

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Écyo Reis Cavalcante Farias

**Estimação de Parâmetros de um Gerador de Indução
baseada no Método de Sensibilidade de Trajetória**

São Carlos

2016

Écyo Reis Cavalcante Farias

**Estimação de Parâmetros de um Gerador de Indução
baseada no Método de Sensibilidade de Trajetória**

Monografia apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Área de concentração: Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica

Orientador: Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari

**São Carlos
2016**

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

F224i Farias, Écyo Reis Cavalcante
Estimação de Parâmetros de um Gerador de Indução baseada no Método de Sensibilidade de Trajetória / Écyo Reis Cavalcante Farias ; orientador Elmer Pablo Tito Cari. – São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

1. Estimação de parâmetros. 2. Gerador de Indução. 3. Sensibilidade de Trajetória. 4. Sistemas não-lineares. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Écyo Reis Cavalcante Farias

Título: “Estimação de parâmetros de um gerador de indução baseada no Método de Sensibilidade de Trajetória”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 30 / 11 / 2016,

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

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

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

Mestre Taylon Gomes Landgraf - Doutorando - SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior

*Com imensa satisfação, alegria e amor
dedico este trabalho aos meus pais Júlio e Kátia,
aos meus irmãos Eduardo e Maria Eduarda
e a todos os meus familiares.*

Agradecimentos

A Deus e a nossa padroeira N. Sr.^a Aparecida por suas bênçãos recebidas e pela força e fé concedidas na busca por constantes desafios e realização de objetivos.

À minha família, pelo incentivo e apoio incondicional que concedem para realização dos meus estudos.

Aos meus familiares e amigos pelo apoio, estímulo e por criarem uma base que possibilita que eu seja uma pessoa melhor.

Ao Professor Elmer Pablo Tito Cari pelo convívio, amizade, confiança e excelente orientação neste trabalho.

Ao Professor Luis Fernando Costa Alberto pelos ensinamentos compartilhados e por me apresentar o Professor Elmer Pablo Tito Cari, o que permitiu a realização deste trabalho.

Aos amigos e aos mestres da Escola Educandário N. Sr.^a Aparecida, da Escola Municipal do Futuro, do Instituto Dom Barreto (IDB) e da Universidade de São Paulo (USP) que contribuíram na minha formação pessoal e profissional.

Aos amigos do laboratório de TCC em Máquinas: Matheus Câmara, Gabriel Negrelli, Taylon Landgraf e Bruno Romanholi, pela ajuda na construção do laboratório, pela amizade e pelos momentos de bom humor compartilhados.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica: César Domingues, Rui Berto e Aura Aparecido, pela ajuda e apoio concedidos na construção do laboratório de TCC em Máquinas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de estudos concedida e pelo apoio financeiro a este trabalho.

“O estudo, a busca da verdade e da beleza são domínios em que nos é consentido sermos crianças por toda a vida.”

Albert Einstein

Resumo

FARIAS, E. R. C. **Estimação de Parâmetros de um Gerador de Indução baseada no Método de Sensibilidade de Trajetória**. 2016. 89p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Neste trabalho, propõe-se um método para a estimação dos parâmetros do gerador de indução baseado na técnica de sensibilidade de trajetória. Os parâmetros são estimados por meio da resolução do problema de otimização não-linear de mínimos quadrados que compara as medidas reais obtidas do sistema com as soluções do modelo do gerador. As medidas reais foram adquiridas mediante a aplicação de uma perturbação estando o gerador conectado a um sistema elétrico real. A principal contribuição deste trabalho é proposição de um método *on-line* de estimação de parâmetros para identificação do modelo do gerador de indução e a validação com dados reais. Inicialmente, o método de sensibilidade é estudado e aplicado a um sistema de segunda ordem mais simples (sistema massa-mola) visando detectar suas potencialidades e limitações frente a um sistema de dinâmica mais complexa, sendo em seguida aplicado para estimação de parâmetros do gerador de indução. Embora o método de sensibilidade de trajetória seja a ênfase deste trabalho, outras abordagens também são estudadas para a estimação de parâmetros, tais como o método de sincronização mestre-escravo, o método barreira logarítmica e o método heurístico baseado na otimização de mapeamento média-variância. Com base nos resultados obtidos, é possível observar que o modelo do gerador proposto representa de forma realística e precisa o sistema em análise.

Palavras-chave: Estimação de parâmetros. Sensibilidade de trajetória. Gerador de indução. Sistemas não-lineares.

Abstract

FARIAS, E. R. C. **Parameter Estimation of an Induction Generator based on the Sensitivity Trajectory Method**. 2016. 89p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

This work proposes a method to estimate the parameters of induction generator based on trajectory sensitivity technique. The parameters are estimated by solving a nonlinear optimization problem of least squares which compares the real measurements of system with the generator model solutions. The real measurements were acquired by applying a disturbance with the generator connected to a real electrical system. The main contribution of this work is to propose a method of parameters estimation for identification of the induction generator model and validation with real data. Initially, the sensitivity method is studied and applied to a second-order simpler system (spring-mass system) to detect potentials and limitations when exposed to a complex dynamic system, and next applied to estimation parameters of the induction generator. Although the trajectory sensitivity method is the emphasis of this work, other approaches are also studied for the parameters estimation, such as the logarithmic barrier method, the master-slave synchronization method and the heuristic method based on mean variance mapping optimization. Based on the results obtained, it is possible to observe that the proposed generator model represents realistically and accurately the actual system under analysis.

Keywords: Parameter estimation. Trajectory sensitivity. Induction generator. Nonlinear systems.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Simplificação do processo de identificação de sistemas.	30
Figura 2 – Diagrama de blocos do procedimento de estimação de parâmetros baseado na técnica de sensibilidade de trajetória.	34
Figura 3 – Esquema do sistema Massa-Mola	35
Figura 4 – Diagrama de blocos do procedimento de estimação de parâmetros baseado na técnica de sensibilidade de trajetória tradicional.	36
Figura 5 – Comparação entre a saída (posição linear) do modelo ao início e ao final do processo de estimação de parâmetros.	37
Figura 6 – Funções de sensibilidade de trajetória após a estimação de parâmetros.	38
Figura 7 – Região de convergência dos parâmetros com o método de sensibilidade de trajetória tradicional.	38
Figura 8 – Erro de convergência com o método de sensibilidade trajetória tradicional e barreira logarítmica.	40
Figura 9 – Região de convergência do método de sensibilidade tradicional com barreira logarítmica.	40
Figura 10 – Diagrama de blocos do procedimento de estimação de parâmetros baseado na técnica de sensibilidade de trajetória tradicional com sincronização mestre-escravo.	41
Figura 11 – Comparação entre os erros de convergência para os métodos propostos.	42
Figura 12 – Região de convergência dos parâmetros do método de sensibilidade de trajetória tradicional com sincronização mestre-escravo.	42
Figura 13 – Circuito equivalente do modelo transitório eletromagnético de quinta ordem do gerador de indução.	47
Figura 14 – Transformação das variáveis retangulares E'_d e E'_q para as variáveis polares E' e δ	50
Figura 15 – Circuito transitório do gerador de indução.	51
Figura 16 – Circuito do gerador de indução conectado a uma carga estática Z_L	51
Figura 17 – Diagrama fasorial do gerador de indução.	52
Figura 18 – Modelo do Gerador de Indução conectado ao SEP.	53
Figura 19 – SEP ensaiado em laboratório para identificação do modelo do gerador de indução.	57
Figura 20 – Visão global do SEP montado em laboratório com os equipamentos instalados.	58
Figura 21 – Instrumentação para aquisição de dados do SEP.	58
Figura 22 – Esquema global para identificação dos parâmetros do modelo do gerador de indução.	59

Figura 23 – Tensões de fase aquisitadas no barramento central do SEP na presença da perturbação.	62
Figura 24 – Correntes de linha aquisitadas no barramento central do SEP na presença da perturbação.	63
Figura 25 – Comparação entre a potência ativa medida e de saída modelo.	65
Figura 26 – Comparação entre a potência reativa medida e de saída modelo.	65
Figura 27 – Comparação entre as potências ativa do modelo para a estimação <i>off-line</i> e <i>on-line</i> dos parâmetros.	67
Figura 28 – Comparação entre as potências reativa do modelo para a estimação <i>off-line</i> e <i>on-line</i> dos parâmetros.	67
Figura 29 – Circuito equivalente do motor de indução em regime permanente.	77
Figura 30 – Teste da máquina de indução com rotor bloqueado.	78
Figura 31 – Teste da máquina de indução em vazio.	79
Figura 32 – Teste da máquina de indução com corrente contínua.	80
Figura 33 – Característica de desaceleração do MCC para determinação de ε_x e ε_y	82
Figura 34 – Mapeamento da variável x_i^* no método MVMO	83
Figura 35 – Efeito dos parâmetros na função de mapeamento	84
Figura 36 – Esquema ilustrativo para os parâmetros e variáveis de uma população.	86
Figura 37 – Atribuição do melhor solução do vetor de parâmetros.	86
Figura 38 – Seleção randômica de m elementos ($m < k$) do melhor vetor de parâmetros (p_{best}).	86
Figura 39 – Modificação dos elementos selecionados.	87
Figura 40 – Obtenção do novo elemento (x_{new}).	87

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultados com o método de sensibilidade trajetória tradicional.	37
Tabela 2 – Resultados com a método de sensibilidade de trajetória tradicional e barreira logarítmica.	39
Tabela 3 – Resultados com o método de sensibilidade de trajetória tradicional e acoplamento mestre-escravo.	41
Tabela 4 – Resultados da estimação com o algoritmo heurístico MVMO considerando uma faixa de incerteza nos parâmetros.	63
Tabela 5 – Valores Singulares da Matriz de Sensibilidade de Trajetória (Γ) e classificação dos parâmetros com base em sua influência na saída.	64
Tabela 6 – Resultados da estimação com o algoritmo híbrido considerando uma faixa de incerteza nos parâmetros.	64
Tabela 7 – Comparação entre os parâmetros <i>off-line</i> (obtidos via testes) e os parâmetros <i>on-line</i> (estimados via modelo), considerando uma incerteza de $\pm 80\%$ nos parâmetros iniciais.	66
Tabela 8 – Impedâncias experimentais da máquina de indução obtidas por meio dos ensaios.	81

Lista de abreviaturas e siglas

IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
GI	Gerador de Indução
LABVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MCC	Motor de Corrente Contínua
MVMO	<i>Mean Variance Mapping Optimization</i>
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência

Lista de símbolos

δ	Ângulo de fase da tensão transitória
E'_d, E'_q	Tensões transitórias de eixo direto e de eixo em quadratura
ψ_{dr}, ψ_{qr}	Fluxo de eixo direto e de eixo em quadratura do rotor
ψ_{ds}, ψ_{qs}	Fluxo de eixo direto e de eixo em quadratura do estator
G_s, B_s	Condutância e susceptância da admitância de carga
H	Constante de relação entre a energia cinética na velocidade síncrona e o valor da potência de base do gerador
J	Momento de inércia combinado do GI e do MCC
M	Constante de inércia combinada do GI e do MCC
ω	Velocidade angular do rotor
ω_s	Velocidade síncrona
D_t	Operador derivada temporal
P_e, Q_e	Potência ativa e reativa no barramento central do SEP
R_r	Resistência do rotor
R_s	Resistência do estator
s	Escorregamento da máquina de indução
T_e	Torque eletromagnético
T_m	Torque mecânico
T_0	Período de amostragem
T'_o	Constante de tempo de circuito transitório em aberto
t_{pm}	Tempo de processamento computacional médio
V	Tensão de fase da rede elétrica
X, X_{ss}	Reatância de eixo direto ou de eixo em quadratura (entreferro uniforme)
X'	Reatância transitória de eixo direto ou de eixo em quadratura

X_{lr}	Reatância de dispersão do rotor
X_{ls}	Reatância de dispersão do estator
X_m	Reatância de magnetização
X_{rr}	Reatância do rotor
Y_L, Z_L	Admitância e impedância da carga estática

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Definição do Problema e sua Importância	25
1.2	Revisão Bibliográfica	26
1.3	Características desejáveis no processo de estimação dos parâmetros do GI	27
1.4	Contribuição e Originalidade deste Trabalho	27
1.5	Objetivos	27
2	MÉTODO DE ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE SISTEMAS DINÂMICOS NÃO-LINEARES	29
2.1	Introdução	29
2.2	Identificação de Sistemas	30
2.3	Método de Sensibilidade de Trajetória	31
2.3.1	Método de Sensibilidade de Trajetória para Sistemas Dinâmicos Não-Lineares	31
2.4	Método de Barreira Logarítmica	34
2.5	Método de Sincronização Mestre-Escravo	35
2.6	Aplicação à Estimação de Parâmetros do Sistema Massa-Mola	35
2.6.1	Modelagem	35
2.6.2	Resultados da estimação de parâmetros	36
2.6.2.1	Estimação de parâmetros com o método de sensibilidade tradicional	36
2.6.2.2	Estimação de parâmetros com os métodos de sensibilidade tradicional e de barreira logarítmica	39
2.6.2.3	Estimação de parâmetros com o método de sensibilidade tradicional e a sincronização mestre-escravo	41
3	MODELAGEM DO SEP	45
3.1	Gerador de Indução	45
3.1.1	Considerações acerca do modelo do gerador de indução	45
3.1.2	Modelo de quinta ordem	46
3.1.3	Modelo de terceira ordem	49
3.1.4	Modelo do Gerador de Indução adotado neste Trabalho para fins de Estimação de Parâmetros	50
4	MÉTODO DE SENSIBILIDADE DE TRAJETÓRIA APLICADO À ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO GERADOR DE INDUÇÃO	55
4.1	Introdução	55

4.2	Dificuldades na identificação do gerador de indução	55
4.3	Esquema para a Estimação dos Parâmetros com o Gerador em Operação no SEP	56
4.3.1	Considerações práticas acerca do SEP de pequeno porte montado no Laboratório de Máquinas do SEL/EESC/USP	57
4.4	Estimação <i>On-line</i> dos Parâmetros do Gerador de Indução	58
4.4.1	Obtenção das medidas reais do sistema	60
4.4.2	Obtenção das estimativas iniciais dos parâmetros	60
4.4.3	Determinação das estimativas iniciais das variáveis de estado	60
4.4.4	Algoritmo de ajuste dos parâmetros	61
4.4.5	Resultados	62
5	CONCLUSÃO	69
5.1	Perspectivas para Trabalhos Futuros	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICES	75
	APÊNDICE A – ESTIMAÇÃO <i>OFF-LINE</i> DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA DE INDUÇÃO	77
A.1	Determinação das Impedâncias do Modelo de Circuito da Máquina de Indução	77
A.1.1	Ensaio de rotor bloqueado	77
A.1.2	Ensaio a vazio (sem carga)	79
A.1.3	Ensaio em corrente contínua	79
A.1.4	Impedâncias da máquina de indução obtidas experimentalmente	80
A.2	Determinação do Momento de Inércia	81
A.3	Estimação <i>Off-line</i> dos Parâmetros Iniciais do Modelo do GI	82
	APÊNDICE B – MÉTODO MVMO DE OTIMIZAÇÃO	83
	APÊNDICE C – PUBLICAÇÕES RELACIONADAS À ESTA PESQUISA	89

1 Introdução

1.1 Definição do Problema e sua Importância

As empresas do setor elétrico utilizam *softwares* de simulação especializados (*Anatem*, *Organon*, *Digsilent*, dentre outros) para conhecer o comportamento dinâmico de um Sistema de Energia Elétrica (SEE). Estes *softwares* possuem modelos detalhados de diferentes elementos do sistema. Entretanto, os parâmetros destes modelos devem ser fornecidos pelos usuários e sua indisponibilidade ou imprecisão pode comprometer a confiabilidade dos resultados e dos estudos que dependem destas simulações.

Dentre os elementos que compõem um SEE, a representação de geradores de indução (GI) tem sido cada vez mais importante para a finalidade de geração de energia elétrica. Embora as máquinas síncronas sejam mais utilizadas para esta finalidade, devido a grande facilidade no controle das potências ativa e reativa, das tensões e de frequência, para aplicações em sistema de geração de baixa potência, o uso de geradores de indução mostra-se vantajoso quando comparado aos geradores síncronos, pois é uma máquina robusta, construtivamente simples, de custo reduzido, de baixo índice de manutenção e que apresenta grande densidade de potência. Além disso, em aplicações de potências mais baixas, há a possibilidade de geração descentralizada de energia, aproveitando recursos locais, uma solução mais adequada e, muitas vezes, de menor custo global.

Em parques eólicos de baixa potência são amplamente utilizados geradores de indução, sendo este o elemento mais importante no modelo de um aerogerador, principalmente daquele duplamente alimentado (DFIG, do inglês *double fed induction generator*) (ERLICH et al., 2008). Além daquelas citadas anteriormente, outra vantagem relevante desta máquina para tal aplicação é a operação do gerador em velocidade variável, porém acima da velocidade síncrona para que possa operar no modo gerador. Isto é conseguido utilizando controladores ou conversores para o controle de potência do GI com base na demanda de carga.

Nesse sentido, o uso de modelos representativos adequados e a correta identificação dos parâmetros do gerador de indução são de vital importância para descrever satisfatoriamente o comportamento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) no qual estão inseridos, de forma que os SEP's cumpram sua função de fornecimento de energia elétrica com qualidade, segurança e economia.

Neste trabalho, é apresentado um método para a identificação de um modelo de um gerador de indução, operando num pequeno SEP, a partir de medidas reais. Mediante a aplicação de uma perturbação, obtém-se o comportamento em regime transitório do sistema com o objetivo de determinar seus parâmetros, estimados por intermédio da técnica

de ajuste de parâmetros denominada de sensibilidade de trajetória.

1.2 Revisão Bibliográfica

A grande dificuldade enfrentada pelas empresas do setor elétrico consiste na indisponibilidade ou incerteza dos parâmetros da máquina de indução. Esta dificuldade advém de uma série de fatores, dentre os quais se destacam: documentação incompleta, perda de dados e envelhecimento natural dos equipamentos com o tempo de operação. Além disso, muitos fabricantes não fornecem dados detalhados desta máquina, uma vez que são de caráter confidencial e estão protegidos por lei de patentes.

Na prática, muitos dos processos empregados na estimação de parâmetros do gerador são obtidos via testes *off-line*, seguindo em geral a norma (IEEE, 2004). Dentre estes testes tradicionais, destacam-se o teste “em vazio”, o teste com “rotor bloqueado” e o teste em “corrente contínua”. A desvantagem associada é que alguns parâmetros estão sujeitos a saturação dependendo da condição de operação da máquina, ocasionando incertezas nas suas medições. Somado-se a isso, para realização destes testes é necessário que a máquina seja desconectada do resto do sistema elétrico, o que pode ser impraticável e quase sempre resulta em perdas econômicas (CARI, 2005).

Com o intuito de contornar estas dificuldades impostas pelos métodos tradicionais, na comunidade científica foram propostos modelos genéricos de geradores eólicos e seus parâmetros são estimados por métodos de estimação *on-line*, isto é, sem a desconexão da máquina do restante do sistema.

Neste trabalho, o método de estimação de parâmetros a ser desenvolvido está baseado na técnica de sensibilidade de trajetória, seguindo uma abordagem similar àquela apresentada em (CARI, 2009). O método é assim intitulado pelo fato do algoritmo de ajuste depender das derivadas parciais das saídas em relação aos parâmetros (sensibilidades) e se enquadra dentro dos métodos de estimação “*on-line*” de parâmetros. Em relação a outras técnicas de estimação de parâmetros (tais como método dos gradientes e algoritmos genéticos), este método possui algumas vantagens:

- Pode ser implementado tanto para sistemas lineares como para sistemas não-lineares;
- Permite representar de forma adequada as não-linearidades do modelo em análise;
- Possui uma rápida convergência para estimar os parâmetros, sendo o erro de convergência quadrático.

A grande desvantagem deste método é que o sucesso de convergência aos valores verdadeiros dos parâmetros depende que os valores iniciais (“estimativa inicial”) estejam próximos dos valores reais. Para contornar tais problemas, serão empregadas técnicas

abordadas em (CARI, 2009). Além disso, será proposto a utilização de um algoritmo híbrido, composto pelo método de sensibilidade de trajetória e pelo método heurístico *Mean Variance Mapping Optimization* (MVMO), este último desenvolvido em (ERLICH; VENAYAGAMOORTHY; WORAWAT, 2010). Vale destacar que método MVMO foi selecionado dentre os métodos heurísticos pois recentes publicações (ERLICH et al., 2012) tem mostrado maiores vantagens deste em relação a outros métodos heurísticos, como algoritmos genéticos e otimização por enxame de partículas (PSO), por exemplo.

1.3 Características desejáveis no processo de estimação dos parâmetros do GI

Com base nas considerações levantadas na seção anterior, algumas características desejáveis no processo de estimação de parâmetros do gerador de indução são:

1. Estimação dos parâmetros “*on-line*”, isto é, com a máquina conectada ao SEP.
2. Seleção adequada das variáveis para obtenção de dados reais de fácil medição, de forma que os parâmetros devem ser estimados com as medidas disponíveis do SEP.
3. O método de estimação deve ser robusto em relação a incertezas dos parâmetros e ruídos presentes no processo de aquisição de dados do “*Sistema Real*”, sendo capaz de estimar os parâmetros aos valores que mais aproximam daqueles verdadeiros.

1.4 Contribuição e Originalidade deste Trabalho

Este trabalho foi desenvolvido considerando as dificuldades e a necessidade das empresas do setor elétrico, principalmente na área de geração de energia eólica, para identificarem o modelo do gerador de indução. A pesquisa será realizada, tanto teoricamente quanto experimentalmente, por meio de ensaios em um sistema elétrico de potência montado no Laboratório de Máquinas Elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP. O método de estimação de parâmetros está baseado na análise de sensibilidade de trajetória, sendo uma abordagem inédita e que atende a diversos requisitos de um processo de identificação de parâmetros, sendo o mais importante deles a identificação do modelo com a máquina ligada ao restante do SEP.

1.5 Objetivos

Com base no exposto anteriormente, o presente trabalho tem por objetivo principal o desenvolvimento de um procedimento para identificar um modelo de um gerador de indução, representativo de um aerogerador, por meio da estimação de seus parâmetros baseado na técnica de sensibilidade de trajetória.

Para que o objetivo principal seja alcançado, espera-se atingir os seguintes objetivos preliminares:

1. Modelagem do gerador de indução conectado a um Sistema Elétrico de Potência;
2. Desenvolvimento de um método para estimar os parâmetros do GI a partir das medidas disponíveis no SEP;
3. Montagem de um pequeno SEP no laboratório para realização de ensaios;
4. Realização de ensaios do SEP em laboratório para validação do modelo.

2 Método de Estimação de Parâmetros de Sistemas Dinâmicos Não-Lineares

2.1 Introdução

A estimação de parâmetros de sistemas dinâmicos não-lineares é muito importante para representar um modelo nas diferentes áreas do conhecimento (elétrica, mecânica, química, dentre outras). Este processo, consiste em encontrar um conjunto de parâmetros que melhor descrevem o sistema real em análise. Desta forma, a estimação de parâmetros está contida na área de identificação de sistemas, em que modelos matemáticos são escolhidos de forma a representar adequadamente as saídas observadas, isto é, os dados experimentais do sistema.

Em relação a outras técnicas de estimação de parâmetros (método dos gradientes, algoritmos genéticos, etc), o método de sensibilidade de trajetória possui algumas vantagens: rapidez de convergência (erro de convergência quadrático), pode ser facilmente implementada para a maioria dos sistemas não-lineares e pode ser utilizada para estimar as condições iniciais das variáveis de estado.

O estudo das funções de sensibilidade é justificado pela necessidade de conhecer os efeitos da variação dos parâmetros nas soluções das equações diferenciais. A taxa de variação das soluções das equações diferenciais em relação aos seus parâmetros chama-se de funções de sensibilidade de trajetória.

A grande desvantagem deste método é que o sucesso de convergência aos valores verdadeiros dos parâmetros depende que os valores iniciais (estimativa inicial) estejam próximos dos valores reais.

Para contornar este problema, estuda-se o uso de duas técnicas que combinadas com a sensibilidade de trajetória minimizam o problema de convergência do método de sensibilidade. A primeira técnica consiste na restrição dos parâmetros usando o método de barreira logarítmica, enquanto que a segunda consiste na sincronização entre as saídas do sistema real e do sistema modelo. Estas serão empregadas em um sistema-teste de 2^a ordem.

2.2 Identificação de Sistemas

O processo de identificação de sistemas consiste basicamente em três etapas (AGUIRRE, 2007):

- **Obtenção de dados ou medidas:** Consiste na primeira etapa do processo de identificação. Os dados são obtidos a partir da realização de ensaios ou testes com o intuito de obter informações dinâmicas do sistema em análise e constituem o bloco “*Sistema Real*”, como apresentado na Figura 1;
- **Escolha da estrutura do modelo:** Nesta etapa, descrevem-se as equações diferenciais e algébricas do sistema que formam o bloco denominado “*Modelo Matemático*”;
- **Estimação de parâmetros:** Na última etapa do processo de identificação, dispendo dos dados coletados e da estrutura do modelo, efetua-se o processo de estimação de parâmetros, que consiste em encontrar o conjunto de parâmetros que melhor descrevem o sistema real. Para esta finalidade, é utilizado um algoritmo de ajuste de parâmetros.

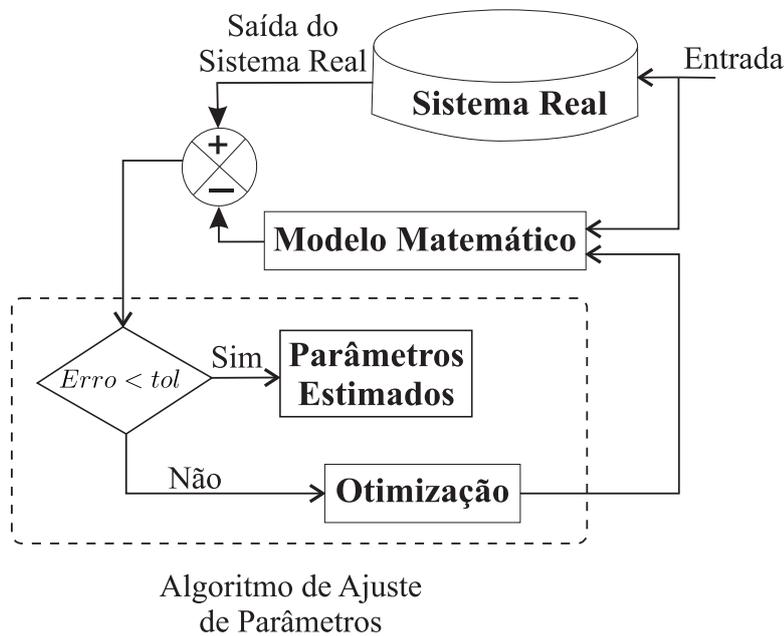


Figura 1 – Simplificação do processo de identificação de sistemas.

Algumas medidas do Sistema Real são escolhidas como entradas a serem aplicadas no bloco “*Modelo Matemático*”, e outras são escolhidas como saídas do mesmo bloco. Em seguida, as saídas do sistema real são comparadas com as saídas do modelo matemático para produzir o sinal de erro, o qual se deseja minimizar. O processo é realizado de forma sucessiva ajustando os parâmetros até que o erro seja inferior a uma tolerância desejada.

2.3 Método de Sensibilidade de Trajetória

Seja $y(t, p)$ o vetor solução de uma equação diferencial ordinária dependente do vetor de parâmetros p . A uma variação Δp , está associada a variação $\Delta y(t, p)$, que por sua vez pode ser aproximada por:

$$\Delta y(t, p) \approx \sum_i^n \frac{\partial y}{\partial p_i} \Delta p_i \quad (2.1)$$

As derivadas parciais

$$\frac{\partial y}{\partial p_i} \doteq \lambda_y^{p_i} \quad (2.2)$$

são denominadas de funções de sensibilidade de trajetória e quantificam a variação da solução (trajetória) da equação diferencial em relação aos seus parâmetros.

A princípio, as funções de sensibilidade para sistemas lineares invariantes no tempo podem ser encontradas resolvendo-se as equações diferenciais e derivando-se a solução em relação a cada parâmetro. No entanto, este procedimento é complicado mesmo em sistemas de baixa ordem e quase sempre impossível para sistemas não lineares, uma vez que nem sempre é possível expressar a solução de equações diferenciais em termos de funções analíticas. Para contornar este problema, as funções de sensibilidade de trajetória são obtidas numericamente a partir das equações de sensibilidade, isto é, das equações diferenciais representativas do modelo (CARI, 2009).

2.3.1 Método de Sensibilidade de Trajetória para Sistemas Dinâmicos Não-Lineares

Considere o sistema não linear modelado por

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), p, u(t)) \\ y(t) &= g(x(t), p, u(t)) \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde $x(t)$ é o vetor de estados (soluções), u é o vetor de entrada, p é o vetor de parâmetros e $y(t)$ é o vetor de saída.

Admite-se que as funções f e g sejam diferenciáveis em relação a cada componente p_i do vetor de parâmetros, para $i = 1, \dots, p$. As sensibilidades de trajetória $\frac{\partial x(t)}{\partial p_i}$ e $\frac{\partial y(t)}{\partial p_i}$ dos estados $x(t)$ e da saída $y(t)$, obtidas diferenciando-se o conjuntos de equações dado por (2.3) em relação a p_i , são as equações de sensibilidade dadas por:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial x(t)}{\partial p_i} = \frac{\partial f(x(t), p, u(t))}{\partial x} \frac{\partial x(t)}{\partial p_i} + \frac{\partial f(x(t), p, u(t))}{\partial p_i} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial y(t)}{\partial p_i} = \frac{\partial g(x(t), p, u(t))}{\partial x} \frac{\partial x(t)}{\partial p_i} + \frac{\partial g(x(t), p, u(t))}{\partial p_i} \quad (2.5)$$

Se f ou g não são diferenciáveis com relação ao parâmetro p_i , as funções de sensibilidade podem ser obtidas de forma aproximada procedendo da seguinte maneira. Sejam p^0 e p^1 , respectivamente, o vetor de parâmetros inicial e o vetor cuja i -ésima componente é $p_i^1 = p_i^0 + \Delta p_i$, em que Δp_i é uma pequena perturbação no parâmetro. A resposta no tempo obtida com os parâmetros p^0 e p^1 são dadas por $y_0(t)$ e $y_1(t)$, respectivamente. Assim, as funções de sensibilidades de trajetória podem ser aproximadas por:

$$\begin{aligned}\frac{\partial x(t)}{\partial p_i} &\approx \frac{x^1(t, p_i^0 + \Delta p_i) - x^0(t)}{\Delta p_i} \\ \frac{\partial y(t)}{\partial p_i} &\approx \frac{y^1(t, p_i^0 + \Delta p_i) - y^0(t)}{\Delta p_i}\end{aligned}\quad (2.6)$$

Como mencionado anteriormente, o processo de estimação de parâmetros consiste na última etapa do processo de identificação de sistemas. Com o intuito de aproximar o comportamento do modelo em relação ao sistema real, faz-se uso de um algoritmo ou técnica de ajuste de parâmetros.

A atualização dos parâmetros é feita com base no cálculo das funções de sensibilidade de trajetória. O ajuste no vetor de parâmetros p é efetuado no sentido de minimizar a diferença entre as saídas do sistema real e as saídas do sistema modelo. Em geral, procura-se minimizar a função objetivo $J(p)$ dada pelo quadrado das diferenças entre as saídas. Neste trabalho, utiliza-se a função objetivo baseada na norma 2, mais conhecida por *método dos mínimos quadrados*. A formulação matemática desta função é dada por:

$$J(p) = \frac{1}{2} \int_0^{T_0} (y_r(t) - y_m(t))^T (y_r(t) - y_m(t)) dt \quad (2.7)$$

sendo $y_r(t)$ o vetor de saída do sistema real (valor medido), $y_m(t)$ é o vetor de saída do sistema modelo e $[0, T_0]$ o intervalo de tempo analisado.

O valor ótimo para o funcional $J(p)$ é obtido por meio da aplicação do operador gradiente, de sentido contrário, em relação ao vetor p quando igualado a zero:

$$\nabla J(p) = -\frac{\partial J(p)}{\partial p} = 0 \quad (2.8)$$

A partir de (2.7) e (2.8), obtém-se:

$$G(p) = -\frac{\partial J(p)}{\partial p} = \int_0^{T_0} \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right)^T (y_r(t) - y_m(t)) dt \quad (2.9)$$

Realizando a expansão em série de Taylor para $G(p)$ no ponto $p = p^{(k)}$ e desprezando os termos de segunda ordem, obtém-se a expressão de ajuste dos parâmetros na k -ésima iteração, dada por:

$$p^{(k+1)} = p^{(k)} - \Gamma^{-1}(p)G(p)|_{p=p^{(k)}} \quad (2.10)$$

sendo $\Gamma(p)$ a matriz Jacobiana, expressa por:

$$\Gamma(p) \approx \int_0^{T_0} \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right)^T \left(\frac{\partial y}{\partial p} \right) \Big|_{p=p^{(k)}} \quad (2.11)$$

Para a implementação numérica, a saída $y_r(t)$ do sistema real é amostrada em intervalos de tempo discreto, de forma que as integrais (2.7), (2.9) e (2.11) transformam-se em somatórios.

O algoritmo do método está sintetizado na Figura 2 e consiste nos passos enumerados a seguir:

1. Obtenção da saída do sistema real a partir de medidas do sistema com os parâmetros reais;
2. Obtenção da saída do sistema modelo a partir de equações matemáticas do modelo;
3. Comparação entre as saídas do sistema real e do modelo matemático por intermédio do cálculo de $J(p^{(k)})$;
4. Obtenção das equações de sensibilidade a partir da derivação das equações em relação aos parâmetros;
5. Interrupção, caso $J(p^{(k)})$ seja menor que uma tolerância especificada. Caso contrário, prossiga com o passo 6;
6. Resolução da equação $\frac{\partial J(p)}{\partial p} = 0$ por intermédio do método de Newton-Raphson e cálculo da função $\Gamma(p^{(k)})$;
7. Cálculo do ajuste incremental dos parâmetros Δp ;
8. Atualização dos parâmetros, iteração do algoritmo para $k = k + 1$ e retorno ao passo 2.

A grande desvantagem do método de estimação de parâmetros baseado na técnica de sensibilidade de trajetória está associada à elevada sensibilidade, ou falta de robustez, em relação às condições iniciais dos parâmetros. Em outras palavras, a convergência dos parâmetros depende que os valores iniciais estejam suficientemente próximos dos valores verdadeiros.

Este problema pode ser contornado por meio do aumento da região de convergência dos parâmetros, de forma que a correta estimação ocorra mesmo que os valores iniciais dos parâmetros estejam relativamente distantes dos valores verdadeiros. Nas seções subsequentes, são discutidas duas técnicas que combinadas ao método de sensibilidade de trajetória tradicional ajudam a resolver este problema, bem como sua aplicação para um sistema-teste de segunda ordem, são elas: o método de barreira logarítmica e a sincronização mestre-escravo.

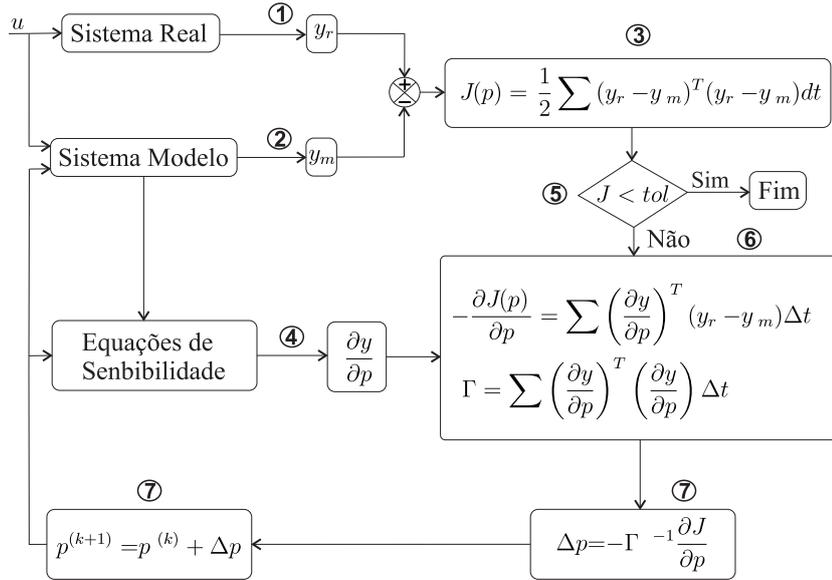


Figura 2 – Diagrama de blocos do procedimento de estimação de parâmetros baseado na técnica de sensibilidade de trajetória.

2.4 Método de Barreira Logarítmica

A otimização é um ramo da matemática aplicada e tem como objetivo encontrar a melhor solução para um determinado problema. Neste trabalho, utiliza-se o método de barreira logarítmica para otimizar o processo de minimização do erro quadrático médio entre as saídas do sistema real e do sistema modelo na estimação dos parâmetros do sistema massa-mola.

Considere o problema de otimização P com restrição de desigualdade representado por:

$$\begin{aligned}
 P : & \text{ Minimizar } f(x) \\
 \text{sujeito a: } & g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\
 & x \in \mathfrak{R}^n,
 \end{aligned}$$

cujas região de factibilidade é expressa por:

$$\mathcal{F} := \{x \in \mathfrak{R}^n | g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m\}$$

em que $f(x)$ é a função objetivo e $g_i(x)$ é a restrição de desigualdade do problema.

A função barreira logarítmica do problema P é dada por:

$$P(x, \mu) = f(x) - \mu \cdot \sum_{i=1}^m \ln g_i(x) \quad (2.12)$$

onde $\mu \geq 0$ é o parâmetro barreira.

As funções barreira tem como propriedades: (i) são infinitas em todo lugar, menos em \mathcal{F} ; (ii) são suaves dentro de \mathcal{F} ; (iii) seu valor tende a $+\infty$ à medida que x se aproxima da fronteira de \mathcal{F} .

2.5 Método de Sincronização Mestre-Escravo

O acoplamento mestre-escravo consiste em acoplar algumas saídas do sistema mestre (sistema real) com o sistema escravo (modelo matemático) em forma unidirecional, isto é, o sistema mestre acopla o sistema escravo. Em resumo, durante o processo de estimação, o ajuste dos parâmetros é realizado de forma que as saídas dos sistemas real e auxiliar sincronizem, ficando suficientemente próximas durante um intervalo de tempo finito. A abordagem matemática acerca desta técnica pode ser encontrada em (CARI, 2009).

2.6 Aplicação à Estimação de Parâmetros do Sistema Massa-Mola

2.6.1 Modelagem

Como referência para o estudo e a aplicação da técnica de sensibilidade de trajetória, será utilizado um sistema de segunda ordem. Seja o sistema massa-mola representado pela Figura 3, cuja equação de movimento é dada por:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m}u(t) - \frac{k}{m}x \quad (2.13)$$

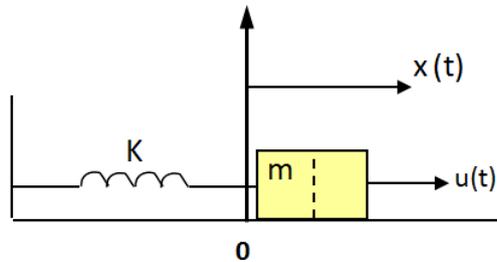


Figura 3 – Esquema do sistema Massa-Mola

Definindo $x_1 \doteq x$ e $x_2 \doteq \dot{x}$ como sendo posição e velocidade lineares, respectivamente, obtém-se:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{k}{m}x_1 + \frac{u}{m} \\ x_1(0) &= x_2(0) = 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

sendo u a força externa aplicada (constante de entrada), $[x_1, x_2]^T$ as variáveis a serem medidas e $p = [k, m]^T$ o vetor parâmetros formado pela constante elástica k e pela massa m . As condições iniciais tanto para posição quanto para velocidade são consideradas nulas.

2.6.2 Resultados da estimação de parâmetros

Os resultados apresentados a seguir, para a estimação dos parâmetros, referem-se a medidas obtidas por simulação, considerando que os valores reais dos parâmetros são conhecidos.

2.6.2.1 Estimação de parâmetros com o método de sensibilidade tradicional

O método de sensibilidade de trajetória proposto foi aplicado para estimação dos parâmetros do sistema massa-mola. O procedimento adotado para tal pode ser resumido no diagrama de blocos da Figura 4.

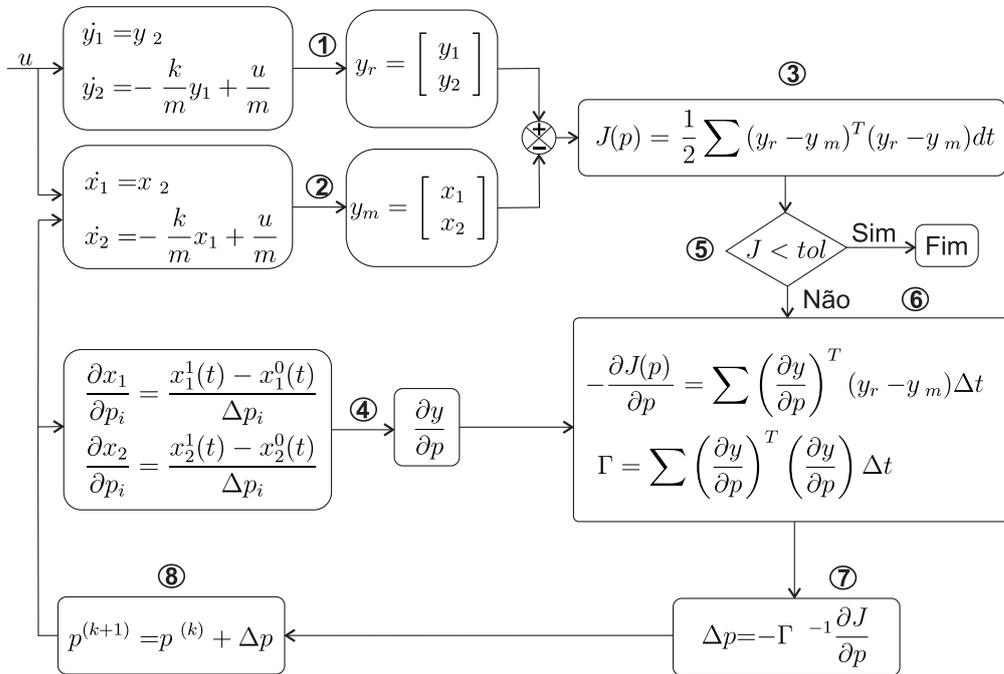


Figura 4 – Diagrama de blocos do procedimento de estimação de parâmetros baseado na técnica de sensibilidade de trajetória tradicional.

Vale destacar que os dados da saída y_r do sistema real foram obtidos via simulação, utilizando como valores verdadeiros dos parâmetros $[k_r, m_r] = [6, 3]$ e condições iniciais $[y_1(0), y_2(0)] = [0, 0]$. Os valores dos parâmetros iniciais foram adotados como $[k^{(0)}, m^{(0)}] = [9, 5/2]$, isto é, com erro associado de 50% e -16,67%, respectivamente.

Na Tabela 1, mostra-se a convergência a valores corretos dos parâmetros após 8 iterações. Na Figura 5 é ilustrada a saída x_1 (posição linear) antes e depois da estimação dos parâmetros, respectivamente.

As funções de sensibilidade $\frac{\partial y}{\partial m}$ e $\frac{\partial y}{\partial k}$ são mostradas na Figura 6. A análise do comportamento destas funções revela algumas observações importantes. De fato, $\frac{\partial y}{\partial m}$ indica que a resposta do sistema é mais sensível à variação do parâmetro m quando comparado à

variação em relação ao parâmetro k , isto é, o parâmetro m possui uma maior influencia sobre a resposta (saída) do sistema.

Tabela 1 – Resultados com o método de sensibilidade trajetória tradicional.

Iteração	k	m	J_p (%)
0	9	2,5	3,6027
1	13,7526	4,4321	2,2041
2	9,3376	5,2498	0,6012
3	4,5043	1,5447	4,0061
4	6,7009	2,5520	1,0523
5	7,2053	3,0358	0,1603
6	5,9261	3,0358	0,0075
7	6,0064	3,0032	0,0000
8 (final)	6	3	0
real	6	3	—

Para avaliar a máxima incerteza e, portanto, a sensibilidade em relação às condições iniciais dos parâmetros, levantou-se a região de convergência mostrada na Figura 7, em que os valores iniciais dos parâmetros foram sucessivamente incrementados ou decrementados até atingir valores limitantes do processo de convergência.

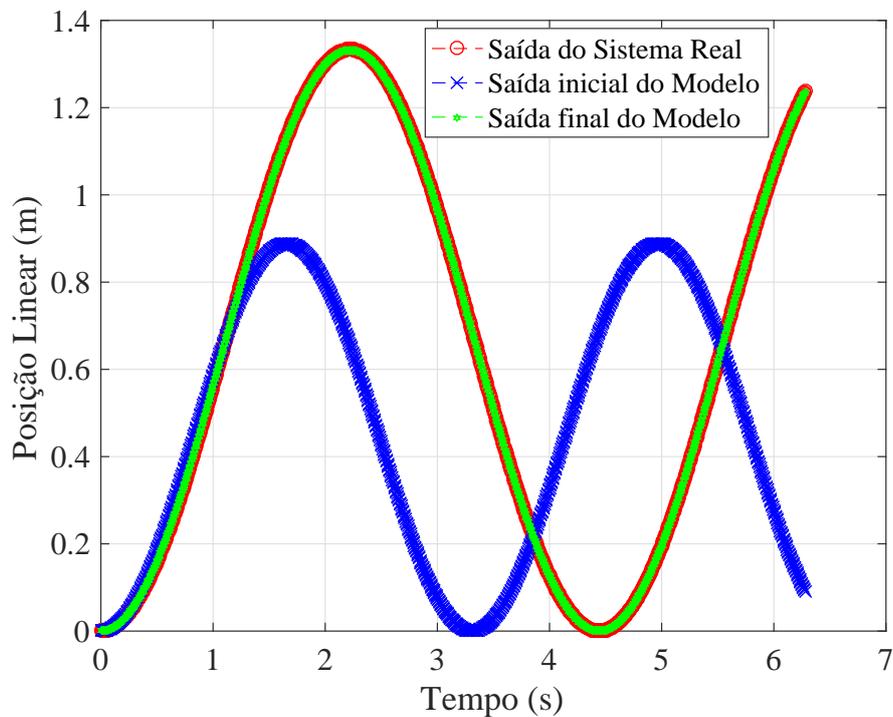


Figura 5 – Comparação entre a saída (posição linear) do modelo ao início e ao final do processo de estimação de parâmetros.

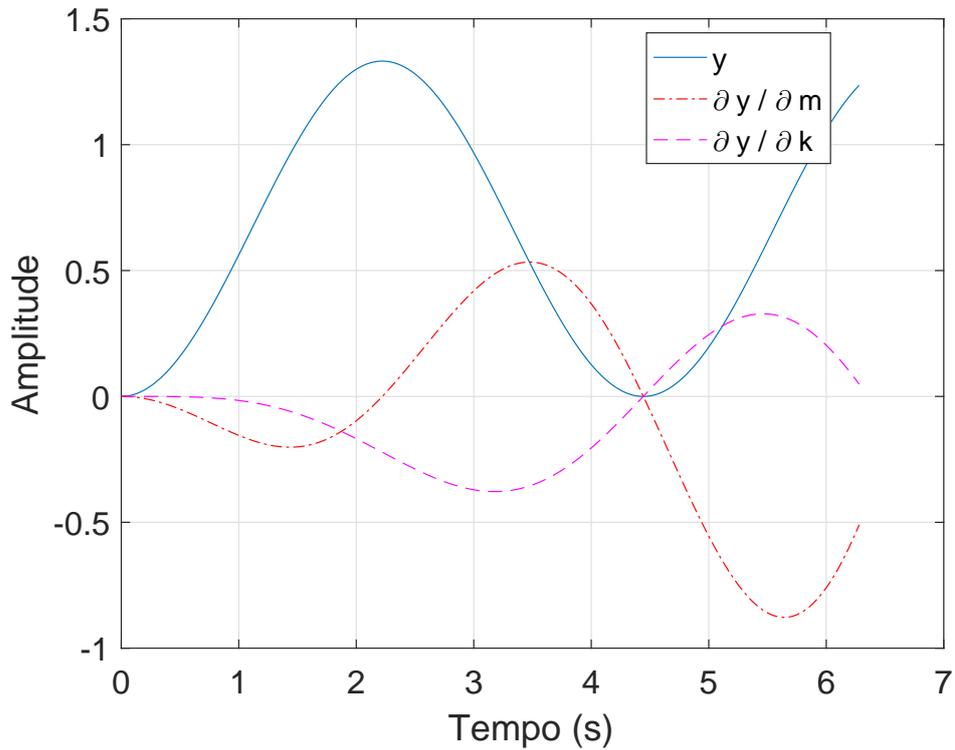


Figura 6 – Funções de sensibilidade de trajetória após a estimação de parâmetros.

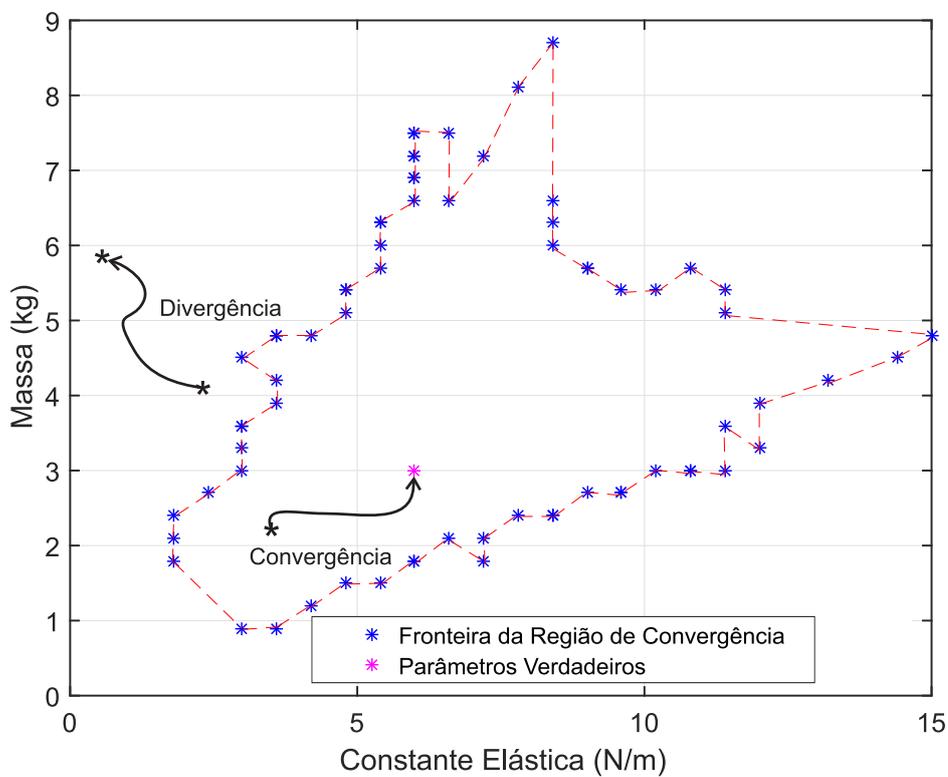


Figura 7 – Região de convergência dos parâmetros com o método de sensibilidade de trajetória tradicional.

2.6.2.2 Estimação de parâmetros com os métodos de sensibilidade tradicional e de barreira logarítmica

A função barreira logarítmica do problema associado ao sistema massa-mola é dada por:

$$P(p, \mu) = J(p) - \mu \cdot \sum_{i=\min, \max} \ln(k - k_i) + \ln(m - m_i) \quad (2.15)$$

sendo $[k_{\min}, m_{\min}] = [3, 6; 2, 4]$ e $[k_{\max}, m_{\max}] = [8, 4; 4, 8]$ os valores das restrições considerados para os parâmetros.

A convergência dos parâmetros é apresentada na Tabela 2. Na Figura 8, mostra-se o erro quadrático médio $J(p)$ entre as saídas do sistema real e do modelo ao longo do processo iterativo. Com base nestes resultados, constata-se que o método de sensibilidade de trajetória com barreira logarítmica apresenta melhor desempenho de convergência em relação ao método de sensibilidade de trajetória tradicional, uma vez que o erro quadrático médio passa a ter um comportamento estritamente descendente. Como consequência, o número de iterações foi reduzido de 8 para 6.

Tabela 2 – Resultados com a método de sensibilidade de trajetória tradicional e barreira logarítmica.

Iteração	k	m	J_p (%)
0	9	2,5	12,5560
1	9,3746	2,5516	4,2823
2	5,9660	2,5983	0,3508
3	5,7798	2,7939	0,0284
4	6,0052	2,9915	0,0005
5	6,0008	3,0004	0,0001
6 (final)	3	0	0
real	6	3	—

Avaliou-se ainda a região de convergência dos parâmetros para este caso, de forma que obteve-se 100% de convergência dentro da região determinada pelos limites de restrição dos parâmetros, conforme apresentado na Figura 9. Assim, com o método de barreira logarítmica a garantia de convergência obtida é de 100%. .

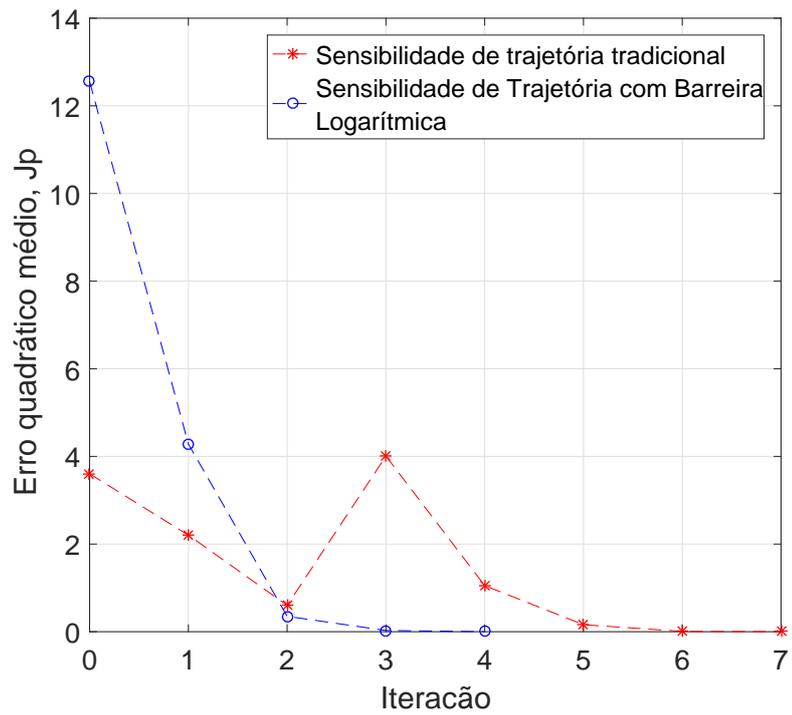


Figura 8 – Erro de convergência com o método de sensibilidade trajetória tradicional e barreira logarítmica.

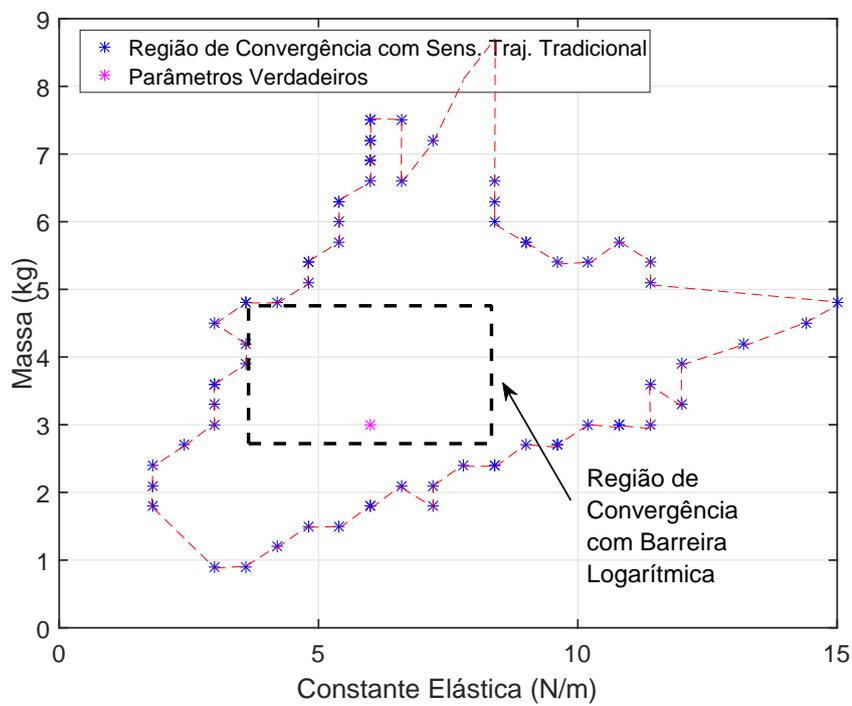


Figura 9 – Região de convergência do método de sensibilidade tradicional com barreira logarítmica.

2.6.2.3 Estimação de parâmetros com o método de sensibilidade tradicional e a sincronização mestre-escravo

Agregou-se ao método de sensibilidade de trajetória tradicional, o acoplamento da variável de estado y_1 medida no sistema real, que passa a ser utilizada como entrada do sistema modelo. O procedimento de estimação dos parâmetros está apresentado no diagrama na Figura 10.

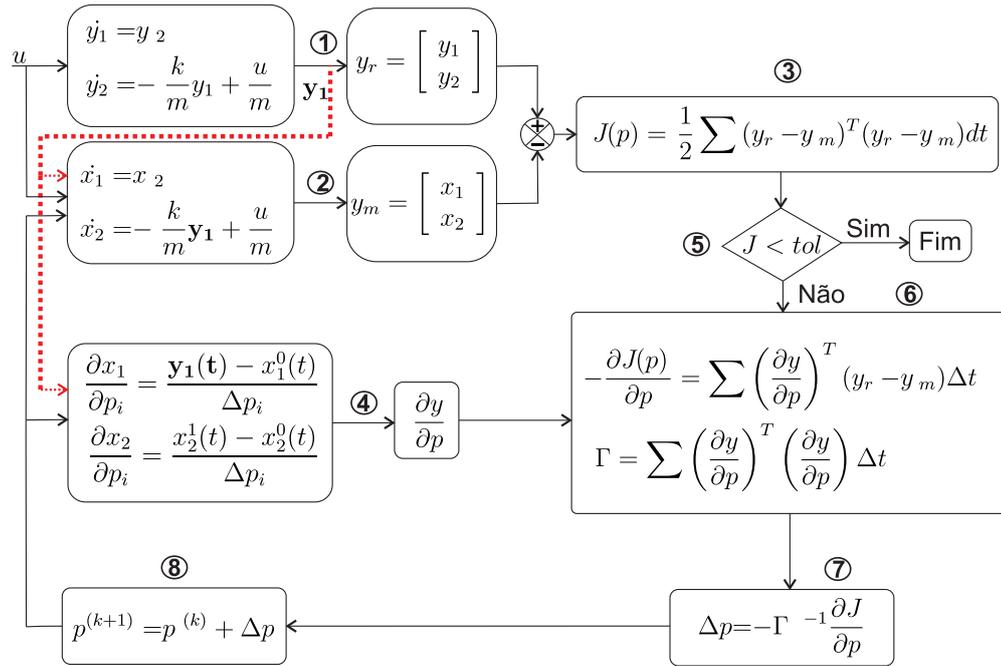


Figura 10 – Diagrama de blocos do procedimento de estimação de parâmetros baseado na técnica de sensibilidade de trajetória tradicional com sincronização mestre-escravo.

A estimação de parâmetros com o método de sensibilidade tradicional e a sincronização mestre-escravo revelou um melhor desempenho de convergência, isto é, de minimização do erro quadrático médio em relação aos métodos apresentados nas duas subseções anteriores, como mostra a Tabela 3 e a Figura 11.

Tabela 3 – Resultados com o método de sensibilidade de trajetória tradicional e acoplamento mestre-escravo.

Iteração	k	m	J_p (%)
0 (inicial)	9,0000	2,5000	167,2617
1	6,4896	2,9116	3,3408
2	6,0084	2,9904	0,0024
3	5,9950	2,9925	0,0001
4 (final)	5,9950	2,9926	0,0000
real	6	3	—

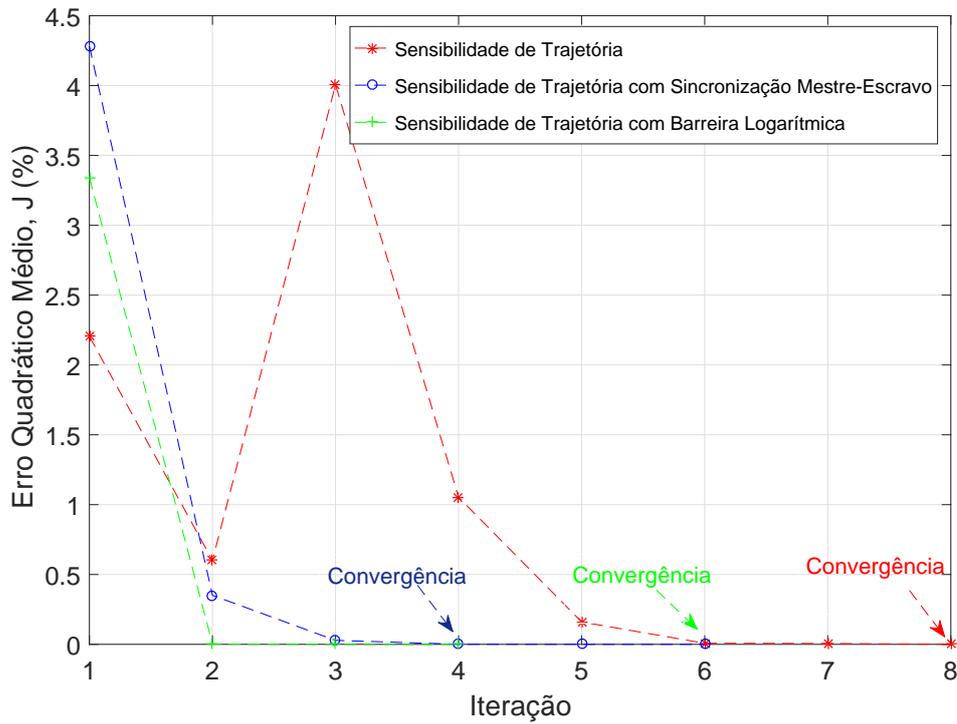


Figura 11 – Comparação entre os erros de convergência para os métodos propostos.

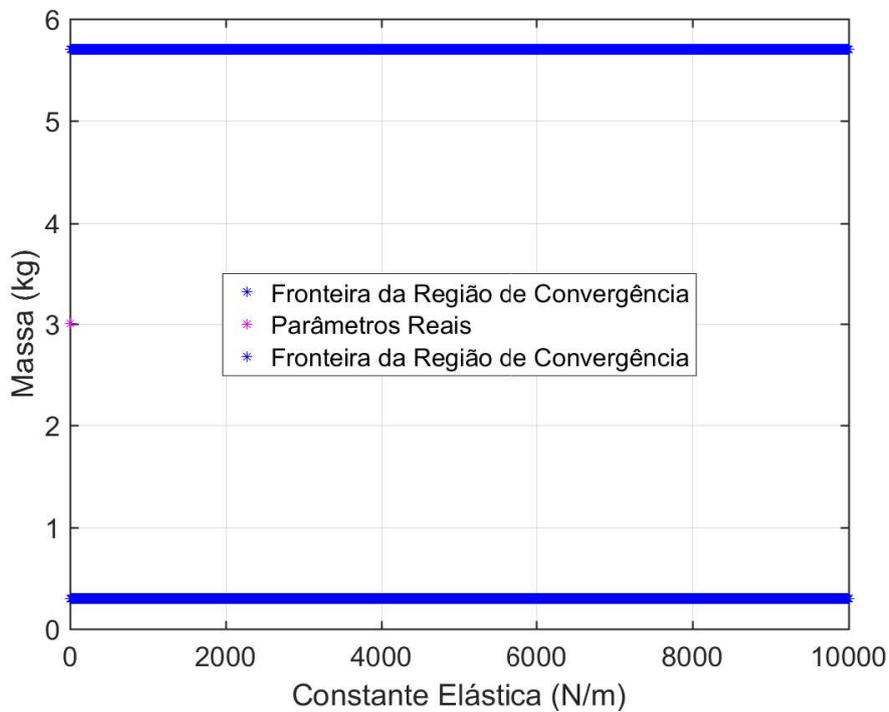


Figura 12 – Região de convergência dos parâmetros do método de sensibilidade de trajetória tradicional com sincronização mestre-escravo.

Por fim, avaliou-se ainda o efeito do acoplamento mestre-escravo na metodologia de sensibilidade de trajetória tradicional no que se refere à máxima incerteza em relação às condições iniciais. Para a região de convergência obtida, ilustrada na Figura 12, observou-se um limitante de convergência apenas em relação aos valores máximos e mínimos do parâmetro m com incertezas de $+90\%$ e -90% , respectivamente. Em relação ao parâmetro k , a convergência para o valor verdadeiro ocorre independentemente do seu valor inicial. Desta forma, o acoplamento mestre-escravo contribuiu para uma diminuição da sensibilidade em relação às condições iniciais dos parâmetros.

A grande desvantagem da técnica de sincronização é que sua utilização está condicionada a disponibilidade da variável de sincronização nas medidas reais, o que nem sempre é possível.

3 Modelagem do SEP

3.1 Gerador de Indução

3.1.1 Considerações acerca do modelo do gerador de indução

O gerador de indução possui várias formas de modelagem, dependendo do nível de detalhamento do modelo considerado. O nível de detalhamento de um modelo é caracterizado principalmente pelo número de fenômenos representados. Entre os principais fenômenos presentes no gerador de indução, destacam-se: a dinâmica dos fluxos magnéticos no estator e no rotor, a saturação magnética, o efeito pelicular (também conhecido como efeito *skin*) e as perdas nos enrolamentos de cobre.

Embora existam modelos que incluam todos os fenômenos citados anteriormente, o nível de complexidade associado é elevado e requer alto esforço computacional para simulação. Em (THIRINGER, 2002) realizou-se uma análise comparativa entre diferentes modelos do gerador de indução e constatou-se que as dinâmicas do fluxo no estator e no rotor são os efeitos majoritários a serem considerados no modelo do gerador. Assim, os efeitos de saturação, as perdas no cobre e o efeito *skin* serão desprezados, sendo considerados neste trabalho apenas os modelos que incluem tanto a dinâmica de fluxo no estator quanto no rotor.

A modelagem do gerador de indução realizada a seguir segue algumas convenções, dentro delas:

- As equações de tensão do modelo são escritas baseado na transformação *Park* em que as variáveis na direção *abc* do sistema de referência trifásico são convertidas para um sistema (ortogonal) de referência rotacional síncrona $dq0$, formado pelo eixos direto (eixo *d*) e em quadratura (eixo *q*), sendo o segundo adiantado em 90° em relação ao primeiro, e pelo eixo zero. Uma descrição mais detalhada sobre esta transformação pode ser encontrada em (KRAUSE et al., 2002);
- É assumido uma condição trifásica equilibrada de operação do gerador, de forma que todas as variáveis da sequência “zero” são consideradas nulas;
- Os enrolamentos do rotor estão curto-circuitados;
- A corrente no estator é considerada positiva quando flui saindo do gerador, convenção contrária aquela adotada para a máquina de indução operando como motor. O torque mecânico aplicado no eixo do gerador é considerado positivo;
- As variáveis e os parâmetros do gerador em cada fase são assumidos como iguais. Além disso, são expressos de acordo com a notação do sistema por unidade (p.u.),

sendo os valores de tensão de base (V_{base}) e de potência de base (S_{base}) e impedância de base (Z_{base}) considerados a partir dos dados nominais de fase da máquina. A velocidade síncrona é a velocidade de base;

- Os modelos são desenvolvidos para o gerador de indução do tipo gaiola de esquilo simples.

3.1.2 Modelo de quinta ordem

Este modelo engloba a dinâmica de transitórios elétricos do estator e do rotor e é conhecido como modelo de quinta ordem pois consiste de cinco equações diferenciais: quatro equações diferenciais elétricas e uma equação diferencial mecânica.

Com base na segunda Lei de Newton para condições rotacionais, a equação que rege o movimento do rotor é expressa por:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (3.1)$$

onde:

J : Momento de inércia combinado do gerador e do seu acionador [$kg.m^2$]

ω : Velocidade angular do rotor [rad/s]

T_m : Torque mecânico [$N.m$]

T_e : Torque eletromagnético [$N.m$]

A constante H é definida como a relação entre a energia cinética (em Joules) na velocidade síncrona (ω_s) e o valor da potência de base (S_{base}) da máquina (em VA):

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\omega_s^2}{S_{base}} \quad (3.2)$$

Reescrevendo (3.2) para J e substituindo a expressão obtida em (3.1), obtém-se a seguinte equação que descreve o movimento da máquina:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (3.3)$$

expressa em p.u., sendo o torque eletromagnético dado por:

$$T_e = \psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds} = \psi_{qr}i_{dr} - \psi_{dr}i_{qr} \quad (3.4)$$

O circuito equivalente da dinâmica elétrica deste modelo é representado na Figura 13. Considerando que os fluxos concatenados nos eixos direto e em quadratura devem ser representados em relação ao referencial síncrono no sistema por unidade, as equações das tensões no estator e no rotor do gerador são dadas por:

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \psi_{qs} \quad (3.5)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \psi_{ds} \quad (3.6)$$

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \psi_{qr} \quad (3.7)$$

$$v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \psi_{dr} \quad (3.8)$$

onde v , i e ψ representam as variáveis de tensão, corrente e fluxo, respectivamente. As velocidades síncrona e do rotor são indicadas por ω_s e ω , respectivamente. R_s e R_r são as resistências dos enrolamentos do estator e do rotor, nesta ordem.

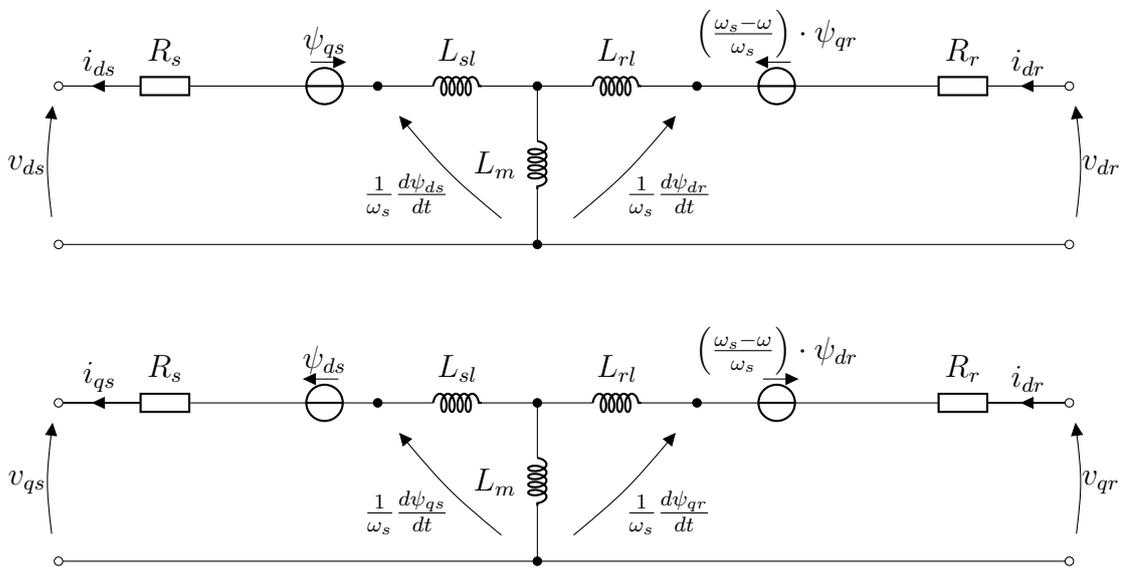


Figura 13 – Circuito equivalente do modelo transitório eletromagnético de quinta ordem do gerador de indução.

Considerando ainda o sistema p.u., torna-se necessário expressar as equações das tensões e dos fluxos concatenados em termos de reatâncias ao invés de indutâncias. As reatâncias são obtidas multiplicando-se as indutâncias pela velocidade elétrica angular de base (ω_s). Assim, as relações entre fluxos e correntes são dadas por:

$$\psi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (3.9)$$

$$\psi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (3.10)$$

$$\psi_{dr} = X_{lr} i_{dr} + X_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (3.11)$$

$$\psi_{qr} = X_{lr} i_{qr} + X_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (3.12)$$

onde X_m é a reatância de magnetização, X_{ls} e X_{lr} são as reatâncias de dispersão no estator e no rotor, respectivamente.

Para a máquina com entreferro uniforme, as reatâncias dos eixos direto e em quadratura são iguais, resultando nas seguintes relações:

$$X \doteq X_d = X_q = X_{ss} = X_{ls} + X_m \quad (3.13)$$

$$X_{rr} = X_{lr} + X_m \quad (3.14)$$

Considerando os fluxos como variáveis independentes, as Equações (3.9)-(3.12) podem ser resolvidas para as correntes, conforme expresso na forma matricial a seguir:

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} X_{rr} & 0 & -X_m & 0 \\ 0 & X_{rr} & 0 & -X_m \\ -X_m & 0 & X_{ss} & 0 \\ 0 & -X_m & 0 & X_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

onde

$$A = \frac{1}{X_{ss}X_{rr} - X_m^2}$$

Substituindo (3.15) em (3.5)-(3.8) para as correntes, obtém-se as equações das tensões em termos dos fluxos:

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} \frac{R_s X_{rr}}{A} + \frac{1}{\omega_s} D_t & -1 & \frac{-R_s X_m}{A} & 0 \\ 1 & \frac{R_s X_{rr}}{A} + \frac{1}{\omega_s} D_t & 0 & \frac{-R_s X_m}{A} \\ \frac{-R_r X_m}{A} & 0 & \frac{R_r X_{ss}}{D} + \frac{1}{\omega_s} D_t & \frac{-\omega_s - \omega}{\omega_s} \\ 0 & \frac{-R_r X_m}{A} & \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} & \frac{R_r X_{ss}}{A} + \frac{1}{\omega_s} D_t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

onde D_t é o operador diferencial $\frac{d}{dt}$.

A reatância transitória é definida pela seguinte equação:

$$X' \doteq X'_d = X'_q = \frac{X_{rr}}{A} = X_{ss} - \frac{X_m^2}{X_{rr}} \quad (3.17)$$

$$= X_{ls} + \frac{X_m X_{lr}}{X_m + X_{lr}} \quad (3.18)$$

Definindo-se ainda a constante de tempo de circuito transitório em aberto por meio da relação:

$$T'_o \doteq T'_{do} = T'_{qo} = \frac{X_{rr}}{\omega_s R_r} \quad (3.19)$$

e as tensões dos eixos direto e em quadratura do rotor, respectivamente, por:

$$E'_d \doteq -\frac{X_m}{X_{rr}} \psi_{qr} \quad (3.20)$$

$$E'_q \doteq \frac{X_m}{X_{rr}} \psi_{dr} \quad (3.21)$$

as Equações (3.16) e (3.3) da dinâmica do modelo do gerador podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{ds}}{dt} = \frac{R_s}{X'} \psi_{ds} + \psi_{qs} - \frac{R_s}{X'} E'_q + v_{ds} \quad (3.22)$$

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{qs}}{dt} = -\psi_{ds} + \frac{R_s}{X'} \psi_{qs} + \frac{R_s}{X'} E'_d + v_{qs} \quad (3.23)$$

$$T'_o \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{X}{X'} E'_q + \frac{X - X'}{X'} \psi_{ds} - (\omega_s - \omega) T'_o E'_d \quad (3.24)$$

$$T'_o \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{X}{X'} E'_d - \frac{X - X'}{X'} \psi_{qs} + (\omega_s - \omega) T'_o E'_q \quad (3.25)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = T_m - \frac{1}{X'} (\psi_{qs} E'_q + \psi_{ds} E'_d) \quad (3.26)$$

3.1.3 Modelo de terceira ordem

O modelo de terceira ordem do gerador de indução é obtido a partir da redução de ordem do modelo de quinta ordem desprezando os efeitos transitórios no estator, isto é, as derivadas temporais dos fluxos ψ_{ds} e ψ_{qs} são consideradas como nulas (AHMED-ZAID; TALEB, 1991). Outra condição simplificadora consiste em desprezar a resistência do estator (R_s). Admitindo ainda a máquina conectada a rede elétrica de tensão monofásica V , os fluxos no estator ficam definidos por:

$$\psi_{ds}(t) = \psi_{ds} = V \quad (3.27)$$

$$\psi_{qs}(t) = \psi_{qs} = 0 \quad (3.28)$$

Assim, se as condições dos fluxos no estator satisfazem as equações $\psi_{ds}(0) = V$ e $\psi_{qs}(0) = 0$, as Equações (3.27) e (3.28) são soluções para $\psi_{ds}(t) = V$ e $\psi_{qs}(t) = 0$. De fato, estas soluções podem ser verificadas por substituição direta nas Equações (3.22) e (3.23).

Realizada estas considerações, obtém-se o modelo de terceira ordem do gerador de indução conectado a rede elétrica:

$$T'_o \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{X}{X'} E'_q + \frac{X - X'}{X'} V + T'_o (\omega - \omega_s) E'_d \quad (3.29)$$

$$T'_o \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{X}{X'} E'_d - T'_o (\omega - \omega_s) E'_q \quad (3.30)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = T_m - \frac{V E'_d}{X'} \quad (3.31)$$

Com o intuito de facilitar a representação matemática das variáveis, o modelo representado na forma retangular pelas variáveis E'_d e E'_q é convertido para sua forma polar de variáveis E' e δ por meio da seguinte transformação (Figura 14):

$$E' = \sqrt{E'^2_d + E'^2_q} \quad (3.32)$$

$$\delta = \arctan \left(\frac{E'_d}{E'_q} \right) \quad (3.33)$$

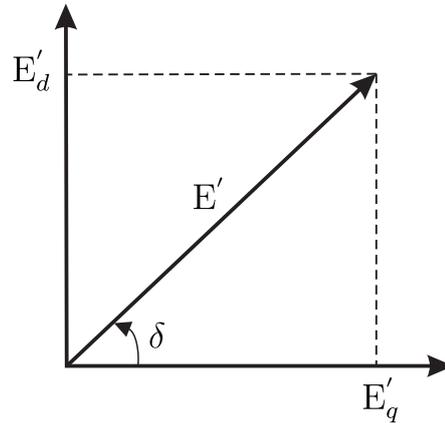


Figura 14 – Transformação das variáveis retangulares E'_d e E'_q para as variáveis polares E' e δ .

Portanto, o modelo de terceira ordem do gerador na sua forma polar é representado por:

$$T'_o \frac{dE'}{dt} = -\frac{X}{X'} E' + \frac{X - X'}{X'} V \cos \delta \quad (3.34)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s - \frac{X - X'}{X'} \frac{V \sin \delta}{T'_o E'} \quad (3.35)$$

$$M \frac{d\omega}{dt} = T_m - \frac{V E' \sin \delta}{X'} \quad (3.36)$$

sendo a constante de inércia da máquina (em segundos) dada por:

$$M = \frac{2H}{\omega_s} \quad (3.37)$$

Acerca deste modelo, vale ressaltar algumas considerações:

- A tensão E' é a tensão transitória em série com a reatância transitória X' , conforme mostrado no circuito da Figura 15;
- A variável δ representa o ângulo de rotação do fluxo do rotor em relação a um eixo de referência girante à velocidade síncrona;
- Apesar de considerar simplificações, resultados apontam que o modelo de terceira ordem representa com uma precisão satisfatória a dinâmica do gerador quando comparado com o modelo de quinta ordem, conforme é discutido em (AHMED-ZAID; TALEB, 1991).

3.1.4 Modelo do Gerador de Indução adotado neste Trabalho para fins de Estimacão de Parâmetros

Neste trabalho, a modelagem do gerador de indução é realizada com base no modelo de terceira ordem (Equações (3.34)-(3.36) conectado em paralelo com uma carga estática

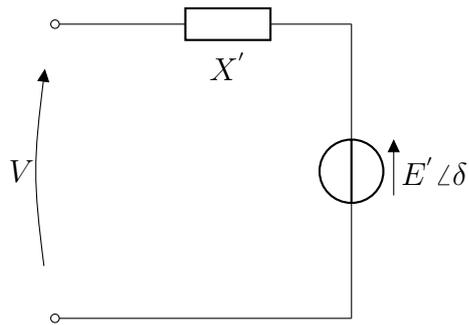


Figura 15 – Circuito transitório do gerador de indução.

Z_L e com a rede elétrica. Nesta seção serão obtidas as equações de saída do modelo. A saída do SEP é definida pela potência complexa na saída do circuito representado pela Figura 16.

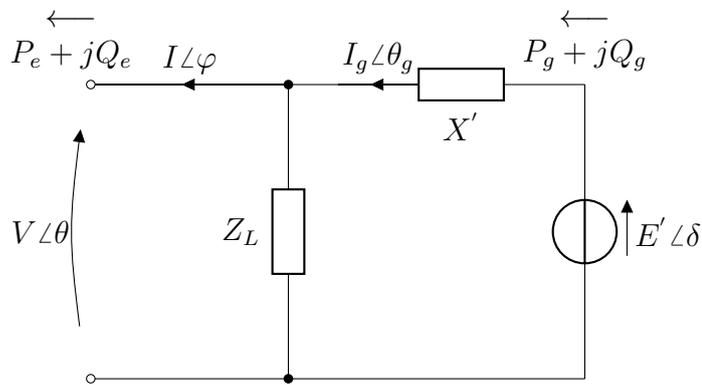


Figura 16 – Circuito do gerador de indução conectado a uma carga estática Z_L

A potência consumida pela impedância Z_L é calculada como:

$$S_{Z_L} = (V \angle \theta) \cdot \left(\frac{V \angle \theta}{Z_L \phi} \right) \quad (3.38)$$

onde ϕ é o ângulo da impedância Z_L .

Sendo a impedância de carga dada por $Z_L = R_L + jX_L$, obtém-se a admitância Y associada:

$$Y = G_s + jB_s \quad (3.39)$$

sendo a condutância dada por:

$$G_s = \frac{R}{R_L^2 + X_L^2} \quad (3.40)$$

e a susceptância por:

$$B_s = \frac{X}{R_L^2 + X_L^2} \quad (3.41)$$

A Equação (3.38) pode ser reescrita em função dos termos desta admitância, resultando na seguinte expressão:

$$S_{Z_L} = G_s V^2 - jB_s V^2 \quad (3.42)$$

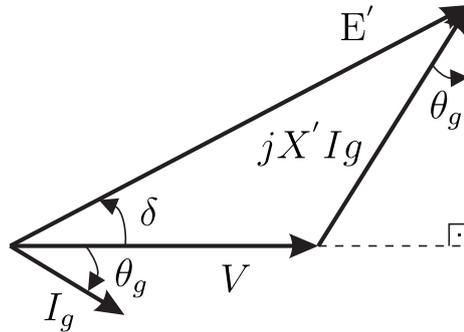


Figura 17 – Diagrama fasorial do gerador de indução.

A partir do emprego das relações trigonométricas no diagrama fasorial do gerador, apresentado na Figura 17, obtêm-se as seguintes igualdades:

$$|E' \sin \delta| = |jX' I_g \cos \theta_g| \quad (3.43)$$

$$V + |jX' I_g \sin \theta| = |E' \cos \theta_g| \quad (3.44)$$

Dispondo das Equações (3.43) e (3.44), as potências ativa e reativa no gerador ficam determinadas, respectivamente, por:

$$P_g = V I_g \cos(\theta - \theta_g) = \frac{V E' \sin \delta}{X'} \quad (3.45)$$

$$Q_g = V I_g \sin(\theta - \theta_g) = V \left(\frac{V - E' \cos \delta}{X'} \right) \quad (3.46)$$

Portanto, as equações de potência de saída, com a referência adotada no gerador, são expressas como:

$$P_e = -G_s V^2 + \frac{V E' \sin \delta}{X'} \quad (3.47)$$

$$Q_e = B_s V^2 + V \left(\frac{V - E' \cos \delta}{X'} \right) \quad (3.48)$$

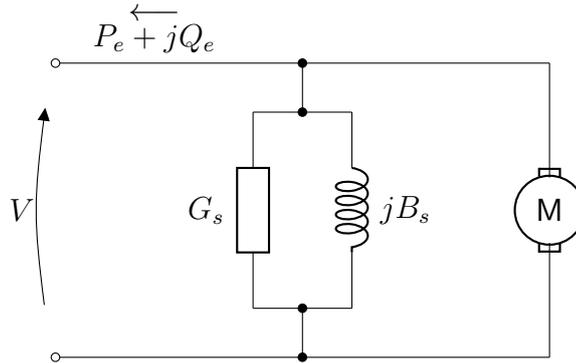


Figura 18 – Modelo do Gerador de Indução conectado ao SEP.

Portanto, as equações de estados e saídas do modelo do gerador de indução adotado neste trabalho (Figura 18) são dadas, respectivamente, por:

$$T_o' \frac{dE'}{dt} = -\frac{X}{X'} E' + \frac{X - X'}{X'} V \cos \delta \quad (3.49)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s - \frac{X - X'}{X'} \frac{V \sin \delta}{T_o' E'} \quad (3.50)$$

$$M \frac{d\omega}{dt} = T_m - \frac{V E' \sin \delta}{X'} \quad (3.51)$$

$$P_e = -G_s V^2 + \frac{V E \sin \delta}{X'} \quad (3.52)$$

$$Q_e = B_s V^2 + V \left(\frac{V - E' \cos \delta}{X'} \right) \quad (3.53)$$

onde:

V : Tensão de fase da rede elétrica

E' : Tensão transitória

δ : Ângulo de fase da tensão transitória

ω_s, ω : Velocidade angular síncrona e do rotor, respectivamente

$X' = X_{ls} + X_m X_{lr} / (X_m + X_{lr})$: Reatância transitória

$X = X_{ls} + X_m$: Reatância de circuito transitório em aberto

$T'_0 = (X_{lr} + X_m) / (\omega_s \cdot R_r)$: Constante de tempo de circuito transitório em aberto

T_m : Torque mecânico

G_s : Condutância da admitância Y_L

B_s : Susceptância da admitância Y_L .

4 Método de Sensibilidade de Trajetória Aplicado à Estimação dos Parâmetros do Gerador de Indução

4.1 Introdução

Neste capítulo, será realizada a identificação do modelo do gerador de indução conectado a um SEP, tendo como base a modelagem desenvolvida no Capítulo 3. As medidas serão obtidas a partir de um sistema real ensaiado em laboratório e utilizadas para a estimação *on-line* e simultânea de parâmetros elétricos e mecânicos do gerador, fazendo uso do método de sensibilidade de trajetória. Ademais, as principais dificuldades enfrentadas no processo de estimação destes parâmetros serão discutidas e analisadas, com o intuito de propor alternativas para contorná-las.

4.2 Dificuldades na identificação do gerador de indução

As principais dificuldades enfrentadas na identificação dos parâmetros do gerador de indução são listadas a seguir com a finalidade de propor um método que consiga contorná-las.

1. Obtenção das medidas com o gerador de indução conectado ao SEP

As medidas do sistema deve ser obtidas para uma estimação dos parâmetros *on-line*, isto é, sem a desconexão do gerador restante do SEP. Tradicionalmente, as empresas de geração utilizam testes *off-line* para obtenção das medidas, seguindo em geral a norma (IEEE, 2004). Na prática, além de ser muitas vezes um procedimento impraticável e que resulta em prejuízos econômicos, os parâmetros obtidos podem conter incertezas pois estão sujeitos a efeitos de saturação da máquina.

Para contornar este obstáculo, são propostas as seguintes alternativas:

- a) As medidas serão obtidas mediante a aplicação de uma perturbação no sistema, representada por uma carga dinâmica (motor de indução).
- b) Será necessário ainda, a utilização de um modelo não-linear do gerador capaz de representar os comportamentos transitórios. Conforme discutido no Capítulo 3, será adotado o modelo do gerador de terceira ordem.

2. Região de convergência limitada para método de estimação de parâmetros

O sucesso de convergência dos parâmetros aos seus valores verdadeiros está condicionado a proximidade dos valores iniciais em relação aos valores reais, o que assegura uma maior probabilidade do processo de estimação ser completado com êxito. Os valores iniciais podem ser obtidos a partir dos dados do fabricante da

própria máquina ou de versões similares. Mesmo dispondo destes valores iniciais, por meio da experiência adquirida neste trabalho, a região de convergência para a estimação simultânea de todos os parâmetros do gerador é tão pequena que seria impraticável em aplicações práticas.

A fim de contornar estas dificuldades, foram propostas as soluções a seguir:

- a) Uma vez que o gerador sob estudo é uma máquina bastante antiga sendo que o fabricante não atua mais no mercado desde a década de 1980, não é possível a obtenção direta dos parâmetros da máquina a partir dos dados do fabricante. Para tanto, as estimativas iniciais dos parâmetros serão determinados por meio de testes *off-line*, tomando como referência os dados de placa do gerador.
- b) Utilização de um algoritmo híbrido de estimação que permita estimar os parâmetros mesmo quando estiverem distantes dos valores verdadeiros. Assim, o processo de estimação será dividido em duas etapas: na primeira, a técnica de ajuste de parâmetros é realizada com base no método heurístico MVM0 e na segunda, com base no método de sensibilidade de trajetória. Além disso, nesta segunda fase é realizada ainda uma análise de sensibilidade com o propósito de determinar a influência dos parâmetros da saída e resolver possíveis problemas de mal condicionamento. Uma vez realizada esta análise, esta segunda etapa será subdividida em duas novas fases.

4.3 Esquema para a Estimação dos Parâmetros com o Gerador em Operação no SEP

O esquema proposto para estimar os parâmetros do gerador de indução a partir de medidas de perturbações obtidas em um sistema de potência é ilustrado na Figura 19. O SEP para estudo é formado pelo gerador de indução, acionado por um motor de corrente contínua (MCC), conectado a uma carga estática e a rede elétrica. Inicialmente, na ocorrência de uma perturbação, são registradas as medidas disponíveis do sistema por meio de medidores instalados no SEP. No caso sob estudo, estas medidas são as tensões de fase (V), as correntes de linha (I) e a velocidade no eixo do gerador (ω).

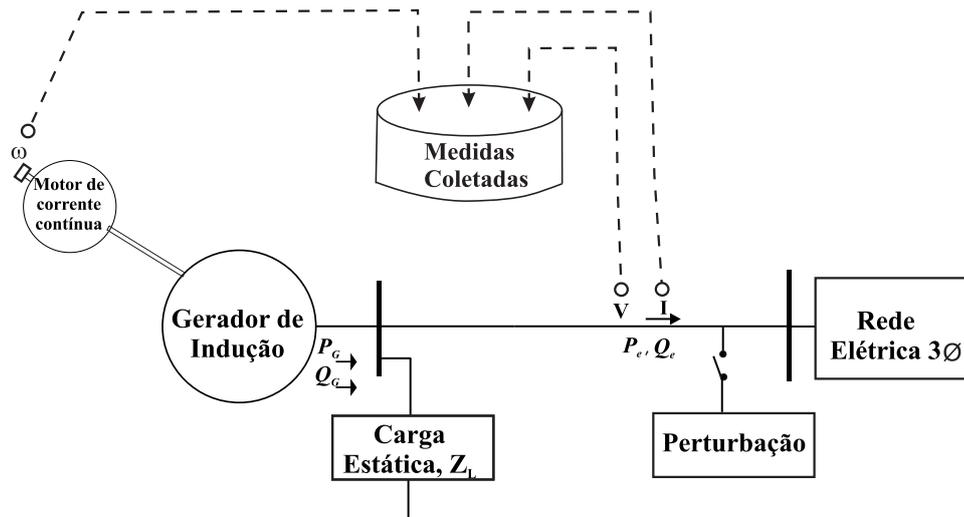


Figura 19 – SEP ensaiado em laboratório para identificação do modelo do gerador de indução.

4.3.1 Considerações práticas acerca do SEP de pequeno porte montado no Laboratório de Máquinas do SEL/EESC/USP

O SEP para estudo montado em laboratório é apresentado na Figura 20. O sistema é constituído por um gerador de indução com dados nominais de placa 220 V, 2683 VA, 2200 W, 1800 rpm e 60 Hz que fornece potência a rede elétrica e a uma carga estática (Z_L) conhecida, sendo do tipo RL .

O evento no SEP para obtenção das medidas a partir de sua resposta dinâmica na presença de uma perturbação, consiste na comutação de uma carga dinâmica representada por um motor de indução trifásico de pequeno porte (220 V, 1471 W, 60 Hz). Na ocorrência da perturbação, os dados medidos das tensões e correntes trifásicas no barramento central de conexão com gerador assim como sua velocidade são amostrados e filtrados em uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*, monitorada e controlada pelo *software* de processamento LABVIEW, instalado em um computador local.

Para coletar as medidas reais do sistema, foram construídos “kit’s” condicionadores de sinais composto por transformadores de corrente e de tensão, conforme apresentado na Figura 21. Ademais, foi realizada a instalação de um encoder para leitura de velocidade no gerador.

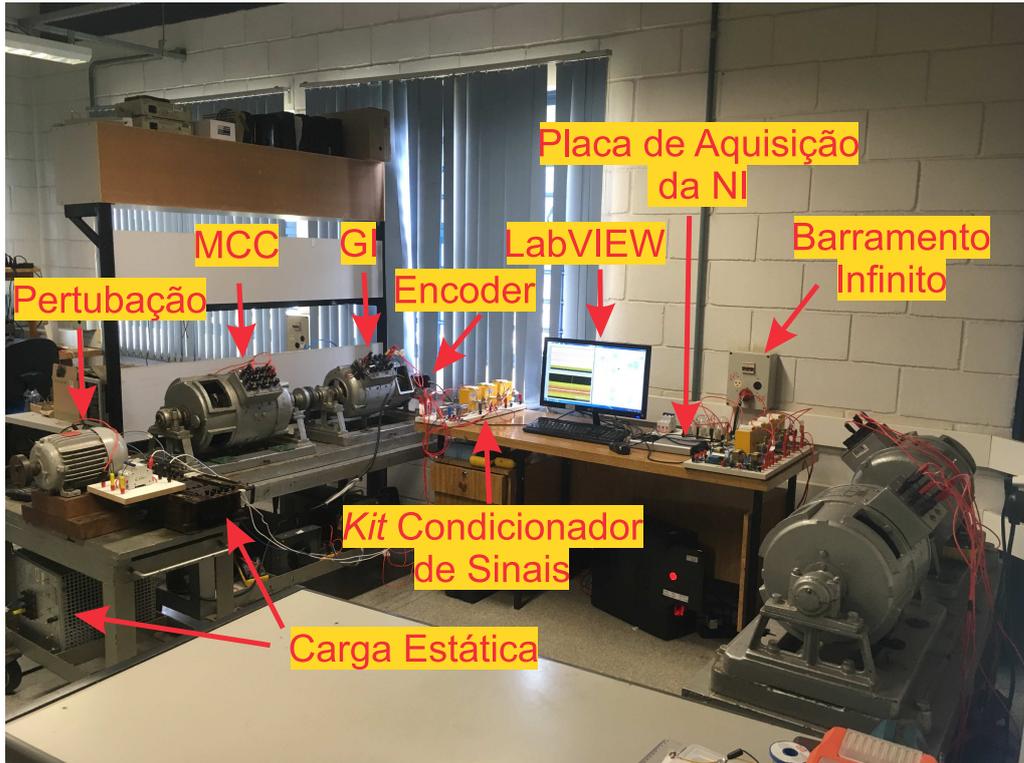


Figura 20 – Visão global do SEP montado em laboratório com os equipamentos instalados.

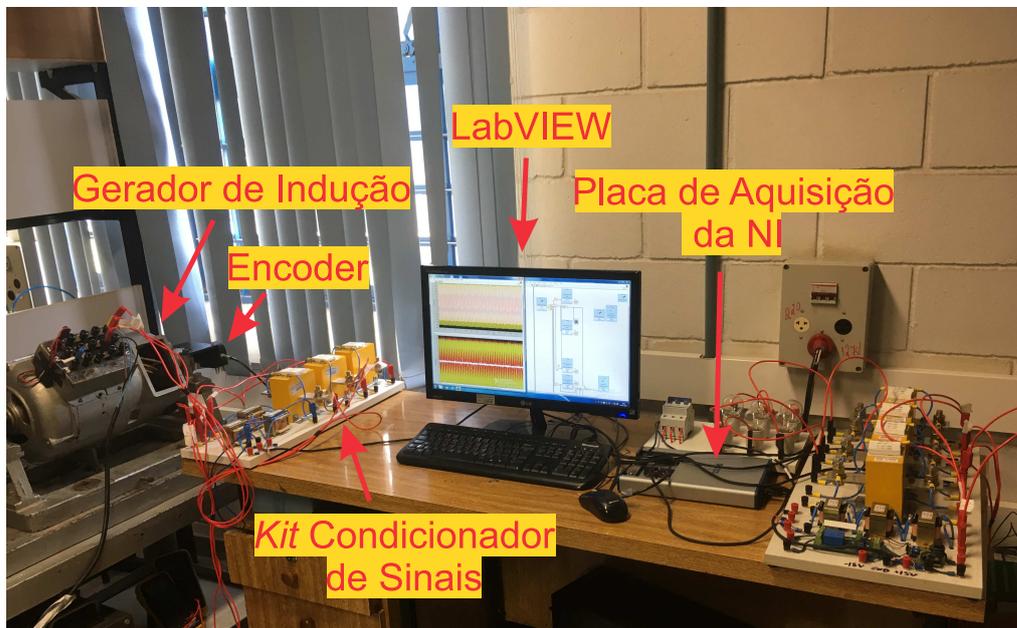


Figura 21 – Instrumentação para aquisição de dados do SEP.

4.4 Estimação *On-line* dos Parâmetros do Gerador de Indução

As equações de estados e saídas do modelo adotado para o gerador de indução descritas no Capítulo 3 são reescritas para facilitar a compreensão:

$$T_o' \frac{dE'}{dt} = -\frac{X}{X'} E' + \frac{X - X'}{X'} V \cos \delta \quad (4.1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s - \frac{X - X'}{X'} \frac{V \sin \delta}{T_o' E'} \quad (4.2)$$

$$M \frac{d\omega}{dt} = T_m - \frac{V E' \sin \delta}{X'} \quad (4.3)$$

$$P_e = -G_s V^2 + \frac{V E' \sin \delta}{X'} \quad (4.4)$$

$$Q_e = B_s V^2 + V \left(\frac{V - E' \cos \delta}{X'} \right) \quad (4.5)$$

O vetor de estados é dado por $x = [E', \delta, \omega]^T$, a entrada por $u = [V]$ e a saída por $y = [P_e, Q_e]^T$. O vetor de parâmetros a ser estimado é definido por:

$$p = [M, T_o', X, X', T_m, G_s, B_s]^T \quad (4.6)$$

Na Figura 22 está apresentado o esquema global para o processo de estimação *on-line* de parâmetros do sistema em estudo.

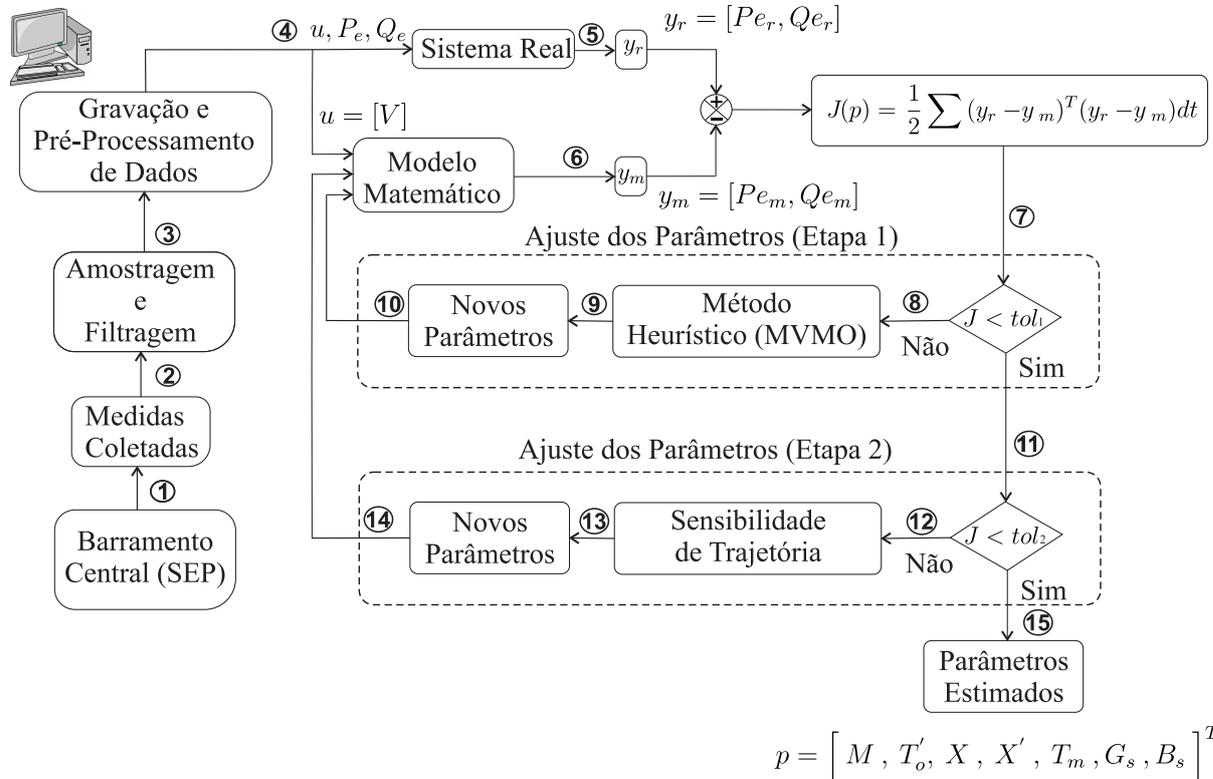


Figura 22 – Esquema global para identificação dos parâmetros do modelo do gerador de indução.

Neste trabalho todas as rotinas para o processamento de dados e a estimação dos parâmetros do modelo foram implementadas no MATLAB, pois é um *software* de computação científica e numérica poderoso para a resolução do problema. As rotinas foram desenvolvidas a partir de outras elaboradas pelo Prof. Dr. Elmer Pablo Tito Cari para modelo de cargas. O processo de estimação segue uma sequência de passos discutidos nas subseções seguintes.

4.4.1 Obtenção das medidas reais do sistema

Considerando a ocorrência da perturbação no sistema, as medidas das tensões e das correntes trifásicas no barramento central de conexão com gerador assim como sua velocidade são amostrados e filtrados em uma placa de aquisição de dados. A taxa de amostragem das medidas foi fixada em $f_0 = 10kHz$ por canal para os 7 canais em uso. Em seguida, os dados das tensões e das correntes gravados em um computador local são convertidos para a forma fasorial por meio da técnica Transformada Janelada de Fourier. A descrição matemática e o algoritmo desta transformada pode ser encontrada em (JOHNS; SALMAN, 1995).

Uma vez que o sistema original trifásico se mostrou ligeiramente desbalanceado, foi feita a análise por componentes simétricos das tensões e correntes de sequência positiva, utilizando para tal o Teorema de Fostescue detalhado em (STEVENSON, 1962). Realizada esta análise, as medidas das potências ativa e reativa no barramento central podem ser obtidas diretamente.

As medidas coletadas são armazenadas no bloco denominado “*Sistema Real*”, sendo a magnitude da tensão de fase (V) selecionada como variável de entrada do bloco “*Modelo Matemático*”, constituído pelas equações de estados (Equações (4.1)-(4.3)), e as potências ativa e reativa (Equações (4.4)-(4.5)) selecionadas como saídas deste sistema.

4.4.2 Obtenção das estimativas iniciais dos parâmetros

Conforme mencionado anteriormente, as estimativas iniciais dos parâmetros foram determinados por meio de testes *off-line*, seguindo o procedimento de teste padrão recomendado por (IEEE, 2004), para os testes em aberto, com rotor bloqueado e em corrente contínua. A estimação *off-line* dos parâmetros elétricos e mecânicos da máquina de indução é tratada separadamente no Apêndice A.

4.4.3 Determinação das estimativas iniciais das variáveis de estado

Obtidos os valores iniciais dos parâmetros, torna-se necessário em seguida determinar as estimativas iniciais das variáveis de estado E' , δ e ω das Equações (4.1)-(4.3). A estimativa inicial da variável ω é facilmente obtido, pois a velocidade é uma medida real do sistema. Por outro lado, as outras duas variáveis são de difícil obtenção em sistemas

reais. Assim, os valores iniciais para E' e δ serão obtidos a partir das Equações (4.2) e (4.3), respectivamente, quando igualadas a zero, isto é, supondo a operação em regime estacionário. Este procedimento é possível uma vez que todas as outras grandezas destas equações já se encontram definidas. Assim, E'_o e δ_o ficam determinados pelo sistema de equações:

$$\delta_o = \cos^{-1} \left(\frac{X}{X - X'} \frac{E'_o}{V} \right) \quad (4.7)$$

$$E'_o = X' \frac{T_m}{V \sin \delta_o} \quad (4.8)$$

4.4.4 Algoritmo de ajuste dos parâmetros

O próximo passo consiste na aplicação do algoritmo de estimação de parâmetros de forma a aproximar o comportamento do modelo em relação ao sistema real. Para tanto, as saídas do modelo matemático são comparadas com as saídas do sistema real e a função de erro é dada pela expressão do funcional $J(p)$:

$$J(p) = \frac{1}{2} \int_0^{T_0} (y_r(t) - y_m(t))^T (y_r(t) - y_m(t)) dt \quad (4.9)$$

sendo $y_r(t) = [P_{e_r}, Q_{e_r}]$ o vetor de saída do sistema real (valores de potências medidos), e $y_m(t) = [P_{e_m}, Q_{e_m}]$ o vetor de saída do modelo matemático (valores de potência obtidos pelo modelo) e T_0 o período de amostragem ($100 \mu s$).

Conforme já mencionado anteriormente, neste projeto é proposto um algoritmo híbrido para o ajuste dos parâmetros baseado no método heurístico *MVMO* e no método de sensibilidade de trajetória. Assim, o processo de estimação de parâmetros é dividido em duas etapas:

1ª Etapa: Aplicação do Método Heurístico MVMO

Nesta etapa, a técnica de ajuste é realizada com base no método *MVMO*. Neste caso, o funcional é intitulado como “*função de aptidão*”. O ajuste é realizado sucessivamente até que $J(p)$ seja menor que uma tolerância especificada $tol_1 = 0,05$. Este valor não pode ser muito pequeno, pois o algoritmo genético torna-se lento quando a função de aptidão atinge valores pequenos. O algoritmo deste método pode ser consultado no Apêndice B.

2ª Etapa: Aplicação do Método Sensibilidade de Trajetória

Na etapa seguinte, a técnica de ajuste dos parâmetros é realizada com base no método de sensibilidade de trajetória abordada no Capítulo 2, tomando como partida os parâmetros já estimados pelo método *MVMO*. As equações de sensibilidade são obtidas derivando-se as Equações (4.1)-(4.5) em relação a cada parâmetro.

As funções de sensibilidade são resolvidas utilizando o método de integração numérica Runge-Kutta de 4ª ordem. A partir da matriz Γ e do vetor $\frac{\partial J(p)}{\partial p}$, determinados pelas Equações (2.9) e (2.11), realiza-se iterativamente o ajuste dos parâmetros até que $J(p)$ seja menor que uma tolerância especificada $tol_1 = 0,001$.

4.4.5 Resultados

As estimativas iniciais dos parâmetros obtidos pelos testes *off-line* estão apresentados no Apêndice A. A exceção é o torque de carga ($T_m = 0,17023 pu$) que foi considerado como igual a potência ativa conhecida na saída do “*Sistema Real*”, já que a potência e o torque são iguais na referência p.u. A carga estática também é previamente conhecida, sendo $G_s = 0,1042 pu$ e $B_s = 0,0031 pu$. Já os valores iniciais calculados para as variáveis de estado são $E'_o = 0,03658 pu$, $\delta_o = 1,526 rad$ e $\omega_o = 380,41 rad/s$, sendo $\omega_s = 377 rad/s$. A variável de entrada é $u = 1 pu$. As bases para os cálculos em p.u. são dadas por $V_{base} = 127 V$, $S_{base} = 1894 VA$ e $Z_{base} = 18 \Omega$.

A perturbação no SEP foi gerada pela entrada permanente da carga dinâmica um certo intervalo de tempo ($\approx 1,8 s$) após o início da amostragem das medidas. Nas Figuras 23 e 24 são mostradas as curvas de tensão de fase e corrente de linha, respectivamente, medidas no barramento central do SEP antes, durante e após a ocorrência da perturbação. É notável que as correntes trifásicas apresentam um pequeno desbalanceamento, o que justifica a utilização da análise por componentes simétricas de sequência positiva, discutido anteriormente.

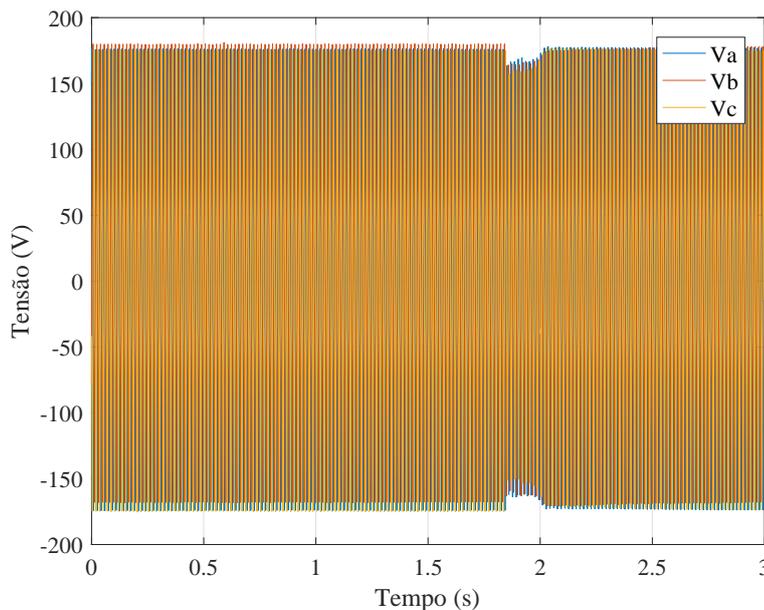


Figura 23 – Tensões de fase aquisitadas no barramento central do SEP na presença da perturbação.

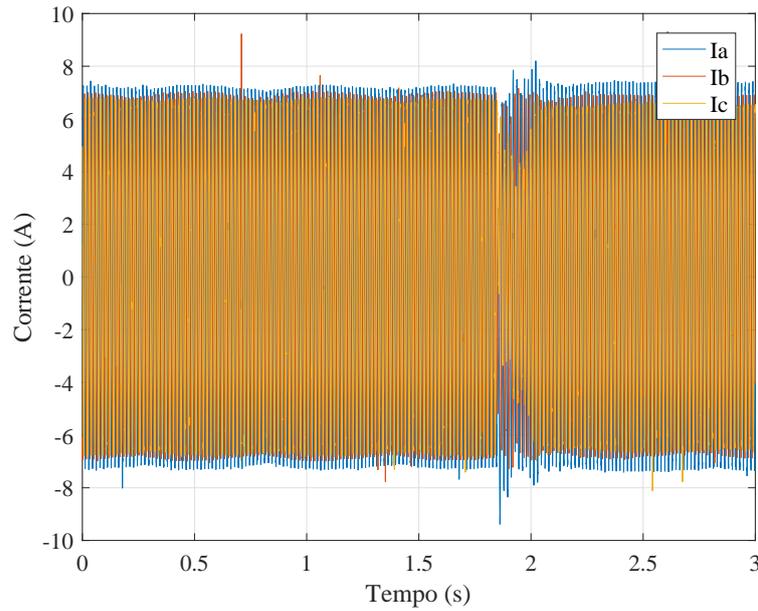


Figura 24 – Correntes de linha aquiritadas no barramento central do SEP na presença da perturbação.

A aplicação do método MVMO requer a definição prévia de uma região de convergência. Para este propósito, a fronteira da região de convergência foi definida com base nas máximas incertezas consideradas para os valores iniciais dos parâmetros. Inicialmente, adotou-se uma incerteza de $\pm 50\%$ para todos os parâmetros e foram testadas a convergência deste método para um espaço amostral de 20 simulações, mantendo a tolerância de erro constante, de forma a avaliar a eficiência de convergência deste método. Em seguida, de forma similar, o método foi aplicado para outras duas faixas de incertezas superiores de $\pm 80\%$ e $\pm 90\%$. A Tabela 4 sintetiza os resultados obtidos com a aplicação deste método.

Tabela 4 – Resultados da estimação com o algoritmo heurístico MVMO considerando uma faixa de incerteza nos parâmetros.

Incerteza (%)	1º Etapa: Método MVMO ($tol_1=0.05$)			
	Geração de População	J_p	η_1 - Eficiência de convergência (%)	t_{pm_1} (s)
± 50	1	0,01	100	7,8
± 80	1	0,0132	100	7,3
± 90	1	0,039	100	13,8

Nota: $t_{pm} \equiv$ tempo de processamento computacional médio do método.

Nota: $\eta \equiv$ Nº de simulações em que ocorreu convergência/nº total de simulações.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4, para a tolerância especificada, o método heurístico conseguiu aproximar as saídas do modelo em relação ao sistema real de forma rápida e com 100% de eficiência de convergência para todas as faixas de incerteza analisadas.

A próxima etapa do processo de estimação consistiu na aplicação do método de sensibilidade de trajetória. No entanto, durante a sua aplicação, em inúmeras tentativas observou-se a divergência das saídas do modelo e, conseqüentemente dos parâmetros estimados. Problemas verossímeis foram relatados em (CARI, 2009) e (CHOI et al., 2006), e um dos principais fatores explicados para suas ocorrências é que quando vários parâmetros são estimados simultaneamente, a influência de alguns destes parâmetros na resposta de saída é muito pequena comparada com a influência de outros, o que torna matriz Γ da Equação (2.11) mal condicionada. Como consequência, o ajuste de parâmetros (Equação 2.10) torna-se crítico para os parâmetros com menor influência (mal condicionados) na saída do modelo, produzindo grandes variações nestes parâmetros e ocasionando a divergência dos parâmetros estimados. Com o intuito de avaliar a influência de cada parâmetro na saída realizou-se a decomposição QR, proposta em (CARI, 2009). Na Tabela 5 são mostrados os valores singulares da matriz de sensibilidade (Γ) e a ordenação dos parâmetros de acordo com sua influência na saída.

Tabela 5 – Valores Singulares da Matriz de Sensibilidade de Trajetória (Γ) e classificação dos parâmetros com base em sua influência na saída.

Parâmetro (p)	M	T'_o	T_m	B_s	X	X'	G_s
Valores Singulares	17753,74	9,72	7,19	2,76	0,18	0,14	0,0012
	bem-condicionados		↔		mal-condicionados		

Tomando como referência os resultados apontados na Tabela 5, a segunda etapa do processo de estimação foi dividida em duas fases: nas duas primeiras iterações é realizado o ajuste apenas dos dois parâmetros com maior influência na saída (M e T'_o), seguindo com o ajuste dos demais parâmetros nas iterações seguintes até atingir a tolerância de erro desejada (tol_2).

Realizada estas considerações, a estimação dos parâmetros foi realizada para as duas etapas, isto é, utilizando o método híbrido (MVMO e sensibilidade de trajetória). Os resultados de desempenho obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados da estimação com o algoritmo híbrido considerando uma faixa de incerteza nos parâmetros.

Incerteza (%)	1º Etapa: Método MVMO ($tol_1=0.05$)				2º Etapa: Método Sens. Traj. ($tol_2=0.001$)		
	Geração de População	J_p	η_1 - Eficiência de convergência (%)	t_{pm1} (s)	Iterações	η_2 - Eficiência de convergência (%)	t_{pm2} (s)
±50	1	0,01	100	7,8	6	75	99,8
±80	1	0,0132	100	7,3	6	100	89,7
±90	1	0,039	100	13,8	5	60	83,2

As Figuras 25 e 26 mostram a comparação entre as saídas do modelo e as medidas reais após a aplicação do algoritmo híbrido para uma faixa de incerteza de $\pm 80\%$ dos parâmetros.

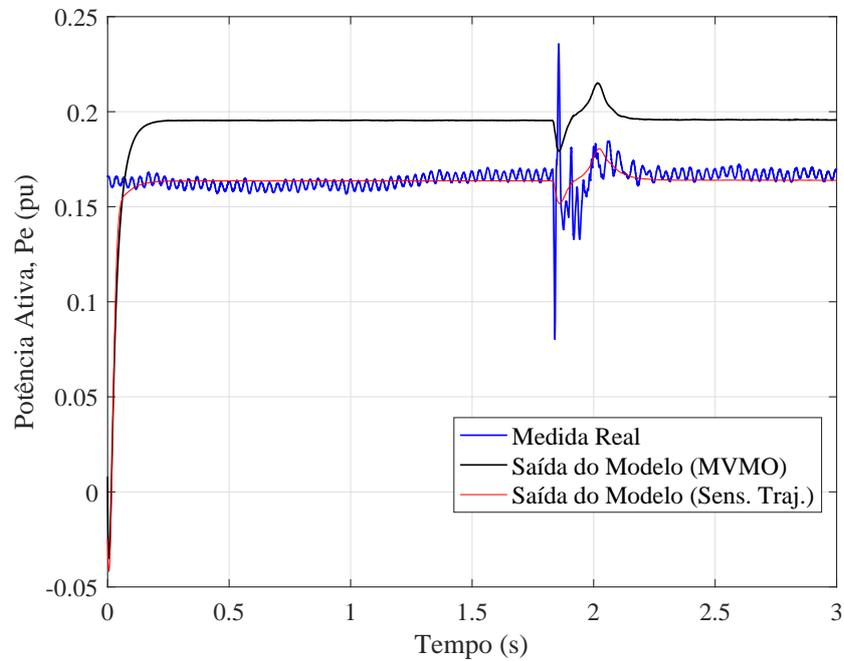


Figura 25 – Comparação entre a potência ativa medida e de saída modelo.

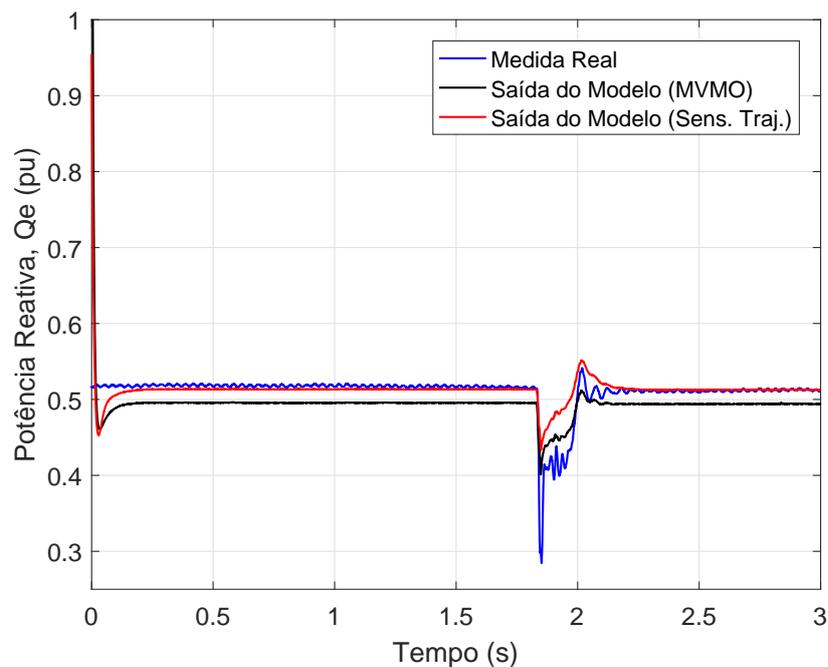


Figura 26 – Comparação entre a potência reativa medida e de saída modelo.

Analisando as saídas obtidas do modelo, é possível constatar que o método heurístico MVMO forneceu sinais de saída suficientemente próximas das saídas reais, de forma que o método de sensibilidade de trajetória conseguiu uma atuação eficiente para garantir uma convergência ainda mais precisa dos parâmetros. Estes resultados mostram ainda que o modelo do gerador implementado se mostrou realístico e preciso na representação do comportamento dinâmico das potências ativa e reativa.

A Tabela 7 compara os parâmetros estimados pelo método híbrido (estimação *on-line*) com os valores dos parâmetros iniciais estimados por meio dos testes *off-line*. Vale destacar que durante a realização deste testes, foram realizadas uma série de aproximações para facilitar a obtenção dos parâmetros, além de desconsiderar vários efeitos, dentre os principais: correções de temperatura, variação do ponto de saturação da máquina e o problema de realização do ensaio de rotor bloqueado em altas frequências (frequência da rede). Estes efeitos atuando de forma simultânea explicam em grande parte os médios/grandes desvios observados para os parâmetros do gerador de indução. Em relação aos parâmetros da carga estática, o principal efeito desconsiderado consiste apenas na correção de temperatura, o que explica o pequeno desvio obtido para os parâmetros G_s e B_s . As Figuras 27 e 28 trazem uma comparação entre a saída do modelo inicial, calculadas utilizando os valores iniciais dos parâmetros e a saída final do modelo, obtidas com base nos valores iniciais dos parâmetros. De fato, os parâmetros imprecisos obtidos via testes *off-line* resultam em saídas distantes das medidas reais, principalmente a saída de potência reativa, não conseguindo representá-las com boa exatidão.

Tabela 7 – Comparação entre os parâmetros *off-line* (obtidos via testes) e os parâmetros *on-line* (estimados via modelo), considerando uma incerteza de $\pm 80\%$ nos parâmetros iniciais.

Parâmetro (p)	<i>Off-line</i> (Testes)	<i>On-line</i> (Modelo)	Desvio (%)
M (s)	0,00023	0,00012	-47,826
T'_o (s)	0,05210	0,02287	-56,104
X (pu)	1,15751	1,60112	38,325
X' (pu)	0,21504	0,65716	205,599
T_m (pu)	0,17023	0,23257	36,645
G_s (pu)	0,10421	0,10951	5,086
B_s (pu)	0,00312	0,00325	4,167

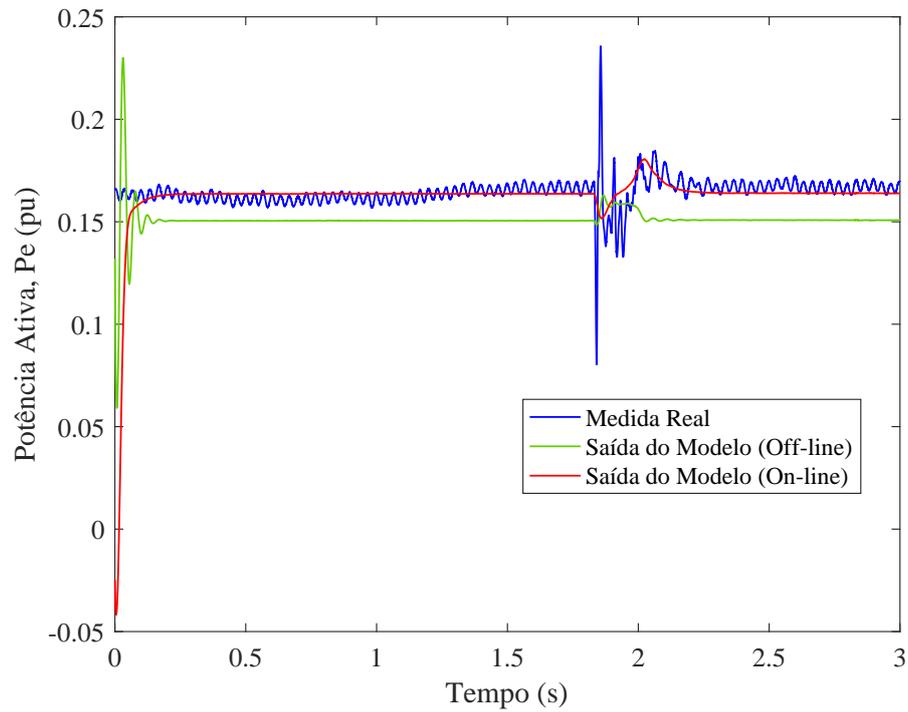


Figura 27 – Comparação entre as potências ativa do modelo para a estimação *off-line* e *on-line* dos parâmetros.

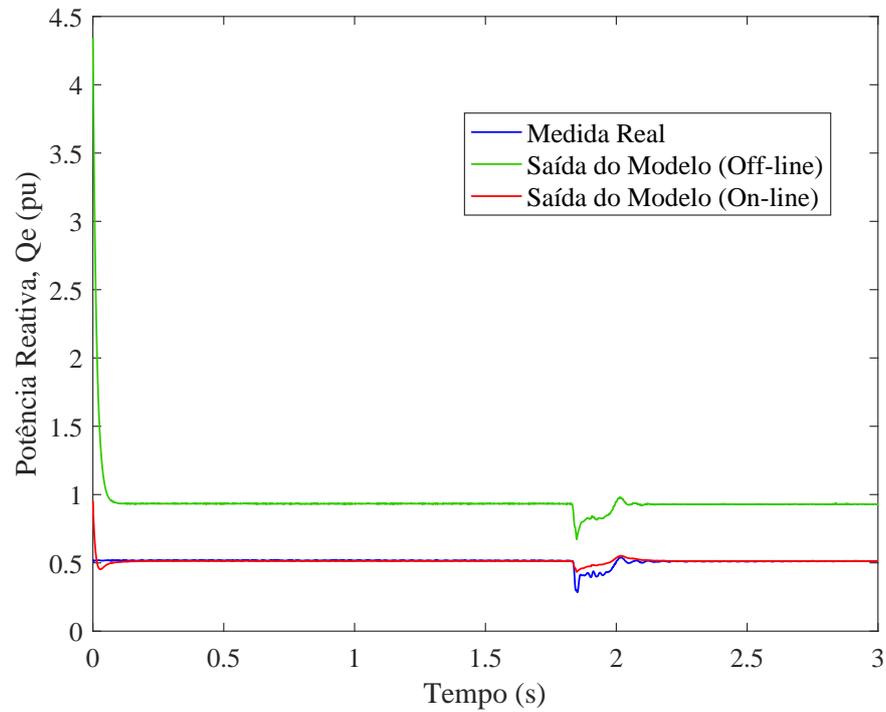


Figura 28 – Comparação entre as potências reativa do modelo para a estimação *off-line* e *on-line* dos parâmetros.

5 Conclusão

No presente trabalho foi apresentado o método de sensibilidade de trajetória aplicado à estimação de parâmetros de sistemas dinâmicos, sendo o gerador de indução o sistema principal em estudo.

Inicialmente, a técnica de sensibilidade de trajetória foi apresentada e aplicada a um sistema de segunda ordem, representado pelo sistema massa-mola. Este sistema-teste foi implementado no *software* MATLAB e seus parâmetros foram estimados a partir de medidas do sistema real obtidas via simulação. No entanto, a garantia de convergência dos parâmetros aos seus valores verdadeiros esteve condicionada a proximidade dos seus valores iniciais em relação aos valores reais. Para contornar este problema, foram propostas duas novas metodologias que combinam o método de sensibilidade de trajetória com as técnicas de barreira logarítmica e de sincronização mestre-escravo.

O efeito da inclusão do método de barreira logarítmica foi a otimização do erro quadrático médio entre as saídas do modelo matemático e do sistema real, acelerando o processo de convergência dos parâmetros e a garantia de 100% de convergência dentro da região de factibilidade, o que o método tradicional não conseguiu garantir. Com relação a sincronização mestre-escravo, além da otimização do erro, foi conseguido um aumento considerável na região de convergência, garantindo robustez em relação às condições iniciais dos parâmetros.

Posteriormente, foi realizado a identificação dos parâmetros do sistema constituído pelo gerador de indução conectado a uma carga estática e a rede elétrica, representando assim o sistema central de estudo deste trabalho.

Uma das características desejáveis no processo de estimação dos parâmetros do gerador de indução é realizá-lo com a máquina conectada ao restante do sistema elétrico, isto é, realizar uma estimação *on-line*. No entanto, este procedimento é uma tarefa de difícil realização até mesmo na prática pelas empresas de geração de energia elétrica. Para contornar esta dificuldade, foi proposto a realização de medidas reais mediante a aplicação de uma perturbação no sistema. Para tornar este procedimento realizável, foi desenvolvida uma modelagem não-linear do gerador capaz de representar os comportamentos transitórios, sendo ainda necessário escolher de forma conveniente as variáveis de estado, de entrada e de saída.

Outra grande contribuição importante deste trabalho foi a proposição de um algoritmo híbrido composto pelo método heurístico MVMO e pelo método de sensibilidade de trajetória com o intuito de contornar a baixa robustez desse último em relação às condições iniciais dos parâmetros. Considerando que a estimação dos parâmetros do gerador

foi realizada de forma simultânea, outra dificuldade enfrentada na aplicação do método de sensibilidade foi a divergência dos parâmetros estimados. Para resolver este problema, foi proposta a estimação dos parâmetros para o método de sensibilidade em duas novas fases, sendo na primeira fase ajustado os parâmetros com maior sensibilidade seguido pelo ajuste dos demais parâmetros.

Os resultados da estimação *on-line* de parâmetros do gerador de indução utilizando o algoritmo híbrido foram apresentados. A aplicação do método heurístico MVMO se mostrou robusto em relação as condições iniciais dos parâmetros e forneceu sinais de saída suficientemente próximas das saídas reais, de forma que o método de sensibilidade de trajetória conseguiu uma atuação eficiente para garantir uma convergência ainda mais precisa dos parâmetros. Os resultados obtidos evidenciam ainda que o modelo do gerador implementado se mostrou realístico e preciso na representação do comportamento dinâmico das potências ativa e reativa (saídas) antes, durante e após a ocorrência da perturbação.

5.1 Perspectivas para Trabalhos Futuros

- Inclusão do método de barreira logarítmica na formulação do método de sensibilidade de trajetória para estimar os parâmetros do gerador de indução;
- Avaliar a possibilidade de estimativas inteligentes já que neste trabalho os valores iniciais de alguns parâmetros foram obtidos por meio de testes *off-line*;
- Aumentar a robustez do método de estimação de parâmetros. Neste sentido, o método híbrido tem fornecido excelentes resultados. Portanto, pode-se analisar até que ponto a faixa de busca dos parâmetros (limite inferiores e superiores dos parâmetros conhecidos) podem ser aumentada;
- Resolver problemas práticos do acionador do gerador de indução (máquina de corrente contínua) que apresentou faiscamento quando a máquina de indução começou a operar como gerador. Este fenômeno foi parcialmente atenuado quando o alinhamento da máquinas foi melhor ajustado.

Referências

ABBASZADEH, A.; LESAN, S.; MORTEZAPOUR, V. Transient Response of Doubly Fed Induction Generator under Voltage Sag Using an Accurate Model. **IEEE Conference on Sustainable Alternative Energy**, p. 1–6, 2009.

AGUIRRE, L. **Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais**. [S.l.]: Editora UFMG, 2007.

AHMED-ZAID, S.; TALEB, M. Structural Modeling of Small and Large Induction Machines Using Integral Manifolds. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 6, n. 3, p. 529–535, 1991.

BENCHLUCH, S. M.; CHOW, J. H. A Trajectory Sensitivity Method for the Identification of Nonlinear Excitation System Models. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 8, n. 2, p. 159–164, 1993.

CARI, E. P. T. **Estimação dos Parâmetros da Máquina Síncrona e seu Sistema de Excitação**. 2005. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

CARI, E. P. T. **Metodologia de Estimação de Parâmetros de Sistemas Dinâmicos Não-Lineares com Aplicação em Geradores Síncronos**. 2009. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

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. **Revista de Controle & Automação**, v. 23, n. 4, 2012.

CARI, E. P. T.; ALBERTO, L. F. C.; OLIVEIRA, F. M. D. Trajectory Sensitivity and Genetic Algorithm Based-Method for Load Identification. **IEEE Industrial Electronics Society**, p. 309–314, 2014.

CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2005.

CHOI, B.-K. et al. Development of Composite Load Models of Power Systems Using On-line Measurement Data. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, p. 8, 2006.

CRUZ, J. B. **Feedback Systems**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1972.

ELIZONDO, M. A. et al. Model Reduction, Validation, and Calibration of Wind Power Plants for Dynamic Studies. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, p. 1–8, 2011.

ERLICH, I. et al. Modeling of Wind Turbines based on Doubly-Fed Induction Generators for Power System Stability Studies. **Power and Energy Society General Meeting**, p. 1–8, 2008.

_____. Determination of Dynamic Wind Farm Equivalents using Heuristic Optimization. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, p. 1–8, 2012.

- ERLICH, I.; VENAYAGAMOORTHY, G. K.; WORAWAT, N. A Mean-Variance Optimization Algorithm. **IEEE Evolutionary Computation**, p. 1–6, 2010.
- ESLAMI, M. **Theory of Sensitivity in Dynamic Systems: An Introduction**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- GRAINGER, J.; STEVENSON, W. **Power System Analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.
- IEEE. **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. [S.l.]: IEEE Power Engineering Society, 2004. 79 p.
- JOHNS, A.; SALMAN, S. **Digital Protection for Power Systems**. [S.l.]: Peter Peregrinus, 1995.
- JUNZHI, W.; MINXIAO, H.; JIE, M. A New Identification Strategy for Improving Convergence Stability of Load Model Parameters. **International Conference on Electrical and Control Engineering**, p. 145–148, 2010.
- KRAUSE, P. et al. **Analysis of Electric Machinery and Drive Systems**. [S.l.]: IEEE Press, 2002.
- KUNDUR, P.; BALU, N.; LAUBY, M. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.
- LI, L. et al. Fast Online Identification of the Dominant Parameters of Composite Load Model Using Volterra Model and Pattern Classification. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, p. 1–8, 2007.
- MCPHERSON, G. **An Introduction to Electrical Machines and Transformers**. [S.l.]: Wiley, 1981.
- MULJADI, E. et al. Equivalencing the Collector System of a Large Wind Power Plant. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, p. 1–9, 2006.
- MULJADI, E.; ELLIS, A. Validation of Wind Power Plant Dynamic Models. **Power and Energy Society General Meeting**, p. 1–7, 2008.
- PERDANA, A. **Wind Turbine Models for Power System Stability Studies**. 2006 — Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2006.
- REGULSKI, P. et al. Induction Generator Model Parameter Estimation Using Improved Particle Swarm Optimization and On-Line Response to a Change in Frequency. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, p. 1–6, 2011.
- RICARDO, E. A. R. **Estimação dos Parâmetros de Modelos de Carga Utilizando Medidas de Perturbação do Sistema Elétrico de Potência**. 2012. Trabalho de Conclusão do Curso (Tecnologia em Automação Industrial) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2012.
- STEVENSON, W. **Elements of Power System Analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1962.
- THEODORO, E. A. R. **Estimação dos Parâmetros de Modelos de Carga em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando a Metodologia de Sensibilidade de Trajetória**. 2007. Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

THIRINGER, T. Grid-Friendly Connecting of Constant-Speed. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 17, n. 4, p. 537–542, 2002.

WANG, X.; SUN, D. Three-Vector-Based Low-Complexity Model Predictive Direct Power Control Strategy for Doubly Fed Induction Generators. v. 32, n. 1, p. 773–782, 2017.

Apêndices

APÊNDICE A – Estimação *Off-line* dos Parâmetros da Máquina de Indução

Os valores iniciais dos parâmetros utilizados no método de estimação de parâmetros do gerador de indução foram obtidos por meio de testes *off-line* seguindo em geral a norma (IEEE, 2004) e com a máquina de indução operando no modo motor.

A.1 Determinação das Impedâncias do Modelo de Circuito da Máquina de Indução

O circuito equivalente do motor de indução operando em regime permanente está mostrado na Figura 29, sendo o escorregamento representado pela variável s . A seguir serão explicados os testes para determinação das impedâncias deste modelo de circuito.

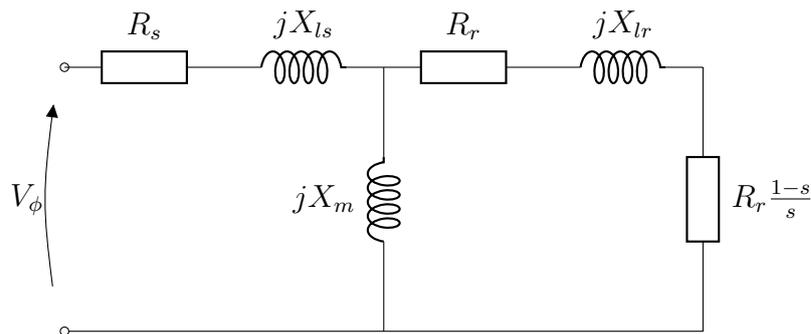


Figura 29 – Circuito equivalente do motor de indução em regime permanente.

A.1.1 Ensaio de rotor bloqueado

Neste ensaio, o rotor é bloqueado (travado) e uma tensão alternada V_{RB} é aplicada ao estator de forma que a corrente de linha é ajustada para o valor nominal. Nestas condições, a tensão, as correntes e as potências resultantes são medidas, conforme mostra o esquema de ligações da Figura 30.

Uma vez que o rotor não está se movendo, o escorregamento é $s = 1$ e portanto a resistência R_{lr}/s é dada por R_{lr} . Como os valores de R_r e X_{ls} são muito baixos, quase toda a corrente de entrada circulará através delas, em vez de fluir através da reatância de magnetização X_m , que é muito maior. Portanto, o circuito nessas condições assemelha-se a uma combinação série de X_{ls} , R_s , X_{lr} e R_r .

Nas condições de partida, o rotor possui a mesma frequência aplicada no estator (frequência de linha, 60Hz). No entanto, em condições normais de funcionamento, o escorregamento da maioria dos motores é de apenas 2 a 4% e a frequência resultante do

rotor está na faixa de 1 a 3 Hz . Desta forma, a frequência de linha não representa as condições do funcionamento do rotor e o (IEEE, 2004) recomenda que a frequência do ensaio de rotor bloqueado seja 25% ou menos da frequência nominal. Embora feita estas considerações, o ensaio de rotor bloqueado foi realizado na mesma frequência de linha devido a indisponibilidade de uma fonte alternada com frequência variável no laboratório.

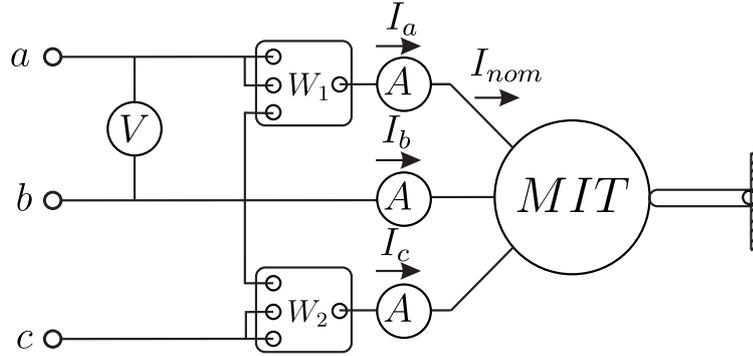


Figura 30 – Teste da máquina de indução com rotor bloqueado.

A impedância de entrada do motor com rotor bloqueado é dada por:

$$|Z_{RB}| = |R_{RB} + jX_{RB}| = \frac{V_{BR}}{\sqrt{3}I_{BR}} \quad (\text{A.1})$$

sendo

$$I_{RB} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (\text{A.2})$$

A resistência R_{RB} com rotor bloqueado é dada pela relação:

$$R_{RB} = R_s + R_r = \frac{P_{BR}}{3I_{BR}^2} = \frac{W_1 + W_2}{3I_{nom}^2} \quad (\text{A.3})$$

A reatância X_{RB} com rotor bloqueado é calculado como:

$$X_{RB} = |Z_{RB}| \sin \theta_{BR} \quad (\text{A.4})$$

sendo ângulo de impedância θ_{BR} obtido por meio de:

$$\theta_{BR} = \cos^{-1} \left(\frac{P_{BR}}{\sqrt{3}I_{BR}V_{BR}} \right) \quad (\text{A.5})$$

Considerando o tipo de rotor bobinado, as reatâncias de dispersão do estator e do rotor são obtidas diretamente por:

$$X_{ls} = 0,5X_{RB} \quad (\text{A.6})$$

$$X_{lr} = 0,5X_{RB} \quad (\text{A.7})$$

A.1.2 Ensaio a vazio (sem carga)

O ensaio a vazio (ou sem carga) de um motor de indução mede as perdas rotacionais do motor e fornece informação sobre sua corrente de magnetização. Neste ensaio, o eixo do motor gira livremente e a tensão aplicada no motor é ajustada para seu valor nominal. Nestas condições, o valor de tensão, as corrente e as potências resultantes são medidas utilizando voltímetro, amperímetros e wattímetros, conforme mostrado na Figura 31. Sendo as perdas por atrito e ventilação a única carga do motor, o escorregamento é muito pequeno (ordem de 0,001) e $R_r(1-s)/s$ é muito grande em comparação com a resistência R_r e a a reatância X_{lr} . Considerando ainda $X_m \ll R_r(1-s)/s$ e $X_m \gg R_s$, a impedância de entrada do circuito equivalente é aproximadamente:

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{nom}}{\sqrt{3}I_V} \approx X_{ls} + X_m \quad (A.8)$$

sendo

$$I_V = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (A.9)$$

Sendo X_{ls} determinado pelo ensaio de rotor bloqueado, a reatância de magnetização pode ser obtida por:

$$X_m = |Z_{eq}| - X_{ls} \quad (A.10)$$

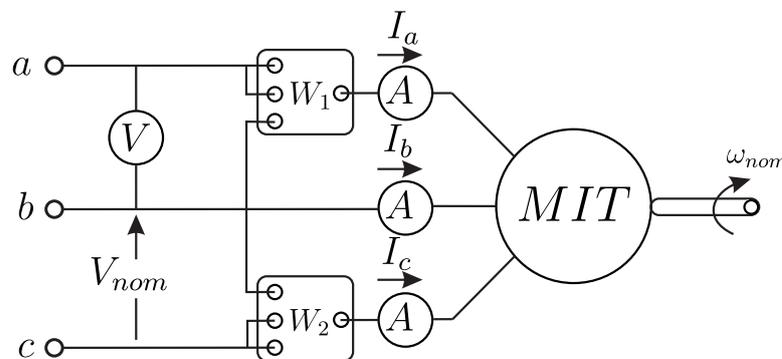


Figura 31 – Teste da máquina de indução em vazio.

A.1.3 Ensaio em corrente contínua

O circuito básico para realização do ensaio em corrente contínua está ilustrado na Figura 32, sendo uma fonte DC conectada a dois dos terminais do motor de indução ligado na configuração delta. Para realizar o ensaio, a corrente nos enrolamentos do estator é ajustada para o valor nominal e, em seguida, a tensão entre os terminais é medida. Com base na norma (IEEE, 2004) é recomendável o ajuste da corrente nos enrolamentos para o valor nominal como uma tentativa de aquecer os enrolamentos com a mesma temperatura da condição de funcionamento normal.

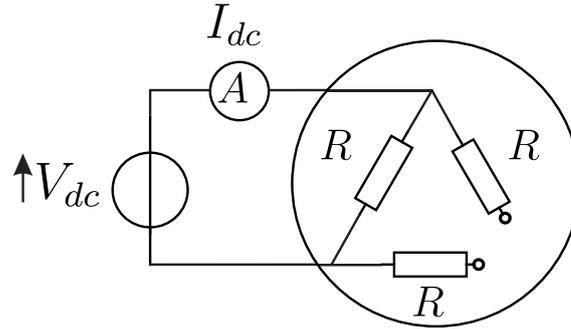


Figura 32 – Teste da máquina de indução com corrente contínua.

Para os enrolamentos na configuração Δ , a corrente circula através de um enrolamento, de modo que a resistência total do caminho é R . Portanto:

$$R = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (\text{A.11})$$

No entanto, a resistência R_s deve ser determinada considerando o circuito monofásico da Figura 29, isto é, considerando o arranjo em Y dos enrolamentos. Assim:

$$R_s = \frac{R}{3} = \frac{V_{dc}}{3I_{dc}} \quad (\text{A.12})$$

Conhecido o valor de R_s , a resistência do rotor R_r pode ser determinada por meio da Equação A.3, sendo igual a:

$$R_r = R_{RB} - R_s \quad (\text{A.13})$$

A.1.4 Impedâncias da máquina de indução obtidas experimentalmente

Os testes para determinação das impedâncias da máquina de indução foram realizados no Laboratório de Máquinas Elétricas do SEL/EESC/USP. Os valores experimentais obtidos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Impedâncias experimentais da máquina de indução obtidas por meio dos ensaios.

Impedância	Valor Experimental (pu)
R_s	0,0238
R_r	0,0589
X_m	1,5666
X_{ls}	0,1130
X_{lr}	0,1130

A.2 Determinação do Momento de Inércia

Nesta seção, o momento de inércia combinado do motor de corrente contínua e da máquina de indução será determinado a partir do teste de retardação para o MCC. São realizados dois testes de retardação, assumindo o MCC com excitação independente e com mesma corrente de campo em ambos os testes.

O primeiro teste consiste na interrupção da tensão de armadura com o MCC operando na tensão nominal e na aquisição da velocidade $\omega_r(t)$ até sua parada completa. Durante o primeiro teste de retardação, fixando um ponto ω_{rx} na curva de velocidade, a desaceleração nesta velocidade é dada por ε_x (Figura 33) e a força eletromotriz induzida é E . O segundo teste é realizado de forma similar ao primeiro sendo um resistor de carga R conectado aos terminais da armadura e a desaceleração na mesma velocidade ($\omega_{rx}=\omega_{ry}$) igual a ε_y . Durante o primeiro teste, a potência consumida pelas perdas constantes é igual a $J\omega_{rx}\varepsilon_x$, e no segundo teste as perdas ôhmicas na armadura do motor são dadas por $E^2/(R_a + R)$, sendo R_a a resistência de armadura do MCC. Assim, a potência total consumida no segundo teste é expressa por:

$$J\omega_{rx}\varepsilon_y = \frac{E^2}{R_a + R} + J\omega_{rx}\varepsilon_x \quad (\text{A.14})$$

A Equação (A.14) pode ser utilizada para determinar a constante de inércia:

$$J = \frac{E^2}{(R + R_a)(\varepsilon_y - \varepsilon_x)\omega_{rx}} \quad (\text{A.15})$$

Este procedimento foi realizado em laboratório e o valor experimental do momento de inércia encontrado foi $J = 0,00155 \text{ kg.m}^2$

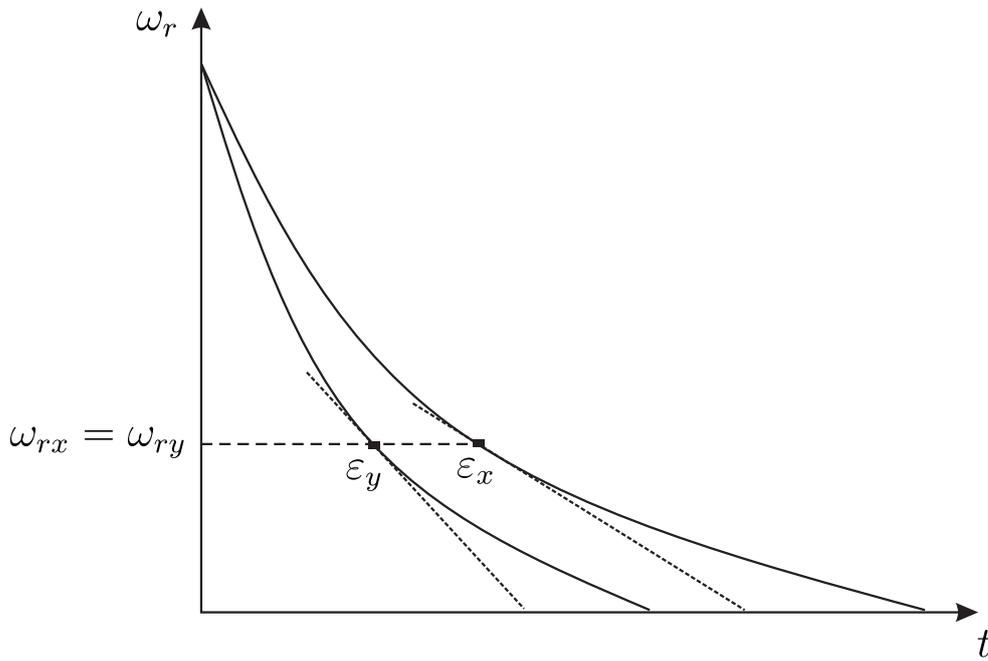


Figura 33 – Característica de desaceleração do MCC para determinação de ε_x e ε_y .

A.3 Estimação *Off-line* dos Parâmetros Iniciais do Modelo do GI

Os valores iniciais dos parâmetros M , X , X' e T'_o do modelo do gerador de indução adotado neste trabalho podem ser diretamente determinados com base nas impedâncias e no momento de inércia obtidos nas Seções A.1 e A.2 utilizando as Equações (3.2), (3.37), (3.13), (3.18) e (3.19). Os valores calculados foram $M = 0,00023\text{ s}$, $X = 1,15751\text{ pu}$, $X' = 0,21504\text{ pu}$ e $T'_o = 0,05210\text{ s}$.

APÊNDICE B – Método MVMO de Otimização

O método heurístico *Mean Variance Mapping Optimization (MVMO)* opera visando encontrar apenas uma solução para o problema a ser otimizado, procedimento contrário ao adotado por muitos algoritmos evolutivos. A faixa de procura interna de todas as variáveis declaradas no MVMO é restrita ao intervalo $[0, 1]$. No entanto, a função de avaliação é calculada para as escalas originais do sistema, sendo normalizada e desnormalizada a cada iteração.

A ideia central do método consiste no cálculo da função de mapeamento (função h) que possui como entrada a média e a variância das melhores soluções obtidas até então. A função de mapeamento transforma uma variável x_i^* , de variação aleatória com distribuição unitária, em outra variável x_i que está concentrada em torno do valor médio. O mapeamento desta variável é mostrado na Figura 34.

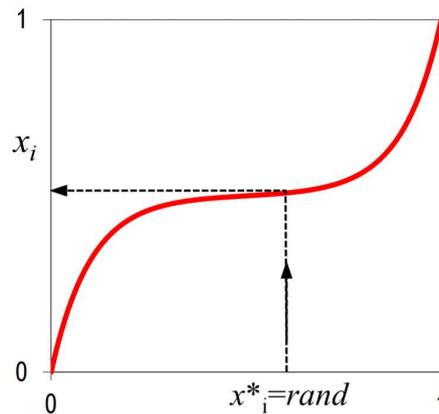


Figura 34 – Mapeamento da variável x_i^* no método MVMO

A transformação $x_i^* \rightarrow x_i$ é descrita matematicamente por

$$x_i = \underbrace{h_x + (1 - h_1 + h_0) \cdot x_i^* - h_0}_{H_{MF}} \quad (\text{B.1})$$

sendo a função de mapeamento definida como

$$h(\bar{x}, s_1, s_2, x) = \bar{x} \cdot (1 - e^{-x \cdot s_1}) + (1 - \bar{x}_i) \cdot e^{-(1-x) \cdot s_2} \quad (\text{B.2})$$

em que h_x , h_1 e h_0 são as saídas da função h , baseadas em diferentes entradas, dadas por

$$h_x = h(x = x_i^*), \quad h_0 = h(x = 0), \quad h_1 = h(x = 1) \quad (\text{B.3})$$

A forma da função h é determinada pela média \bar{x} e pelas variáveis de forma s_1 e s_2 . O efeito destas variáveis na forma da função de mapeamento é ilustrado na Figura 35

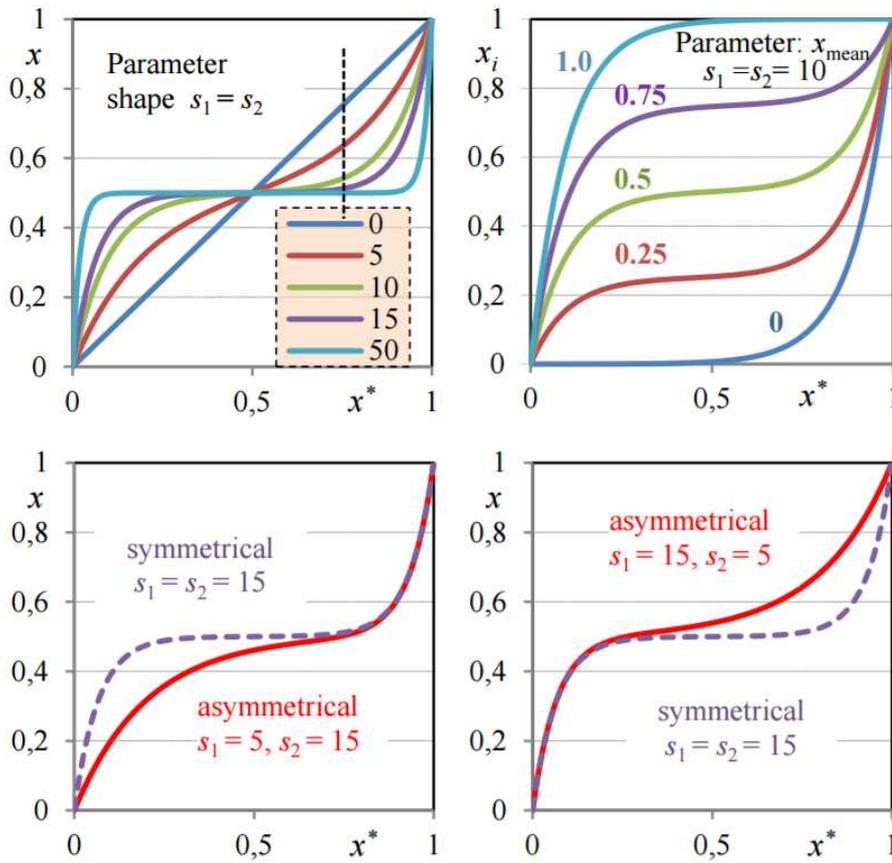


Figura 35 – Efeito dos parâmetros na função de mapeamento

As variáveis de média e de forma são calculadas para n melhores populações obtidas, de forma que:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_i(j) \quad (\text{B.4})$$

$$s_i = -\ln(v_i) \cdot f_s \quad (\text{B.5})$$

com a a variância

$$v_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_i(j) - \bar{x}_i)^2 \quad (\text{B.6})$$

Vale destacar que o fator f_s pode ser utilizado para alterar a forma da função de mapeamento. Assim se $f_s > 1$, melhora-se a precisão de estimação de x_i . Por outro lado se $f_s < 1$, melhora-se a a busca global deste parâmetro.

As variáveis do vetor de forma s_{i_1} e s_{i_2} de x_i são determinadas por meio do algoritmo:

$$s_{i_1} = s_{i_2} = s_i$$

se $s_i > 0$ então

se $s_i > d_i$

$$d_i = d_i \cdot \Delta d ; s_{i_1} = s_i ; s_{i_2} = d_i$$

fim

senão se

$$d_i = d_i / \Delta d ; s_{i_1} = s_i ; s_{i_2} = d_i$$

fim

fim

sendo os valores de d_i definidos para todas as variáveis ao início da otimização. A literatura mostra que valores entre $[1, 5]$ são razoáveis para garantir um bom desempenho inicial.

O algoritmo do método para estimação de parâmetros consiste nos seguintes passos enumerados a seguir:

1. Entrada com as condições iniciais do vetor de parâmetros e do vetor das variáveis de estados. Definição dos limites de convergência de cada parâmetro;
2. Definição do número de indivíduos, que por sua vez define o tamanho da população. Cada indivíduo será formado por um vetor de parâmetros obtido;
3. Geração da população inicial;
4. Avaliação da “*função de aptidão*”:
 - a) O vetor de parâmetros obtido até o momento funciona como entrada do modelo matemático para cálculo de suas saídas e determinação da *fitness function* para cada indivíduo e classe de população, conforme ilustrado na Figura 36;
 - b) Se o $J(p)$ da melhor solução obtida para o vetor de parâmetros for menor que a tolerância especificada, o algoritmo é finalizado. Caso contrário, prossiga com o próximo passo;
 - c) Normalização do vetor de parâmetros por meio da equação:

$$p_i^{norm} = \frac{p_i - p_i^{min}}{p_i^{max} - p_i^{min}} \quad (B.7)$$
 - d) Cálculo da média \bar{x}_i e da variância v_i da população;
 - e) Cálculo do fator de forma s_i , dado pela Equação B.5. Cálculo dos fatores s_{i_1} e s_{i_2} a partir do algoritmo apresentado anteriormente;
 - f) Geração do primeiro descendente (*offspring*):
 - i. Atribuição do melhor solução do vetor de parâmetros (p_{best}) como genitor parente (x_{parent}), como mostra a Figura 37;

- ii. Seleção randômica de m elementos $m < k$ de (p_{best}) que serão modificados pela função de mapeamento, indicado na Figura 38;
- iii. Modificação dos elementos selecionados, fazendo sua transformação usando a função de mapeamento, onde se gera o novo elemento (x_{new}) , conforme apresentado na Figura 39;
- iv. Utilizando o elemento x_{new} , reorganiza-se as soluções com o menor valor para a função $J(p)$, e volta-se a etapa 2.

	Fitness Function $J(p)$	p_1	p_2	...	p_k
1					
2					
...					
np					
Mean, \bar{x}_i	-----				
variance, v_i	-----				
s_i	-----				
d_{io}	-----				
s_{i1}	-----				
s_{i2}	-----				
$d_{io_updated}$	-----				

Figura 36 – Esquema ilustrativo para os parâmetros e variáveis de uma população.

	Fitness Function $J(p)$	p_1	p_2	...	p_k
1					

$\rightarrow p_{best} = x_{parent}$

Figura 37 – Atribuição do melhor solução do vetor de parâmetros.

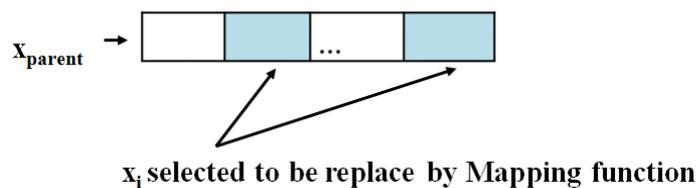


Figura 38 – Seleção randômica de m elementos $(m < k)$ do melhor vetor de parâmetros (p_{best}) .



Figura 39 – Modificação dos elementos selecionados.

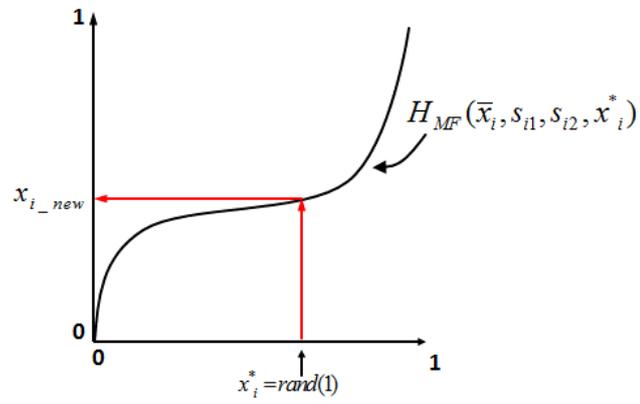


Figura 40 – Obtenção do novo elemento (x_{new}).

APÊNDICE C – Publicações relacionadas à esta pesquisa

- FARIAS, E. R. C.; CARI, E. P. T.; ALBERTO, L. F. C. Alberto. Método de Sensibilidade de Trajetória Aplicado à Estimação de Parâmetros de Sistemas Dinâmicos Não-Lineares. **Congresso Brasileiro de Automática**, 2016.
- FARIAS, E. R. C.; CARI, E. P. T. Trajectory Sensitivity Method Applied to Dynamic Systems. **24º Simpósio de Iniciação Científica e Tecnológica da USP**, 2016.

Além disso, estão sendo escritos dois artigos para submissão em revistas com base nos resultados de estimação dos parâmetros do gerador de indução e de um modelo de carga dinâmica.