



Universidade Federal  
de São João del-Rei

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEL

**METODOLOGIA ANALÍTICA NÃO ITERATIVA  
PARA ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MOTOR  
DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM BASE EM DADOS  
DE CATÁLOGO**

**João Marcos Rabelo Baccarini**

**Orientadora:** Lane Maria Rabelo

**Coorientador:** Gleison Fransoares Vasconcelos Amaral

São João del-Rei, 25 de março de 2021.



Universidade Federal  
de São João del-Rei

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEL

# **METODOLOGIA ANALÍTICA NÃO ITERATIVA PARA ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM BASE EM DADOS DE CATÁLOGO**

**João Marcos Rabelo Baccarini**

Dissertação apresentada à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientadora:** Lane Maria Rabelo

**Coorientador:** Gleison Fransoares Vasconcelos Amaral

São João del-Rei, 25 de março de 2021.

# Agradecimentos

Aos meus pais, Marcos Baccarini e Lane Maria Rabelo, pelo incentivo, apoio e cobrança em todos os momentos, amo muito vocês dois. Também ao meu irmão João Vitor pelo companheirismo e amizade incondicional.

Aos meus orientadores Lane Maria Rabelo, Gleison Fransoares Vasconcelos Amaral e Francisco Carlos Rodrigues Coelho, pelas correções, ensinamentos e ajuda durante o meu mestrado.

Aos meus amigos e colegas que conheci durante este percurso, obrigado pela ajuda, companheirismo.

A todos os professores da UFSJ pelos conselhos, ensinamentos e paciência com a qual guiaram meu aprendizado.

*“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos.”*

Isaac Newton

# Resumo

O motor de indução trifásico (MIT) é amplamente utilizada na indústria. O circuito equivalente do MIT é essencial em diversas aplicações, como avaliação de desempenho, projeto de malhas de controle de torque/velocidade e também na área de diagnóstico de falhas. Este trabalho estabelece uma metodologia analítica e não-iterativa para estimar os parâmetros do circuito equivalente da máquina com alta precisão, usando apenas dados disponibilizados nos catálogos de fabricantes. A avaliação da precisão da metodologia foi realizada utilizando dados de 916 motores de 3 diferentes fabricantes (WEG, Hércules e Siemens) para 2 categorias distintas (N e D), com faixas de potência entre 1 e 700 hp. Por meio do circuito equivalente estimado, o rendimento e fator de potência para três pontos de operação (50%, 75% e 100% de carga nominal) são calculados e comparados com os disponibilizados nos catálogos das máquinas. Além disso, foram realizadas também análises estatísticas, que mostraram que a técnica proposta supera outras duas metodologias, apresentando erros menores para praticamente todas as máquinas. Por fim, dois casos ilustrativos foram apresentados (um para cada categoria de motor) para máquinas de 5 hp (Categoria N) e 7,5 hp (Categoria D). Os três circuitos obtidos através dos três métodos foram utilizados para estimar as curvas de rendimento e fator de potência dessas máquinas, de zero a 120% da potência nominal. Os resultados foram comparados com as curvas de fabricante, comprovando a qualidade da abordagem proposta.

**Palavras-chave:** Motor de Indução, Estimação de Parâmetros, Dados de Catálogo, Método Analítico, Alta Precisão.

# Abstract

The three-phase induction motor is widely used in industry. Its equivalent circuit is essential in several applications, like performance evaluation, designing of speed/torque control loops, and failure diagnosis. This work establishes an analytical, non-iterative methodology to estimate the equivalent circuit parameters of this machine with high precision, using only data provided by the manufacturer catalog. The proposed methodology assessment is done by applying it to a total of 916 motors from 3 different manufacturers (WEG, Hercules and Siemens), for 2 distinct categories (N and D), with power range from 1 to 700 hp. Having the estimated equivalent circuit, the efficiency and power factor of three operating points (half, three quarters, and full load) are calculated and compared to the data available in the manufacturer catalog. These differences, so called errors, are small in a wide power range, roughly from 5 hp onwards. Also, by means of statistical analysis, the proposed method outperforms two other estimation methodologies, presenting lower errors for almost all considered machines. Finally, two illustrative cases are made (one for each category) with a 5 hp (N category) and 7.5 hp (D category). The three methods are used to estimate the efficiency and power factor curves of the motor from zero to 120% of the rated power, attesting to the quality of the proposed approach.

**Keywords:** Induction Machine, Parameter Estimation, Manufacturer Data, Analytical Method, High Precision.

# Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 Circuito equivalente da Máquina de Indução Trifásica, funcionamento em regime permanente, representação por fase.....               | 9  |
| Figura 2.2 Circuito equivalente da Máquina de Indução, funcionamento em regime permanente, rotor em gaiola dupla, representação por fase. .... | 10 |
| Figura 2.3 Circuito equivalente simplificado da Máquina de Indução Trifásica, funcionamento em regime permanente, representação por fase.....  | 10 |
| Figura 2.4 Gráfico de Torque x Velocidade de um Motor de Indução Trifásico (Categoria N).....  | 16 |
| Figura 3.1 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 100% de carga – Categoria N.....  | 23 |
| Figura 3.2 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 75% de carga – Categoria N.....   | 24 |
| Figura 3.3 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 50% de carga – Categoria N.....   | 24 |
| Figura 3.4 <i>Boxplots</i> da estimação de rendimento – Categoria N.....   | 25 |
| Figura 3.5 Estimação de Fator de Potência, comparação entre os métodos. 100% de carga – Categoria N.....                                       | 26 |
| Figura 3.6 Estimação de Fator de Potência, comparação entre os métodos. 75% de carga – Categoria N.....  | 27 |
| Figura 3.7 Estimação de Fator de Potência, comparação entre os métodos. 50% de carga – Categoria N.....  | 27 |
| Figura 3.8 <i>Boxplot</i> da estimação de Fator de Potência – Categoria N .....  | 28 |
| Figura 3.9 Curvas de Rendimento para o motor de 5 HP – Categoria N .....   | 30 |
| Figura 3.10 Curvas de Fator de Potência para o motor de 5 HP – Categoria N.....  | 30 |
| Figura 3.11 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 100% de carga – Categoria D.....   | 32 |
| Figura 3.12 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 75% de carga – Categoria D.....  | 33 |
| Figura 3.13 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 50% de carga – Categoria D.....  | 33 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.14 <i>Boxplots</i> da estimação de rendimento – Categoria D.....                                  | 34 |
| Figura 3.15 Estimação de Fator de Potência, comparação entre os métodos: 100% de carga – Categoria D ..... | 35 |
| Figura 3.16 Estimação de Fator de Potência a 75% de carga – Categoria D .....                              | 35 |
| Figura 3.17 Estimação de Fator de Potência a 50% de carga – Categoria D .....                              | 36 |
| Figura 3.18 <i>Boxplots</i> da estimação de fator de potência – Categoria D.....                           | 36 |
| Figura 3.19 Curvas de Rendimento para o motor de 7,5 HP – Categoria D .....                                | 38 |
| Figura 3.20 Curvas de Fator de Potência para o motor de 7,5 HP – Categoria D.....                          | 39 |



# Lista de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela I: Relação entre $x_1$ e $x_2$ .....   | 13 |
| Tabela II: Relação entre $x_1$ e $x_2$ .....  | 19 |
| Tabela III: Dados de catálogo usados por cada método .....                            | 21 |
| Tabela IV: Estatísticas do Erro na Estimação do Rendimento – Categoria N .....        | 25 |
| Tabela V: Estatísticas do Erro na Estimação de Fator de Potência – Categoria N.....   | 28 |
| Tabela VI: Dados de Catálogo do Motor de 5 HP – Categoria N .....                     | 29 |
| Tabela VII: Comparação entre valores estimados – Categoria N .....                    | 29 |
| Tabela VIII: Estatísticas do Erro na Estimação de Rendimento – Categoria D.....       | 34 |
| Tabela IX: Estatísticas do Erro na Estimação de Fator de Potência – Categoria D ..... | 37 |
| Tabela X: Dados de Catálogo do Motor de 7,5 HP – Categoria D.....                     | 37 |
| Tabela XI: Comparação entre valores estimados – Categoria D.....                      | 38 |

# Lista de Abreviações

ABNT: *Associação Brasileira de Normas Técnicas*

BJSFV: *Sigla utilizada para se referir ao método de estimação proposto por Guimarães et. al. em [1], se refere às iniciais dos autores*

HP: *Horse-Power (unidade de medida de potência)*

IEC: *Comissão Eletrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission)*

IEEE: *Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos*

LKT: *Lei de Kirchhoff das Tensões*

MIT: *Motor de Indução Trifásico*

NBR: *Norma Brasileira*

NEMA: *National Electrical Manufacturers Association*

NM: *Sigla utilizada para se referir ao método de estimação proposto por Natarajan e Misra em [2], se refere às iniciais dos autores*

# Sumário

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Capítulo 1 - Introdução</b> .....   | <b>1</b>  |
| 1.1 Enquadramento e Motivação .....  | 1         |
| 1.2 Objetivos .....  | 2         |
| 1.3 Revisão da literatura .....  | 3         |
| 1.4 Metodologia .....  | 7         |
| 1.5 Estrutura do trabalho.....   | 7         |
| <b>Capítulo 2 - Descrição do Método</b> .....                                | <b>9</b>  |
| 2.1 Circuito Equivalente .....   | 9         |
| 2.2 Método de Natarajan e Misra (NM).....                                    | 11        |
| 2.3 Método BJSFV .....   | 13        |
| 2.4 Método Proposto.....   | 16        |
| 2.5 Dados de Catálogo de cada método .....                                   | 21        |
| <b>Capítulo 3 - Análise dos Resultados</b> .....                             | <b>22</b> |
| 3.1 Motores Categoria N.....   | 22        |
| 3.1.1 Análise de Rendimento .....  | 22        |
| 3.1.2 Análise de Fator de Potência.....                                      | 25        |
| 3.1.3 Estudo de Caso .....   | 28        |
| 3.2 Motores Categoria D.....   | 31        |
| 3.2.1 Análise de Rendimento .....  | 31        |
| 3.2.2 Análise de Fator de Potência.....                                      | 34        |
| 3.2.3 Estudo de Caso .....   | 37        |
| <b>Capítulo 4 - Considerações Finais</b> .....                               | <b>40</b> |
| 4.1 Conclusões .....   | 40        |
| 4.2 Trabalhos Futuros .....  | 40        |
| 4.3 Artigo Publicado .....   | 41        |
| <b>Referências Bibliográficas</b> .....                                      | <b>42</b> |
| <b>Anexos</b> .....  | <b>47</b> |
| Anexo 1 – Equação do Escorregamento em função da Potência (Método BJSFV) ... | 47        |
| Anexo 2 – Equação da Corrente Nominal do Rotor (Método BJSFV) [31].....      | 49        |

# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Enquadramento e Motivação

O Motor de Indução Trifásico (MIT) é amplamente utilizado em aplicações industriais e, uma maneira de se prever, analisar e compreender sua operação, é representá-lo por meio de um modelo matemático normalmente denominado de circuito equivalente. A modelagem matemática consiste em um conjunto de parâmetros elétricos que são úteis para se estimar, por exemplo, a eficiência, o fator de potência, o torque e a corrente para diversas condições de operação, especialmente quando medições reais com carga não podem ser executadas. Além disso, informações sobre os parâmetros do circuito equivalente são essenciais para o ajuste dos controladores utilizados nos sistemas de controle e, também, em estudos para a detecção e diagnóstico de falhas.

Os métodos clássicos para obtenção dos parâmetros do circuito equivalente são definidos por padrões técnicos, como IEEE Std 112 [3] e a norma ABNT NBR 17094-3 [4]. Geralmente, estes métodos requerem tempo e esforços humanos significativos, além de duas montagens diferentes em relação ao eixo do motor: (i) teste de rotor bloqueado ou rotor travado; e (ii) teste sem carga ou teste à vazio. Esses ensaios são difíceis de serem executados se a máquina já estiver instalada (acoplada a uma carga mecânica, por exemplo). Além disso, é necessário também fazer a medição da resistência dos enrolamentos do estator, o que requer, normalmente, que a máquina esteja desconectada. Portanto, esses métodos nem sempre são possíveis ou práticos de serem aplicados no chão de fábrica [5]. A precisão da instrumentação também tem um papel muito importante nas medições das grandezas nos ensaios experimentais, já que esse parâmetro define a qualidade dos dados e diminui o grau de incertezas [6]. Por esses motivos, nos últimos anos, muitos métodos alternativos para estimativa de parâmetros de máquinas de indução têm sido propostos, cada um com suas próprias vantagens e limitações [7].

De acordo com [8], os métodos de estimação de parâmetros podem ser classificados em cinco categorias: (i) **Cálculo de parâmetros a partir de dados de projeto**. Trata-se do mais preciso, uma vez que está mais intimamente relacionado à constituição física da máquina. Mas, além de necessitar de técnicas de elementos finitos, os dados necessários não estão disponíveis para todos os usuários. (ii) **Estimativa de**

**parâmetros com base em modelos de motor em regime permanente.** Os métodos podem usar soluções analíticas ou iterativas com base em equações que relacionam variáveis elétricas e mecânicas e dados fornecidos pelos fabricantes. É o tipo mais utilizado uma vez que os dados necessários são geralmente acessíveis. (iii) **Estimativa de parâmetros no domínio da frequência.** Apesar de ser um método preciso, não é muito utilizado no setor industrial pois se utiliza dados de medições que são realizadas durante a partida [9]. (iv) **Estimativa de parâmetros no domínio do tempo.** Para este tipo de técnica, as medidas elétricas e mecânicas no domínio do tempo são realizadas e os parâmetros do modelo são ajustados. O método tende a ser mais custoso em relação aos outros, e os dados necessários geralmente não estão disponíveis [10] (v) **Estimativa de parâmetros em tempo real que é usada para ajustar os controladores de sistemas de acionamento de alto desempenho.** Essas técnicas requerem algoritmos rápidos o suficiente para atualizar continuamente os controladores. [11]

Dentro desta classificação, algoritmos de estimação com base em modelos do motor em regime permanente e que utilizam dados de catálogos são amplamente propostos. Existem diferentes técnicas que contam com abordagens analíticas [2][12] e com métodos recursivos [13][14] que podem utilizar também dados de medição com a máquina em operação. Em relação a estas duas classes de métodos, as técnicas analíticas podem oferecer cálculos mais rápidos, sendo, normalmente, preferíveis para implementação em plantas industriais. Entretanto, cabe ressaltar que a precisão na obtenção dos parâmetros, deve ser também considerada na escolha do método de estimativa dos parâmetros da máquina de indução.

## 1.2 Objetivos

### A. Objetivo Geral

Considerando:

- i) A importância da representação do MIT através de um modelo matemático para análise de desempenho em regime permanente e, também no projeto de métodos de diagnóstico de falhas.
- ii) A frequente impossibilidade de realização de ensaios, definidos em Normas Técnicas, em uma planta industrial.
- iii) A disponibilidade de dados por meio dos catálogos de fabricantes.

- iv) A rapidez e eficiência de algoritmos analíticos.

Este trabalho de dissertação de mestrado tem por finalidade principal propor uma nova metodologia de estimação de parâmetros de MIT de fácil aplicação prática.

## **B. Objetivos Específicos**

- i) Calcular os parâmetros para motores de diferentes fabricantes e diferentes características de projeto;
- ii) De posse do circuito equivalente obter os valores do rendimento e fator de potência para 50%, 75% e 100% de carga e comparar com os fornecidos nos catálogos;
- iii) Comparar e analisar estatisticamente a robustez do método em relação a outros dois algoritmos analíticos;
- iv) Traçar as curvas de Rendimento e de Fator de Potência e comparar com as fornecidas pelo fabricante.

### **1.3 Revisão da literatura**

Inicialmente, são citados trabalhos de estimação de parâmetros normalmente utilizados em acionamentos de velocidade variável, em máquinas de alto desempenho. No entanto, esta seção tem por objetivo principal trazer uma revisão bibliográfica de métodos recursivos e analíticos de estimação de parâmetros por meio de dados de catálogos de fabricantes, que é o tema desta dissertação.

No trabalho [15] apresenta-se uma revisão de diferentes métodos de estimação de parâmetros do modelo da máquina de indução trifásica para aplicação em sistemas de controle de velocidade. Foram analisados 207 artigos científicos publicados até o ano de 2003 com diferentes abordagens sobre o assunto. Os autores dividiram as técnicas de identificação de parâmetros em dois grupos principais: métodos *offline* e métodos *online*. A princípio, o foco de alguns trabalhos é no comissionamento e, para isso, a estimação dos parâmetros é realizada *offline* a partir de medições e durante a inicialização da unidade de controle. A principal ideia por trás desse conceito é a de que o controlador determina automaticamente os parâmetros necessários para o controle do motor. Esta etapa se faz necessária uma vez que, em muitas ocasiões, o fabricante do conversor de frequência é diferente do fabricante do motor. Entretanto, alguns parâmetros variam com a temperatura, frequência da tensão de alimentação e efeito de saturação magnética, sendo que alguns tipos de controle exibem sensibilidade às essas variações, tais como o controle

Direto de Torque e Controle por Enfraquecimento de Campo. Assim, faz-se necessária a estimação dos parâmetros em tempo real: trata-se dos métodos *online*. Apesar da quantidade de trabalhos citados em [15], outros métodos foram propostos a partir de 2003 de forma a melhorar o desempenho do estimador e facilitar a sua implementação numa planta real [11] [16] [17] [18] [19].

Publicado em 1989, o trabalho desenvolvido em [2] foi um dos pioneiros no que se refere a estimação de parâmetros do MIT a partir do modelo em regime permanente. Propõe-se o cálculo analítico das resistências e reatâncias da máquina utilizando apenas dados de catálogo, dispensando-se os testes experimentais. O método despreza os efeitos de saturação magnética, considera as perdas no ferro, atrito e ventilação constantes e utiliza os valores de fator de potência e rendimento para 100% e 75% de carga nominal. Para a separação entre as reatâncias de dispersão do estator e do rotor é utilizada a relação definida no IEEE Standard 112 [3]. Foram apresentados os resultados do cálculo dos parâmetros de 28 Motores Trifásicos, 440 V, NEMA, categoria B e de potência variando entre 30 e 500 hp. De acordo com os autores, existe uma boa concordância entre a estimativa dos valores de fator de potência e rendimento extraídos do circuito equivalente obtidos pelo algoritmo e os dados fornecidos pelos fabricantes. A metodologia utiliza de uma relação entre a resistência do rotor e a reatância de dispersão do rotor que depende do valor de torque máximo e de partida. Analisando a expressão para o cálculo desta relação, conclui-se que, no caso de torque de partida superior ao torque máximo, este valor é um número complexo. Portanto, nestes casos, o método não consegue estimar os valores dos parâmetros do motor.

O método dos mínimos quadrados não-lineares foi empregado para resolver um conjunto de equações não-lineares na metodologia proposta por Haque [12], que necessita do conhecimento da potência nominal, rendimento e fator de potência para 50% e 100% de carga, torque máximo e torque de partida. O método utiliza valores empíricos de parâmetros de resistência e reatância do rotor adequados a motores de categorias A e B da NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) [4], cuja razão entre o torque de partida e o torque máximo é menor ou igual a 0,625. No estudo, as perdas à vazio são determinadas em condições de carga nominal e, em seguida, divididas em perdas no núcleo e perdas no ferro, usando uma constante predefinida. A eficácia do método foi avaliada em 300 motores de alta tensão calculando variáveis externas através dos

parâmetros estimados e comparando-as com os valores correspondentes fornecidos pelo fabricante.

Uma metodologia para obtenção dos parâmetros de três diferentes opções de circuito equivalente é apresentada em [20]. Estes circuitos representam os rotores de gaiola simples, gaiola dupla e parâmetros do rotor dependentes do escorregamento. O objetivo principal do trabalho é analisar o valor das perdas no ferro e das perdas por atrito e ventilação. Usando técnicas de programação não linear, os parâmetros foram calculados nos diferentes modelos por meio da atribuição de valores iniciais conforme definido em [21]. Foram realizados testes de laboratório em motores de 0,75, 1,5 e 5,5 kW de acordo com a norma IEC 60034-2-1 [22].

Partindo de dados de catálogo, um algoritmo não iterativo foi proposto em [1], incluindo no modelo a variação dos parâmetros do rotor com o escorregamento devido ao efeito pelicular. Valores de pontos notáveis, como a corrente e torque na partida, torque máximo e parâmetros para as condições nominais são comparados com os dados fornecidos pelo fabricante. Os resultados obtidos mostraram uma concordância muito boa entre os valores extraídos do modelo e os fornecidos pelos fabricantes. A metodologia foi aplicada a centenas de motores.

O trabalho [23] mostra uma metodologia para determinar o circuito equivalente de motores para avaliar as ações dos fabricantes para melhorar a eficiência da máquina. Em geral, o melhor rendimento do motor é obtido através do aumento da bitola dos condutores, tanto no estator quanto no rotor, melhorando o comportamento do motor devido a uma maior condutividade elétrica. A metodologia adotada para obtenção do circuito equivalente é similar à proposta em [1] ocorrendo alterações nas equações para no cálculo das reatâncias de dispersão do estator e do rotor.

Em [24] os métodos de estimação desenvolvidos por [1], [2] e [12] foram avaliados em 200 motores de diferentes potências. As análises conduziram à proposta de um algoritmo híbrido: para o cálculo da resistência do estator utiliza-se a equação recomendada em [1], para a resistência do rotor utiliza-se a definida em [2] e o algoritmo definido em [12] para a estimação dos demais parâmetros, de forma a se combinar as qualidades dos diferentes métodos.

Técnicas que empregam medições de tensão, corrente, torque e/ou velocidade aliadas à ferramentas de otimização também são utilizadas para estimação de parâmetros



do circuito equivalente do motor de indução [25], [26]. O modelo dinâmico do MIT, com referencial estacionário, é utilizado em [14] para a obtenção da função objetivo e a estimação dos parâmetros do motor a partir de medições de corrente e velocidade. De posse das equações encontradas, emprega-se a técnica de Otimização por Enxame de Partículas (*PSO - Particle Swarm Optimization* do inglês) para busca de possíveis valores para cada resistência e reatância do modelo matemático. A metodologia proposta foi aplicada a um motor de 4 polos, 220 V e os erros entre os parâmetros obtidos por ensaio e os simulados não ultrapassaram a 5%.

O trabalho [13] também propõe a utilização da ferramenta PSO para a obtenção dos parâmetros do MIT. A estimativa é feita inteiramente *online* utilizando medições de corrente e de fator de potência nas condições de operação com carga nominal e sem carga. A simulação é validada através da realização de experimentos em um motor trifásico de 110 volts e 2,0 HP. O maior erro encontrado foi no cálculo da soma da reatância de dispersão do estator e do rotor: -18,26 %. O menor erro ocorreu na estimação da resistência do rotor: 1,22%.

Em [27], os parâmetros são estimados através do PSO e do Diagrama H-G. Neste diagrama, duas diferentes equações são desenvolvidas, uma relacionada à potência ativa que gera o torque no motor e a outra à potência reativa, que produz o fluxo de magnetização. Para validação da técnica, os autores apresentaram resultados das simulações de oito motores de diferentes fabricantes e número de polos (2, 4 e 6 pares de polos), potência variando de 11 a 800 kW. Além da medição de tensão, corrente e potência elétrica de entrada, o método apresenta a necessidade de realizar também a medição da velocidade.

Recentemente uma técnica capaz de estimar os valores dos parâmetros e, também o momento de inércia e o coeficiente de atrito viscoso foi proposta em [28]. Três conjuntos distintos de sinais de entrada são aplicados ao algoritmo proposto: (i) sinal de corrente de uma fase, juntamente com a velocidade medida em um tacogerador, (ii) sinal de corrente de uma fase, juntamente com a velocidade medida em um torquímetro, e (iii) apenas o sinal de corrente de uma fase. O método consiste em um aproximador de função para estimativa de parâmetros usando o algoritmo de Evolução Diferencial combinado com o modelo dinâmico do MIT em coordenadas bifásicas. Para verificar a eficiência e validar o método de estimativa, testes experimentais foram realizados em um MIT de 220

V, 4 polos e 1 HP. Os resultados mostraram uma pequena variação entre os valores obtidos pelos três tipos de experimentos realizados.

#### **1.4 Metodologia**

Para fazer referência às técnicas desenvolvidas por Natarajan e Misra [2] e Guimarães et al. [1][29] foram escolhidas, respectivamente, as siglas NM e BJSFV, referenciando as iniciais dos autores.

Para análises de robustez e precisão da nova técnica desenvolvida, adotou-se as seguintes etapas:

1. Implementação dos algoritmos NM, BJSFV e do algoritmo Proposto no software Matlab;
2. Obtenção dos parâmetros do circuito equivalente para motores de categoria N e D a partir de dados de catálogos de diferentes fabricantes para as três técnicas;
3. Cálculo do rendimento e do fator de potência para três condições de operação, 50%, 75% e 100 % de carga nominal. Foram retirados os motores que tiveram valores complexos e negativos quando da aplicação dos algoritmos NM e BJSFV;
4. Análises estatísticas dos resultados;
5. Obtenção da curva de rendimento e de fator de potência em função do escorregamento, na faixa de 0 a 120% da carga nominal, e comparação com as curvas fornecidas pelos fabricantes. Devido ao número elevado de motores, foram selecionadas duas máquinas de diferentes categorias que apresentaram os piores resultados na comparação do rendimento obtido pelo método proposto em relação ao fornecido pelo fabricante, para a situação de 100 % de carga.

#### **1.5 Estrutura do trabalho**

Além da Introdução, a descrição da técnica proposta e as análises de robustez e precisão são apresentadas em 3 capítulos. Os capítulos foram intitulados, respectivamente: Capítulo 2 - Descrição do Método; Capítulo 3 - Análises dos Resultados e Capítulo 4 - Considerações Finais.

Os modelos tradicionais que representam a máquina de indução funcionando em regime permanente são descritos no início do Capítulo 2. As equações necessárias para a implementação das técnicas NM e BJSFV são apresentadas nas seções 2.2 e 2.3 respectivamente. A seção 2.4 foi utilizada para o detalhamento e equacionamento do novo método analítico proposto.

As apresentações e discussões estatísticas dos resultados obtidos, o que correspondem às etapas 2, 3 e 4 da metodologia proposta estão contidas no Capítulo 3. As curvas de torque e de fator de potência em função da velocidade, etapa 5, também faz parte do Capítulo 3. As considerações finais e propostas para trabalhos futuros são tratadas no Capítulo 4.

## Capítulo 2 - Descrição do Método

Na parte inicial deste capítulo são realizados comentários sobre os modelos de Máquinas de Indução, em regime permanente. As principais equações dos métodos NM e BJSFV são apresentadas nas seções 2.2 e 2.3. O desenvolvimento do método proposto é detalhado na seção 2.4. Na seção 2.5 é apresentada uma tabela que explicita os dados de catálogo necessários para estimar os parâmetros do modelo por cada método.

### 2.1 Circuito Equivalente

Na Figura 2.1 é mostrado o circuito elétrico normalmente utilizado para a representação do funcionamento da máquina de indução trifásica, em regime permanente. As resistências e as reatâncias de dispersão do estator e do rotor são representadas pelas variáveis  $r_1$ ,  $x_1$ ,  $r_2$  e  $x_2$ , respectivamente. As perdas no ferro podem ser obtidas por meio da potência dissipada na resistência  $r_{fe}$ . O parâmetro  $x_M$  corresponde à reatância de magnetização. A tensão de alimentação, valor por fase, é dada por  $V$  e as correntes de estator, de excitação e de rotor são representadas por  $I_1$ ,  $I_0$  e  $I_2$ .

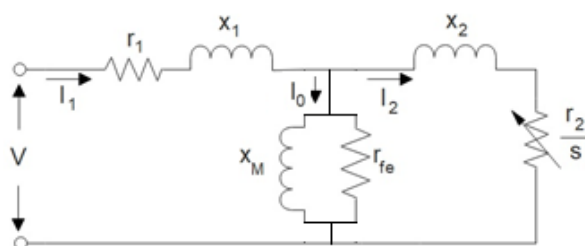


Figura 2.1 Circuito equivalente da Máquina de Indução Trifásica, funcionamento em regime permanente, representação por fase.

Os parâmetros do rotor variam com o escorregamento devido ao efeito pelicular causado pelas características construtivas das barras do rotor. Alguns autores [20][30]. sugerem alterações no modelo matemático de forma a reproduzir o funcionamento dos rotores de dupla gaiola, conforme Figura 2.2. Os parâmetros  $r_{21}$  e  $x_{21}$  são as resistências e reatâncias das gaiolas internas e os parâmetros  $r_{22}$  e  $x_{22}$  das gaiolas externas.

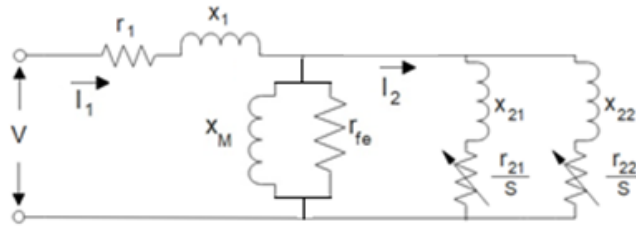


Figura 2.2 Circuito equivalente da Máquina de Indução, funcionamento em regime permanente, rotor em gaiola dupla, representação por fase.

A potência de entrada para o motor funcionando sem carga representa as perdas por efeito joule no estator e as perdas à vazio que correspondem a soma das perdas no ferro, perdas mecânicas (atrito e ventilação) e perdas suplementares. Para o cálculo de  $r_{fe}$  é necessário separar das perdas à vazio a parcela que corresponde as perdas no ferro (Perdas por Histerese e Foucault). Este valor pode ser obtido através de testes experimentais conforme Norma Brasileira [4]. A potência de entrada e corrente são medidas para o motor operando sem carga e alimentados com diferentes valores de tensão, o que dificulta a realização deste teste em uma planta real. Assim, o circuito equivalente despreza o valor da resistência  $r_{fe}$  pois é superior ao valor da reatância de magnetização  $x_M$ , conforme Figura 2.3. É importante ressaltar que esta estratégia não significa excluir as perdas no ferro. Neste caso, a potência dissipada na resistência  $\frac{r_2}{s}$ , denominada de potência eletromagnética, é o somatório das perdas por efeito joule no rotor, perdas no ferro, perdas por atrito e ventilação, perdas suplementares e a potência mecânica entregue à carga.

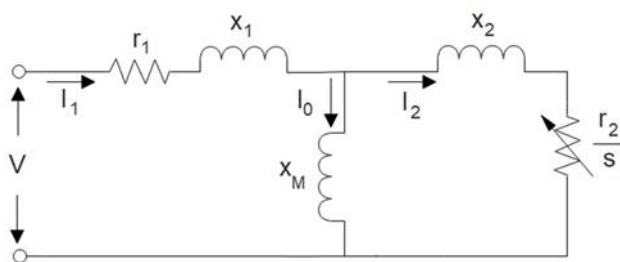


Figura 2.3 Circuito equivalente simplificado da Máquina de Indução Trifásica, funcionamento em regime permanente, representação por fase.

A seguir são explicitadas as equações para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do MIT propostos em dois trabalhos distintos [2][1]. Essas metodologias são utilizadas também como referências para as análises dos resultados obtidos pelo método proposto neste trabalho.

## 2.2 Método de Natarajan e Misra (NM)

No trabalho [2] os autores consideraram desprezíveis: as distorções nos fluxos magnéticos devido aos harmônicos de tempo e de espaço; a saturação magnética e as perdas suplementares. O modelo adotado para representação da máquina de Indução é o da Figura 2.1.

A soma das perdas por atrito e ventilação ( $P_{fw}$ ) e perdas no núcleo ( $P_c$ ) é dada pela variável  $P_{const}$ . A potência de entrada pode ser obtida pela equação 2.1, sendo  $P_{out}$  a potência mecânica de saída (potência entregue à carga),  $I_l$  é a corrente no estator,  $\eta$  é o rendimento.

$$P_{out} \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) = 3I_l^2(r_1+r_2) + P_{const}. \quad (2.1)$$

A equação (2.1) pode ser analisada especificamente para 100% e 50% de carga nominal. A corrente nominal é fornecida pelo fabricante e a corrente a 50% de carga pode ser obtida usando (2.2), em que  $V_l$  é a tensão de linha. O rendimento  $\eta_{50\%}$  e o fator de potência  $(\cos\theta)_{50\%}$ , à 50% da carga, são encontrados também em dados de catálogos. Desses dois pontos de operação, a soma das resistências de estator e de rotor ( $r_1+r_2$ ) e o valor da potência  $P_{const}$  podem ser encontrados.

$$I_{50\%} = \frac{0.5P_{out}}{\sqrt{3}V_l(\cos\theta)_{50\%}\eta_{50\%}} \quad (2.2)$$

Para a determinação do valor da resistência que representa as perdas no ferro ( $r_{fe}$ ), os autores fizeram as seguintes considerações: as perdas no núcleo correspondem a cerca de 50% das perdas constantes e a tensão no ramo de magnetização é igual à tensão no estator:

$$r_{fe} = \frac{3V^2}{0.5P_{const}} \quad (2.3)$$

A partir da determinação de  $r_{fe}$ , pode-se obter a corrente ativa do motor operando sem carga:

$$I_{0r} = \sqrt{\frac{0.5P_{const}}{3r_{fe}}}, \quad (2.4)$$

Pelo diagrama fasorial e, considerando dois pontos de operação, 75% e 100% de carga, pode-se obter a corrente  $I_m$  e a parcela reativa da corrente do rotor ( $I_2 \text{ sen } \varphi_2$ ):

$$(I_2 \text{ sen } \varphi_2) + I_m = I_1 \text{ sen } \varphi. \quad (2.5)$$

A impedância  $X_m$  é calculada assumindo que a tensão no ramo de magnetização ( $E$ ) é aproximadamente igual a tensão de alimentação:

$$X_m = \frac{E}{I_m} \quad (2.6)$$

Assim, a parte real da corrente do rotor é dada pela equação (2.7). E, pode-se obter também o módulo da corrente  $I_2$  por (2.8):

$$(I_2 \text{ cos } \varphi_2) = I_1 \text{ cos } \varphi - I_{0r} \quad (2.7)$$

$$I_2 = \sqrt{(I_2 \text{ cos } \varphi_2)^2 + (I_2 \text{ sin } \varphi_2)^2}. \quad (2.8)$$

Desprezando as perdas por atrito e ventilação é possível encontrar a relação entre potência eletromagnética  $P_{ele}$  e a potência de saída, através de (2.9):

$$P_{ele} = \frac{P_{out}}{(1 - s)}. \quad (2.9)$$

A potência dissipada por efeito joule no rotor é dada pela equação (2.10). De (2.9) e (2.10) obtém-se a resistência do rotor em (2.11):

$$P_{jo2} = sP_{ele}, \quad (2.10)$$

$$r_2 = \frac{sP_{out}}{3I_2^2(1 - s)}. \quad (2.11)$$

Finalmente, a resistência do estator é calculada subtraindo  $r_2$  do valor de resistência obtido na equação (2.1).

As reatâncias de dispersão do estator e do rotor são obtidas através do conhecimento do torque máximo e de partida. A expressão que relaciona o torque desenvolvido com os parâmetros do rotor é dada em (2.12), sendo  $K_1$  uma constante relacionada ao fluxo no entreferro e à velocidade. Para obter a equação do torque de partida ( $T_{st}$ ) basta substituir o escorregamento ( $s$ ) por 1

$$T = \frac{K_1 s E r_2}{r_2^2 + (s x_2)^2}. \quad (2.12)$$

Derivando a equação (2.12) em relação ao escorregamento, pode-se obter a condição de máximo torque dado por (2.13):

$$T_{max} = \frac{K_1 E r_2}{2x_2} \quad (2.13)$$

A reatância do rotor referida ao estator ( $x_2$ ) é obtida usando a relação entre torque de partida ( $T_{st}$ ) e torque máximo ( $T_{max}$ ), conforme mostra a equação (2.14). Para calcular a reatância do estator ( $x_1$ ), é utilizada a relação entre  $x_1$  e  $x_2$ , que depende da categoria do motor definida pelas normas, como mostra a Tabela I.

$$x_2 = \frac{r_2(T_{st}/T_{max})}{1 - \sqrt{1 - (T_{st}/T_{max})^2}} \quad (2.14)$$

Tabela I: Relação entre  $x_1$  e  $x_2$

| IEEE STD. E NEMA |           | NBR 17094-3 |           |
|------------------|-----------|-------------|-----------|
| $x_1/x_2$        | Categoria | $x_1/x_2$   | Categoria |
| 1                | A e D     | 0,78        | D         |
| 0,67             | B         | 0,68        | N         |
| 0,43             | C         | 0,58        | H         |

### 2.3 Método BJSFV

O Método BJSFV foi proposto em [1] e usado em [29] para avaliar ações dos fabricantes para melhorar o rendimento dos motores. Para o desenvolvimento da técnica os autores representaram a máquina de indução pelo circuito equivalente mostrado na Figura 2.1 considerando:

- 1- A potência dissipada na resistência  $r_{fe}$  representa as perdas rotacionais, ou seja, o somatório das perdas por atrito e ventilação, perdas no ferro e suplementares,
- 2- O efeito pelicular, inserindo as variações da resistência e reatância do rotor com escorregamento conforme equações (2.15) e (2.18).

$$g_r = \ln(r_{2st}/r_2)/\sqrt{(1 - s_n)}, \quad (2.15)$$

$$g_x = \ln(x_{2st}/x_{2k})/\sqrt{(1 - s_k)}, \quad (2.16)$$

$$r_2(s) = r_{2st} \exp(g_r \sqrt{1 - s}), \quad (2.17)$$

$$x_2(s) = x_{2st} \exp(g_x \sqrt{1 - s}), \quad (2.18)$$

Os subíndices 'st' e 'k' são utilizados para representar situação de partida e valor correspondente ao torque máximo, respectivamente.



A equação (2.19) é utilizada para o cálculo do escorregamento em função da potência entregue à carga, na região de operação. A dedução desta equação é mostrada no Anexo 1.

$$s = \frac{1}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - 4s_n(1 - s_n) \frac{P}{P_{out}}} \right]. \quad (2.19)$$

O escorregamento relacionado ao torque máximo é calculado em (2.20), em que  $s_n$  é o escorregamento nominal,  $T_{st}$  é o torque de partida em valor por unidade.

$$s_k = s_n \left( T_{st} + \sqrt{T_{st}^2 - 1} \right). \quad (2.20)$$

A corrente de rotor varia com o fator de potência e com o escorregamento de acordo com a equação (2.21). A dedução desta equação, feita por [31], é apresentada no Anexo 2.

$$I_2 = I_1 \cos \left( \sqrt{1 + (s/s_k)^2} \right). \quad (2.21)$$

Para todos os pontos de operação, a equação (2.22) explicita o fluxo de potência na máquina. Desprezando as perdas suplementares, o termo  $P_{rot}$  representa as perdas rotacionais, ou seja, a soma das perdas por atrito e ventilação ( $P_{fw}$ ) e as perdas no ferro ( $P_{ferro}$ ):

$$\frac{P_{out}}{(1 - s)} = \frac{P_{out}}{\eta} - 3r_1 I_1^2 - P_{rot}. \quad (2.22)$$

As perdas por atrito e ventilação são praticamente constantes enquanto as perdas no ferro variam com a carga. Neste trabalho os autores consideram as perdas rotacionais constantes. Desta forma, estas perdas e a resistência do estator podem ser calculadas pela equação (2.23) na qual foi feita um ajuste linear por meio de mínimos quadrados considerando dois pontos de operação

$$r_1 = \text{inclinação} \left[ \frac{P_{out}}{\eta} - \frac{P_{out}}{(1-s)} : 3I_1^2 \right]. \quad (2.23)$$

No momento inicial de partida praticamente toda a energia eletromagnética é dissipada na resistência do rotor. Portanto, o valor da resistência do rotor na partida ( $r_{2st}$ ) pode ser determinada pela equação (2.24)

$$r_{2st} = \frac{P_{out} T_{st}}{3(I_2 I_{st})^2} \frac{n_s}{n_n}. \quad (2.24)$$

As perdas por efeito joule no rotor podem ser explicitada para os três pontos de operação. Desta forma, a resistência do rotor, referida ao estator, pode ser obtida pela equação (2.25)

$$r_2 = \text{inclinação} \left[ \frac{s P_{out}}{(1-s)} : 3I_2^2 \right]. \quad (2.25)$$

As velocidades nominal e síncrona são representadas por  $n_n$  e  $n_s$  respectivamente. Para qualquer ponto de operação a resistência do rotor pode ser determinada pelas equações (2.15), (2.17), (2.24) e (2.25).

A equação (2.26) define a reatância de curto-circuito ( $x_{sc}$ ) e as equações (2.27) e (2.28) permitem o cálculo da reatância do estator ( $x_1$ ) e reatância do rotor na partida ( $x_{2st}$ ).

$$x_{sc} = \sqrt{(V/I_1 I_{st})^2 - (r_1 + r_{2st})^2}, \quad (2.26)$$

$$x_1 = (0.6 - 0.3 \left( \frac{T_{st}}{T_k} \right)) x_{sc}, \quad (2.27)$$

$$x_{2st} = x_{sc} - x_1. \quad (2.28)$$

Derivando a equação do torque desenvolvido pelo motor em relação ao escorregamento, pode-se obter a equação (2.29):

$$x_{2k} = \frac{r_{2k}}{s_k}. \quad (2.29)$$

De posse do valor da reatância do rotor na partida a reatância para qualquer ponto de operação é calculada, utilizando as expressões (2.16), (2.18), (2.28) e (2.29).

Aplicando a Lei de Kirchhoff das tensões, o valor aproximado da tensão no ramo de magnetização é dado pela equação:

$$E = V_1 - I_1 \sqrt{(r_1^2 + x_1^2)}. \quad (2.30)$$

As perdas rotacionais obtidas em (2.22) serão utilizadas para o cálculo da resistência  $r_{fe}$

$$r_{fe} = \frac{3E^2}{P_{rot}} \quad (2.31)$$

A reatância de magnetização é dada pela equação:

$$x_m = \frac{E}{\sqrt{I_1^2 - I_2^2 - \left(\frac{E}{r_{fe}}\right)^2}} \quad (2.32)$$

## 2.4 Método Proposto

A metodologia proposta foi construída considerando o circuito equivalente representado na Figura 2.3 e as seguintes afirmações e simplificações:

- I. O modelo é válido para a região normal de operação:  $s \in [s_k s_v]$ , onde  $s$  é o escorregamento,  $s_k$  é o escorregamento correspondente ao torque eletromagnético máximo e  $s_v$  é o escorregamento sem carga (vazio). A Figura 2.4 mostra o gráfico de torque por velocidade, a região normal de operação é aquela à direita do ponto marcado.

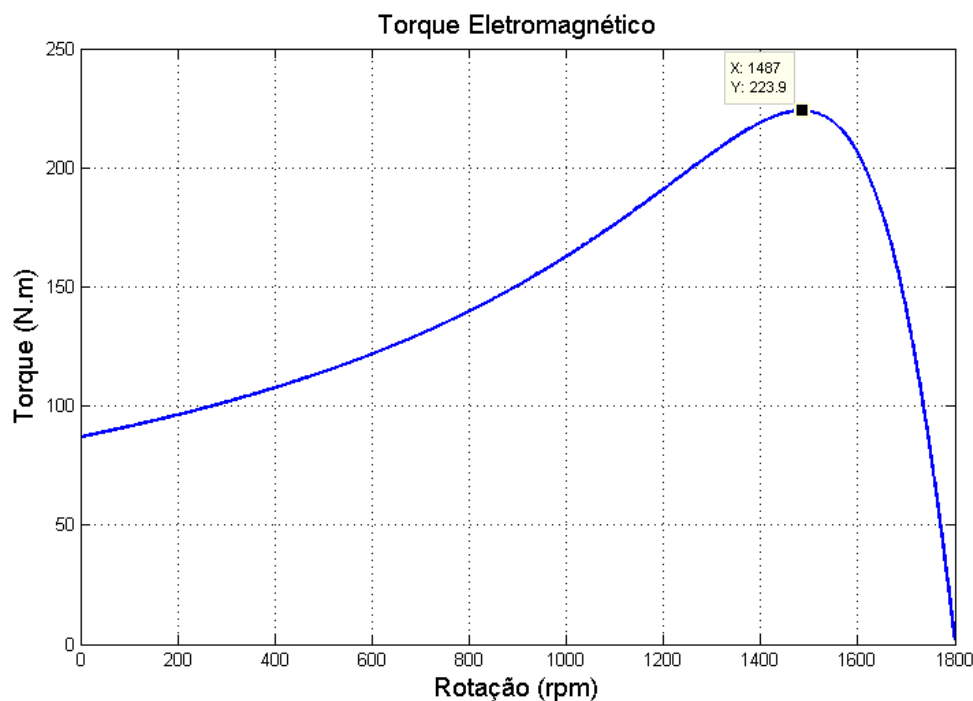


Figura 2.4 Curva típica de Torque x Velocidade de um Motor de Indução Trifásico (Categoria N)

- II. Na região de funcionamento normal:
  - a. Saturação magnética e efeito pelicular são desprezíveis;

- b. Os parâmetros são constantes;
- c. A soma das perdas por atrito e ventilação, magnéticas e suplementares é constante e será chamada de perdas rotacionais  $P_{rot}$ .

III. A variação de  $s$ , em relação à potência de saída, foi considerada linear.

O balanço energético de potência ativa é descrito pela equação (2.33):

$$P_{out} = P_1 - P_{j1} - P_{j2} - P_{rot}. \quad (2.33)$$

Sendo  $P_{out}$  a potência de saída,  $P_1$  a potência de entrada,  $P_{j1}$  as perdas joulicas no enrolamento do estator,  $P_{j2}$  as perdas joulicas no enrolamento do rotor e  $P_{rot}$  as perdas rotacionais.

#### A. Cálculo de $r_1$ e $P_{rot}$

A equação (2.33) pode ser reescrita como:

$$P_{out} = P_1 - P_{j1} - sP_{ag} - P_{rot}, \quad (2.34)$$

$$P_{out} = P_1 - P_{j1} - s(P_1 - P_{j1}) - P_{rot}, \quad (2.35)$$

$$P_{out} = (1 - s)(P_1 - P_{j1}) - P_{rot}, \quad (2.36)$$

$$P_{out} = (1 - s)P_1 - (1 - s)P_{j1} - P_{rot}, \quad (2.37)$$

$$P_{out} - (1 - s)P_1 = - (1 - s)3R_1I_1^2 - P_{rot}, \quad (2.38)$$

$$P_{out} - (1 - s)P_1 = [-(1 - s)3I_1^2 \quad -1] \begin{bmatrix} R_1 \\ P_{rot} \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Sendo  $P_{ag}$  a potência eletromagnética.

Considerando que, normalmente, nos catálogos de fabricantes de motores tem-se dados referentes a 50%, 75% 100% da carga nominal, pode-se escrever a equação (2.39) como:

$$\begin{bmatrix} P_{out_{50}} - (1 - s_{50})P_{1_{50}} \\ P_{out_{75}} - (1 - s_{75})P_{1_{75}} \\ P_{out_{100}} - (1 - s_{100})P_{1_{100}} \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} -(1 - s_{50})3I_{1_{50}}^2 & -1 \\ -(1 - s_{75})3I_{1_{75}}^2 & -1 \\ -(1 - s_{100})3I_{1_{100}}^2 & -1 \end{bmatrix}_{3 \times 2} \begin{bmatrix} R_1 \\ P_{rot} \end{bmatrix}_{2 \times 1}. \quad (2.40)$$

A variação do escorregamento foi considerada linear, ou seja,

$$s_{50} = 0,5s_n = 0,5s_{100}, \quad (2.41)$$

$$s_{75} = 0,75s_n = 0,75s_{100}. \quad (2.42)$$

Sendo  $s_n$  o escorregamento em potência nominal.

Para se obter a corrente do estator no  $i$ -ésimo ponto de carga ( $I_{1i}$ ) foi utilizada a expressão:

$$I_{1i} = \frac{P_{out_i}}{\eta_i 3V_n f p_i}. \quad (2.43)$$

A potência de saída ( $P_{out_i}$ ), o rendimento ( $\eta_i$ ) e o fator de potência ( $f p_i$ ) são encontrados nos catálogos dos fabricantes para cada um dos pontos de carga  $i$ .  $V_n$  é a tensão de fase na conexão estrela.

A equação (2.40), por conveniência, será reescrita como (2.44), considerando os três pontos de operação:

$$Y_{3 \times 1} = \psi_{3 \times 2} \theta_{2 \times 1}. \quad (2.44)$$

A equação (2.44) é uma matriz de regressão. Assim, pode-se obter a matriz  $\theta$  por meio de mínimos quadrados, ou seja,

$$\theta = (\psi' \psi)^{-1} \psi' Y. \quad (2.45)$$

Assim,  $r_1 = \theta(1,1)$  e  $P_{rot} = \theta(2,1)$ .

## B. Cálculo de $r_2$

Também do balanço energético tem-se que

$$P_{out} + P_{rot} = P_{mec}, \quad (2.46)$$

$$P_{mec} = (1 - s)P_{ag}, \quad (2.47)$$

$$P_{j2} = sP_{ag}. \quad (2.48)$$

Sendo  $P_{mec}$  a potência mecânica.

Combinando as equações (2.46), (2.47) e (2.48) tem-se que

$$P_{j2} = \frac{s(P_{out} + P_{rot})}{(1 - s)}. \quad (2.49)$$

Para que se possa utilizar a equação (2.49) para calcular  $r_2$  é necessário ter uma estimativa da corrente  $I_2$ . Considerando baixos valores para o escorregamento, a corrente do rotor pode ser aproximada pela equação (2.50)

$$I_2 = \sqrt{I_1^2 - I_0^2}. \quad (2.50)$$

Sendo  $I_0$  a corrente de magnetização.

Combinando as equações (2.49) e (2.50) e considerando a corrente  $I_0$  constante tem-se:

$$P_{j2} = 3r_2 I_2^2 = 3r_2 (I_1^2 - I_0^2), \quad (2.51)$$

$$P_{j2} = 3r_2 I_1^2 - 3r_2 I_0^2, \quad (2.52)$$

$$P_{j2} = 3r_2 I_1^2 + k. \quad (2.53)$$

Em que  $k$  é uma constante. Com as equações (2.49) e (2.53) pode-se construir a equação de regressão para  $r_2$ :

$$\frac{(1-s)(P_{out} + P_{rot})}{s} = 3r_2 I_1^2 + k, \quad (2.54)$$

$$\frac{(1-s)(P_{out} + P_{rot})}{s} = [3I_1^2 \quad 1] \begin{bmatrix} r_2 \\ k \end{bmatrix}. \quad (2.55)$$

Tomando os pontos de carga do catálogo e considerando que as perdas  $P_{rot}$  foram estimadas, a equação (2.55) pode ser escrita na forma de regressão como:

$$Y_{2 \times 3x1} = \psi_{2 \times 3x2} \theta_{2 \times 2x1}. \quad (2.56)$$

$\theta_2$  também pode ser obtido por meio de mínimos quadrados, ou seja,

$$\theta_2 = (\psi_2' \psi_2)^{-1} \psi_2' Y_2. \quad (2.57)$$

Assim,  $r_2 = \theta_2(1,1)$ .

### C. Determinação das reatâncias $x_1$ , $x_2$ e $x_M$

Para determinar a relação entre  $x_1$  e  $x_2$  é utilizada a relação (2.58)

$$x_2 = \frac{x_1}{a}. \quad (2.58)$$

sendo  $a$  uma constante que depende da categoria do motor (Tabela II).

Tabela II: Relação entre  $x_1$  e  $x_2$

| IEEE STD. E NEMA |           | NBR 17094-3 |           |
|------------------|-----------|-------------|-----------|
| $x_1/x_2$        | Categoria | $x_1/x_2$   | Categoria |
| 1                | A e D     | 0.78        | D         |
| 0.67             | B         | 0.68        | N         |
| 0.43             | C         | 0.58        | H         |

Com a utilização desta relação o número de parâmetros que faltam ser determinados caiu de 3 para 2. Assim, são necessárias duas equações para obter  $x_1$  e  $x_M$ . O equacionamento para a obtenção destes dois parâmetros se dá a partir do balanço de potência reativa no motor e aplicando lei de Kirchhoff das tensões (LKT) na malha composta pelo ramo de magnetização e o ramo do rotor.

O ramo de magnetização está em paralelo com o ramo do rotor como pode ser visto na Figura 2.3. Logo, pode-se concluir que:

$$I_0 x_M = I_2 \sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}. \quad (2.59)$$

Isolando  $x_M$  e elevando os dois lados da equação ao quadrado tem-se:

$$x_M^2 = \left(\frac{I_2}{I_0}\right)^2 \left[\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2\right]. \quad (2.60)$$

O balanço de potência reativa é:

$$Q = 3x_1 I_1^2 + 3x_M I_0^2 + 3x_2 I_2^2, \quad (2.61)$$

$$Q = 3x_1 I_1^2 + 3x_M I_0^2 + 3\left(\frac{x_1}{a}\right)(I_1^2 - I_0^2), \quad (2.62)$$

$$3x_M I_0^2 = Q - 3\left(I_1^2 + \frac{I_1^2}{a} - \frac{I_0^2}{a}\right)x_1. \quad (2.63)$$

Finalmente, substituindo a equação (2.60) na equação (2.63) obtém-se um polinômio de 2º grau em  $x_1$ :

$$Ax_1^2 + Bx_1 + C = 0. \quad (2.64)$$

onde

$$A = \frac{9(I_0^4 - I_0^2 I_1^2 + (I_1^2 a - I_0^2 + I_1^2)^2)}{a^2}, \quad (2.65)$$

$$B = -\frac{6Q(I_1^2 a + I_0^2 - I_1^2)}{a}, \quad (2.66)$$

$$C = \frac{9I_0^4 r_2^2 - 9I_0^2 I_1^2 r_2^2 + Q^2 s^2}{s^2}. \quad (2.67)$$

Resolvendo a equação (2.64) obtém-se  $x_1$  pela equação quadrática

$$x_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (2.68)$$

Todos os valores usados para estimar  $x_1$  são valores nominais.

A potência reativa total é obtida na equação (2.69), também no ponto de carga nominal:

$$Q = Q_{TN} = \frac{P_{outN}}{\eta_N f p_N} \text{sen}(\cos^{-1}(fp_N)). \quad (2.69)$$

A corrente  $I_0$  é dada pela equação (2.70)

$$I_0 = \sqrt{\frac{3r_2 I_1^2 - \frac{(P_{outN} + P_{rot})}{(1 - s_n)} s_n}{3r_2}}. \quad (2.70)$$

## 2.5 Dados de Catálogo de cada método

A tabela III mostra os dados de catálogo usados por cada um dos métodos. É importante ressaltar que os dados fornecidos na placa dos motores tais como tensão, corrente e velocidade são necessários para a estimação dos parâmetros pelos três métodos.

Tabela III: Dados de catálogo usados por cada método

| Dados Utilizados    | NM         | BJSFV           | Proposto        |
|---------------------|------------|-----------------|-----------------|
| Corrente            | 75% e 100% | 50%, 75% e 100% | 50%, 75% e 100% |
| Rendimento          | 75% e 100% | 50%, 75% e 100% | 50%, 75% e 100% |
| Fator de Potência   | 75% e 100% | 50%, 75% e 100% | 50%, 75% e 100% |
| Torque Máximo       | Sim        | Sim             | Não             |
| Torque de Partida   | Sim        | Sim             | Não             |
| Corrente de Partida | Não        | Sim             | Não             |



## Capítulo 3 - Análise dos Resultados

Para apresentar uma análise consistente do método proposto, este foi testado em 916 motores (789 da categoria N e 127 da categoria D) de 3 fabricantes distintos, e com potência dentro da faixa de 1 a 700 HP. Esses dados podem ser encontrados em [32][33][34]. Máquinas cujo torque de partida ( $T_{st}$ ) é maior do que o torque máximo ( $T_k$ ) não foram incluídas, pois o método NM [2] falha para estes casos. Os dados foram obtidos e armazenados através do *Excel* do pacote *Microsoft Office* (usado para grandes bases de dados) e os cálculos feitos com o *software Matlab*.

Apesar de encontrarem de prontidão os parâmetros do circuito equivalente, métodos clássicos de estimação (ensaios a vazio e de rotor travado) não são práticos, principalmente considerando, neste trabalho, o alto número de máquinas testadas. Portanto, a avaliação do método proposto é feita através da análise de quanto duas variáveis calculadas (rendimento e fator de potência) se diferem dos valores fornecidos nos catálogos para três condições de operação: 50%, 75% e 100% de carga nominal.

Para destacar a precisão do método proposto os resultados no cálculo do rendimento e fator de potência foram comparados com os obtidos utilizando as técnicas NM [2] e BJSFV [29]. Escolheu-se o algoritmo NM por ser uma abordagem pioneira na área de estimação de parâmetros utilizando dados de catálogo e a BJSFV por ser uma técnica publicada recentemente.

### 3.1 Motores Categoria N

#### 3.1.1 Análise de Rendimento

As Figuras 3.1 a 3.3 mostram os erros na estimação de rendimento usando os parâmetros obtidos por método para todos os motores em três condições de carga: 100%, 75% e 50% de carga nominal. Os erros foram obtidos através das diferenças entre os valores de rendimento fornecidos pelos fabricantes e aqueles calculados pelos métodos. Para a maioria das máquinas simuladas, o método proposto mostra desempenho superior às técnicas intituladas NM e BJSFV.

A Figura 3.4 também corrobora a qualidade do método proposto, mostrando o *boxplot* dos gráficos 3.1 a 3.3. As caixas mostram as faixas nos quais os resultados estatisticamente significantes se encontram enquanto os símbolos '+' em vermelho são anomalias e desconsiderados da análise estatística [35]. Os limites das caixas mostram o

primeiro e terceiro quartis, e a linha que divide tal caixa ao meio denota a mediana. Esses quartis são valores que dividem o conjunto de amostra em quatro partes iguais, ou seja, entre cada um desses valores fica 25% da amostra ordenada. Observa-se, para todas as situações, que a caixa do método proposto é muito mais estreita e próxima de 0 do que os outros, o que significa que é mais precisa e confiável do que NM e BJSFV. Os maiores erros ocorreram para motores de baixa potência (abaixo de 5HP). No caso do método proposto, este fato ocorreu devido à aproximação adotada para o cálculo da corrente do rotor (equação 2.50) e esses dados correspondem à valores discrepantes na Figura 3.4.

A Tabela IV mostra as estatísticas do erro na estimação de rendimento. Os erros próximos de zero e os baixos valores do desvio padrão indicam a alta precisão do método proposto.

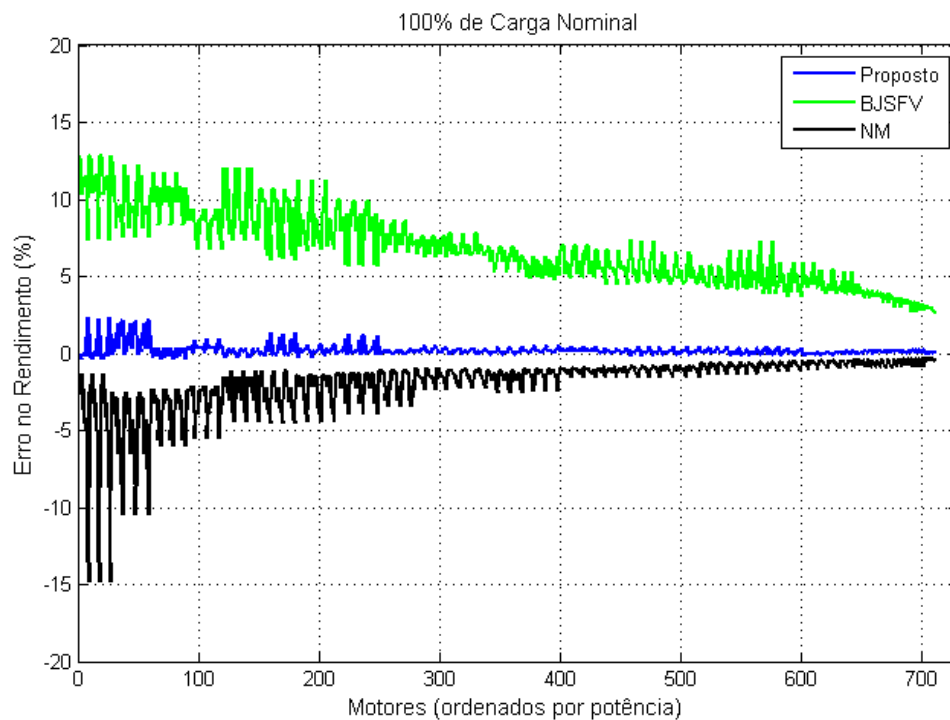


Figura 3.1 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 100% de carga – Categoria N

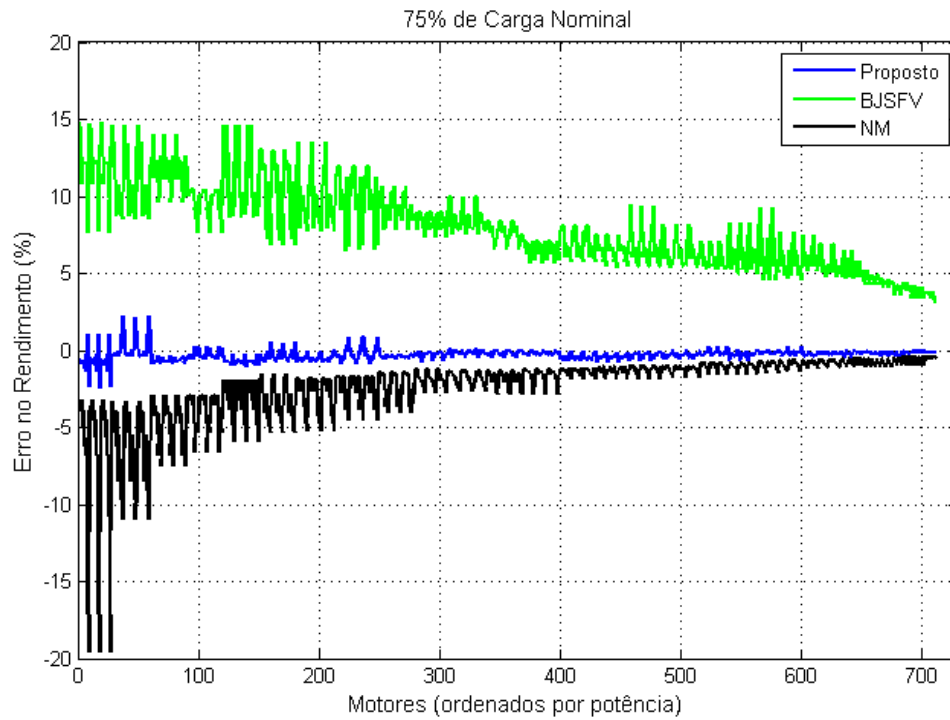


Figura 3.2 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 75% de carga – Categoria N

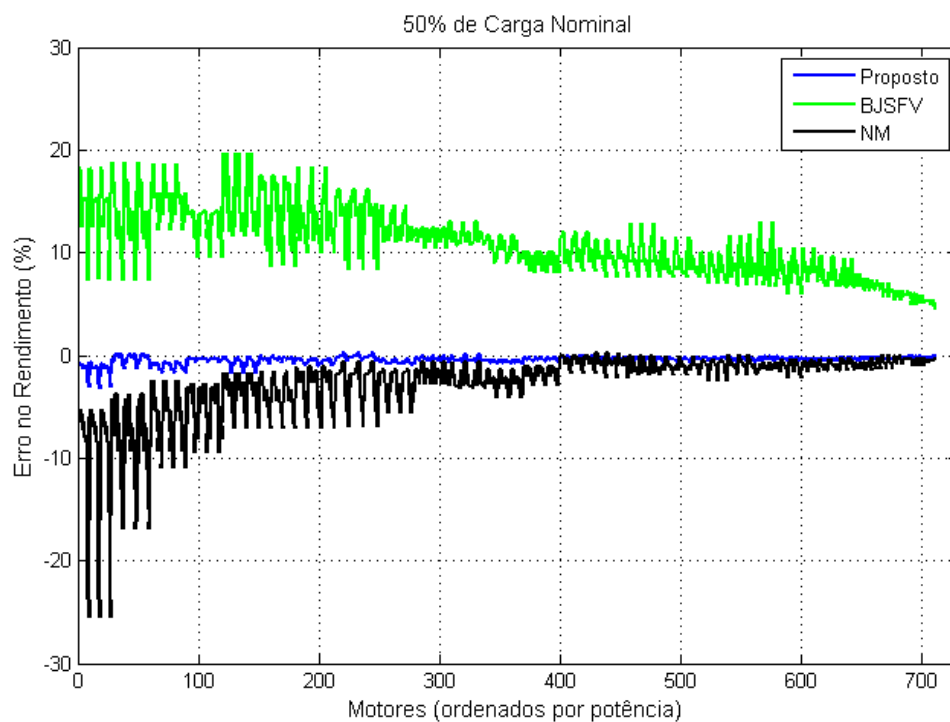


Figura 3.3 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 50% de carga – Categoria N

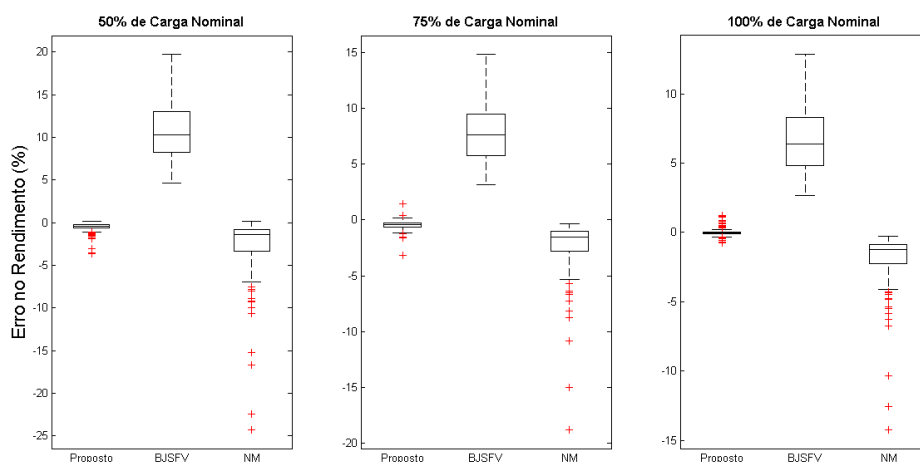


Figura 3.4 *Boxplots* da estimação de rendimento – Categoria N

Tabela IV: Estatísticas do Erro na Estimação do Rendimento – Categoria N

| MÉTODO          | CARGA NOMINAL | MÉDIA (%)     | Mediana (%)   | Desvio Padrão (%) |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
| <b>Proposto</b> |               | <b>0.159</b>  | <b>0.093</b>  | <b>0.342</b>      |
| BJSFV           | 100%          | 6.709         | 6.442         | 2.269             |
| NM              |               | -1.817        | -1.296        | 1.636             |
| <b>Proposto</b> |               | <b>-0.314</b> | <b>-0.279</b> | <b>0.362</b>      |
| BJSFV           | 75%           | 7.765         | 7.400         | 2.515             |
| NM              |               | -2.255        | -1.553        | 2.076             |
| <b>Proposto</b> |               | <b>-0.437</b> | <b>-0.346</b> | <b>0.392</b>      |
| BJSFV           | 50%           | 10.445        | 10.025        | 3.140             |
| NM              |               | -2.630        | -1.561        | 2.978             |

### 3.1.2 Análise de Fator de Potência

As Figuras 3.5 a 3.7 mostram os erros na estimação de fator de potência usando os parâmetros obtidos por método para todos os motores a 100%, 75% e 50% de carga respectivamente. A Figura 3.8 mostra o *boxplot* dos dados apresentados nas Figuras 3.5 a 3.7. É possível observar que o método proposto é, novamente, o mais preciso de todos, ficando mais próximo de 0% de erro, conforme mostram os *boxplots*. Além disso, a técnica proposta apresenta uma boa estimação independentemente da potência do motor,

enquanto o método de BJSFV apresenta um erro elevado para baixa potência e NM mostra imprecisão para potências muito altas e muito baixas.

A Tabela V mostra a estatística dos erros na estimação do fator de potência para cada um dos três métodos, de forma que é visível o melhor desempenho da técnica proposta, mesmo adotando o circuito equivalente simplificado, que aglutina as perdas no ferro e as perdas por atrito e ventilação. Analisando a média e mediana dos erros para 50% de carga nominal pode-se concluir, de forma errada, que o método de BJSFV trouxe melhores resultados do que os encontrados pelo método proposto e o método BJSFV. Porém, observando a Figura 3.7, nota-se que o conjunto de dados está muito mais espalhado e distante de zero do que o do método proposto. Em resumo, erros positivos muito elevados e erros negativos muito altos resultam em baixos valores de média e mediana.

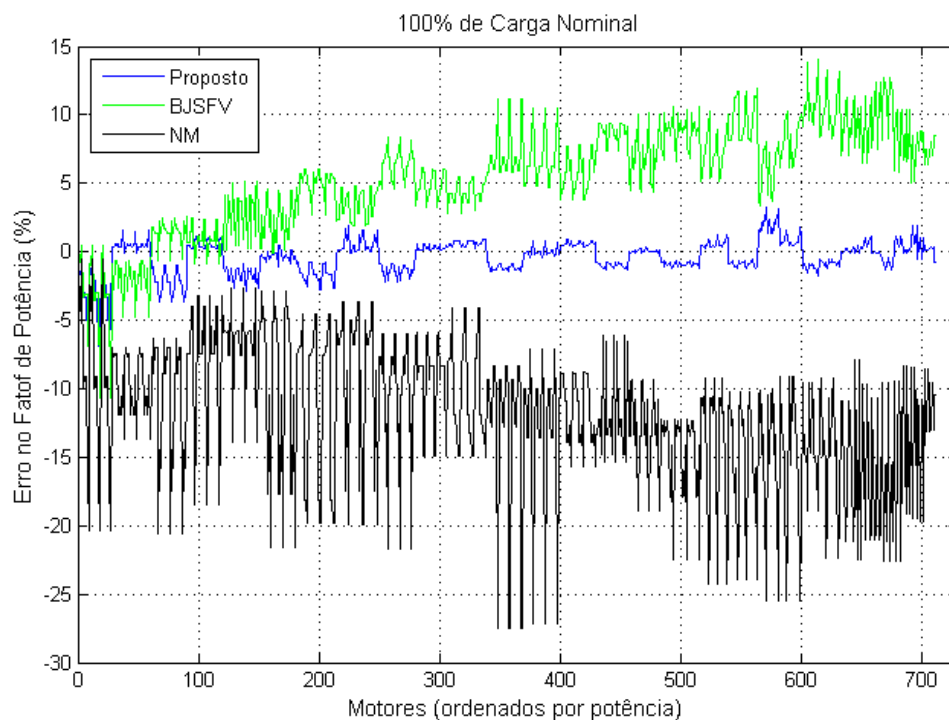


Figura 3.5 Estimação de Fator de Potência, comparação entre os métodos. 100% de carga – Categoria N

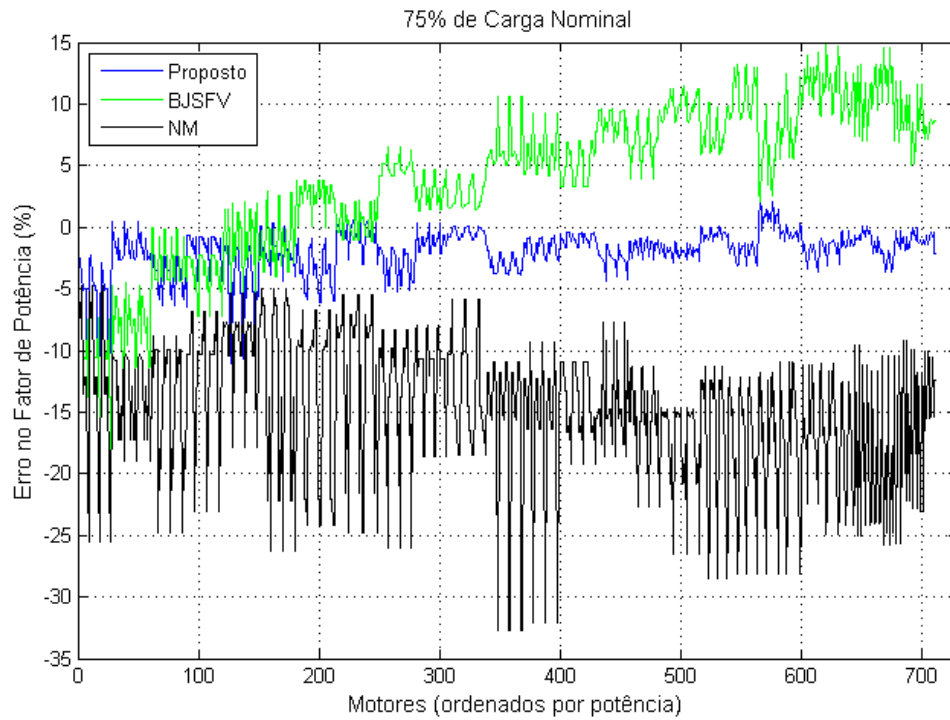


Figura 3.6 Estimação de Fator de Potência, comparação entre os métodos. 75% de carga – Categoria N

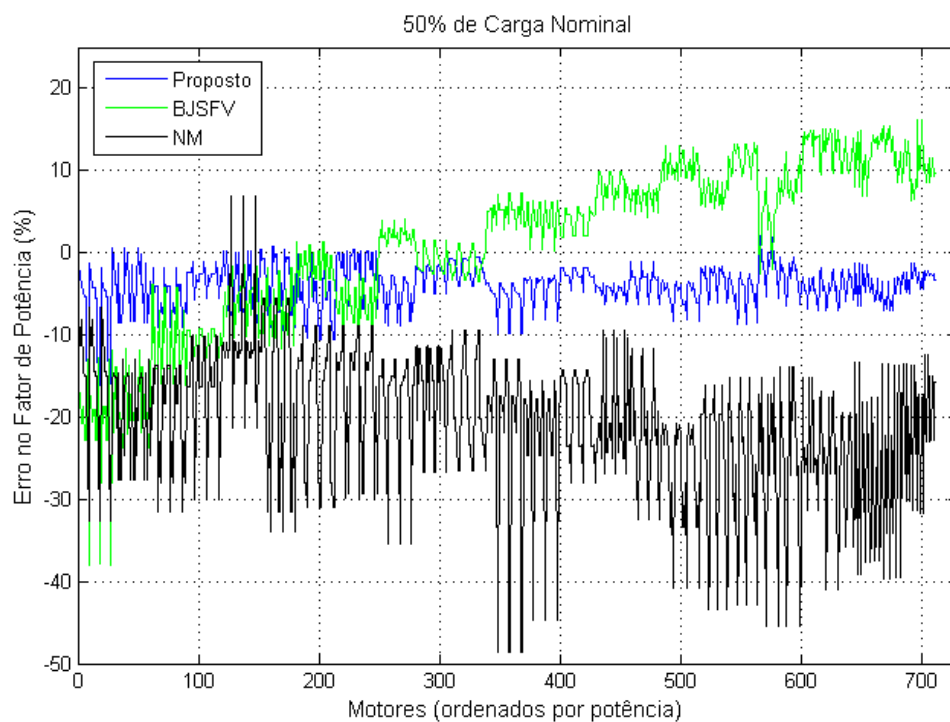


Figura 3.7 Estimação de Fator de Potência, comparação entre os métodos. 50% de carga – Categoria N

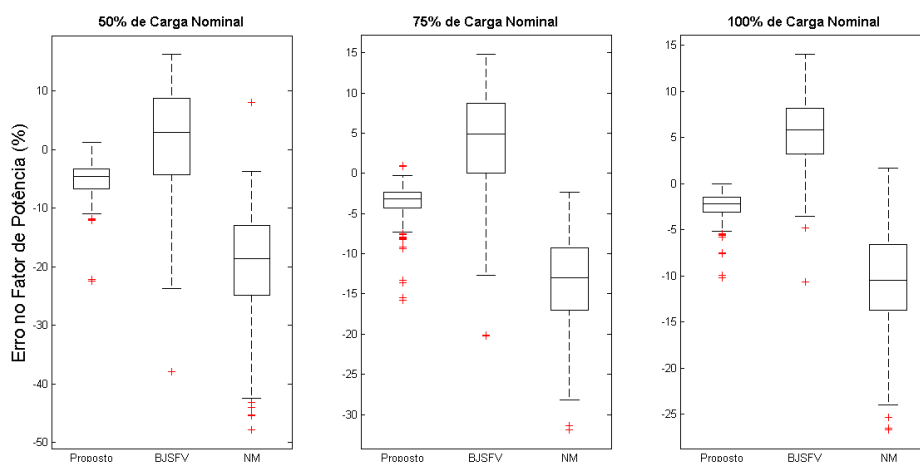


Figura 3.8 *Boxplot* da estimação de Fator de Potência – Categoria N

Tabela V: Estatísticas do Erro na Estimação de Fator de Potência – Categoria N

| MÉTODO          | CARGA NOMINAL | MÉDIA (%)     | Mediana (%)   | Desvio Padrão (%) |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
| <b>Proposto</b> |               | <b>-0.388</b> | <b>-0.109</b> | <b>1.373</b>      |
| BJSFV           | 100%          | 6.738         | 7.105         | 3.953             |
| NM              |               | -11.548       | -10.853       | 5.440             |
| <b>Proposto</b> |               | <b>-1.930</b> | <b>-1.571</b> | <b>1.853</b>      |
| BJSFV           | 75%           | 4.253         | 5.063         | 5.745             |
| NM              |               | -14.360       | -13.484       | 5.942             |
| <b>Proposto</b> |               | <b>-3.917</b> | <b>-3.604</b> | <b>2.526</b>      |
| BJSFV           | 50%           | 0.081         | 1.593         | 9.231             |
| NM              |               | -20.327       | -18.999       | 9.063             |

### 3.1.3 Estudo de Caso

Finalmente, para mostrar um detalhamento maior dos resultados, foi feito um estudo de caso com um motor de 5 HP da WEG (W22, IR2). É importante ressaltar que esta é uma das máquinas que mostra um dos maiores erros para o método proposto. A Tabela VI apresenta os dados de catálogo do motor, enquanto a Tabela VII exhibe os parâmetros estimados para o método proposto em comparação com BJSFV e NM.

Como não existe informação de catálogo para os dados da Tabela 3.4, não é permitido verificar diretamente como o modelo proposto se aproxima dos valores reais. Porém, os gráficos de rendimento e fator de potência são mostrados em catálogo, tornando possível uma comparação entre estes e os gráficos produzidos através da estimação. As Figuras 3.9 e 3.10 mostram tais gráficos. Ambas as imagens confirmam a precisão da técnica proposta, cujas curvas estão mais próximas às do fabricante (principalmente em relação ao rendimento). Já as curvas obtidas com os parâmetros estimados por BJSFV e NM mostram maiores desvios quando comparadas às do fabricante.

Tabela VI: Dados de Catálogo do Motor de 5 HP – Categoria N

| $P_{out}$ (HP) | $V$ (V)       | $freq$ (Hz)    | $I_1$ (A) | $Polos$      |
|----------------|---------------|----------------|-----------|--------------|
| 5              | 220           | 60             | 12.6      | 2            |
| $\eta_{50\%}$  | $\eta_{75\%}$ | $\eta_{100\%}$ | $n$ (rpm) | $I_{st}/I_1$ |
| 85.5           | 87.1          | 87.6           | 3500      | 7.3          |
| $fp_{50\%}$    | $fp_{75\%}$   | $fp_{100\%}$   | $T_k/T_n$ | $T_{st}/T_n$ |
| 0.74           | 0.83          | 0.88           | 3.3       | 2.2          |

Tabela VII: Comparação entre valores estimados – Categoria N

| MÉTODO          | $r_1$ ( $\Omega$ ) | $r_2$ ( $\Omega$ )    | $x_1$ ( $\Omega$ ) | $x_2$ ( $\Omega$ ) |
|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Proposto</b> | <b>0.4249</b>      | <b>0.2782</b>         | <b>0.5244</b>      | <b>0.7711</b>      |
| BJSFV           | 0.4337             | 0.2756                | 0.4388             | 2.5862             |
| NM              | 0.3629             | 0.2979                | 0.5304             | 0.7799             |
| Método          | $x_M$ ( $\Omega$ ) | $r_{fe}$ ( $\Omega$ ) | $P_{rot}$ (W)      |                    |
| <b>Proposto</b> | <b>23.9730</b>     | -                     | <b>212.0300</b>    |                    |
| BJSFV           | 22.9602            | 66.4252               | 209.2188           |                    |
| NM              | 28.2138            | 461.4789              | 209.7604           |                    |



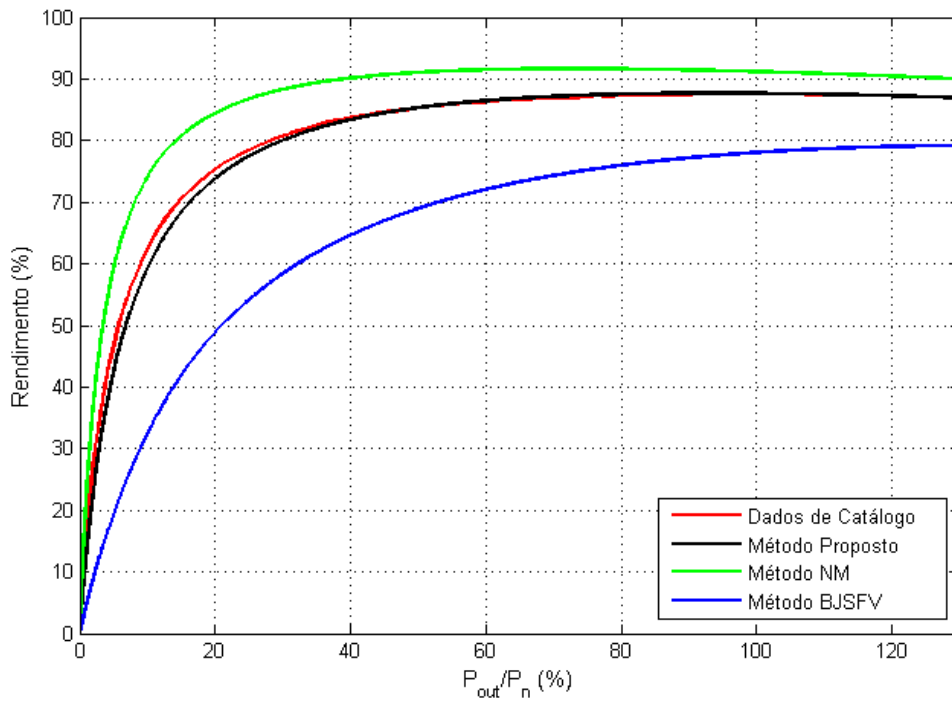


Figura 3.9 Curvas de Rendimento para o motor de 5 HP – Categoria N

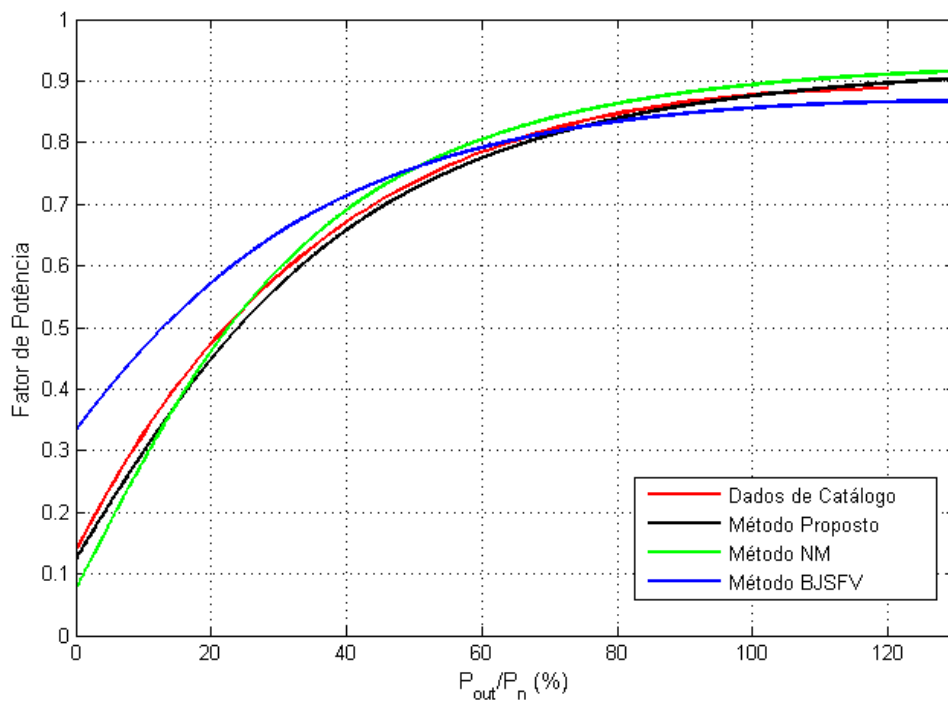


Figura 3.10 Curvas de Fator de Potência para o motor de 5 HP – Categoria N

### 3.2 Motores Categoria D

Assim como foi feito para os motores de categoria N, todos os cálculos e simulações foram realizados no *Matlab*. Os motores de categoria D tem como uma das principais características o alto conjugado de partida, que é justamente o momento em que ele atinge seu valor máximo ( $T_{st} = T_k$ ).

O Método BJSFV, proposto em [29], apresentou problemas em sua estimação para motores desta categoria, pois o parâmetro  $x_2$  dá como resultado uma indeterminação matemática, que o *Matlab* considera o resultado como infinito. Isso acontece no cálculo de  $g_x$ , na equação (2.16)

$$g_x = \ln(x_{2st}/x_{2k})/\sqrt{(1 - s_k)}. \quad (2.16)$$

Conforme mencionado anteriormente, para motores de categoria D, o valor de torque máximo acontece no momento de partida, ou seja, o escorregamento no qual ocorre o torque máximo ( $s_k$ ) é sempre 1. Ao se substituir esta variável na equação (2.16) tem-se uma fração na qual o denominador é zero, levando então o valor de  $g_x$  a infinito. Com isso, esse valor de infinito será usado na equação (2.18) para estimar  $x_2$ , que faz com que este parâmetro também seja infinito

$$x_2(s) = x_{2st} \exp(g_x \sqrt{1 - s}). \quad (2.18)$$

Este erro acontece para todos os motores desta categoria já que está atrelado a uma característica específica desta categoria. Assim, a estimação de rendimento e fator de potência fica muito prejudicada, apresentando resultados sem significado físico. Por isso, este método foi considerado inapropriado para a estimação deste tipo de máquina, não tendo sido, portanto, comparado com os valores obtidos pelo método proposto.

Já o método proposto e o NM [2] se mostraram aptos a fazer a estimação, sendo este utilizado para analisar a eficiência do método proposto para motores de categoria D, de forma similar ao que foi feito para os motores de categoria N.

#### 3.2.1 Análise de Rendimento

Assim como na seção 3.1, todos os cálculos foram realizados através do *Matlab* e todos os gráficos extraídos foram similares aos da seção anterior. As Figuras 3.11 a 3.13 mostram os erros na estimação de rendimento para cada ponto de carga analisado. Na grande maioria das máquinas simuladas o método proposto se mostrou consideravelmente superior ao NM.

Outra maneira de se observar os resultados é através dos *boxplots* mostrados na Figura 3.14. A caixa do método proposto é muito mais estreita do que a do NM apresentando um erro praticamente nulo para 100% de carga e muito próxima disto para 50%. A Tabela VIII também corrobora este fato, mostrando os dados estatísticos da estimação. Para todos os dados extraídos (média, mediana e desvio padrão) o método proposto apresentou resultados melhores (mais próximos de zero).

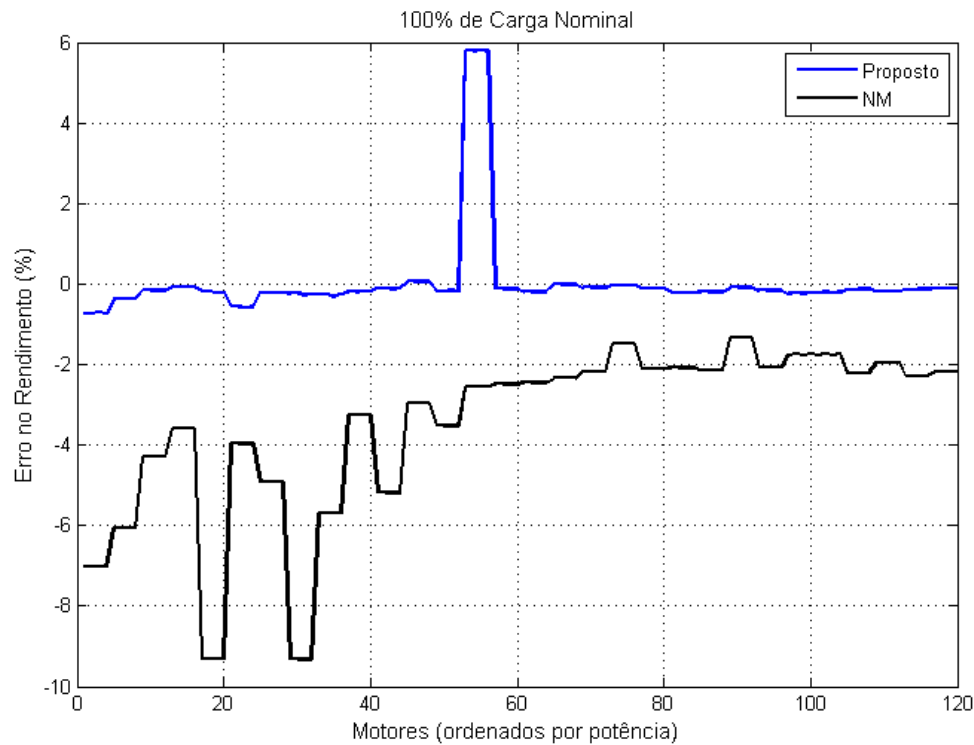


Figura 3.11 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 100% de carga – Categoria D

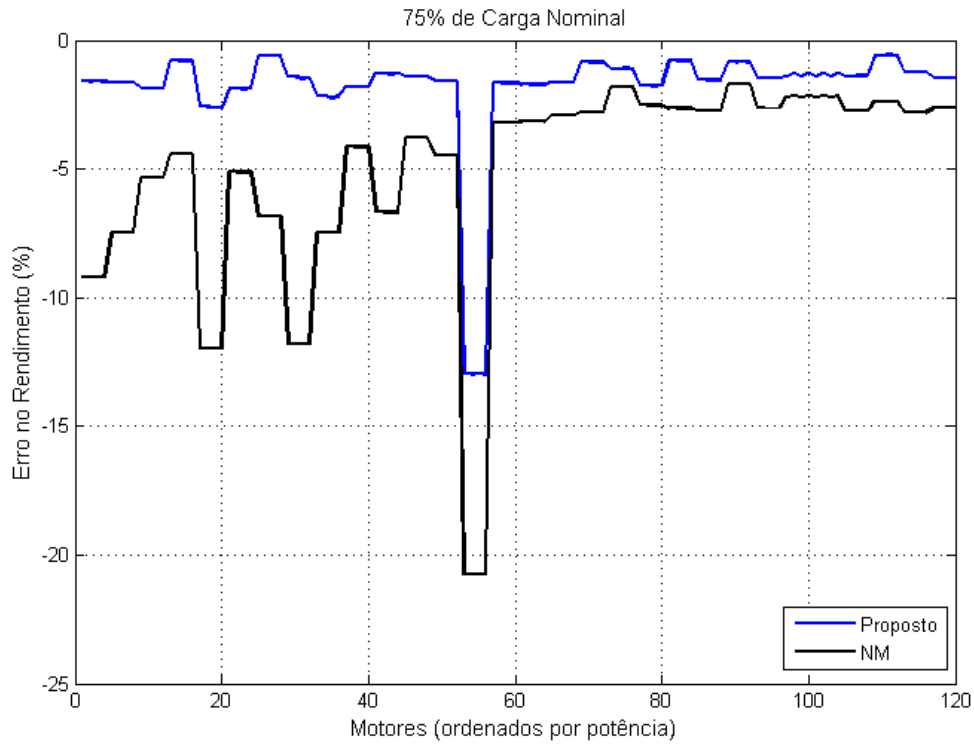


Figura 3.12 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 75% de carga – Categoria D

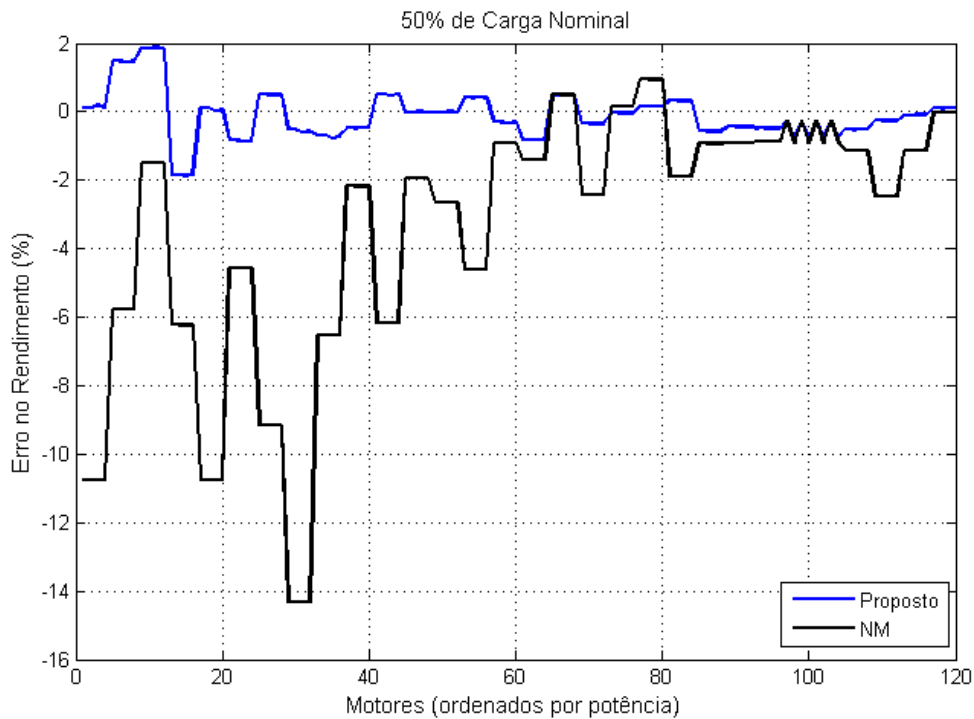


Figura 3.13 Estimação de Rendimento, comparação entre os métodos: 50% de carga – Categoria D

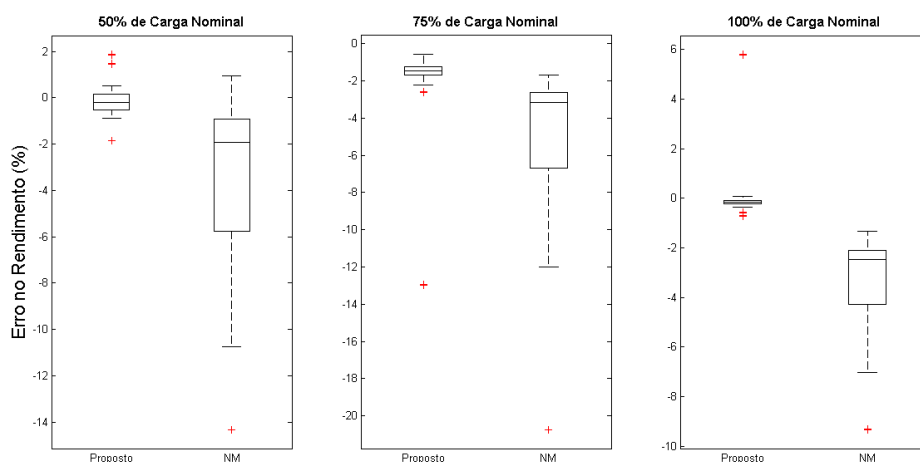


Figura 3.14 *Boxplots* da estimação de rendimento – Categoria D

Tabela VIII: Estatísticas do Erro na Estimação de Rendimento – Categoria D

| Método          | Carga Nominal | Média (%)       | Mediana (%)    | Desvio Padrão (%) |
|-----------------|---------------|-----------------|----------------|-------------------|
| <b>Proposto</b> | 100%          | <b>0,1500</b>   | <b>-0,0351</b> | <b>1,1433</b>     |
| NM              |               | -3,7982         | -2,6835        | 2,3337            |
| <b>Proposto</b> | 75%           | <b>- 1,7027</b> | <b>-1,3696</b> | <b>2,0754</b>     |
| NM              |               | - 5,3973        | -3,3921        | 4,1656            |
| <b>Proposto</b> | 50%           | <b>-0,0400</b>  | <b>-0,1460</b> | <b>0,6716</b>     |
| NM              |               | -3,8795         | - 2,5355       | 4,0473            |

### 3.2.2 Análise de Fator de Potência

As Figuras 3.15 a 3.17 mostram os erros na estimação do fator de potência para os três pontos de carga estudados. Já a Figura 3.18 mostra os *boxplots* dos gráficos 3.15 a 3.17. O método proposto novamente mostrou bons resultados apresentando baixos erros na estimação para a maioria dos motores em todas as condições de carga. O método NM mostrou uma grande dificuldade para o caso de plena carga. Isto pode ser observado tanto nas imagens quanto na Tabela IX que mostra que tal método apresenta elevados valores de média, mediana e desvio padrão do erro para esta condição de carga.

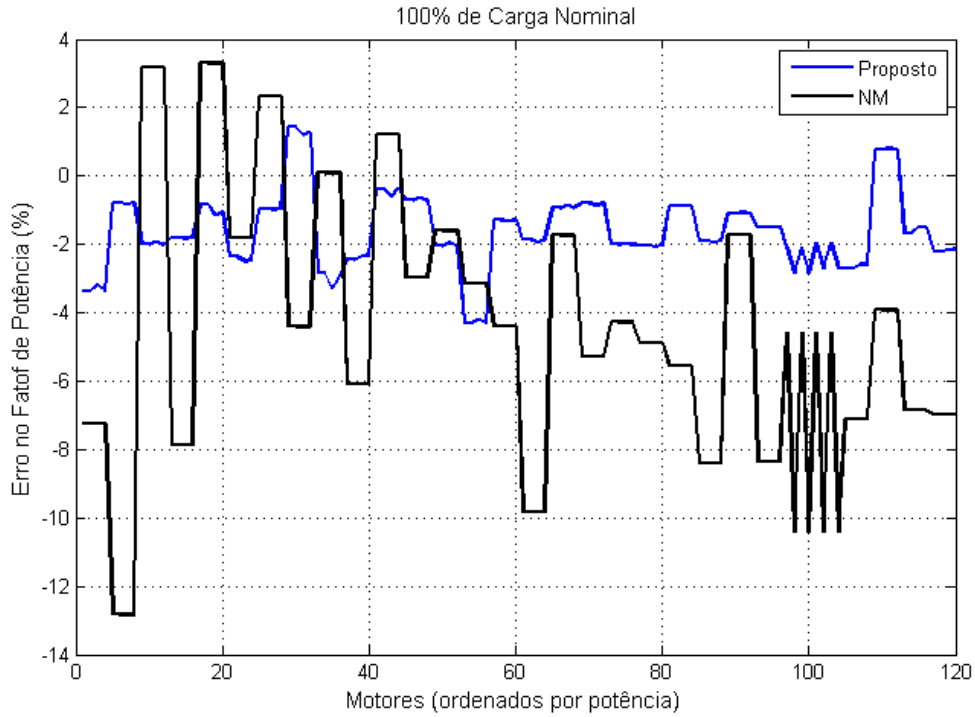


Figura 3.15 Estimação de Fator de Potência, comparação entre os métodos: 100% de carga – Categoria D

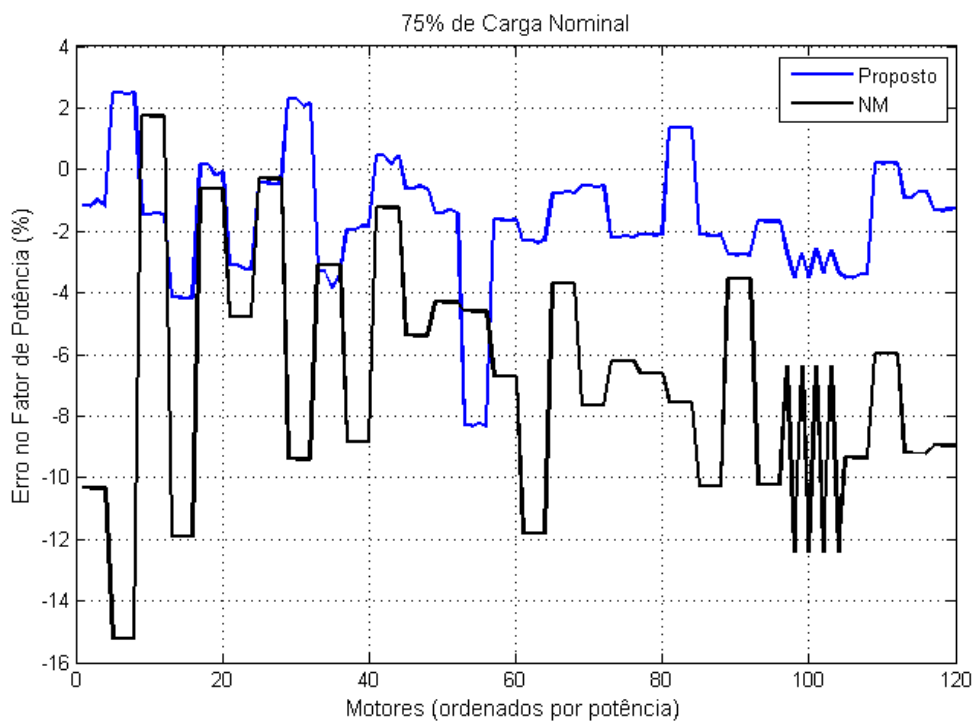


Figura 3.16 Estimação de Fator de Potência a 75% de carga – Categoria D

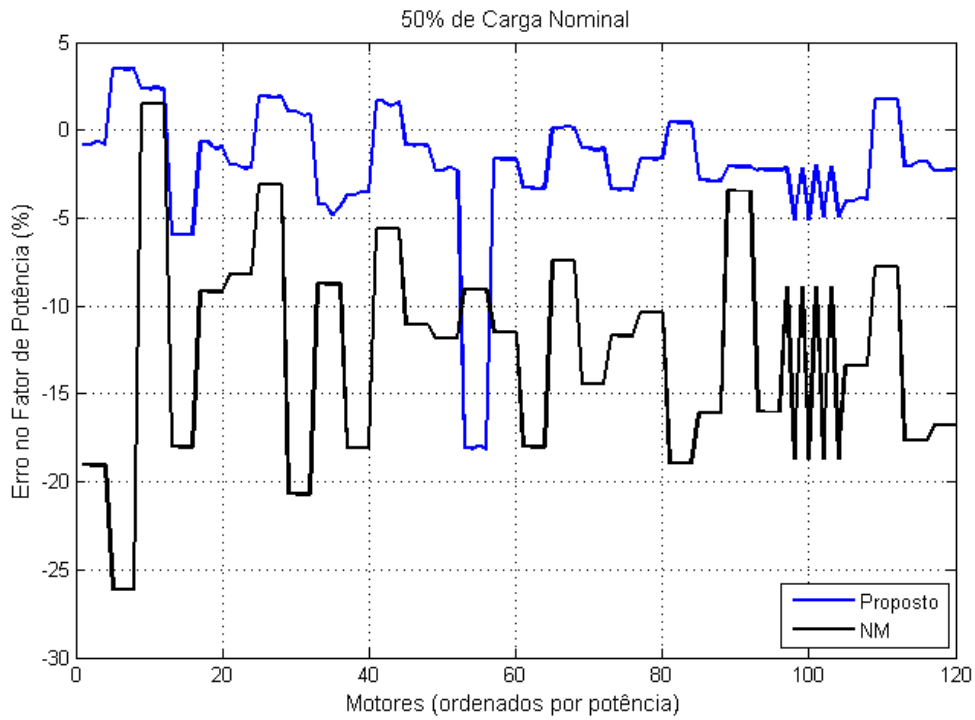


Figura 3.17 Estimação de Fator de Potência a 50% de carga – Categoria D

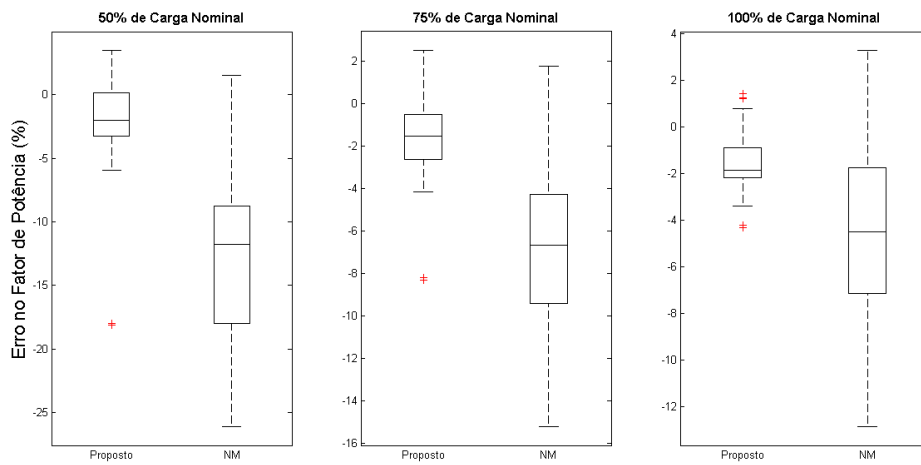


Figura 3.18 *Boxplots* da estimação de fator de potência – Categoria D

Tabela IX: Estatísticas do Erro na Estimação de Fator de Potência – Categoria D

| <b>Método</b>   | <b>Carga Nominal</b> | <b>Média (%)</b> | <b>Mediana (%)</b> | <b>Desvio Padrão (%)</b> |
|-----------------|----------------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| <b>Proposto</b> | 100%                 | <b>-1,2127</b>   | <b>- 1,1261</b>    | <b>3,5203</b>            |
| NM              |                      | -14,2238         | - 13,8345          | 5,9405                   |
| <b>Proposto</b> | 75%                  | <b>- 0,4856</b>  | <b>-0,5709</b>     | <b>1,8783</b>            |
| NM              |                      | - 8.5103         | - 7.8343           | 3,5402                   |
| <b>Proposto</b> | 50%                  | <b>-0,2585</b>   | <b>- 0,2145</b>    | <b>1,2226</b>            |
| NM              |                      | - 6,2506         | - 5,9888           | 3,3494                   |

### 3.2.3 Estudo de Caso

Para finalizar as análises, foi feito um estudo de caso com um motor de 7,5HP da WEG (W22 IR1). Assim como o motor analisado na seção 3.1.3 esta é uma das máquinas que teve um dos maiores erros para o método proposto. A Tabela X apresenta os dados de catálogo do motor e a Tabela XI exhibe os parâmetros estimados para o método proposto e com o NM. As Figuras 3.19 e 3.20 mostram as curvas de rendimento e fator de potência do fabricante em comparação com a obtida através dos dois métodos.

Tabela X: Dados de Catálogo do Motor de 7,5 HP – Categoria D

|                |               |                |           |              |
|----------------|---------------|----------------|-----------|--------------|
| $P_{out}$ (HP) | $V$ (V)       | $freq$ (Hz)    | $I_1$ (A) | $Polos$      |
| 7,5            | 220           | 60             | 20,4      | 6            |
| $\eta_{50\%}$  | $\eta_{75\%}$ | $\eta_{100\%}$ | $n$ (rpm) | $I_{st}/I_1$ |
| 80             | 81            | 82             | 1115      | 7,4          |
| $fp_{50\%}$    | $fp_{75\%}$   | $fp_{100\%}$   | $T_k/T_n$ | $T_{st}/T_n$ |
| 0,70           | 0,81          | 0,86           | 3,6       | 3,6          |



Tabela XI: Comparação entre valores estimados – Categoria D

| Método          | $r_1$ ( $\Omega$ ) | $r_2$ ( $\Omega$ )    | $x_1$ ( $\Omega$ ) | $x_2$ ( $\Omega$ ) |
|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Proposto</b> | <b>0,2328</b>      | <b>0,4431</b>         | <b>0,3418</b>      | <b>0,3418</b>      |
| NM              | 0,0717             | 0,4711                | 0,4711             | 0,4711             |
| Método          | $x_M$ ( $\Omega$ ) | $r_{fe}$ ( $\Omega$ ) | $P_{rot}$ (W)      |                    |
| <b>Proposto</b> | <b>13,0673</b>     | -                     | <b>478,1412</b>    |                    |
| NM              | 17,1726            | 184,5209              | 262,3009           |                    |

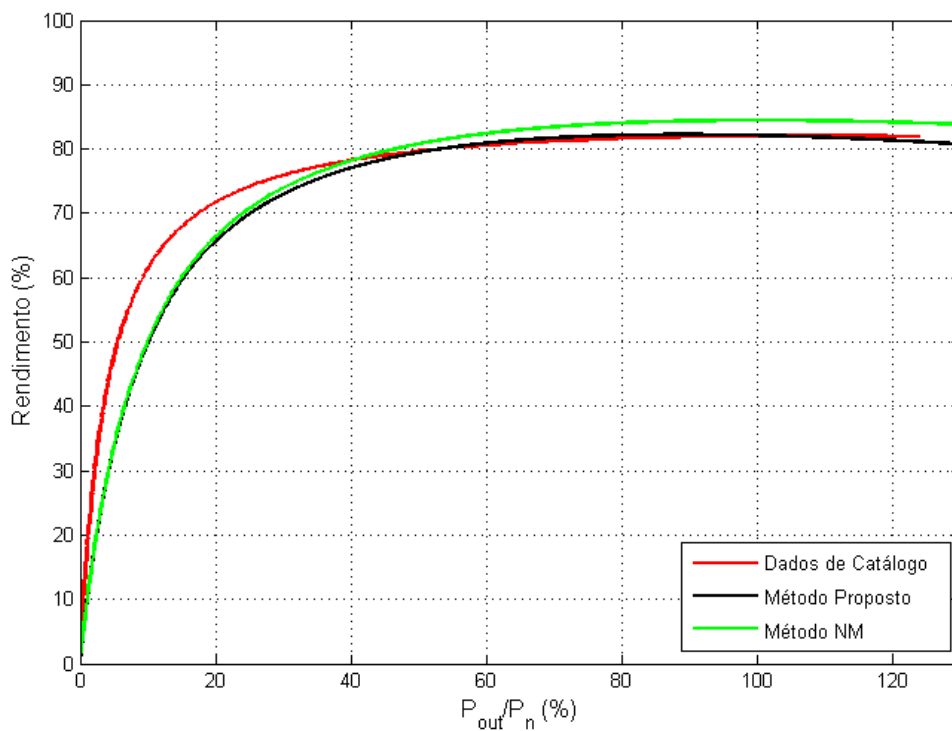


Figura 3.19 Curvas de Rendimento para o motor de 7,5 HP – Categoria D

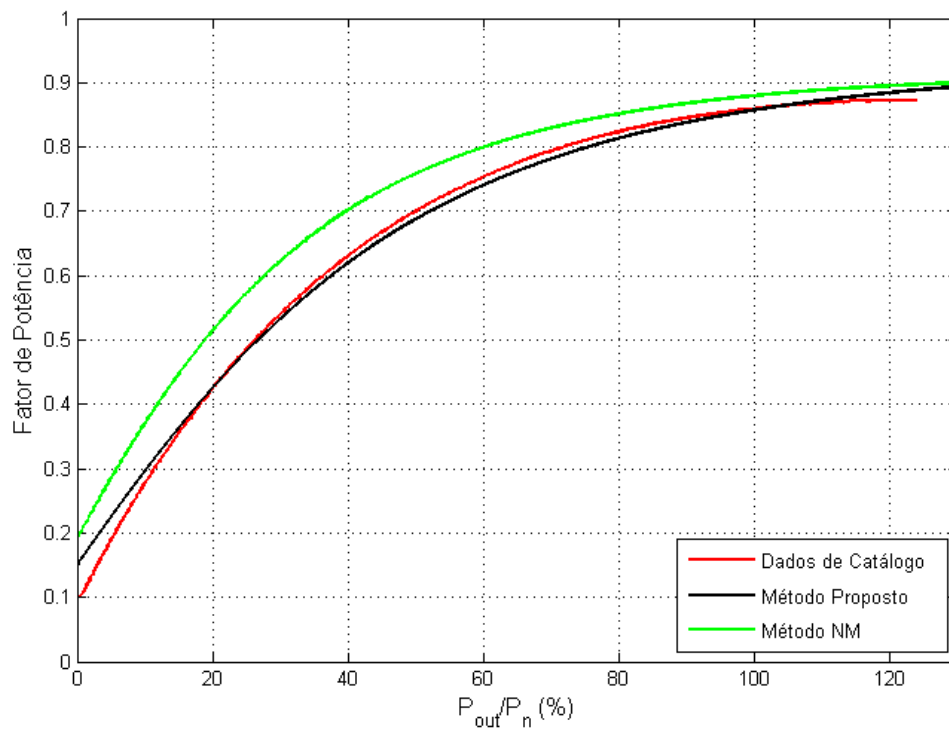


Figura 3.20 Curvas de Fator de Potência para o motor de 7,5 HP – Categoria D

Para estes motores em específico, o método NM conseguiu bons resultados para potências mais baixas, enquanto o método proposto acertou para potências maiores. Como os métodos consideram os parâmetros do circuito equivalente constantes e os motores de categoria D tem um grande efeito pelicular eram já esperados erros maiores que os relacionados aos motores de categoria N.

# Capítulo 4 - Considerações Finais

## 4.1 Conclusões

Neste trabalho foi proposto um novo método não iterativo para estimação de parâmetros de motores de indução trifásicos utilizando dados de catálogo. Os modelos matemáticos de 916 diferentes motores de 2 categorias (N e D) foram obtidos e foram realizadas comparações de rendimento e fator de potência com outros dois métodos de estimação e, também com dados de fabricantes fornecidos para três pontos de operação de carga (50%, 75% e 100% da carga nominal).

Através das análises estatísticas realizadas é possível concluir os seguintes pontos: i) O pequeno intervalo entre quartis no *boxplot* mostra a precisão do método proposto; ii) A efetividade do método proposto é comprovada observando a proximidade do conjunto de dados de erro de 0% para os testes realizados; iii) O maior desvio padrão acontece para a condição de 50% de carga, devido à aproximação feita na equação da corrente do rotor; iv) As curvas características tanto de rendimento quanto fator de potência ficaram muito próximas das curvas fornecidas pelo fabricante. As diferenças foram muito menores do que aquelas obtidas utilizando os parâmetros obtidos pelas metodologias BJSFV e NM.

Além de todos os pontos abordados no parágrafo anterior, o método também mostrou sua robustez obtendo bons resultados para ambas as categorias estudadas, diferente do método BJSFV que mostrou problemas para a categoria D.

Por fim, é importante reiterar que o método proposto tem as seguintes características: simplicidade, já que o algoritmo não é recursivo; não é invasivo, pois utiliza dados de catálogo; e tem alta precisão e efetividade. Como se trata de um método muito direto, ele pode ser facilmente implementado em plataformas industriais.

## 4.2 Trabalhos Futuros

Como trabalho futuro, sugere-se:

- i) Utilizar outras métricas para a análise do modelo proposto, tais como: torque e corrente.
- ii) Analisar o efeito da saturação magnética e o efeito pelicular

- iii) Desenvolver um algoritmo que possibilite a atualização dos parâmetros de forma a ser utilizado para a detecção e o diagnóstico de falhas elétricas que podem ocorrer durante a operação do motor

### **4.3 Artigo Publicado**

O desenvolvimento deste projeto deu origem a um trabalho em periódico A1 (QUALIS CAPES 2013-2016) e um trabalho completo em anais de evento Nacional.

O primeiro deles [36] foi publicado no final de 2020, e apresenta o método de estimação de parâmetros e resultados para os motores categoria N. Não foram incluídas as análises para os motores de Categoria D.

No trabalho completo apresentado no Congresso Brasileiro de Automática [37] diferentes Metaheurísticas foram utilizadas para estimar parâmetros de um motor de indução e foi feita uma avaliação para descobrir qual delas resultou em melhores resultados.

# Referências Bibliográficas

- [1] J. M. C. Guimaraes, J. V. Bernardes, A. E. Hermeto, and E. D. C. Bortoni, “Parameter determination of asynchronous machines from manufacturer data sheet,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 3, pp. 689–697, 2014, doi: 10.1109/TEC.2014.2317525.
- [2] R. Natarajan and V. K. Misra, “Parameter estimation of induction motors using a spreadsheet program on a personal computer,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 16, no. 2, pp. 157–164, 1989, doi: 10.1016/0378-7796(89)90008-4.
- [3] IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers., *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators (ANSI), IEEE Std 112-2017*. 2017.
- [4] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “Máquinas elétricas girantes Parte 3: Testes em Motores de Indução Trifásicos,” *ABNT NBR 17094-3*, 2018.
- [5] M. Al-Badri, P. Pillay, and P. Angers, “A Novel in Situ Efficiency Estimation Algorithm for Three-Phase Induction Motors Operating with Distorted Unbalanced Voltages,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 6, pp. 5338–5347, 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2728786.
- [6] H. F. Vieira da Silva, “Simulação e comparação dos parâmetros do circuito equivalente por fase de motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo de diferentes classes de rendimento,” *Dissertação de Mestrado - Universidade de Coimbra*, 2016.
- [7] C. A. C. Wengerkievicz, “Desenvolvimento de algoritmo para estimação de valores de parâmetros do circuito equivalente de motores de indução trifásicos a partir de dados de catálogo,” *Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina*, 2016.
- [8] D. Lindenmeyer, H. W. Dommel, A. Moshref, and P. Kundur, “An induction motor parameter estimation method,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 251–262, 2001, doi: 10.1016/S0142-0615(00)00060-0.
- [9] J. R. Willis, G. J. Brock, and J. S. Edmonds, “Derivation of Induction Motor

- Models from Standstill Frequency Response Tests,” no. December, pp. 37–38, 1989.
- [10] J. A. de Kock, F. S. van der Merwe, and H. J. Vermeulen, “Induction motor parameter estimation through an output error technique,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 1, pp. 69–76, 1994, doi: 10.1109/60.282478.
- [11] S. Maiti, C. Chakraborty, Y. Hori, and M. C. Ta, “Model reference adaptive controller-based rotor resistance and speed estimation techniques for vector controlled induction motor drive utilizing reactive power,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 2, pp. 594–601, 2008, doi: 10.1109/TIE.2007.911952.
- [12] M. H. Haque, “Estimation of three-phase induction motor parameters,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 26, no. 3, pp. 187–193, 1993, doi: 10.1016/0378-7796(93)90012-4.
- [13] D. Bhowmick and S. K. Chowdhury, “Online Estimation and Analysis of Equivalent Circuit Parameters of Three Phase Induction Motor Using Particle Swarm Optimization,” in *2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Dec. 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/PEDES.2018.8707590.
- [14] E. M. Tofighi, A. Mahdizadeh, and M. R. Feyzi, “Online estimation of induction motor parameters using a modified particle swarm optimization technique,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 3645–3650, 2013, doi: 10.1109/IECON.2013.6699715.
- [15] H. A. Toliyat, E. Levi, and M. Raina, “A review of RFO induction motor parameter estimation techniques,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 2, pp. 271–283, 2003, doi: 10.1109/TEC.2003.811719.
- [16] Y. Koubaa, “Recursive identification of induction motor parameters,” *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 12, no. 5, pp. 363–381, 2004, doi: 10.1016/j.simpat.2004.04.003.
- [17] A. B. Proca and A. Keyhani, “Sliding-mode flux observer with online rotor parameter estimation for induction motors,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 2, pp. 716–723, 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.891786.

- [18] M. Wlas, Z. Krzeminski, and H. A. Toliyat, "Neural-network-based parameter estimations of induction motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1783–1794, 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.918615.
- [19] G. Kenné, R. S. Simo, F. Lamnabhi-Lagarrigue, A. Arzandé, and J. C. Vannier, "An online simplified rotor resistance estimator for induction motors," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 18, no. 5, pp. 1188–1194, 2010, doi: 10.1109/TCST.2009.2033790.
- [20] M. Torrent, "Estimation of equivalent circuits for induction motors in steady state including mechanical and stray load losses," *Eur. Trans. Electr. Power*, 2011, doi: 10.1002/etep.621.
- [21] J. Pedra and F. Córcoles, "Estimation of induction motor double-cage model parameters from manufacturer data," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 2, pp. 310–317, 2004, doi: 10.1109/TEC.2003.822314.
- [22] IEC - International Electrotechnical Commission, "Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)," 2014.
- [23] E. C. Bortoni, J. V. Bernardes, P. V. V. da Silva, V. A. D. Faria, and P. A. V. Vieira, "Evaluation of manufacturers strategies to obtain high-efficient induction motors," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 31, no. November 2018, pp. 221–227, 2019, doi: 10.1016/j.seta.2018.12.022.
- [24] C. A. C. Wengerkievicz *et al.*, "Estimation of three-phase induction motor equivalent circuit parameters from manufacturer catalog data," *J. Microwaves, Optoelectron. Electromagn. Appl.*, vol. 16, no. 1, pp. 90–107, 2017, doi: 10.1590/2179-10742017v16i1873.
- [25] V. P. Sakthivel, R. Bhuvaneshwari, and S. Subramanian, "Multi-objective parameter estimation of induction motor using particle swarm optimization," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 23, no. 3, pp. 302–312, 2010, doi: 10.1016/j.engappai.2009.06.004.
- [26] F. Duan, R. Zivanovic, S. Al-Sarawi, and D. Mba, "Induction Motor Parameter Estimation Using Sparse Grid Optimization Algorithm," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 12, no. 4, pp. 1453–1461, 2016, doi: 10.1109/TII.2016.2573743.

- [27] D. Bhowmick, M. Manna, and S. K. Chowdhury, “Improved equivalent circuit parameter estimation of induction motor using H-G diagram and PSO,” *2017 IEEE Calcutta Conf. CALCON 2017 - Proc.*, vol. 2018-Janua, pp. 443–447, 2018, doi: 10.1109/CALCON.2017.8280772.
- [28] J. J. Guedes, M. F. Castoldi, A. Goedel, C. M. Agulhari, and D. S. Sanches, “Parameters estimation of three-phase induction motors using differential evolution,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 154, pp. 204–212, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.08.033.
- [29] E. C. Bortoni, J. V. Bernardes, P. V. V. da Silva, V. A. D. Faria, and P. A. V. Vieira, “Evaluation of manufacturers strategies to obtain high-efficient induction motors,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 31, no. December 2018, pp. 221–227, 2019, doi: 10.1016/j.seta.2018.12.022.
- [30] S. S. Waters and R. D. Willoughby, “Modeling Induction Motors for System Studies,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-19, no. 5, pp. 875–878, 1983, doi: 10.1109/TIA.1983.4504301.
- [31] J. S. de Sá, “Contribuição à Análise do Comportamento Térmico de Motores de Indução Trifásicos com Rotor tipo Gaiola.” Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, Campinas, 1989.
- [32] WEG, “Seleção de Motores Elétricos.” [Online]. Available: [http://ecatalog.weg.net/tec\\_cat/tech\\_motor\\_sel\\_web.asp](http://ecatalog.weg.net/tec_cat/tech_motor_sel_web.asp).
- [33] Siemens, “Motores ABNT.” [Online]. Available: <https://new.siemens.com/br/pt/produtos/drives/motores-abnt-carcaca-ate-315l.html>.
- [34] Hercules, “Motores Monofásicos e Trifásicos.” [Online]. Available: <https://www.herculesmotores.com.br/arquivos/catalogo-hercules-motores-84.pdf>.
- [35] D. C. Montgomery and G. C. Runger, “Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.” Editora LTC, Rio de Janeiro, 2009.
- [36] G. F. V. Amaral, J. M. R. Baccarini, F. C. R. Coelho, and L. M. R. Baccarini, “A High Precision Method for Induction Machine Parameters Estimation from Manufacturer Data,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, pp. 1–1, 2020, doi:



10.1109/tec.2020.3032320.

- [37] J. M. R. Baccarini, F. C. R. Coelho, L. M. Rabelo, and G. F. V. Amaral, “Estimação Online dos Parâmetros do Circuito Equivalente do Motor de Indução Trifásico via Metaheurísticas,” 2020, doi: 10.48011/asba.v2i1.1408.

# Anexos

## Anexo 1 – Equação do Escorregamento em função da Potência (Método BJSFV)

Calcula-se a potência através de (A.1).

$$P = 3r_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) I_2^2 \quad (\text{A.1})$$

Como  $R_2$  é considerado constante na região  $0 < s < s_k$

$$\frac{P}{P_{out}} = \frac{(1-s)}{s} \frac{s_n}{(1-s_n)} I_2^2 \quad (\text{A.2})$$

Considerando que a tensão induzida  $E$  não varia com a carga.

$$I_2^2 = \frac{E^2}{\left( \frac{r_2}{s} \right)^2 + (x_2)^2} \quad (\text{A.3})$$

Como  $\frac{R_2}{s}$  é muito maior do que  $x_2$ , chega-se em (A.4)

$$\frac{P}{P_{out}} = \frac{(1-s)}{s} \frac{s_n}{(1-s_n)} \frac{1}{\left( \frac{r_2}{s} \right)^2} \frac{\left( \frac{r_2}{s_n} \right)^2}{1} \quad (\text{A.4})$$

Simplificando (A.4), obtém-se

$$\frac{P}{P_{out}} = \frac{(1-s)}{s} \frac{s_n}{(1-s_n)} \frac{s^2}{s_n^2} \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{P}{P_{out}} = \frac{(1-s)}{(1-s_n)} \frac{s}{s_n} \quad (\text{A.6})$$

Manipulando (A.6) e isolando o escorregamento, chega-se em (A.7) e (A.8)

$$s^2 - s + \frac{P}{P_{out}}(1 - s_n)s_n \quad (\text{A.7})$$

$$s = \frac{1}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - 4s_n(1 - s_n) \frac{P}{P_{out}}} \right] \quad (\text{A.8})$$

A raiz escolhida é a negativa para que o escorregamento fique dentro da região de operação.

## Anexo 2 – Equação da Corrente Nominal do Rotor (Método BJSFV) [31]

A componente ativa de corrente nominal do estator é praticamente igual à componente ativa da corrente nominal do rotor, pois à velocidade nominal a reatância do rotor é muito pequena.

$$I_1 \cos \psi_n = I_2 \cos \psi_2 \quad (\text{B.1})$$

Sendo que  $\cos \psi_n$  é o fator de potência nominal e  $\cos \psi_2$  fator de potência nominal do rotor. Por outro lado, tem-se

$$\cos \psi_2 = \frac{\sin \psi_2}{\tan \psi_2} = \frac{r_2}{s_n x_2} \sin \psi_2 \quad (\text{B.2})$$

Manipulando (B.2)

$$\cos \psi_2 = \frac{r_2}{s_n x_2} \sqrt{1 - \cos^2 \psi_2} \quad (\text{B.3})$$

$$\cos^2 \psi_2 = \frac{\left(\frac{r_2}{s_n x_2}\right)^2}{1 + \left(\frac{r_2}{s_n x_2}\right)^2} = \frac{\left(\frac{S_k}{S_n}\right)^2}{1 + \left(\frac{S_k}{S_n}\right)^2} \quad (\text{B.4})$$

$$\cos^2 \psi_2 = \frac{1}{\left(\frac{S_n}{S_k}\right)^2 + 1} \quad (\text{B.5})$$

Desta forma, resulta:

$$I_1^2 \cos^2 \psi_n = I_2^2 \frac{1}{\left(\frac{S_n}{S_k}\right)^2 + 1} \quad (\text{B.6})$$

$$I_2 = I_1 \cos \sqrt{1 + \left(\frac{S_n}{S_k}\right)^2} \quad (\text{B.7})$$