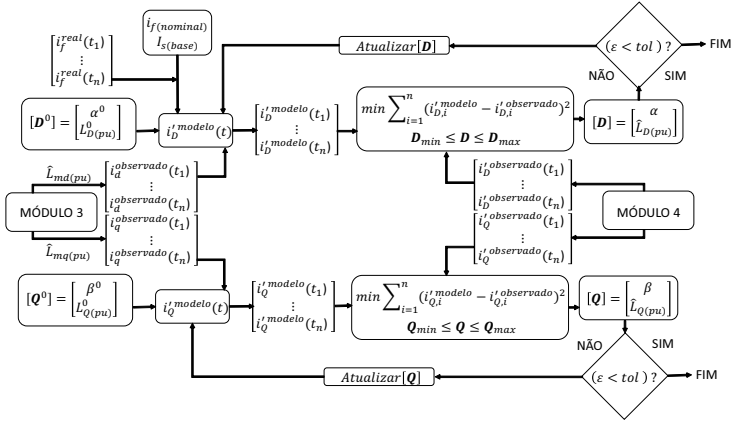


Figura 12 – Módulo 5 - Identificação dos Parâmetros $L_{D(pu)}$, $R_{D(pu)}$, $L_{Q(pu)}$ e $R_{Q(pu)}$.

Os valores de $i_d(0)$, $i_f(0)$ e $i_q(0)$ das Equações (4.49) e (4.50) são obtidos calculando a média dos valores de $i_d^{\text{observado}}$, i_f^{real} e $i_q^{\text{observado}}$ para o intervalo de amostra escolhido.

A Equação (4.44), que define o parâmetro α , depende dos valores de $R_{D(pu)}$, $L_{D(pu)}$, ω_{base} e Δt . Se o período de amostragem é $\Delta t \ll 1s$, pode-se dizer que $\alpha \approx 1$. Para não restringir muito a possível faixa de valores que α pode adquirir, utiliza-se 0,9 de valor mínimo e 1 de valor máximo. Como é mostrado na Tabela 3. O valor médio é utilizado como α^0 .

De maneira análoga aos prováveis valores de α , pode-se encontrar uma provável faixa de valores para β . Mostra-se na Equação (4.46) que este parâmetro depende dos valores de $R_{Q(pu)}$, $L_{Q(pu)}$, ω_{base} e Δt . Então, considerando que o período de amostragem é $\Delta t \ll 1s$, pode-se dizer que $\beta \approx 1$. Para não restringir muito a possível faixa de valores que este parâmetro pode adquirir, utilizam-se os valores mínimos e máximos mostrados na Tabela 3 (Valor mínimo de 0,9 e valor máximo de 1). O valor médio é utilizado para atribuir valor ao β^0 .

Tabela 3 – Valores Mínimos, Máximos e Médios de Geradores Síncronos de Polos Salientes para o Módulo 5

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio
$\alpha - \beta$	0,9	1,0	0,95
$L_{D(pu)} - L_{Q(pu)}$	0,1	2,0	1,05

Com as correntes observadas ($i_d^{observado}$ e $i_q^{observado}$), os parâmetros identificados ($\hat{L}_{md(pu)}$ e $\hat{L}_{mq(pu)}$), os valores iniciais de $[\mathbf{D}^0]$ e $[\mathbf{Q}^0]$ e o conhecimento de $i_f^{(nominal)}$ e $I_s^{(base)}$ é possível utilizar i_D^{modelo} (Equação (4.47)) e i_Q^{modelo} (Equação (4.50)).

Os valores obtidos em i_D^{modelo} (Equação (4.47)) são comparados com os valores de $i_D^{observado}$ obtidos a partir da Equação (4.53) no Módulo 4 e o erro (ϵ) entre os sinais é minimizado com o MMQNL, obtendo um novo valor para $[\mathbf{D}]$ a cada iteração. Encontrado o valor dos parâmetros contidos em $[\mathbf{D}]$, na sequência, o algoritmo compara i_Q^{modelo} (Equação (4.50)) com $i_Q^{observado}$ obtido a partir da Equação (4.54) pelo Módulo 4 e o erro (ϵ) entre os sinais é minimizado com o MMQNL, obtendo, a cada iteração, um novo valor para $[\mathbf{Q}]$.

Não foi observada nenhuma relação de desigualdade entre os parâmetros que devem ser identificados, então esta restrição não foi imposta. As restrições de valores mínimos e máximos são mostradas nas Equações (4.84) e (4.85).

$$\mathbf{D}_{min} = [0, 9 \quad 0, 1]^T \quad (4.84)$$

$$\mathbf{D}_{max} = [1, 0 \quad 2, 0]^T$$

$$\mathbf{Q}_{min} = [0, 9 \quad 0, 1]^T \quad (4.85)$$

$$\mathbf{Q}_{max} = [1, 0 \quad 2, 0]^T$$

Se os erros forem menores que um valor de tolerância estabelecido ($\epsilon < tol$), o Módulo 5 é finalizado e os valores encontrados em $[\mathbf{D}]$ e $[\mathbf{Q}]$ são admitidos corretos. Caso contrário, o algoritmo continua atualizando $[\mathbf{D}]$ e $[\mathbf{Q}]$ até que $\epsilon < tol$.

Encontrado os valores de α , β , $\hat{L}_{D(pu)}$ e $\hat{L}_{Q(pu)}$, devem ser realizadas manipulações algébricas para encontrar $\hat{R}_{D(pu)}$ e $\hat{R}_{Q(pu)}$. As Equações (4.44) e (4.46) são modificadas para:

$$\hat{R}_{D(pu)} = \frac{\hat{L}_{D(pu)}}{\omega_{base} \Delta t} (1 - \alpha) \quad (4.86)$$

$$\hat{R}_{Q(pu)} = \frac{\hat{L}_{Q(pu)}}{\omega_{base} \Delta t} (1 - \beta) \quad (4.87)$$

As Equações (4.86) e (4.87) são utilizadas para identificar os parâmetros $\hat{R}_{D(pu)}$ e $\hat{R}_{Q(pu)}$.

4.6.6 Síntese do Processo de Identificação dos Parâmetros do Gerador Síncrono de Polos Salientes

Todos os módulos apresentados anteriormente possuem funções que se complementam, estimando sinais e identificando os parâmetros do gerador síncrono de polos salientes.

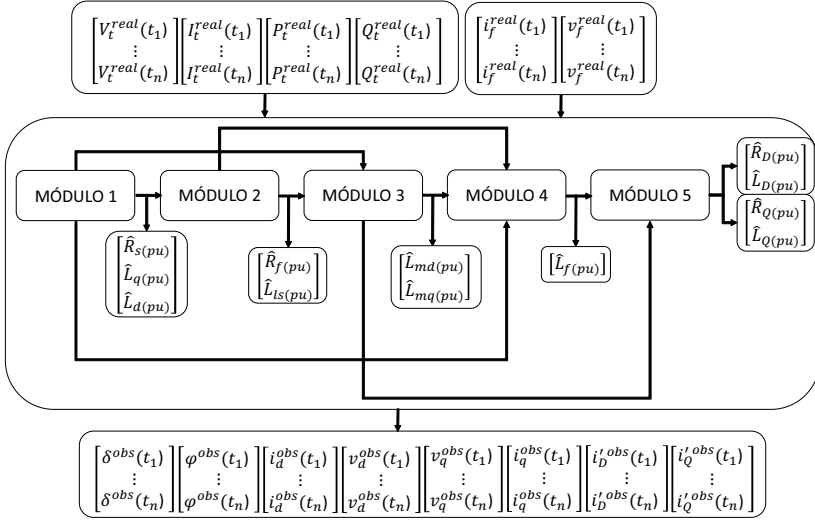


Figura 13 – Síntese do Processo de Identificação dos Parâmetros do Gerador Síncrono de Polos Salientes.

O método proposto necessita apenas de seis sinais reais medidos: V_t , I_t , P_t , Q_t , i_f e v_f . O objetivo principal é identificar todos os parâmetros fundamentais do gerador síncrono. O método cumpre isso, e além disso, nota-se que diversos sinais podem ser estimados como efeito secundário do método proposto.

4.6.7 Análise do Erro de Estimação e Análise Estatística

Quando sinais reais são utilizados em um processo de identificação há ruído associado. Isso ocorre por causa do processo de medição. Como consequência, os parâmetros estimados por um determinado processo contém o Erro de Estimação, o qual é composto por três tipos de erros distintos: Erro de Tendência, Erro de Espalhamento e Erro

Irreduzível (RODRÍGUEZ, 2015):

- Erro de Tendência: é a diferença entre a média das estimações e o valor de referência de uma determinada grandeza. Para ser coerente, todas as estimações devem ser realizadas por um mesmo método. Como existem ruídos aleatórios presentes nos sinais registrados em campo, os sinais calculados por modelos têm uma faixa de estimação. O Erro de Tendência calcula o quão longe a grandeza estimada está do valor real (valor de referência);
- Erro de Espalhamento: no caso de um processo de identificação que é repetido diversas vezes tem-se o Erro de Espalhamento. Este é definido como a variabilidade das estimações de uma determinada grandeza em torno do valor médio estimado. Pode-se calcular o espalhamento a partir da variância;
- Erro Irreduzível: parcela do Erro de Estimação que ocorre devido ao ruído aleatório presente nos sinais coletados no campo. Em condições ideais é nulo (o Erro de Tendência e o Erro de Espalhamento são nulos). Em experimentos reais não há como este erro ser evitado.

Na Figura 14 são verificados os conceitos de Erro de Tendência e Erro de Espalhamento. O círculo central (vermelho) representa o valor real e os pontos dentro do alvo representam os valores estimados por um determinado processo de estimação.

A melhor estimação é dada quando há baixo espalhamento e baixa tendência. Tal fato ocorre quando todos os valores estimados estão no círculo central (Figura 14).

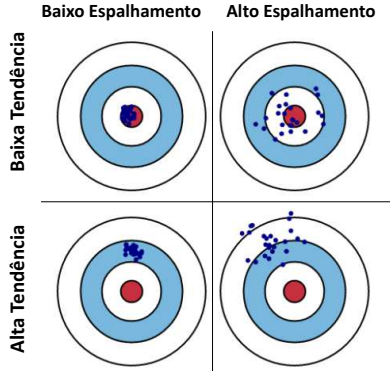


Figura 14 – Erro de Tendência e Espalhamento.
 Fonte: Adaptado de Rodríguez (2015)

Para quantificar os erros mencionados previamente, as seguintes considerações são feitas (RODRÍGUEZ, 2015):

$$\begin{aligned}
 y &= f(x, \mathbf{P}) + \epsilon \\
 E\{\epsilon\} &= 0 \\
 Var\{\epsilon\} &= \sigma_e^2
 \end{aligned}
 \tag{4.88}$$

Na Equação (4.88) o resíduo (ϵ) possui um valor esperado ($E\{\epsilon\}$) nulo com variância ($Var\{\epsilon\}$) igual a σ_e^2 . Baseado nisso, pode-se inferir que o valor esperado do resíduo em um conjunto de parâmetros \mathbf{P}^* é matematicamente definido como (RODRÍGUEZ, 2015):

$$Err\{\mathbf{P}^*\} = E\{f(x, \mathbf{P}^*) - y\}^2
 \tag{4.89}$$

A Equação (4.89) é decomposta em três componentes:

$$\begin{aligned}
 Err\{\mathbf{P}^*\} &= [E\{f(x, \mathbf{P}^*)\} - f(x, \mathbf{P}^*)] + \\
 &\quad \left[E\{(f(x, \mathbf{P}^*) - E\{f(x, \mathbf{P}^*)\})^2\} \right] + [\sigma_e^2] \\
 Err\{\mathbf{P}^*\} &= [Erro de Tendência] + \\
 &\quad [Erro de Espalhamento] + [Erro Irreduzível]
 \end{aligned}
 \tag{4.90}$$

A Equação (4.90) define o Erro de Estimação. O primeiro termo é o Erro de Tendência (indica o afastamento entre o valor estimado e o real), o segundo termo indica o Erro de Espalhamento (o quadrado do

desvio esperado de \mathbf{P}^* em torno do seu valor médio, também conhecido como variância) e o terceiro termo quantifica o Erro Irredutível (ocorre devido aos ruídos presentes nos sistemas reais de medições). O último termo só é evitado se $\epsilon = 0$ e $\sigma_e^2 = 0$ (RODRÍGUEZ, 2015).

Uma medida estatística da qualidade do ajuste realizado por um método de identificação de parâmetros consiste no cálculo de um intervalo de confiança (RODRÍGUEZ, 2015). Este cálculo permite determinar limites de valores que o parâmetro pode assumir baseado na aplicação do método proposto para algumas amostras (RODRÍGUEZ, 2015; MSA, 2017). O processo de identificação desta dissertação se propõe em utilizar um número pequeno de amostras. Então, para construir o intervalo de confiança, é utilizada a distribuição t-Student. O intervalo de confiança utilizado é de 95% (MSA, 2017).

5 RESULTADOS

5.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE

O gerador síncrono de polos salientes do sistema teste utilizado tem potência trifásica nominal (S_n) de 187 MVA, tensão nominal (V_n) de 13,8 kV, corrente de campo nominal de 1087 A ($i_{f(nominal)}$), opera com frequência nominal (f_n) de 60 Hz e está conectado a um barramento infinito com tensão unitária no sistema *p.u.* por um transformador elevador de 13,8 kV/230 kV. A descrição completa das equações diferenciais que compõe o modelo da máquina síncrona que o software Simulink utiliza está disponível em MathWorks (2017). Na Figura 15 é apresentado o ambiente de simulação do Simulink. Todas as medições dos sinais foram obtidas a partir do Simulink e exportadas ao MATLAB para realizar as análises.

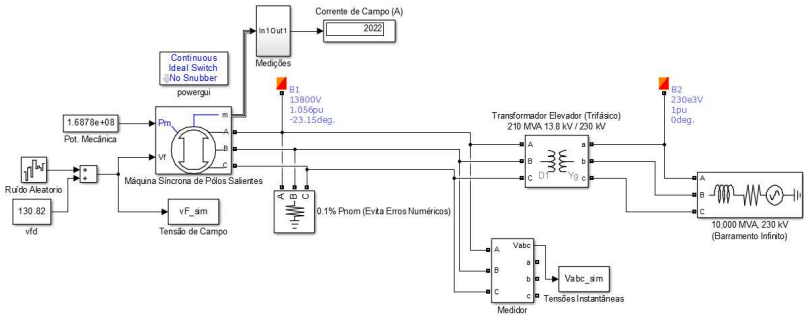


Figura 15 – Máquina Síncrona de Polos Salientes Conectada a um Barramento Infinito por um Transformador Elevador.

A simulação foi realizada com a máquina operando com um fator de potência de 0,9 atrasado e com tempo final de simulação de 60 segundos. A frequência de amostragem utilizada para coletar os sinais elétricos foi de 1 kHz ($\Delta t = 1 \times 10^{-3} s$). Os sinais coletados foram tratados com um filtro Butterworth, utilizando a função `filtfilt` do MATLAB para eliminar grande parte dos ruídos e suavizar as curvas. Tem-se acesso às seguintes medições via simulação do Simulink: $i_d(t)$, $i_q(t)$, $i_f(t)$, $v_d(t)$, $v_q(t)$, $v_f(t)$, $\delta(t)$, $P_t(t)$, $Q_t(t)$, $v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, entre outras.

Aplicou-se pequenas perturbações permanentes em $v_f(t)$ para simular o comportamento da máquina síncrona operando em regime quase que permanente quando está conectada à rede elétrica. Validou-se os modelos das correntes de amortecimento, corrente de campo, tensão de campo e ângulo de carga desenvolvidos nesta dissertação com os dados coletados via simulação e então foi aplicado o processo de identificação proposto.

5.1.1 Parâmetros da Máquina Síncrona e Bases para Simulação

Os parâmetros em *p.u.*, assim como as bases do Estator e Campo são mostrados a seguir.

- Parâmetros para Simulação:

$$\begin{aligned}
 R_{s(pu)} &= 2,8544 \times 10^{-3} \\
 L_{d(pu)} &= 1,3050 \\
 L_{q(pu)} &= 0,4740 \\
 L_{md(pu)} &= 1,1907 \\
 L_{mq(pu)} &= 0,3596 \\
 L_{ls(pu)} &= 0,1144 \\
 L_{f(pu)} &= 1,3043 \\
 R_{f(pu)} &= 5,7947 \times 10^{-4} \\
 L_{D(pu)} &= 1,3723 \\
 L_{Q(pu)} &= 0,7433 \\
 R_{D(pu)} &= 0,0117 \\
 R_{Q(pu)} &= 0,0197
 \end{aligned}$$

- Bases do Estator para Simulação:

$$V_{s(base)} = \frac{\sqrt{2}V_n}{\sqrt{3}} = 1,1268 \times 10^4 \text{ V}$$

$$I_{s(base)} = \frac{\sqrt{2}S_n}{\sqrt{3}V_n} = 1,1064 \times 10^4 \text{ A}$$

$$Z_{s(base)} = \frac{V_{s(base)}}{I_{s(base)}} = 1,0184 \text{ } \Omega$$

$$\omega_{base} = 2\pi f_n = 376,9911 \frac{rad}{s}$$

$$L_{s(base)} = \frac{Z_{s(base)}}{\omega_{base}} = 0,0027 \text{ H}$$

- Bases do Campo para Simulação:

$$I_{f(base)} = i_{f(nominal)} L_{md(pu)} = 1,2942 \times 10^3 \text{ A}$$

$$V_{f(base)} = \frac{S_n}{I_{f(base)}} = 1,4449 \times 10^5 \text{ V}$$

$$Z_{f(base)} = \frac{V_{f(base)}}{I_{f(base)}} = 111,6383 \text{ } \Omega$$

$$L_{f(base)} = \frac{Z_{f(base)}}{\omega_{base}} = 0,2961 \text{ H}$$

5.2 AVALIAÇÃO DOS MODELOS PROPOSTOS

Para avaliar os modelos desenvolvidos de estimação dos sinais admite-se que todos os parâmetros fundamentais são conhecidos. Os erros entre os sinais estimados e simulados são calculados utilizando o Erro Percentual (KYRIAKIDES, 2003).

5.2.1 Análise Quantitativa dos Erros

O Erro Percentual (EP) entre os valores simulados e estimados dos sinais é calculado de acordo com a Equação (5.1).

$$EP(\%) = 100 \times \frac{\|\vec{g}^{simulado} - \vec{g}^{observado}\|_2}{\|\vec{g}^{simulado}\|_2} \quad (5.1)$$

Tem-se que $\|\cdot\|_2$ é a norma euclidiana e sua formulação é dada pela Equação (5.2) (KYRIAKIDES, 2003). $g^{observado}$ é a representação dos sinais estimados e $g^{simulado}$ é a representação dos sinais adquiridos via simulação.

$$\|\vec{g}\|_2 = \left(\sum_{i=1}^n |g_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

5.2.2 Comparativo entre Corrente de Campo Simulada e Calculada

Aqui é verificado se a Equação (4.31) determina corretamente a corrente de campo (i_f) na presença de pequenas perturbações.

Observa-se na Figura 16 a coerência entre $i_f^{simulado}$ e i_f^{modelo} . Tem-se no fragmento aumentado o quão próximas estão as curvas. O EP calculado tem um valor de 0,0017%, que é um valor percentual de erro praticamente nulo.

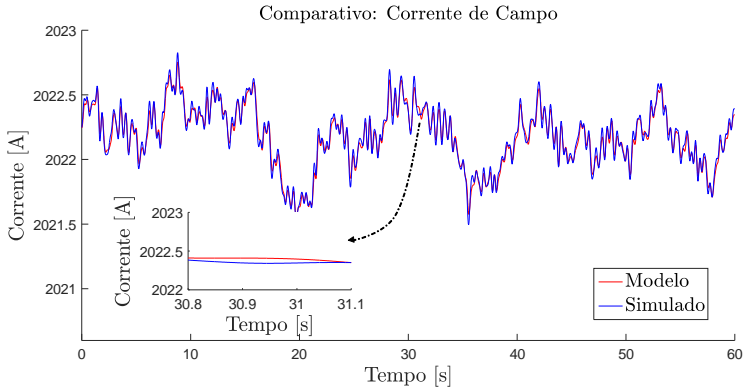


Figura 16 – Comparativo entre o Modelo da Corrente de Campo (Equação (4.31)) e o Valor Simulado, com Fragmento Ampliado.

Pelas condições de operação impostas ao gerador síncrono de polos salientes, a formulação de i_f^{modelo} apresentou resultados satisfatórios, possibilitando identificar os parâmetros $R_{s(pu)}$, $L_{q(pu)}$ e $L_{d(pu)}$ com o Módulo 1.

5.2.3 Comparativo entre Tensão de Campo Simulada e Calculada

Nesta seção avaliou-se se a Equação (4.33) determinou de maneira satisfatória o comportamento em regime quase que permanente da tensão de campo (v_f) obtida via simulação.

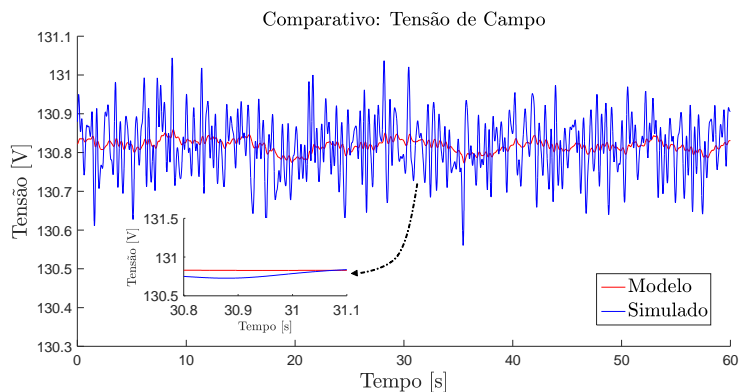


Figura 17 – Comparativo entre o Modelo da Tensão de Campo (Equação (4.33)) e o Valor Simulado, com Fragmento Ampliado.

Observa-se na Figura 17 que $v_f^{simulado}$ e v_f^{modelo} destoam um pouco no comparativo do comportamento dinâmico. No entanto, nota-se no fragmento aumentado que não há uma diferença muito grande entre as curvas. Ou seja, há coerência no comportamento das curvas em torno de um ponto de operação.

Para quantificar, o EP é calculado, obtendo um valor de 0,0535%, um valor relativamente baixo. Conclui-se que, pelas condições impostas de operação, a formulação de v_f^{modelo} determinou o comportamento dinâmico, mas eliminou alguns ruídos que estão presentes na medição do sinal. Devido a isso, quando comparado o sinal de v_f^{modelo} com $v_f^{simulado}$ é possível identificar os parâmetros $R_{f(pu)}$ e $L_{ls(pu)}$ com o Módulo 2.

5.2.4 Comparativo entre Ângulo de Carga Simulado e Calculado

Compara-se na Figura 18 o sinal de ângulo de carga obtido pela Equação (4.27) e pela simulação.

Observa-se que os sinais são praticamente idênticos. O fragmento aumentado torna tal constatação mais clara. O cálculo do EP foi realizado obtendo-se um valor de 0,002%. Conclui-se que se houver conhecimento dos parâmetros $R_s(pu)$ e $L_q(pu)$ é possível estimar de maneira satisfatória o comportamento dinâmico do ângulo de carga e assim observar diversos sinais que dependem do conhecimento do ângulo de carga (i_d , i_q , v_d e v_q).

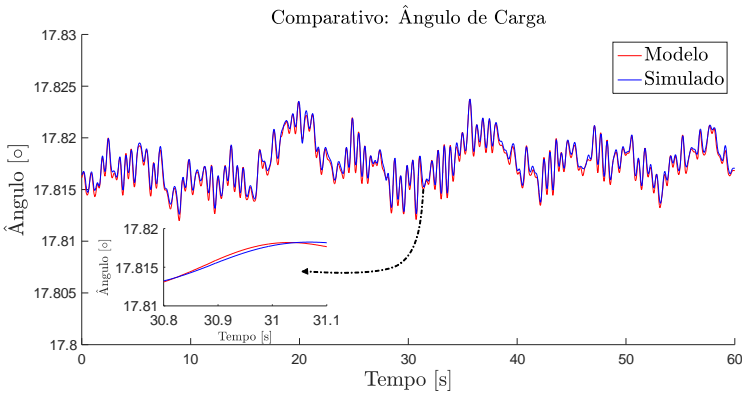


Figura 18 – Comparativo entre o Modelo do Ângulo de Carga (Equação (4.27)) e o Valor Simulado, com Fragmento Ampliado.

5.2.5 Comparativo entre os Observadores Não Convencionais das Correntes de Amortecimento

Na Figura 19 é apresentado um comparativo entre o comportamento dinâmico da corrente de amortecimento de eixo em quadratura (i'_q) obtido via simulação e calculado pelas Equações (4.50) e (4.54).

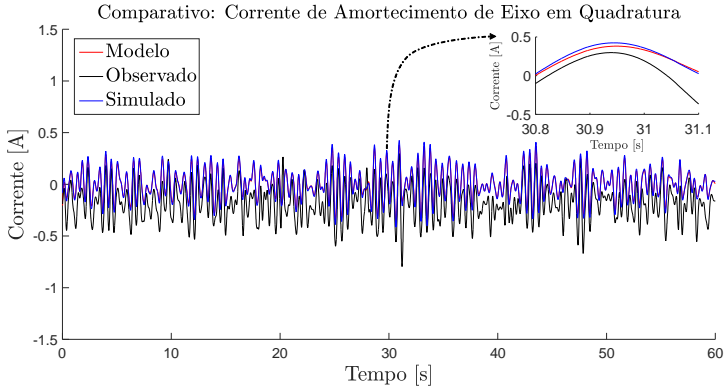


Figura 19 – Comparativo entre os Modelos de Corrente de Amortecimento de Eixo em Quadratura (Equação (4.50) - Modelo e Equação (4.54) - Observado) e o Valor Simulado, com Fragmento Ampliado.

Primeiramente foi comparado o sinal simulado ($i'_Q{}^{simulado}$) com o calculado pela Equação (4.50) ($i'_Q{}^{modelo}$). Observa-se no fragmento aumentado que as curvas estão praticamente sobrepostas. O cálculo do EP foi realizado entre as duas curvas e um valor de 7,0453% foi obtido.

Agora, compara-se o sinal simulado ($i'_Q{}^{simulado}$) com o calculado pela Equação (4.54) ($i'_Q{}^{observado}$). Nota-se no fragmento aumentado e durante todos os 60 segundos da amostra que as curvas possuem um comportamento dinâmico semelhante. No entanto, há um deslocamento de eixo e em alguns pontos as curvas são diferentes. O cálculo do EP foi realizado entre estas duas curvas e um valor de 139,0309% foi obtido.

Apesar da Equação (4.50) ter apresentado bons resultados, o processo necessita que a Equação (4.54) apresente uma estimativa satisfatória do sinal i'_Q , o que não ocorreu, fazendo com que o algoritmo identifique de forma errônea os parâmetros $L_{Q(pu)}$ e $R_{Q(pu)}$.

Na Figura 20 é mostrado um comparativo entre o comportamento dinâmico da corrente de amortecimento de eixo direto (i'_D) obtido via simulação e calculado pelas Equações (4.47) e (4.53).

Observa-se no fragmento aumentado e durante todo o período da amostra que as três curvas estão praticamente sobrepostas. Para quantificar, comparou-se o sinal simulado ($i'_D{}^{simulado}$) com o calculado pela Equação (4.47) ($i'_D{}^{modelo}$) e foi obtido EP = 10,4159%.

Foi quantificado o erro entre o sinal simulado ($i'_D{}^{simulado}$) com o calculado pela Equação (4.53) ($i'_D{}^{observado}$), obtendo um valor para EP

de 13,2310%.

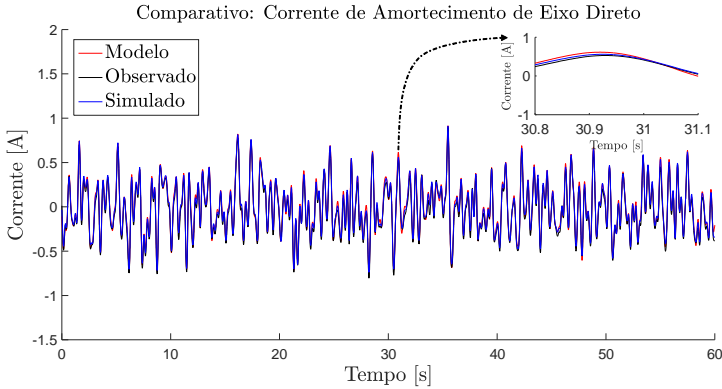


Figura 20 – Comparativo entre os Modelos de Corrente de Amortecimento de Eixo Direto (Equação (4.47) - Modelo e Equação (4.53) - Observado) e o Valor Simulado, com Fragmento Ampliado.

Os erros obtidos não são tão pequenos quanto os de corrente de campo, tensão de campo e ângulo de carga (inferiores à 1%), porém não são muito elevados (entre 10% e 15%). Conclui-se que é possível utilizar as Equações (4.53) e (4.47) para estimar as correntes de amortecimento de eixo direto e assim utilizar o processo de identificação on-line proposto nesta dissertação para determinar os parâmetros $L_{f(pu)}$, $L_{D(pu)}$ e $R_{D(pu)}$.

5.3 IDENTIFICAÇÃO UTILIZANDO DADOS SINTÉTICOS NO SISTEMA TESTE

Foi realizada uma simulação com tempo final de 60 segundos para obter dados sintéticos e utilizar o procedimento de identificação on-line. Nessa simulação o gerador opera em regime permanente com pequenas perturbações aleatórias permanentes na tensão de campo a fim de simular o comportamento quase que em regime permanente do sistema elétrico. Os dados foram separados em 4 amostras (períodos de 30 segundos) e foi aplicado o procedimento proposto em cada amostra.

Tabela 4 – Intervalo de Tempo das Amostras.

Amostra	Início do Intervalo [s]	Final do Intervalo [s]
1	$t_1 = 0$	$t_2 = 30$
2	$t_3 = 10$	$t_4 = 40$
3	$t_5 = 20$	$t_6 = 50$
4	$t_7 = 30$	$t_8 = 60$

Além da identificação dos parâmetros, os erros entre os sinais estimados (utilizando os parâmetros identificados) e simulados, foram analisados. Os resultados do processo de identificação com dados sintéticos permite calcular os erros e desvios do modelo com relação ao sistema teste, tornando possível avaliar o procedimento desenvolvido.

Ao final, realizou-se o cálculo estatístico do intervalo de confiança utilizando os parâmetros identificados nas 4 amostras. Calculou-se também o Erro de Tendência e o Erro de Espalhamento. Cada amostra compreende os intervalos de tempo presentes na Tabela 4. Para realizar o processo de identificação, apenas as seguintes quantidades foram utilizadas: S_n , V_n , $i_f(nominal)$, f_n , $v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$, $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$, $i_f(t)$ e $v_f(t)$. As simulações foram realizadas em um computador com Sistema Operacional Windows 10 Home, processador Intel(R) Core(TM) i5-5200U e 8GB de RAM.

5.3.1 Identificação dos Parâmetros Utilizando a Amostra 1

A primeira amostra contém os sinais presentes entre $t_1 = 0$ e $t_2 = 30s$. O processo de identificação dos parâmetros foi realizado em menos de um minuto. Todos os sinais estimados da Amostra 1 foram gerados a partir dos parâmetros presentes na Tabela 5, que foram identificados pelo método proposto nesta dissertação.

Tabela 5 – Parâmetros Identificados na Amostra 1.

Parâmetro	Valor Identificado	Parâmetro	Valor Identificado
$\hat{R}_s(pu)$	$2,1014 \times 10^{-3}$	$\hat{L}_f(pu)$	1,3151
$\hat{L}_d(pu)$	1,3145	$\hat{R}_f(pu)$	$5,8529 \times 10^{-4}$
$\hat{L}_q(pu)$	0,4549	$\hat{L}_D(pu)$	1,3683
$\hat{L}_{md}(pu)$	1,1966	$\hat{L}_Q(pu)$	–
$\hat{L}_{mq}(pu)$	0,3370	$\hat{R}_D(pu)$	0,0114
$\hat{L}_{ls}(pu)$	0,1179	$\hat{R}_Q(pu)$	–

5.3.2 Estimação dos Sinais da Amostra 1

Na Figura 21 é mostrado o comparativo entre as correntes de eixo direto e em quadratura observadas e simuladas. O EP calculado de i_d foi 1,02%, de i_q foi 0,92%, de i'_D foi 12,28% e de i'_Q foi de 100%. Todos os erros percentuais dos sinais observados e simulados foram baixos, com exceção do sinal observado de i'_Q (Figura 21d). Já se sabia que a Equação (4.54) apresenta um resultado não satisfatório de estimação do comportamento dinâmico. Comprovou-se aqui que o cálculo de i'_Q a partir da Equação (4.53) não é possível a partir dos parâmetros identificados.

São apresentados nas Figuras 22 e 23 os sinais observados e simulados das tensões de eixo direto e em quadratura, ângulo de carga e fator de potência. O erro percentual foi calculado e os seguintes resultados foram obtidos: EP de v_d de 3,02%, de v_q de 0,31%, do δ de 3,11% e do FP de 0,01%. Pode-se dizer que todos os erros calculados aqui foram baixos.

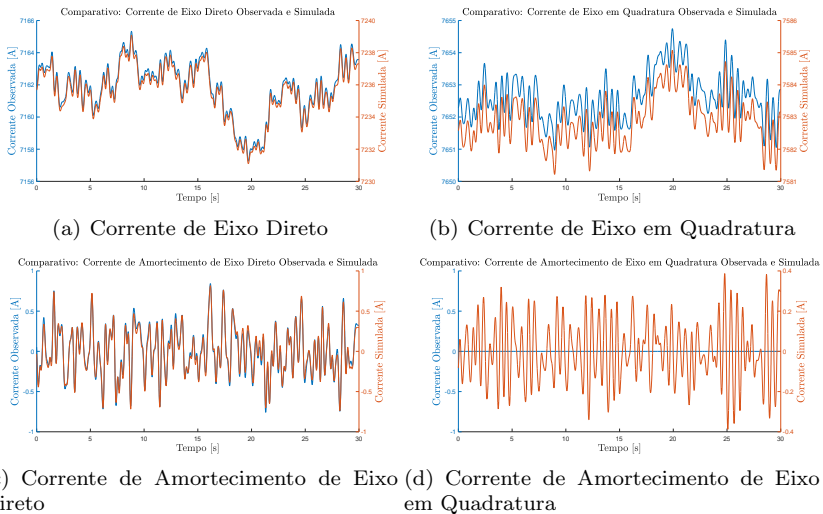


Figura 21 – Comparativo das Correntes $d - q$ da Amostra 1.

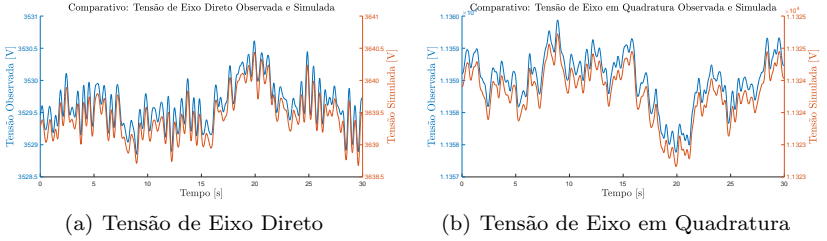


Figura 22 – Comparativo das Tensões $d - q$ da Amostra 1.

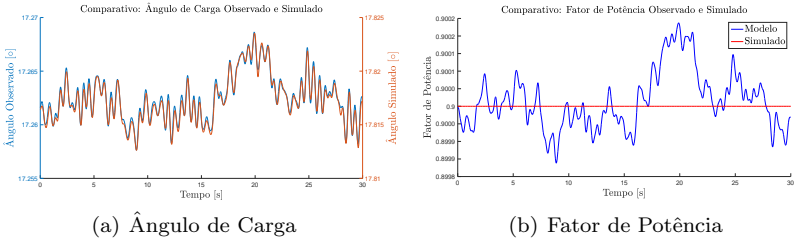


Figura 23 – Ângulo de Carga e Fator de Potência da Amostra 1.

5.3.3 Identificação dos Parâmetros Utilizando a Amostra 2

A segunda amostra contém os sinais presentes entre $t_3 = 10s$ e $t_4 = 40s$. O processo de identificação dos parâmetros foi realizado em menos de um minuto. Todos os sinais observados neste período de tempo foram gerados a partir dos parâmetros presentes na Tabela 6, identificados pelo método proposto nesta dissertação.

Tabela 6 – Parâmetros Identificados na Amostra 2.

Parâmetro	Valor Identificado	Parâmetro	Valor Identificado
$\hat{R}_s(pu)$	$2,0985 \times 10^{-3}$	$\hat{L}_f(pu)$	1,3139
$\hat{L}_d(pu)$	1,3133	$\hat{R}_f(pu)$	$5,8498 \times 10^{-4}$
$\hat{L}_q(pu)$	0,4574	$\hat{L}_D(pu)$	1,3942
$\hat{L}_{md}(pu)$	1,1963	$\hat{L}_Q(pu)$	—
$\hat{L}_{mq}(pu)$	0,3404	$\hat{R}_D(pu)$	0,0114
$\hat{L}_{ls}(pu)$	0,1170	$\hat{R}_Q(pu)$	—

5.3.4 Estimação dos Sinais da Amostra 2

Apresenta-se na Figura 24 as correntes observadas e estimadas de eixo direto e eixo em quadratura da Amostra 2. Calculou-se o erro percentual e os seguintes valores foram obtidos: EP de i_d foi 0,88%; EP de i_q foi 0,79%; EP de i'_D foi 12,67%; EP de i'_Q foi de 100%. Nesta amostra são observados resultados semelhantes aos apresentados pela Amostra 1. Isto é, todos os sinais apresentaram boas observações, exceto i'_Q (Figura 24d), impossibilitando identificar os parâmetros $R_{Q(pu)}$ e $L_{Q(pu)}$.

Na Figura 25 são mostrados os valores simulados e observados das tensões de eixo direto e em quadratura. O erro percentual de v_d foi de 2,60% e o EP de v_q foi de 0,26%. Conclui-se que os sinais observados de tensão apresentaram baixos erros percentuais em relação aos simulados.

Por último, analisou-se o EP do ângulo de carga e do Fator de Potência (Figura 26): obteve-se 2,69% para δ e 0,01% para o FP.

As conclusões acerca dos resultados obtidos na Amostra 2 é a mesma da Amostra 1. Ou seja, os parâmetros identificados estimaram de maneira satisfatória os sinais, com exceção da corrente de amortecimento de eixo em quadratura.

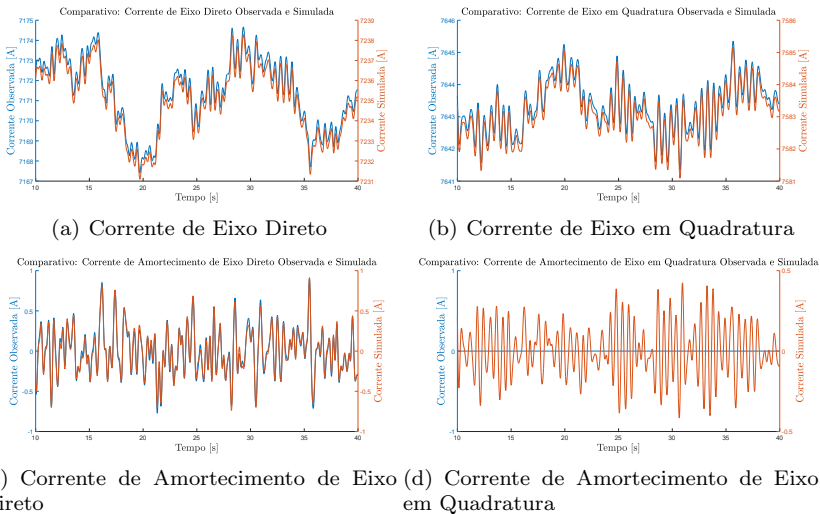


Figura 24 – Comparativo das Correntes $d - q$ da Amostra 2.

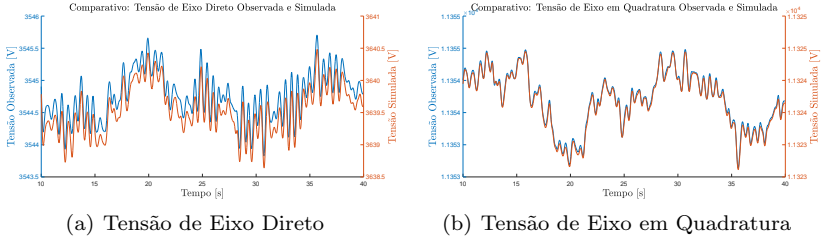


Figura 25 – Comparativo das Tensões $d - q$ da Amostra 2.

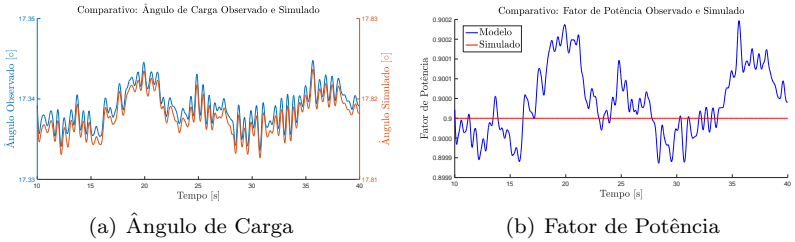


Figura 26 – Ângulo de Carga e Fator de Potência da Amostra 2.

5.3.5 Identificação dos Parâmetros Utilizando a Amostra 3

A terceira amostra contém os sinais presentes entre $t_5 = 20s$ e $t_6 = 50s$. O processo de identificação dos parâmetros foi realizado em menos de um minuto. Os parâmetros identificados são apresentados na Tabela 7 e os sinais estimados por estes parâmetros são apresentados posteriormente.

Tabela 7 – Parâmetros Identificados na Amostra 3.

Parâmetro	Valor Identificado	Parâmetro	Valor Identificado
$\hat{R}_s(pu)$	$2,0005 \times 10^{-3}$	$\hat{L}_f(pu)$	1,3091
$\hat{L}_d(pu)$	1,3103	$\hat{R}_f(pu)$	$5,8212 \times 10^{-4}$
$\hat{L}_q(pu)$	0,4638	$\hat{L}_D(pu)$	1,4267
$\hat{L}_{md}(pu)$	1,1934	$\hat{L}_Q(pu)$	—
$\hat{L}_{mq}(pu)$	0,3469	$\hat{R}_D(pu)$	0,0122
$\hat{L}_{ls}(pu)$	0,1169	$\hat{R}_Q(pu)$	—

5.3.6 Estimação dos Sinais da Amostra 3

Ao analisar os sinais observados e simulados obtidos a partir do processo de identificação aplicado na terceira amostra (Figuras 27, 28 e 29) calculou-se os seguintes erros percentuais: i_d de 0,52%; i_q de 0,47%; i'_D de 11,90%; i'_Q de 100%; v_d de 1,53%; v_q de 0,16%; δ de 1,58% e FP de 0,01%. A conclusão é análoga às Amostras 1 e 2.

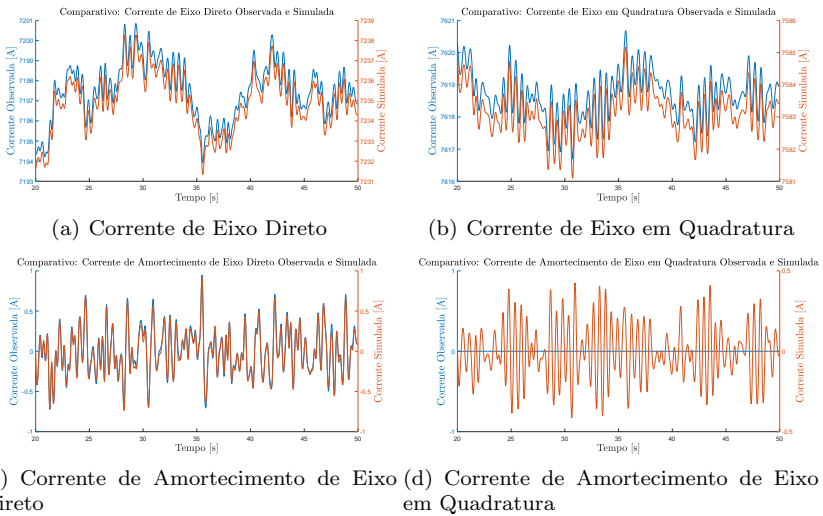


Figura 27 – Comparativo das Correntes $d - q$ da Amostra 3.

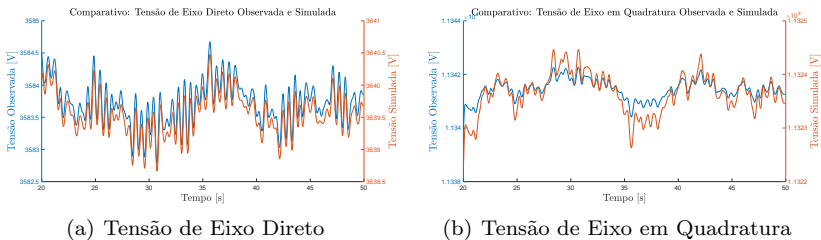


Figura 28 – Comparativo das Tensões $d - q$ da Amostra 3.

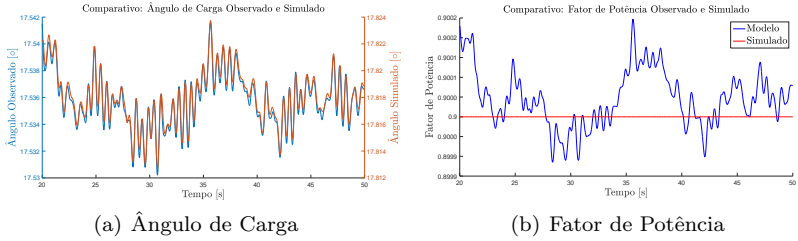


Figura 29 – Ângulo de Carga e Fator de Potência da Amostra 3.

5.3.7 Identificação dos Parâmetros Utilizando a Amostra 4

A quarta amostra contém os sinais presentes entre $t_7 = 30s$ e $t_8 = 60s$. O processo de identificação dos parâmetros foi realizado em menos de um minuto. O valor identificado de cada parâmetro é apresentado na Tabela 8. Os sinais estimados desta amostra são apresentados na sequência.

Tabela 8 – Parâmetros Identificados na Amostra 4.

Parâmetro	Valor Identificado	Parâmetro	Valor Identificado
$\hat{R}_s(pu)$	$2,0001 \times 10^{-3}$	$\hat{L}_f(pu)$	1,3198
$\hat{L}_d(pu)$	1,3179	$\hat{R}_f(pu)$	$5,8940 \times 10^{-4}$
$\hat{L}_q(pu)$	0,4481	$\hat{L}_D(pu)$	1,3863
$\hat{L}_{md}(pu)$	1,2008	$\hat{L}_Q(pu)$	–
$\hat{L}_{mq}(pu)$	0,3310	$\hat{R}_D(pu)$	0,0116
$\hat{L}_{ls}(pu)$	0,1171	$\hat{R}_Q(pu)$	–

5.3.8 Estimação dos Sinais da Amostra 4

Os sinais da quarta amostra foram analisados e os erros percentuais obtidos foram: i_d de 1,40%; i_q de 1,26%; i'_D de 12,64%; i'_Q de 100%; v_d de 4,13%; v_q de 0,42%; δ de 4,26% e FP de 0,01%. Nos sinais das Figuras 30, 31 e 32 são observados erros percentuais maiores que os das amostras anteriores. Isto ocorre pois o EP de δ é superior aqui, no entanto, a conclusão geral é igual às anteriores.

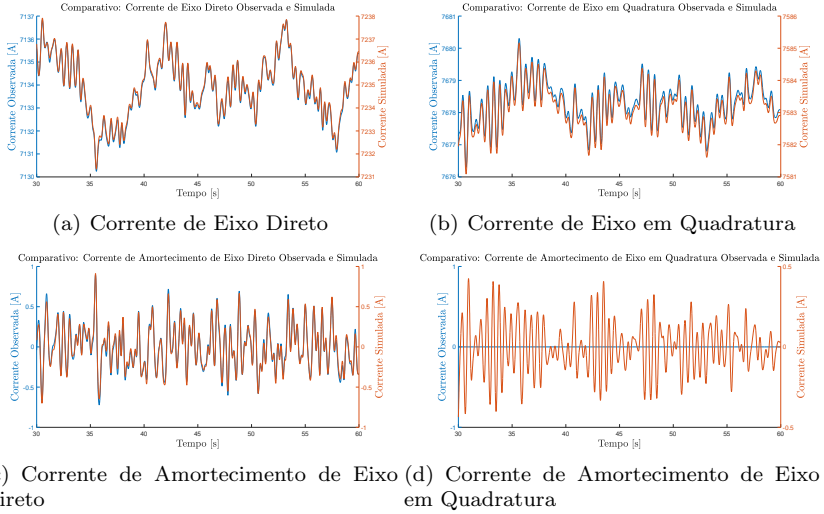


Figura 30 – Comparativo das Correntes $d - q$ da Amostra 4.

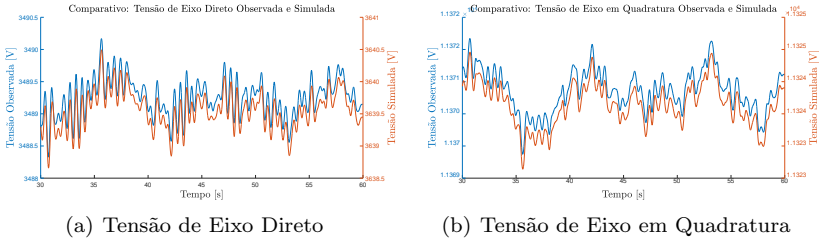


Figura 31 – Comparativo das Tensões $d - q$ da Amostra 4.

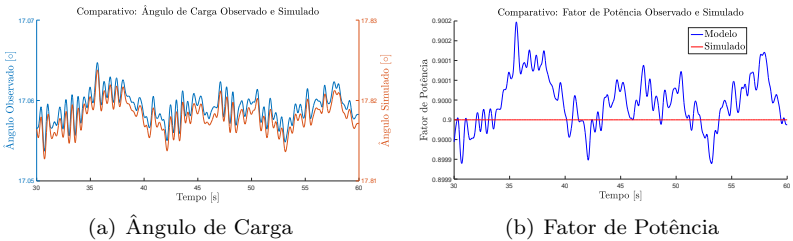


Figura 32 – Ângulo de Carga e Fator de Potência da Amostra 4.

5.3.9 Síntese do Processo de Identificação dos Parâmetros Utilizando as Amostras 1, 2, 3 e 4

A soma do tempo de processamento para a identificação dos parâmetros de todas as amostras é inferior a cinco minutos, o que não é muito elevado. O número de iterações não é comentado pois o procedimento de identificação utiliza métodos iterativos mais de uma vez.

Conclui-se que uma amostra compreendendo um período de trinta segundos e que utiliza uma frequência de amostragem de 1 kHz, identifica de maneira satisfatória praticamente todos os parâmetros do gerador síncrono de polos salientes, exceto $R_{Q(pu)}$ e $L_{Q(pu)}$. Além disso, o método torna possível estimar o comportamento dinâmico de diversos sinais que até então eram desconhecidos.

Como foram identificados os valores dos parâmetros para quatro amostras distintas, necessita-se realizar uma análise estatística.

5.3.10 Análise Estatística dos Parâmetros Estimados

Como foi visto no capítulo 4, o Erro de Tendência fornece uma avaliação do desempenho em procedimentos de identificação. No entanto, essa é uma avaliação fraca, pois não permite medir a volatilidade dos resultados considerando erros aleatórios de medições presentes nos registros dos sinais. Dessa forma, é necessário complementar a análise com o Erro de Espalhamento, e assim determinar o quão espalhados os parâmetros identificados estão quando o procedimento é aplicado a vários conjuntos de dados contaminados com ruídos aleatórios.

Além do exposto até aqui, sabe-se que o Erro de Tendência e o Erro de Espalhamento possuem comportamento inverso e dependem da complexidade do modelo utilizado. Isto é, para um modelo de alta complexidade, o Erro de Tendência diminui, mas o Erro de Espalhamento aumenta e vice-versa. Tal fato ocorre pois pequenos erros nos sinais coletados são pouco tolerados em modelos complexos. Em contrapartida, modelos simples apresentam erro de tendência considerável, porém possuem maior tolerância a erros nos sinais de entrada, apresentando menor Erro de Espalhamento. Dessa forma, conclui-se que um bom procedimento de identificação não é aquele que apresenta o menor Erro de Tendência ou Espalhamento, mas sim o que apresenta menor Erro de Estimação (Erro de Tendência mais Erro de Espalhamento) (RODRÍGUEZ, 2015).

Como os parâmetros fundamentais são conhecidos, os Erros de

Tendências são calculados e mostrados na Tabela 9. Os parâmetros $L_{Q(pu)}$ e $R_{Q(pu)}$ não são identificados, então eles foram retirados da análise.

Tabela 9 – Parâmetros Identificados.

Parâmetro	Valor Real	Valor Médio	Err. Tend. (%)
$R_{s(pu)}$	$2,8544 \times 10^{-3}$	$2,0501 \times 10^{-3}$	28,18
$L_d(pu)$	1,3050	1,3140	0,69
$L_q(pu)$	0,4740	0,4561	3,79
$L_{md(pu)}$	1,1907	1,1968	0,51
$L_{mq(pu)}$	0,3596	0,3388	5,78
$L_{ls(pu)}$	0,1144	0,1172	2,47
$R_f(pu)$	$5,7947 \times 10^{-4}$	$5,8545 \times 10^{-4}$	1,03
$L_f(pu)$	1,3043	1,3145	0,78
$R_D(pu)$	0,0117	0,0117	0,42
$L_D(pu)$	1,3723	1,3939	1,57

Realizou-se o cálculo da média dos parâmetros identificados nas quatro amostras. O Erro de Tendência foi obtido em relação ao valor real e o Erro de Espalhamento foi calculado em relação ao valor médio estimado. Observa-se na Tabela 9 que a resistência estimada do estator ($R_{s(pu)}$) apresentou o maior Erro de Tendência (28,18%). No entanto, todos os outros parâmetros estimados possuem Erro de Tendência inferior a 6%.

Ao analisar a Tabela 10, observa-se um baixo espalhamento para todos parâmetros estimados.

Tabela 10 – Análise Estatística.

Parâmetro	Espalhamento	Intervalo de Confiança (95%)
$R_{s(pu)}$	$3,3115 \times 10^{-9}$	$1,9586 \times 10^{-3} - 2,1417 \times 10^{-3}$
$L_d(pu)$	$9,8801 \times 10^{-6}$	1,3090 — 1,3190
$L_q(pu)$	$4,2137 \times 10^{-5}$	0,4457 — 0,4664
$L_{md(pu)}$	$9,2825 \times 10^{-6}$	1,1919 — 1,2016
$L_{mq(pu)}$	$4,4083 \times 10^{-5}$	0,3283 — 0,3494
$L_{ls(pu)}$	$2,0917 \times 10^{-7}$	0,1165 — 0,1178
$R_f(pu)$	$8,9793 \times 10^{-12}$	$5,8068 \times 10^{-4} - 5,9022 \times 10^{-4}$
$L_f(pu)$	$1,9323 \times 10^{-5}$	1,3075 — 1,3215
$R_D(pu)$	$1,4333 \times 10^{-7}$	0,01105 — 0,01225
$L_D(pu)$	$5,9635 \times 10^{-4}$	1,3550 — 1,4327

Conclui-se que o método proposto na dissertação apresenta, no geral, um baixo Erro de Estimação (Erro de Espalhamento mais Erro de Tendência). Então, espera-se que seja um procedimento satisfatório para identificação on-line dos parâmetros utilizando dados reais.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação sistematizou um processo de identificação construindo cinco módulos. Cada módulo possui uma função e todos os módulos se complementam, com o objetivo principal de identificar os parâmetros fundamentais de um gerador síncrono de polos salientes conectado à rede elétrica.

O método foi validado utilizando dados sintéticos e os seguintes parâmetros foram identificados: $R_{s(pu)}$, $L_{q(pu)}$ e $L_{d(pu)}$ com o Módulo 1; $R_{f(pu)}$ e $L_{ls(pu)}$ com o Módulo 2; $L_{md(pu)}$ e $L_{mq(pu)}$ com o Módulo 3; $L_{f(pu)}$ com o Módulo 4; $R_{D(pu)}$, $L_{D(pu)}$, $R_{Q(pu)}$ e $L_{Q(pu)}$ com o Módulo 5.

O método de identificação on-line proposto nesta dissertação, com o gerador síncrono de polos salientes em operação normal e utilizando dados sintéticos, identifica com boa qualidade e baixo Erro de Estimção todos os parâmetros fundamentais do gerador síncrono de polos salientes, com exceção dos parâmetros $R_{Q(pu)}$ e $L_{Q(pu)}$, que possuem um alto Erro de Estimção. Além disso, torna possível observar o comportamento dinâmico dos sinais $\delta(t)$, $i_d(t)$, $i_q(t)$, $v_d(t)$, $v_q(t)$ e $i'_D(t)$ do gerador para um determinado ponto de operação do sistema elétrico.

6.2 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como a Equação (4.54) não estima o sinal i'_Q observado, deve-se encontrar uma outra maneira de observá-lo no Módulo 4. Se tal maneira for encontrada, provavelmente, será possível identificar os parâmetros $R_{Q(pu)}$ e $L_{Q(pu)}$ com o Módulo 5 de forma satisfatória.

Necessita-se validar o método para outros pontos de operação e aumentar o número de amostras, complementando a pesquisa com novas análises estatísticas. Também é necessário verificar se as variações na velocidade do rotor em regime quase que permanente são significativas de modo que afete os resultados do método proposto de identificação dos parâmetros do gerador síncrono de polos salientes.

Deve-se aplicar o procedimento em um sistema real e ter a validação definitiva do método. Além disso, também é necessário incluir um modelo para o sistema de excitação para verificar se há melhora

nos resultados de identificação dos parâmetros.

Se o método for aplicado a um gerador de polos salientes real, recomenda-se analisar as respostas da Equação (3.25) ao longo do tempo. Tal equação trata da razão entre o número de espiras do estator e do campo. Devido ao fato das alterações no valor de $\frac{N_s}{N_f}$ serem, provavelmente, um indicativo de deterioração das espiras do estator e/ou campo, a Equação (3.25) aliada à identificação do parâmetro $L_{md(pu)}$ pode dar indícios de faltas incipientes.

Se o procedimento de identificação on-line proposto aqui for complementado com tais sugestões, este procedimento pode se tornar uma ferramenta poderosa para identificar parâmetros e, de maneira complementar, indicar faltas incipientes em geradores síncronos de polos salientes.

REFERÊNCIAS

AGHAMOLKI, H. G. **Phasor Measurement Unit Data-based States and Parameters Estimation in Power System**. Tese (Doutorado) — University of South Florida, nov. 2016.

AHMADI, S.; KARRARI, M.; MALIK, O. P. Synchronous generator parameter estimation using data collected with machine in closed-loop operation. **Electric Power Components and Systems**, Informa UK Limited, v. 43, n. 16, p. 1859–1871, aug 2015.

ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power system control and stability**. 2. ed. [S.l.]: IEEE Press, 2003. (IEEE Press series on power engineering).

BERHAUSEN, S.; PASZEK, S. Use of the finite element method for parameter estimation of the circuit model of a high power synchronous generator. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences**, Walter de Gruyter GmbH, v. 63, n. 3, p. 575–582, jan 2015.

BERHAUSEN, S.; PASZEK, S. Synchronous generator model parameter estimation based on noisy dynamic waveforms. **Journal of Electrical Engineering**, Walter de Gruyter GmbH, v. 67, n. 1, p. 21–28, jan 2016.

BORTONI, E. C.; ARAUJO, B. T.; JARDINI, J. A. Estimation of quadrature axis synchronous reactance using the constant excitation test. **IEEE Power and Energy Technology Systems Journal**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 3, n. 2, p. 1–8, June 2016.

BORTONI, E. C.; JARDINI, J. A. A standstill frequency response method for large salient pole synchronous machines. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 19, n. 4, p. 687–691, Dec 2004. ISSN 0885-8969.

BRKOVIC, B.; PETROVIC, D.; VASIC, R. Determination of synchronous generator parameters using the field current waveform. In: **2015 Power Eletronics**. [S.l.: s.n.], 2015.

BURTH, M.; VERGHESE, G. C.; VELEZ-REYES, M. Subset selection for improved parameter estimation in on-line identification

of a synchronous generator. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 14, n. 1, p. 218–225, Feb 1999. ISSN 0885-8950.

CARI, E. P.; LANDGRAF, T. G.; ALBERTO, L. F. A constrained minimization approach for the estimation of parameters of transient generator models. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 143, p. 252–261, feb 2017. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616304175>>.

CARI, E. P. T.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G. A methodology for parameter estimation of synchronous generators based on trajectory sensitivity and synchronization technique. In: **2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting**. [S.l.]: IEEE, 2006. p. 6 pp.–. ISSN 1932-5517.

CARI, E. P. T.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G. A novel methodology for power angle estimation of synchronous generator based on trajectory sensitivity analysis. In: **2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting**. [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1–6. ISSN 1932-5517.

CARI, E. P. T.; 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**, FapUNIFESP (SciELO), v. 23, n. 4, p. 453–464, aug 2012. ISSN 0103-1759.

CARVALHO, A. R. **Contribuições para o projeto de geradores síncronos de grande porte**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2011.

CHOWDHURY, S. D.; SENROY, N. Pmu data based online parameter estimation of synchronous generator. In: **2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

COSTA, A. S. **Despacho Econômico via Método Primal/Dual de Pontos Interiores**. UFSC, 2017. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~simoes/plnjop/sl-pdpi.pdf>>.

COULTES, M. E.; WATSON, W. Synchronous machine models by standstill frequency response tests. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100, n. 4, p. 1480–1489, April 1981. ISSN 0018-9510.

DANDENO, P. L.; HAUTH, R. L.; SCHULZ, R. P. Effects of synchronous machine modeling in large scale system studies. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-92, n. 2, p. 574–582, mar 1973. ISSN 0018-9510.

DANDENO, P. L.; KUNDUR, P.; SCHULZ, R. P. Recent trends and progress in synchronous machine modeling in the electric utility industry. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 7, p. 941–950, jul 1974. ISSN 0018-9219.

DINELEY, J. L.; MORRIS, A. J. Synchronous generator transient control: Part i -theory and evaluation of alternative mathematical models. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-92, n. 2, p. 417–422, mar 1973. ISSN 0018-9510.

EL-BAKRY, A. S.; TAPIA, R. A.; TSUCHIYA, T.; ZHANG, Y. On the formulation and theory of the newton interior-point method for nonlinear programming. **Journal of Optimization Theory and Applications**, Springer Nature, v. 89, n. 3, p. 507–541, jun 1996. ISSN 1573-2878. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1007/BF02275347>>.

FALLAH, E.; ASIABAN, M. M. Parameter identification of 7th order model of synchronous generator by ekf. In: **ICEE 2012**. ICEE, 2012. Disponível em:
<<http://files.matlabsite.com/docs/papers/icee2012/3/icee2012-265.pdf>>.

FERREIRA, M. P.; FREITAS, F. L.; MATSUO, T. K.; BORBA, B. de; FONSECA, J. E. R. da. Monitoramento online como ferramenta para otimização da manutenção de geradores: Uma tecnologia 100% nacional em arquitetura distribuída. **XI SIMPASE**, 2015.

FREITAS, F. L.; FERREIRA, M. P.; MATSUO, T. K.; BORBA, B. de; RODRIGUES, J. M.; CABRERA, B. P.; SILVA, A. S. e; DECKER, I. C. Diagnóstico de hidrogeradores a partir do monitoramento permanente em tempo real de parâmetros da função geração. **VII ENAM**, 2016.

FREITAS, F. L.; FERREIRA, M. P.; MATSUO, T. K.; BORBA, B. de; SILVA, A. S. e; DECKER, I. C.; CABRERA, B. P.; RODRIGUES, J. M. Estado-da-arte de monitoramento e diagnóstico de geradores de energia elétrica. **VII ENAM**, 2016.

GALLEHDARI, Z.; DEHGHANI, M.; NIKRAVESH, S. K. Y. Online state space model parameter estimation in synchronous machines.

Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering (IJEET), IJEET, v. 10, n. 2, p. 124–132, 2014. Disponível em: <http://ijeet.iust.ac.ir/article-1-546-en.pdf>.

GELFAND, I. M.; SAUL, M. **Trigonometry**. [S.l.]: Birkhauser Boston, 2001.

GHAHREMANI, E.; KARRARI, M.; MALIK, O. P. Synchronous generator third-order model parameter estimation using online experimental data. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 2, n. 5, p. 708, September 2008. ISSN 1751-8687.

GHAHREMANI, E.; KARRARI, M.; MENHAJ, M. B.; MALIK, O. P. Rotor angle estimation of synchronous generator from online measurement. In: **2008 43rd International Universities Power Engineering Conference**. [S.l.]: IEEE, 2008. p. 1–5.

GOMEZ, J. E.; DECKER, I. C. A novel model validation methodology using synchrophasor measurements. **Electric Power Systems Research**, v. 119, p. 207 – 217, 2015. ISSN 0378-7796. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877961400354X>.

GRANVILLE, S. Optimal reactive dispatch through interior point methods. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, n. 1, p. 136–146, Feb 1994. ISSN 0885-8950.

HALLINGSTAD, O. Estimation of synchronous machine parameters. **Journal of Modeling, Identification and Control**, The Norwegian Institute of Technology, Division of Engineering Cybernetics, v. 1, p. 1–15, 1980. Disponível em: <http://www.mic-journal.no/pdf/1980/MIC-1980-1-1.pdf>.

HASNI, M.; TOUHAMI, O.; IBTIOUEN, R.; FADEL, M.; CAUX, S. Synchronous machine parameter identification by various excitation signals. **Electrical Engineering**, Springer Nature, v. 90, n. 3, p. 219–228, may 2007. ISSN 1432-0487. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00202-007-0069-z>.

HEFFRON, W. G.; PHILLIPS, R. A. Effect of a modern amplitudyne voltage regulator on underexcited operation of large turbine generators [includes discussion]. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems**, v. 71, n. 1, Jan 1952. ISSN 0097-2460.

HUANG, H.; ZHANG, J. The application of recursive least squares in synchronous generator parameter identification. **International Journal of Control and Automation**, Science and Engineering Research Support Society, v. 9, n. 8, p. 79–88, aug 2016.

HUANG, J.; CORZINE, K. A.; BELKHAYAT, M. Online synchronous machine parameter extraction from small-signal injection techniques. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 24, n. 1, p. 43–51, mar 2009. ISSN 0885-8969.

HURLEY, J. D.; SCHWENK, H. R. Standstill frequency response modeling and evaluation by field tests on a 645 mva turbine generator. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100, n. 2, p. 828–836, Feb 1981. ISSN 0018-9510.

IEEE Std 115-2009. **IEEE Std 115-2009 (Revision of IEEE Std 115-1995)**: Ieee guide for test procedures for synchronous machines part i acceptance and performance testing part ii test procedures and parameter determination for dynamic analysis. Piscataway, 2010. 219 p.

KARAYAKA, H. B.; KEYHANI, A.; AGRAWAL, B.; SELIN, D.; HEYDT, G. T. Identification of armature circuit and field winding parameters of large utility generators. In: **IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233)**. [S.l.]: IEEE, 1999. v. 1, p. 29–34 vol.1.

KARAYAKA, H. B.; KEYHANI, A.; AGRAWAL, B.; SELIN, D.; HEYDT, G. T. Methodology development for estimation of armature circuit and field winding parameters of large utility generators. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 14, n. 4, p. 901–908, Dec 1999. ISSN 0885-8969.

KARAYAKA, H. B.; KEYHANI, A.; AGRAWAL, B. L.; SELIN, D. A.; HEYDT, G. T. Identification of armature, field, and saturated parameters of a large steam turbine-generator from operating data.

IEEE Transactions on Energy Conversion, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 15, n. 2, p. 181–187, jun 2000. ISSN 0885-8969.

KARAYAKA, H. B.; KEYHANI, A.; HEYDT, G. T.; AGRAWAL, B. L.; SELIN, D. A. Synchronous generator model identification and parameter estimation from operating data. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 18, n. 1, p. 121–126, mar 2003. ISSN 0885-8969.

KARRARI, M.; MALIK, O. P. Identification of heffron-phillips model parameters for synchronous generators using online measurements. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 151, n. 3, p. 313, May 2004. ISSN 1350-2360.

KARRARI, M.; MALIK, O. P. Identification of physical parameters of a synchronous generator from online measurements. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 19, n. 2, p. 407–415, jun 2004. ISSN 0885-8969.

KEYHANI, A.; MIRI, S. Observers for tracking of synchronous machine parameters and detection of incipient faults. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), EC-1, n. 2, p. 184–192, jun 1986. ISSN 0885-8969.

KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D.; SOCIETY, I. P. E. **Analysis of electric machinery and drive systems**. [S.l.]: IEEE Press, 2002. (IEEE Press series on power engineering). ISBN 9780471143260.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994. (EPRI power system engineering series). ISBN 9780070359581.

KYRIAKIDES, E. **Innovative concepts for on-line synchronous generator parameter estimation**. Tese (Doutorado) — Arizona State University, 2003.

KYRIAKIDES, E.; HEYDT, G. T. Synchronous machine parameter estimation using a visual platform. In: **2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)**. [S.l.]: IEEE, 2001. v. 3, p. 1381–1386 vol.3.

KYRIAKIDES, E.; HEYDT, G. T. Estimation of synchronous generator parameters using an observer for damper currents and a graphical user interface. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 69, n. 1, p. 7–16, apr 2004. ISSN 0378-7796.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779603001822>>.

KYRIAKIDES, E.; HEYDT, G. T.; VITTAL, V. On-line estimation of synchronous generator parameters using a damper current observer and a graphic user interface. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 19, n. 3, p. 499–507, sep 2004. ISSN 0885-8969.

LANDGRAF, T. G.; CARL, E. P. T.; ALBERTO, L. F. C. Online parameter estimation of synchronous generators from accessible measurements. In: **2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)**. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 1–5.

LIN, K.; KYRIAKIDES, E.; HEYDT, G. T.; LOGIÄ†, N.; SINGH, B. Experience with synchronous generator parameter identification using a kalman filter. In: **IEEE PES General Meeting**. [S.l.]: IEEE, 2010. p. 1–7. ISSN 1932-5517.

MACHADO, V. S. **Análise dos ensaios de comissionamento de um gerador síncrono**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade de Brasília, 2008.

MANDERS, E. J.; BISWAS, G.; MOSTERMAN, P. J.; BARFORD, L. A.; BARNETT, R. J. Signal interpretation for monitoring and diagnosis, a cooling system testbed. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 49, n. 3, p. 503–508, Jun 2000. ISSN 0018-9456.

MATHWORKS. **SimPowerSystems User’s Guide R2013a Hydro-Québec**. [S.l.], 2013.

MATHWORKS. **Synchronous Machine**. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/>>.

MINNICH, S. H. Small signals, large signals, and saturation in generator modeling. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, EC-1, n. 1, p. 94–102, March 1986. ISSN 0885-8969.

MOGHARBEL, B.; FAN, L.; MIAO, Z. Least squares estimation-based synchronous generator parameter estimation using PMU data. In: **2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting**. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 1–5. ISSN 1932-5517.

MOUNI, E.; TNANI, S.; CHAMPENOIS, G. Synchronous generator modelling and parameters estimation using least squares method. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Elsevier BV, v. 16, n. 6, p. 678–689, jul 2008. ISSN 1569-190X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X08000695>>.

MSA. **MSA - Análises dos Sistemas de Medição**. São Carlos, 2017. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/analise-dos-sistemas-de-medicao>>.

NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. **Numerical Optimization**. 2. ed. [S.l.]: Springer New York, 2006. ISBN 978-0-387-40065-5.

OGATA, K. **Discrete-Time Control Systems**. [S.l.]: PRENTICE HALL, 1994. ISBN 0130342815.

OTEAFY, A. M.; CHIASSON, J. N.; AHMED-ZAID, S. Development and application of a standstill parameter identification technique for the synchronous generator. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier BV, v. 81, p. 222–231, oct 2016.

PARK, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis - part i. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 48, n. 3, p. 716–727, jul 1929. ISSN 0096-3860.

PARK, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines - part ii. **Electrical Engineering**, v. 52, n. 1, p. 44–45, jan 1933. ISSN 0095-9197.

PILLUTLA, S.; KEYHANI, A.; KAMWA, I. Neural network observers for on-line tracking of synchronous generator parameters. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 14, n. 1, p. 23–30, mar 1999. ISSN 0885-8969.

RADMANESH, H. R.; SHAKOURI, H. G.; NAZARZADEH, J. Synchronous generator parameter estimation using pseudo-inverse method in hybrid domain. In: **2007 IEEE International**

Symposium on Industrial Electronics. [S.l.: s.n.], 2007. p. 335–340. ISSN 2163-5137.

RASOULI, M.; LAGOA, C. A nonlinear term selection method for improving synchronous machine parameters estimation.

International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier BV, v. 85, p. 77–86, feb 2017. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061516311498>>.

RODRÍGUEZ, G. A. G. **Identificação de Parâmetros de Geradores Síncronos de Polos Salientes a Partir de Ensaios de Pré-Excitação e Rejeição de Carga com Variação da Tensão de Campo.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

RODRÍGUEZ, G. G.; SILVA, A. S. e; ZENI, N. Identification of synchronous machine parameters from field flashing and load rejection tests with field voltage variations. **Electric Power Systems Research**, Elsevier BV, v. 143, p. 813–824, feb 2017.

SAIED, S. A.; BARTHAEE, S. M.; KARRARI, M.; ROSEHART, W.; MALIK, O. P. Identification of electric parameters of synchronous generator using input output data set. In: **Power Plants and Power Systems Control 2006: A Proceedings Volume from the IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control, Kananaskis, Canada, 2006.** [S.l.]: Elsevier Science, 2007. (IFAC Proceedings Volumes). ISBN 9780080555362.

SAIED, S. A.; KARRARI, M.; ABBASZADEH, K.; MALIK, O. P. Identification of electric parameters of synchronous generators with detailed representation of damper windings. In: **2008 40th North American Power Symposium.** [S.l.]: IEEE, 2008. p. 1–6.

TSAI, H.; KEYHANI, A.; DEMCKO, J.; FARMER, R. G. On-line synchronous machine parameter estimation from small disturbance operating data. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 10, n. 1, p. 25–36, mar 1995. ISSN 0885-8969.

TSAI, H.; KEYHANI, A.; DEMCKO, J. A.; SELIN, D. A. Development of a neural network based saturation model for synchronous generator analysis. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 10, n. 4, p. 617–624, Dec 1995. ISSN 0885-8969.

VALVERDE, G.; KYRIAKIDES, E.; HEYDT, G. T.; TERZIJA, V. Nonlinear estimation of synchronous machine parameters using operating data. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 26, n. 3, p. 831–839, sep 2011. ISSN 0885-8969.

VALVERDE, G.; KYRIAKIDES, E.; HEYDT, G. T.; TERZIJA, V. On-line parameter estimation of saturated synchronous machines. In: **2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting**. [S.l.]: IEEE, 2011. p. 1–6. ISSN 1932-5517.

WEHBE, Y.; FAN, L.; MIAO, Z. Least squares based estimation of synchronous generator states and parameters with phasor measurement units. In: **2012 North American Power Symposium (NAPS)**. [S.l.]: IEEE, 2012. p. 1–6.

WU, Y.-C.; DEBS, A. S.; MARSTEN, R. E. A direct nonlinear predictor-corrector primal-dual interior point algorithm for optimal power flows. **IEEE Transactions on Power Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, n. 2, p. 876–883, may 1994. ISSN 0885-8950.

XUE, A.; ZHANG, J.; BI, T.; CHEN, S.; TANG, W.; HU, S. A new robust identification method for xq of synchronous generator with steady-state PMU data. In: **2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting**. [S.l.]: IEEE, 2013. p. 1–5. ISSN 1932-5517.

ZHAO, Z.; ZHENG, F.; GAO, J.; XU, L. A dynamic on-line parameter identification and full-scale system experimental verification for large synchronous machines. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 10, n. 3, p. 392–398, Sep 1995. ISSN 0885-8969.

ZIHUA, H.; ANCHENG, X.; HONGYU, Y.; ZHAOYANG, Z.; JIANDONG, H. A novel online robust identification method for xq of synchronous generator based on IGG criterion. In: **2015 34th Chinese Control Conference (CCC)**. [S.l.]: IEEE, 2015. p. 2883–2888.

ZWOLAK, J. W.; BOGGS, P. T.; WATSON, L. T. **ODRPACK95: A weighted orthogonal distance regression code with bound constraints**. [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://eprints.cs.vt.edu/archive/00000707/01/odrTOMS04.pdf>>.

APÊNDICE A - PONTOS INTERIORES *PRIMAL-DUAL*

Exemplifica-se aqui o algoritmo dos Pontos Interiores *Primal-Dual*. Ao final, mostra-se brevemente a construção das funções que são minimizadas nos módulos que aplicam o MMQNL.

De um modo geral, os problemas propostos nesta dissertação adquirem a seguinte forma:

$$\left[\begin{array}{l} \mathbf{R}(\mathbf{P}) = \sum_{i=0}^N [f(x_i; \mathbf{P}) - y_i]^2 \\ \mathbf{G}(\mathbf{P}) \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_{min} \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_{max} \end{array} \right] \quad (\text{A.1})$$

- \mathbf{N} : Número de medições do intervalo de tempo analisado;
- x_i, y_i : Valores conhecidos que compõe o vetor de valores estimados e vetor de valores conhecidos que se deseja comparar, respectivamente;
- \mathbf{P} : Vetor de parâmetros;
- $f(x_i; \mathbf{P})$: Função que deve ser aproximada de y_i ;
- $\mathbf{R}(\mathbf{P})$: Soma dos quadrados dos resíduos entre o vetor de valores estimados e o vetor de valores que se deseja comparar;
- $\mathbf{G}(\mathbf{P})$: Vetor com restrições de relação entre parâmetros;
- \mathbf{P}_{min} e \mathbf{P}_{max} : Valores mínimos e máximos dos parâmetros, respectivamente.

Para a resolução deste problema, necessita-se transformar as restrições de desigualdade em restrições de igualdade, introduzindo variáveis de folga (s_t, s_{max} e s_{min}). Deve-se salientar que as variáveis de folga são estritamente positivas (inclui-se esta nova restrição ao problema) (COSTA, 2017). O problema modificado é reescrito como:

$$\left[\begin{array}{l} \mathbf{R}(\mathbf{P}) = \sum_{i=0}^N [f(x_i; \mathbf{P}) - y_i]^2 \\ \mathbf{G}(\mathbf{P}) + s_t = \mathbf{0} \\ \mathbf{P} + s_{max} = \mathbf{P}_{max} \\ -\mathbf{P} + s_{min} = -\mathbf{P}_{min} \\ s_t, s_{max}, s_{min} \geq \mathbf{0} \end{array} \right] \quad (\text{A.2})$$

- s_t : Variável de folga das restrições de desigualdade entre os parâmetros;
- s_{max} : Variável de folga do limite superior dos parâmetros;
- s_{min} : Variável de folga do limite inferior dos parâmetros.

$\mathbf{G}(\mathbf{P})$ pode ser definido como um produto matricial:

$$\mathbf{G}(\mathbf{P}) = [\mathbf{G}_r] \mathbf{P} \quad (\text{A.3})$$

Tem-se que:

$[G_r]$: Matriz que relaciona os parâmetros do gerador síncrono.

Deve-se agora desenvolver a função Lagrangeana:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\cdot) = & R(\mathbf{P}) + \pi_t^T ([G_r]\mathbf{P} + s_t) + \\ & + \pi_{max}^T (\mathbf{P} + s_{max} - \mathbf{P}_{max}) + \\ & + \pi_{min}^T (-\mathbf{P} + s_{min} + \mathbf{P}_{min}) \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

- π_t : Multiplicador de Lagrange das restrições de desigualdade originais associados as relações entre parâmetros;
- π_{max} : Multiplicador de Lagrange das restrições de desigualdade originais associados aos limites superiores dos parâmetros;
- π_{min} : Multiplicador de Lagrange das restrições de desigualdade originais associados aos limites inferiores dos parâmetros.

Para simplificar o Lagrangeano, propõe-se as seguintes nomenclaturas:

$$\mathbf{F} \triangleq \begin{bmatrix} G_r \\ I \\ -I \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{s} \triangleq \begin{bmatrix} s_t \\ s_{max} \\ s_{min} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$\boldsymbol{\pi} \triangleq \begin{bmatrix} \pi_t \\ \pi_{max} \\ \pi_{min} \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

$$\mathbf{P}_{lim} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{P}_{max} \\ \mathbf{P}_{min} \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

I é uma matriz identidade de dimensões apropriadas.

A nomenclatura proposta é aplicada na função Lagrangeana:

$$\mathcal{L}(\cdot) = R(\mathbf{P}) + \boldsymbol{\pi}^T ([\mathbf{F}]\mathbf{P} + \mathbf{s} - \mathbf{P}_{lim}) \quad (\text{A.9})$$

O Lagrangeano deve atender as condições de factibilidade dual:

$$\nabla_{\mathbf{P}} \mathcal{L}(\cdot) = \nabla_{\mathbf{P}} R(\mathbf{P}) + [\mathbf{F}]^T \boldsymbol{\pi} = \mathbf{0} \quad (\text{A.10})$$

$$\nabla_{\boldsymbol{\pi}} \mathcal{L}(\cdot) = [\mathbf{F}]\mathbf{P} + \mathbf{s} - \mathbf{P}_{lim} = \mathbf{0} \quad (\text{A.11})$$

Define-se $\nabla_{\mathbf{P}}\mathbf{R}(\mathbf{P})$ como o vetor gradiente de $\mathbf{R}(\mathbf{P})$.
Existem, também, as condições de folga complementar:

$$[\mathbf{S}][\mathbf{\Pi}] = \mathbf{0} \quad (\text{A.12})$$

$$\mathbf{s} \geq \mathbf{0} \quad (\text{A.13})$$

$$\boldsymbol{\pi} \geq \mathbf{0} \quad (\text{A.14})$$

Tem-se que $\mathbf{S} \triangleq \mathit{diag}[\mathbf{s}]$ e $\mathbf{\Pi} \triangleq \mathit{diag}[\boldsymbol{\pi}]$.

Se as restrições das Equações (A.10)–(A.14) forem atendidas, tem-se a solução ótima. No entanto, há um problema na Equação (A.12), sendo necessário um artifício matemático para obter a solução do problema. Consiste em alterar a igualdade $[\mathbf{S}][\mathbf{\Pi}]$ (Equação (A.12)) de zero para $\boldsymbol{\mu}^1$. Deve-se inicializar este com um valor pequeno e positivo e fazer com que tenda a zero ao longo do processo iterativo.

A atualização do parâmetro $\boldsymbol{\mu}$ é feita da seguinte maneira:

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{\mathbf{s}^T \boldsymbol{\pi}}{2l\beta} \quad (\text{A.15})$$

β^2 é um fator de aceleração especificado pelo usuário e l é o número de restrições de desigualdade que foram transformadas para restrições de igualdade.

O método *Primal-Dual* de pontos interiores utiliza o procedimento de Newton para resolver iterativamente o sistema de equações não-lineares que representam as condições de KKT (Equações (A.10)–(A.14)).

A resolução do problema via Newton exige o conhecimento da matriz de segundas derivadas da função Lagrangeana em relação aos parâmetros que se deseja encontrar, também conhecida como Hessiana ($\mathbf{H}(\mathbf{P})$).

$$\nabla_{\mathbf{P}}^2 \mathcal{L}(\cdot) = \nabla_{\mathbf{P}}^2 \mathbf{R}(\mathbf{P}) = \mathbf{H}(\mathbf{P}) \quad (\text{A.16})$$

$\nabla_{\mathbf{P}}^2 \mathbf{R}(\mathbf{P})$ é a matriz de segundas derivadas de $\mathbf{R}(\mathbf{P})$.

O problema que deve ser resolvido iterativamente é apresentado na sequência:

$$[\mathbf{W}(\cdot)]\Delta\mathbf{x} = -\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{L}(\cdot) \quad (\text{A.17})$$

¹Variável de relaxação do problema (COSTA, 2017)

² $\beta \geq 1$ e usualmente $\beta = 10$ (COSTA, 2017)

$$[\mathbf{W}(\cdot)] \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{H}(\mathbf{P}) & \mathbf{F} & \mathbf{0} \\ \mathbf{F}^T & \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S} & \mathbf{\Pi} \end{bmatrix} \quad (\text{A.18})$$

$$\Delta \mathbf{x} \triangleq \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \boldsymbol{\pi} \\ \Delta \mathbf{s} \end{bmatrix} \quad (\text{A.19})$$

$$\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{L}(\cdot) \triangleq \begin{bmatrix} \nabla_{\mathbf{P}} \mathcal{L}(\cdot) \\ \nabla_{\boldsymbol{\pi}} \mathcal{L}(\cdot) \\ \mathbf{S}\boldsymbol{\pi} - \boldsymbol{\mu}e \end{bmatrix} \quad (\text{A.20})$$

e é um vetor constante de uns de tamanho condizente ao produto $[\mathbf{S}]\boldsymbol{\pi}$.

Após solucionar o sistema linear que fornece $\Delta \mathbf{x}^k$ (Equação (A.17)), atualiza-se o vetor \mathbf{x} fazendo: $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \rho\boldsymbol{\alpha}\Delta \mathbf{x}^k$.

Tem-se que ρ é um parâmetro que tem valor típico de 0,9995 (COSTA, 2017) e impede que um componente da nova solução atinja a fronteira da região viável, $\boldsymbol{\alpha}$ é o tamanho do passo primal ($\boldsymbol{\alpha}_p$) ou dual ($\boldsymbol{\alpha}_d$) que preserva a não negatividade de $\boldsymbol{\pi}$ e \mathbf{s} .

$$\mathbf{P}^{k+1} = \mathbf{P}^k + \rho\boldsymbol{\alpha}_p\Delta \mathbf{P}^k \quad (\text{A.21})$$

$$\boldsymbol{\pi}^{k+1} = \boldsymbol{\pi}^k + \rho\boldsymbol{\alpha}_d\Delta \boldsymbol{\pi}^k \quad (\text{A.22})$$

$$\mathbf{s}^{k+1} = \mathbf{s}^k + \rho\boldsymbol{\alpha}_p\Delta \mathbf{s}^k \quad (\text{A.23})$$

Os valores de $\boldsymbol{\alpha}_p$ e $\boldsymbol{\alpha}_d$ são calculados da seguinte forma:

$$\boldsymbol{\alpha}_p = \min\left\{\min_{\Delta s_j < 0} \frac{s_j}{|\Delta s_j|}, 1\right\} \quad (\text{A.24})$$

$$\boldsymbol{\alpha}_d = \min\left\{\min_{\Delta \pi_j < 0} \frac{\pi_j}{|\Delta \pi_j|}, 1\right\} \quad (\text{A.25})$$

A convergência do problema é garantida como decorrência do cumprimento das condições de KKT (Equações (A.10)–(A.12)):

$$\|\nabla_{\mathbf{P}} \mathcal{R}(\mathbf{P}) + [\mathbf{F}]^T \boldsymbol{\pi}\|_{\infty} \leq \epsilon \quad (\text{A.26})$$

$$\|[\mathbf{F}]\mathbf{P} + \mathbf{s} - \mathbf{P}_{lim}\|_{\infty} \leq \epsilon \quad (\text{A.27})$$

$$\|[\mathbf{S}][\boldsymbol{\pi}]\|_{\infty} \leq \epsilon \quad (\text{A.28})$$

Utiliza-se ϵ para definir um valor de tolerância³. Tem-se que $\|\cdot\|_{\infty}$ é a norma infinita, ou seja, o algoritmo converge quando o maior

³No algoritmo foi utilizado $\epsilon = 1 \times 10^{-5}$

valor pertencente aos vetores que definem as condições de KKT for inferior ou igual ao valor de ϵ .

A seguir, tem-se uma visão geral do algoritmo de maneira simplificada:

Síntese do Algoritmo
1. Escolher um ponto inicial $(\mathbf{s}^0, \boldsymbol{\pi}^0, \mathbf{P}^0)$, um valor inicial para o parâmetro $\boldsymbol{\mu}$ e inicializar $\mathbf{k} = \mathbf{0}$;
2. Resolver o problema usando o método de Newton inicializado em $(\mathbf{s}^k, \boldsymbol{\pi}^k, \mathbf{P}^k)$ para calcular um novo ponto $(\mathbf{s}^{k+1}, \boldsymbol{\pi}^{k+1}, \mathbf{P}^{k+1})$;
3. Aplicar os testes de convergência dados pelas Equações (A.26)–(A.28): # Se os testes indicarem convergência \Rightarrow FIM ; # Caso contrário, seguir para o passo 4;
4. Faça $\mathbf{k} = \mathbf{k} + 1$. Atualizar o parâmetro $\boldsymbol{\mu}$ (Equação (A.15)) e retornar ao passo 2.

Os problemas modificados (Equação (A.2)) para os módulos que utilizam o MMQNL são descritos na sequência:

•Módulo 1:

$$\left[\begin{array}{l}
 R(\mathbf{P}) = \sum_{i=0}^N \left(i_{f,i}^{modelo} - i_{f,i}^{real} \right)^2 \\
 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s(pu) \\ L_q(pu) \\ L_d(pu) \end{bmatrix} + s_{P,t} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} R_s(pu) \\ L_q(pu) \\ L_d(pu) \end{bmatrix} + s_{P,max} = \begin{bmatrix} R_s^{max}(pu) \\ L_q^{max}(pu) \\ L_d^{max}(pu) \end{bmatrix} \\
 - \begin{bmatrix} R_s(pu) \\ L_q(pu) \\ L_d(pu) \end{bmatrix} + s_{P,min} = - \begin{bmatrix} R_s^{min}(pu) \\ L_q^{min}(pu) \\ L_d^{min}(pu) \end{bmatrix} \\
 s_{P,t}; s_{P,max}; s_{P,min} \geq 0
 \end{array} \right] \quad (A.29)$$

•Módulo 2:

$$\left[\begin{array}{l} \mathbf{R}(\mathbf{T}) = \sum_{i=0}^N \left(v_{f,i}^{modelo} - v_{f,i}^{real} \right)^2 \\ \left[\begin{array}{cc} 1 & -1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \mathbf{R}_{f(pu)} \\ \mathbf{L}_{ls(pu)} \end{array} \right] + s_{T,t} = \mathbf{0} \\ \left[\begin{array}{c} \mathbf{R}_{f(pu)} \\ \mathbf{L}_{ls(pu)} \end{array} \right] + s_{T,max} = \left[\begin{array}{c} \mathbf{R}_{f(pu)}^{max} \\ \mathbf{L}_{ls(pu)}^{max} \end{array} \right] \\ - \left[\begin{array}{c} \mathbf{R}_{f(pu)} \\ \mathbf{L}_{ls(pu)} \end{array} \right] + s_{T,min} = - \left[\begin{array}{c} \mathbf{R}_{f(pu)}^{min} \\ \mathbf{L}_{ls(pu)}^{min} \end{array} \right] \\ s_{T,t}; s_{T,max}; s_{T,min} \geq \mathbf{0} \end{array} \right] \quad (\text{A.30})$$

•Módulo 5: Observa-se que as funções minimizadas não apresentaram restrições entre parâmetros.

$$\left[\begin{array}{l} \mathbf{R}(\mathbf{D}) = \sum_{i=0}^N \left(i_{D,i}^{modelo} - i_{D,i}^{observado} \right)^2 \\ \left[\begin{array}{c} \alpha \\ \mathbf{L}_{D(pu)} \end{array} \right] + s_{D,max} = \left[\begin{array}{c} \alpha^{max} \\ \mathbf{L}_{D(pu)}^{max} \end{array} \right] \\ - \left[\begin{array}{c} \alpha \\ \mathbf{L}_{D(pu)} \end{array} \right] + s_{D,min} = - \left[\begin{array}{c} \alpha^{min} \\ \mathbf{L}_{D(pu)}^{min} \end{array} \right] \\ s_{D,max}; s_{D,min} \geq \mathbf{0} \end{array} \right] \quad (\text{A.31})$$

$$\left[\begin{array}{l} \mathbf{R}(\mathbf{Q}) = \sum_{i=0}^N \left(i_{Q,i}^{modelo} - i_{Q,i}^{observado} \right)^2 \\ \left[\begin{array}{c} \beta \\ \mathbf{L}_{Q(pu)} \end{array} \right] + s_{Q,max} = \left[\begin{array}{c} \beta^{max} \\ \mathbf{L}_{Q(pu)}^{max} \end{array} \right] \\ - \left[\begin{array}{c} \beta \\ \mathbf{L}_{Q(pu)} \end{array} \right] + s_{Q,min} = - \left[\begin{array}{c} \beta^{min} \\ \mathbf{L}_{Q(pu)}^{min} \end{array} \right] \\ s_{Q,max}; s_{Q,min} \geq \mathbf{0} \end{array} \right] \quad (\text{A.32})$$

As derivadas de primeira ordem (Gradiente) e segunda ordem (Hessiana) das funções $\mathbf{R}(\mathbf{P})$, $\mathbf{R}(\mathbf{T})$, $\mathbf{R}(\mathbf{D})$ e $\mathbf{R}(\mathbf{Q})$ necessárias para aplicar o método *Primal-Dual* são desenvolvidas no Apêndice B.

**APÊNDICE B - DERIVADAS DAS EQUAÇÕES DOS
MÓDULOS QUE APLICAM O MMQNL**

Apresenta-se aqui o desenvolvimento das derivadas para o cálculo dos vetores e matrizes de derivadas de primeira e segunda ordem das funções objetivos dos problemas de otimização presentes nos Módulos 1, 2 e 5.

B.1 VETOR GRADIENTE

B.1.1 MÓDULO 1

Calcula-se $i_{f,i}^{modelo}$ pela Equação (4.31).

$$R(\mathbf{P}) = \sum_{i=0}^N \left(i_{f,i}^{modelo} - i_{f,i}^{real} \right)^2 \quad (\text{B.1})$$

A função objetivo que deve ser minimizada no Módulo 1 é reescrita como um produto vetorial:

$$R(\mathbf{P}) = \left[i_{f,i}^{modelo} - i_{f,i}^{real} \right]^T \left[i_{f,i}^{modelo} - i_{f,i}^{real} \right] \quad (\text{B.2})$$

O vetor de primeiras derivadas da função $R(\mathbf{P})$ em relação ao vetor \mathbf{P} :

$$\nabla_{\mathbf{P}} R(\mathbf{P}) = \frac{\partial R(\mathbf{P})}{\partial \mathbf{P}} = 2\mathbf{J}_{\mathbf{P}}^T \left[i_{f,i}^{modelo} - i_{f,i}^{real} \right] \quad (\text{B.3})$$

Define-se $\mathbf{J}_{\mathbf{P}}$ como o vetor de primeiras derivadas da função objetivo $R(\mathbf{P})$ em relação a cada parâmetro contido em \mathbf{P} .

$$\mathbf{J}_{\mathbf{P}} \triangleq \left[\frac{\partial i_{f,i}^{modelo}}{\partial R_s(pu)} \quad \frac{\partial i_{f,i}^{modelo}}{\partial L_q(pu)} \quad \frac{\partial i_{f,i}^{modelo}}{\partial L_d(pu)} \right] \quad (\text{B.4})$$

As derivadas parciais em relação a cada parâmetro:

$$\frac{\partial i_{f,i}^{modelo}}{\partial R_s(pu)} = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial b_i}{\partial R_s(pu)} \left(c_i^{-\frac{1}{2}} \right) - \left(\frac{b_i}{2} \right) \frac{\partial c_i}{\partial R_s(pu)} \left(c_i^{-\frac{3}{2}} \right) \right) \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{\partial i_{f,i}^{modelo}}{\partial L_q(pu)} = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial b_i}{\partial L_q(pu)} \left(c_i^{-\frac{1}{2}} \right) - \left(\frac{b_i}{2} \right) \frac{\partial c_i}{\partial L_q(pu)} \left(c_i^{-\frac{3}{2}} \right) \right) \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{\partial i_{f,i}^{modelo}}{\partial L_{d(pu)}} = \frac{1}{a} \left(\frac{\partial b_i}{\partial L_{d(pu)}} \left(c_i^{-\frac{1}{2}} \right) - \left(\frac{b_i}{2} \right) \frac{\partial c_i}{\partial L_{d(pu)}} \left(c_i^{-\frac{3}{2}} \right) \right) \quad (\text{B.7})$$

As derivadas parciais auxiliares:

$$\frac{\partial b_i}{\partial R_{s(pu)}} = 2R_{s(pu)} Z_{s(base)} I_{t,i}^2 + \left(\frac{4}{3} \right) Z_{s(base)} P_{t,i} \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{\partial b_i}{\partial L_{q(pu)}} = L_{d(pu)} Z_{s(base)} I_{t,i}^2 + \left(\frac{2}{3} \right) Z_{s(base)} Q_{t,i} \quad (\text{B.9})$$

$$\frac{\partial b_i}{\partial L_{d(pu)}} = L_{q(pu)} Z_{s(base)} I_{t,i}^2 + \left(\frac{2}{3} \right) Z_{s(base)} Q_{t,i} \quad (\text{B.10})$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial R_{s(pu)}} = 2R_{s(pu)} Z_{s(base)} I_{t,i}^2 + \left(\frac{4}{3} \right) Z_{s(base)} P_{t,i} \quad (\text{B.11})$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial L_{q(pu)}} = 2L_{q(pu)} Z_{s(base)} I_{t,i}^2 + \left(\frac{4}{3} \right) Z_{s(base)} Q_{t,i} \quad (\text{B.12})$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial L_{d(pu)}} = 0 \quad (\text{B.13})$$

B.1.2 MÓDULO 2

Calcula-se $v_{f,i}^{modelo}$ pela Equação (4.33).

$$\mathbf{R}(\mathbf{T}) = \sum_{i=0}^N \left(v_{f,i}^{modelo} - v_{f,i}^{real} \right)^2 \quad (\text{B.14})$$

A função objetivo que deve ser minimizada no Módulo 2 é reescrita como um produto vetorial:

$$\mathbf{R}(\mathbf{T}) = \left[v_{f,i}^{modelo} - v_{f,i}^{real} \right]^T \left[v_{f,i}^{modelo} - v_{f,i}^{real} \right] \quad (\text{B.15})$$

O vetor de primeiras derivadas da função $\mathbf{R}(\mathbf{T})$ em relação ao vetor \mathbf{T} :

$$\nabla_{\mathbf{T}} \mathbf{R}(\mathbf{T}) = \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{T})}{\partial \mathbf{T}} = 2\mathbf{J}_{\mathbf{T}}^T \left[\mathbf{v}_{f,i}^{modelo} - \mathbf{v}_{f,i}^{real} \right] \quad (\text{B.16})$$

Define-se $\mathbf{J}_{\mathbf{T}}$ como o vetor de primeiras derivadas da função objetivo $\mathbf{R}(\mathbf{T})$ em relação a cada parâmetro contido em \mathbf{T} .

$$\mathbf{J}_{\mathbf{T}} \triangleq \left[\frac{\partial \mathbf{v}_{f,i}^{modelo}}{\partial \mathbf{R}_{f(pu)}} \quad \frac{\partial \mathbf{v}_{f,i}^{modelo}}{\partial \mathbf{L}_{ls(pu)}} \right] \quad (\text{B.17})$$

As derivadas parciais em relação a cada parâmetro:

$$\frac{\partial \mathbf{v}_{f,i}^{modelo}}{\partial \mathbf{R}_{f(pu)}} = i_{f,i}^{real} \left[\frac{S_n}{\left(\hat{\mathbf{L}}_{d(pu)} - \mathbf{L}_{ls(pu)} \right)^2 i_{f(nominal)}^2} \right] \quad (\text{B.18})$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_{f,i}^{modelo}}{\partial \mathbf{L}_{ls(pu)}} = i_{f,i}^{real} \left[\frac{2\mathbf{R}_{f(pu)} S_n}{\left(\hat{\mathbf{L}}_{d(pu)} - \mathbf{L}_{ls(pu)} \right)^3 i_{f(nominal)}^2} \right] \quad (\text{B.19})$$

B.1.3 MÓDULO 5

B.1.3.1 Corrente de Amortecimento de Eixo Direto

Calcula-se $i'_{D,i}{}^{modelo}$ pela Equação (4.47).

$$\mathbf{R}(\mathbf{D}) = \sum_{i=0}^N \left(i'_{D,i}{}^{modelo} - i'_{D,i}{}^{observado} \right)^2 \quad (\text{B.20})$$

A função objetivo $\mathbf{R}(\mathbf{D})$ que deve ser minimizada no Módulo 5 é reescrita como um produto vetorial:

$$\mathbf{R}(\mathbf{D}) = \left[i'_{D,i}{}^{modelo} - i'_{D,i}{}^{observado} \right]^T \left[i'_{D,i}{}^{modelo} - i'_{D,i}{}^{observado} \right] \quad (\text{B.21})$$

O vetor de primeiras derivadas da função $\mathbf{R}(\mathbf{D})$ em relação ao vetor \mathbf{D} :

$$\nabla_D R(\mathbf{D}) = \frac{\partial R(\mathbf{D})}{\partial \mathbf{D}} = 2\mathbf{J}_D^T \left[i'_{D,i}{}^{modelo} - i'_{D,i}{}^{observado} \right] \quad (\text{B.22})$$

Define-se \mathbf{J}_D como o vetor de primeiras derivadas da função objetivo $R(\mathbf{D})$ em relação a cada parâmetro contido em \mathbf{D} .

$$\mathbf{J}_D \triangleq \begin{bmatrix} \frac{\partial i'_{D,i}{}^{modelo}}{\partial \alpha} & \frac{\partial i'_{D,i}{}^{modelo}}{\partial L_{D(pu)}} \end{bmatrix} \quad (\text{B.23})$$

As derivadas parciais em relação a cada parâmetro:

$$\begin{aligned} \frac{\partial i'_{D,i}{}^{modelo}}{\partial \alpha} &= \frac{1}{L_{D(pu)}} \left[\{i(\alpha^{i-1}) - (i-1)(\alpha^{i-2})\} * i_{df,i} \right] + \\ &\quad - \frac{i_{df,i}}{L_{D(pu)}\alpha^2} - i \frac{(\alpha^{i-1})}{L_{D(pu)}} i_{df}(0) \end{aligned} \quad (\text{B.24})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial i'_{D,i}{}^{modelo}}{\partial L_{D(pu)}} &= \frac{\alpha^i}{L_{D(pu)}^2} i_{df}(0) - \frac{i_{df,i}}{L_{D(pu)}^2 \alpha} + \\ &\quad - \frac{1}{L_{D(pu)}^2} [(\alpha^i - \alpha^{i-1}) * i_{df}(0)] \end{aligned} \quad (\text{B.25})$$

$$i_{df,i} = \left(i_{d,i}^{observado} \right) \hat{L}_{md(pu)} - i_{f,i}^{real} \left(\frac{I_s(base)}{i_f(nominal)} \right) \quad (\text{B.26})$$

$$i_{df}(0) = \left(i_d^{observado}(0) \right) \hat{L}_{md(pu)} - i_f^{real}(0) \left(\frac{I_s(base)}{i_f(nominal)} \right) \quad (\text{B.27})$$

Salienta-se que $i_d^{observado}(0)$ e $i_f^{real}(0)$ são os valores médios destas amostras para o intervalo de tempo utilizado e $(*)$ é o operador da convolução discreta.

B.1.3.2 Corrente de Amortecimento de Eixo em Quadratura

Calcula-se $i'_{Q,i}{}^{modelo}$ pela Equação (4.50).

$$R(\mathbf{Q}) = \sum_{i=0}^N \left(i'_{Q,i}{}^{\text{modelo}} - i'_{Q,i}{}^{\text{observado}} \right)^2 \quad (\text{B.28})$$

A função objetivo $R(\mathbf{Q})$ que deve ser minimizada no Módulo 5 é reescrita como um produto vetorial:

$$R(\mathbf{Q}) = \left[i'_{Q,i}{}^{\text{modelo}} - i'_{Q,i}{}^{\text{observado}} \right]^T \left[i'_{Q,i}{}^{\text{modelo}} - i'_{Q,i}{}^{\text{observado}} \right] \quad (\text{B.29})$$

O vetor de primeiras derivadas da função $R(\mathbf{Q})$ em relação ao vetor \mathbf{Q} :

$$\nabla_{\mathbf{Q}} R(\mathbf{Q}) = \frac{\partial R(\mathbf{Q})}{\partial \mathbf{Q}} = 2\mathbf{J}_{\mathbf{Q}}^T \left[i'_{Q,i}{}^{\text{modelo}} - i'_{Q,i}{}^{\text{observado}} \right] \quad (\text{B.30})$$

Define-se $\mathbf{J}_{\mathbf{Q}}$ como o vetor de primeiras derivadas da função objetivo $R(\mathbf{Q})$ em relação a cada parâmetro contido em \mathbf{Q} .

$$\mathbf{J}_{\mathbf{Q}} \triangleq \left[\frac{\partial i'_{Q,i}{}^{\text{modelo}}}{\partial \beta} \quad \frac{\partial i'_{Q,i}{}^{\text{modelo}}}{\partial L_{Q(pu)}} \right] \quad (\text{B.31})$$

As derivadas parciais em relação à cada parâmetro:

$$\begin{aligned} \frac{\partial i'_{Q,i}{}^{\text{modelo}}}{\partial \beta} &= \frac{\hat{L}_{mq(pu)}}{L_{Q(pu)}} \left[\{i(\beta^{i-1}) - (i-1)(\beta^{i-2})\} * i_{q,i}^{\text{observado}} \right] + \\ &\quad - \frac{i_{q,i}^{\text{observado}} \hat{L}_{mq(pu)}}{L_{Q(pu)} \beta^2} - i \frac{(\beta^{i-1})}{L_{Q(pu)}} \hat{L}_{mq(pu)} i_q^{\text{observado}}(\mathbf{0}) \end{aligned} \quad (\text{B.32})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial i'_{Q,i}{}^{\text{modelo}}}{\partial L_{Q(pu)}} &= \frac{\beta^i}{L_{Q(pu)}^2} \hat{L}_{mq(pu)} i_q^{\text{observado}}(\mathbf{0}) - \frac{i_{q,i}^{\text{observado}} \hat{L}_{mq(pu)}}{L_{Q(pu)}^2 \beta} + \\ &\quad - \frac{\hat{L}_{mq(pu)}}{L_{Q(pu)}^2} \left[(\beta^i - \beta^{i-1}) * i_{q,i}^{\text{observado}} \right] \end{aligned} \quad (\text{B.33})$$

Salienta-se que $i_q^{\text{observado}}(\mathbf{0})$ é o valor médio desta amostra para o intervalo de tempo utilizado e $(*)$ é o operador da convolução discreta.

B.2 MATRIZ HESSIANA

B.2.1 MÓDULO 1

A segunda derivada da função objetivo $R(\mathbf{P})$ em relação a \mathbf{P} :

$$\nabla_{\mathbf{P}}^2 R(\mathbf{P}) = \frac{\partial^2 R(\mathbf{P})}{\partial \mathbf{P}^2} = 2 \left\{ \mathbf{J}_{\mathbf{P}}^T \mathbf{J}_{\mathbf{P}} + \sum_{i=0}^N \left(i_{f,i}^{modelo} - i_{f,i}^{real} \right) \frac{\partial^2 i_{f,i}^{modelo}}{\partial \mathbf{P}^2} \right\} \quad (\text{B.34})$$

B.2.2 MÓDULO 2

A segunda derivada da função objetivo $R(\mathbf{T})$ em relação a \mathbf{T} :

$$\nabla_{\mathbf{T}}^2 R(\mathbf{T}) = \frac{\partial^2 R(\mathbf{T})}{\partial \mathbf{T}^2} = 2 \left\{ \mathbf{J}_{\mathbf{T}}^T \mathbf{J}_{\mathbf{T}} + \sum_{i=0}^N \left(v_{f,i}^{modelo} - v_{f,i}^{real} \right) \frac{\partial^2 v_{f,i}^{modelo}}{\partial \mathbf{T}^2} \right\} \quad (\text{B.35})$$

B.2.3 MÓDULO 5

A segunda derivada da função objetivo $R(\mathbf{D})$ em relação a \mathbf{D} :

$$\nabla_{\mathbf{D}}^2 R(\mathbf{D}) = \frac{\partial^2 R(\mathbf{D})}{\partial \mathbf{D}^2} = 2 \left\{ \mathbf{J}_{\mathbf{D}}^T \mathbf{J}_{\mathbf{D}} + \sum_{i=0}^N \left(i'_{D,i}{}^{modelo} - i_{D,i}^{obs} \right) \frac{\partial^2 i'_{D,i}{}^{modelo}}{\partial \mathbf{D}^2} \right\} \quad (\text{B.36})$$

A segunda derivada da função objetivo $R(\mathbf{Q})$ em relação a \mathbf{Q} :

$$\nabla_{\mathbf{Q}}^2 R(\mathbf{Q}) = \frac{\partial^2 R(\mathbf{Q})}{\partial \mathbf{Q}^2} = 2 \left\{ \mathbf{J}_{\mathbf{Q}}^T \mathbf{J}_{\mathbf{Q}} + \sum_{i=0}^N \left(i'_{Q,i}{}^{modelo} - i_{Q,i}^{obs} \right) \frac{\partial^2 i'_{Q,i}{}^{modelo}}{\partial \mathbf{Q}^2} \right\} \quad (\text{B.37})$$

B.2.4 SIMPLIFICAÇÃO

Pode-se simplificar as Equações (B.34)–(B.37). O erro residual (parcela da Hessiana calculado pelo somatório) presente nestas equações tem caráter aleatório, podendo ser tanto negativo quanto positivo e, geralmente, não possuem relação com o modelo. Então, o somatório de todos os erros aleatórios para uma determinada amostra tende a um valor nulo (RODRÍGUEZ, 2015). Conclui-se que é possível calcular as Hessianas como mostrado na sequência:

$$\nabla_{\mathbf{P}}^2 R(\mathbf{P}) = \frac{\partial^2 R(\mathbf{P})}{\partial \mathbf{P}^2} = 2 \left\{ \mathbf{J}_{\mathbf{P}}^T \mathbf{J}_{\mathbf{P}} \right\} \quad (\text{B.38})$$

$$\nabla_{\mathbf{T}}^2 R(\mathbf{T}) = \frac{\partial^2 R(\mathbf{T})}{\partial \mathbf{T}^2} = 2 \left\{ \mathbf{J}_{\mathbf{T}}^T \mathbf{J}_{\mathbf{T}} \right\} \quad (\text{B.39})$$

$$\nabla_{\mathbf{D}}^2 R(\mathbf{D}) = \frac{\partial^2 R(\mathbf{D})}{\partial \mathbf{D}^2} = 2 \left\{ \mathbf{J}_{\mathbf{D}}^T \mathbf{J}_{\mathbf{D}} \right\} \quad (\text{B.40})$$

$$\nabla_{\mathbf{Q}}^2 R(\mathbf{Q}) = \frac{\partial^2 R(\mathbf{Q})}{\partial \mathbf{Q}^2} = 2 \left\{ \mathbf{J}_{\mathbf{Q}}^T \mathbf{J}_{\mathbf{Q}} \right\} \quad (\text{B.41})$$

**APÊNDICE C - RELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS
FUNDAMENTAIS E PADRÃO**

Todos as quantidades definidas aqui estão no sistema por unidade, com exceção das constantes de tempo que estão em segundos (KUNDUR, 1994; ANDERSON; FOUAD, 2003). São apresentadas neste apêndice as reatâncias transitórias de eixo direto (L'_d) e de eixo em quadratura (L'_q), as reatâncias subtransitórias de eixo direto (L''_d) e de eixo em quadratura (L''_q), as constantes de tempo do período transitório (T'_d) e subtransitório (T''_d), as constantes de tempo de circuito aberto de eixo direto do período transitório (T'_{d0}) e subtransitório (T''_{d0}):

$$L'_d = L_{ls} + \frac{L_{md}L_{lf}}{L_{md} + L_{lf}} = L_d - \frac{L_{md}^2}{L_f} \quad (C.1)$$

$$L'_q = L_{ls} + \frac{L_{mq}L_{lQ}}{L_{mq} + L_{lQ}} = L_q - \frac{L_{mq}^2}{L_Q} \quad (C.2)$$

$$L''_d = L_{ls} + \frac{L_{md}L_{lf}L_{lD}}{L_{md}L_{lf} + L_{lf}L_{lD} + L_{md}L_{lD}} \quad (C.3)$$

$$L''_q = L_{ls} + \frac{L_{mq}L_{lQ}}{L_{mq} + L_{lQ}} \quad (C.4)$$

$$T'_{d0} = \frac{L_f}{\omega_r R_f} \quad (C.5)$$

$$T'_{q0} = \frac{L_Q}{\omega_r R_Q} \quad (C.6)$$

$$T''_{d0} = \frac{1}{\omega_r R_D} \left(L_{lD} + \frac{L_{md}L_{lf}}{L_{md} + L_{lf}} \right) \quad (C.7)$$

$$T''_{q0} = \frac{1}{\omega_r R_Q} \left(L_{lQ} + \frac{L_{mq}L_{lQ}}{L_{mq} + L_{lQ}} \right) \quad (C.8)$$

$$T'_d = \frac{1}{\omega_r R_f} \left(L_{lf} + \frac{L_{md}L_{ls}}{L_{md} + L_{ls}} \right) \quad (C.9)$$

$$T''_d = \frac{1}{\omega_r R_D} \left(L_{lD} + \frac{L_{md}L_{ls}L_{lf}}{L_{md}L_{ls} + L_{ls}L_{lf} + L_{mq}L_{lf}} \right) \quad (C.10)$$

$$T''_q = \frac{1}{\omega_r R_Q} \left(L_{lQ} + \frac{L_{mq}L_{ls}}{L_{mq} + L_{ls}} \right) \quad (C.11)$$

Considerando que as resistências elétricas dos enrolamentos amortecedores dos eixos direto e em quadratura são bem maiores do que a

resistência elétrica do enrolamento de campo é possível realizar algumas simplificações e chegar nas seguintes relações (MOUNI; TNANI; CHAMPENOIS, 2008):

$$\frac{T'_d}{T'_{d0}} = \frac{L'_d}{L_d} \quad (\text{C.12})$$

$$\frac{T''_d}{T''_{d0}} = \frac{L''_d}{L'_d} \quad (\text{C.13})$$

$$\frac{T''_q}{T''_{q0}} = \frac{L''_q}{L_q} \quad (\text{C.14})$$