VETOR

Determinação dos parâmetros do circuito equivalente de um motor de indução trifásico a partir dos dados de ensaio com carga

Determination of the parameters of the equivalent circuit of a three-phase induction motor from the load test data

Juliano Bitencourt Padilha†, Lisandra Kittel Ries, Adilson Pacheco Bortoluzzi, Rafael Henrique Eckstein

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Florianópolis, Brasil
†**Autor correspondente:** juliano.padilha@ifsc.edu.br

Resumo

Este artigo busca determinar os parâmetros do circuito equivalente de um motor de indução trifásico a partir dos dados de ensaio com carga. Tais parâmetros são ditos concentrados e compreendem de resistências e reatâncias associadas à frequência de operação da máquina. Utilizando dados provenientes do ensaio com carga, uma nova metodologia adota heurísticas para restringir o intervalo de busca de cada parâmetro por meio de otimização. Os valores obtidos são posteriormente comparados com os resultados obtidos pela metodologia clássica. Por fim, de posse dos parâmetros, resultados para a corrente de linha, potência de saída e rendimento, todos em função da velocidade de operação do motor, são apresentados a partir do uso do circuito equivalente, o que possibilita uma visão abrangente do desempenho do motor em condições reais de operação e valida os parâmetros obtidos com a nova metodologia proposta.

Palavras-chave

motor de indução trifásico • circuito equivalente • ensaio com carga

Abstract

This paper aims to determine the parameters of the equivalent circuit of a three-phase induction motor based on load test data. These parameters are considered concentrated and include resistances and reactances associated with the machine's operating frequency. Utilizing data from the load test, a new methodology adopts heuristics to narrow down the search range for each parameter through optimization. The obtained values are subsequently compared with results obtained using the classical methodology. Finally, with the parameters in hand, results for line current, output power, and efficiency, all as functions of the motor's operating speed, are presented using the equivalent circuit. This provides a comprehensive view of the motor's performance under real operating conditions and validates the parameters obtained with the proposed new methodology. This provides a comprehensive insight into the motor's performance under real operating conditions and validates the obtained parameters using the new methodology.

Keywords

three-phase induction motor • equivalent circuit • load test

1 Introdução

O motor de indução trifásico é a máquina rotativa mais utilizada na indústria e comercialmente está disponível em uma ampla faixa de potência. Portanto, a avaliação de seu desempenho torna-se relevante. Nesse contexto, os modelos equivalentes permitem simplificar a análise do comportamento complexo do motor ao fazerem uso de parâmetros elétricos concentrados (resistências e indutâncias). Tais modelos são baseados em princípios eletromagnéticos e se aproximam do comportamento real do motor, o que é essencial para o estudo do desempenho, eficiência e resposta dinâmica.

Em suma, o estudo do comportamento do motor de indução trifásico (MIT) sob os mais diversos níveis de carga pode ser realizado por meio da utilização de um circuito equivalente. Há na literatura alguns modelos de circuitos [1-4], com livros didáticos sobre máquinas elétricas normalmente fazendo uso desses modelos [5,6]. Já outros estudos utilizam do método de elementos finitos [7].

Este artigo busca determinar os parâmetros do circuito equivalente mais comumente utilizado para o MIT a partir dos dados de ensaio com carga. A nova metodologia utilizada faz uso de heurística ao limitar o intervalo de busca de cada um dos parâmetros a serem determinados. Os parâmetros obtidos são então comparados com aqueles obtidos pela metodologia clássica (obtidos dos ensaios de rotor bloqueado e em vazio) [8,9]. Por fim, resultados para a corrente de linha, potência de saída e rendimento, todos em função da velocidade de operação do motor, são apresentados.

2 Circuito equivalente do MIT

O circuito equivalente por fase considerado para o MIT está ilustrado na Fig. 1 e é o mesmo encontrado nas referências [5] e [6].

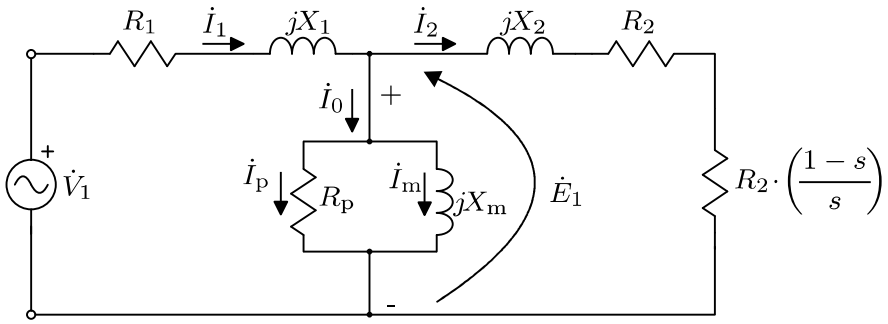


Figura 1: Circuito equivalente do MIT.

Na Fig. 1, temos que:
R_1: resistência do enrolamento do estator;
X_1: reatância de dispersão do enrolamento do estator;
R_p: resistência que representa as perdas no núcleo (perdas ferromagnéticas);
X_m: reatância de magnetização da máquina;
R_2: resistência do enrolamento (ou barras) do rotor, referida ao estator;
X_2: reatância de dispersão do enrolamento (ou barras) do rotor, referida ao estator;
s: escorregamento;
$R_2.[(1 - s)/s]$: resistência de carga (representa a carga acoplada ao eixo, ou seja, a potência de saída mais perdas por atrito e ventilação (P_{Aev})).

Na Fig. 1, o ponto sobre as variáveis que representam tensões e correntes indica representação fasorial. Assim, essa abordagem não contempla a presença de possível conteúdo harmônico nas tensões e correntes do motor. Ainda, ao utilizar o circuito por fase, é assumido que as tensões trifásicas aplicadas ao motor são equilibradas (mesmo valor eficaz e defasadas de 120º) e que o motor também apresenta impedâncias equilibradas em cada fase (o que resulta em correntes equilibradas). Já em caso de desequilíbrios e não linearidades, o uso de técnicas mais avançadas de análise é necessário, como por exemplo, simulações com o método de elementos finitos (que considera parâmetros distribuídos ao invés de concentrados).

3 Procedimentos

Inicialmente mediu-se a resistência por fase do estator do MIT utilizado (especificações: 1 CV; 60 Hz; 4 polos; 220 V; 3,02 A; ligação triângulo) e posteriormente foram realizados os ensaios de rotor bloqueado e em vazio da máquina. Dessa forma, foi possível, aplicando a metodologia clássica, determinar os parâmetros do circuito equivalente. Esses parâmetros são apresentados na próxima seção. Cabe destacar que a abordagem clássica segue um equacionamento para obtenção dos parâmetros a partir dos dados obtidos dos ensaios citados.

Na Fig. 2 é apresentado o aparato experimental para o ensaio com carga do MIT. A alimentação do motor é realizada por meio de um variador de tensão trifásico, de modo que é possível manter em 220 V a tensão de alimentação independente da carga acoplada ao motor. Há quatro medidores analógicos ligados na saída do variador de tensão: um voltímetro, um amperímetro e dois wattímetros (emprego do método dos dois wattímetros para medição de potência trifásica). Para determinar a rotação do motor, um tacômetro foi utilizado. Acoplado ao eixo do motor há um gerador de corrente contínua (dínamo) que desempenha o papel de carga mecânica (recebe a energia mecânica proveniente do motor e a converte em energia elétrica para alimentação de um conjunto de lâmpadas incandescentes). Lâmpadas adicionais conectadas na saída do gerador representam uma maior carga mecânica ao motor, o que diminui a rotação do motor. A tensão de saída do dínamo também pode ser controlada, se necessário, a partir da fonte de tensão variável que alimenta o circuito de campo. Ainda, o dínamo apresenta o estator livre para girar, de modo que é possível medir o torque fornecido pelo motor ao gerador a partir da multiplicação de um braço de alavanca (medido do centro do eixo do gerador até o ponto de contato com a balança) pelo resultado da massa medida pela balança vezes a aceleração da gravidade (9,81 m/s^2).

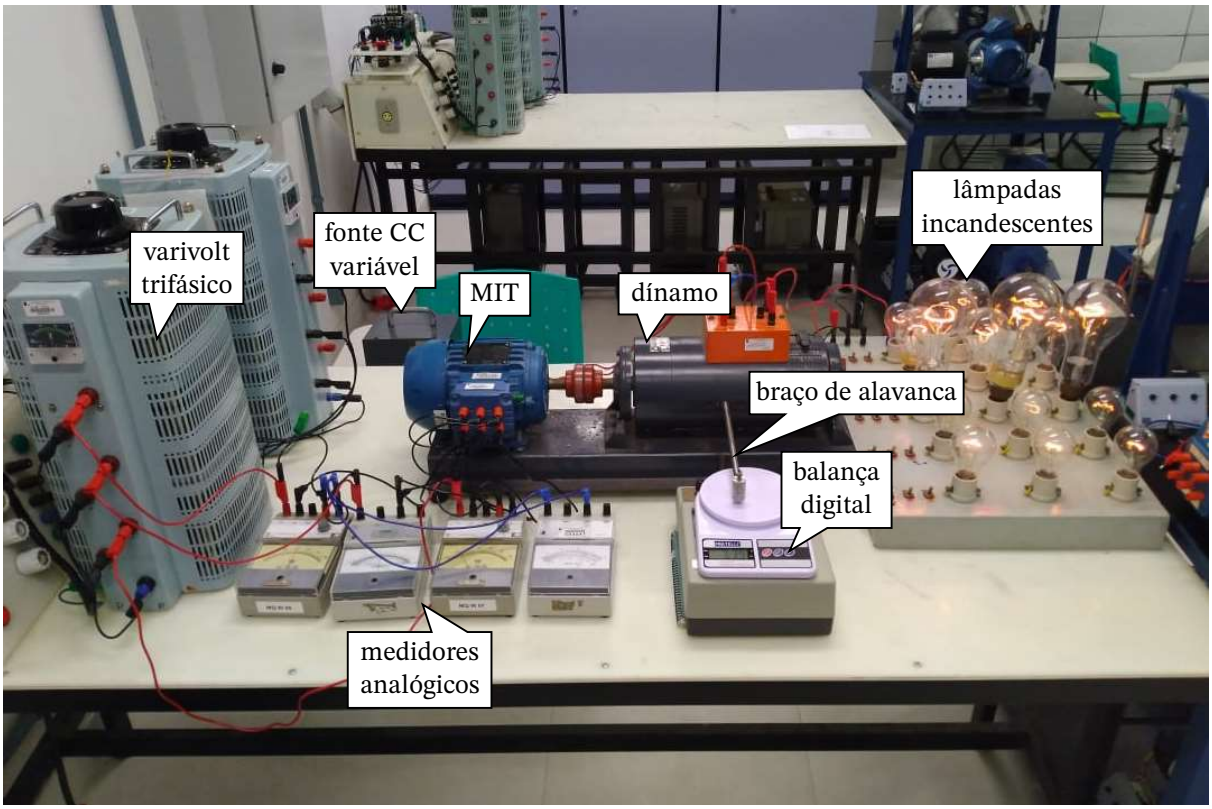


Figura 2: Aparato experimental para o ensaio com carga do MIT.

A nova abordagem para determinação dos parâmetros considera os resultados obtidos do ensaio com carga. Para a otimização dos parâmetros, assumiu-se como critério a minimização da soma dos erros quadráticos associados à corrente de linha (I_L), potência de saída (P_S) e rendimento (η). Basicamente a otimização avalia conjuntos de parâmetros (todos dentro dos limites estipulados), calcula por meio do circuito equivalente os valores de I_L, P_S e η para todos os pontos experimentais e avalia a soma dos erros quadráticos. O conjunto que apresentar menor soma é, então, o considerado.

A Tab. 1 ilustra as heurísticas assumidas para o intervalo dos parâmetros a serem determinados. Na tabela, V_F (V) é a tensão de fase e P_N (W) é a potência nominal do motor. O valor de R_1 é assumido como conhecido (obtido por meio de um miliohmímetro).

Tabela 1: Intervalo de busca para a otimização dos parâmetros.

parâmetro	heurística
R_1 (Ω)	medido experimentalmente
R_2 (Ω)	$k_1 \cdot R_1$ com $0{,}50 \leq k_1 \leq 2{,}00$
X_2 (Ω)	$k_2 \cdot R_1$ com $0{,}50 \leq k_2 \leq 2{,}00$
X_1 (Ω)	igual a $0{,}68X_1$ (motor categoria N)
R_p (Ω)	$\frac{3 \cdot V_F^2}{k_3 \cdot P_N}$ com $0{,}005 \leq k_3 \leq 0{,}200$
X_m (Ω)	$k_4 \cdot R_p$ com $0{,}05 \leq k_4 \leq 0{,}50$
P_{AeV} (W)	$k_5 \cdot P_N$ com $0{,}005 \leq k_5 \leq 0{,}200$

Na Tabela 1, assumiu-se que os limites para R_2 e X_2 fazem referência ao valor de R_1. É difícil estabelecer uma relação direta entre os parâmetros, mas é razoável propor que apresentam ordens de grandezas próximas. Já o valor de X_1 é equacionado conforme determina a norma ABNT NBR 17094-3 para motores categoria N. Os limites assumidos para R_p, conforme equacionamento proposto considera que as perdas ferromagnéticas (representadas por R_p) são aproximadamente entre 0,5% e 20% da potência nominal do motor (para motores pequenos tais perdas são percentualmente mais representativas em relação à potência nominal do que para motores maiores). Essa mesma consideração foi assumida para o valor de P_{AeV}. Por fim, para estipular os limites associados à X_m, considerou-se que X_m é sempre menor que R_p e apresenta ordem de grandeza mais próxima de R_p do que de R_1.

4 Resultados e discussões

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no ensaio com carga e os obtidos com o circuito equivalente. Pela tabela, observa-se uma excelente aderência do modelo com os resultados experimentais, com a maior diferença absoluta observada quando assumindo os parâmetros da metodologia clássica, na ordem de 7,41% e de 3,11% quando assumindo os parâmetros da nova metodologia. De forma geral, observa-se menores diferenças ao assumir os parâmetros com a nova metodologia. As diferenças calculadas consideram o resultado experimental como referência.

Tabela 2: Resultados obtidos e comparação entre resultados.

ensaio com carga (experimental)				circuito equivalente (parâmetros com a nova metodologia)			circuito equivalente (parâmetros com a metodologia clássica)			diferença (%) (parâmetros com a nova metodologia)			diferença (%) (parâmetros com a metodologia clássica)		
n_R (rpm)	I_L (A)	P_S (W)	η (%)	I_L (A)	P_S (W)	η (%)	I_L (A)	P_S (W)	η (%)	I_L	P_S	η	I_L	P_S	η
1780	2,3	185,3	48,1	2,28	188,88	47,63	2,35	188,45	50,14	-0,87	+1,93	-0,98	+2,13	+1,67	+4,07
1769	2,5	340,3	61,0	2,48	329,72	59,94	2,51	316,82	61,58	-0,80	-3,11	-1,74	+0,40	-7,41	+0,94
1759	2,7	437,5	65,3	2,71	449,18	65,52	2,69	427,13	66,95	+0,37	+2,67	+0,34	-0,37	-2,43	+2,46
1752	2,9	539,6	67,5	2,88	528,14	67,87	2,84	500,81	69,26	-0,69	-2,12	+0,55	-2,11	-7,75	+2,54
1748	3,0	580,4	68,9	2,98	571,18	68,85	2,93	541,65	70,24	-0,67	-1,59	-0,07	-2,39	-7,15	+1,91
1743	3,1	628,1	69,0	3,12	624,43	69,81	3,04	591,39	71,20	+0,65	-0,58	+1,17	-1,97	-6,21	+3,09
1735	3,3	697,3	69,7	3,33	704,70	70,84	3,23	668,09	72,26	+0,91	+1,06	+1,64	-2,17	-4,37	+3,54
1728	3,5	762,7	70,0	3,53	772,44	71,39	3,40	732,32	72,84	+0,86	+1,28	+1,99	-2,94	-4,15	+3,90

Cabe destacar que dada a velocidade do motor (n_R), o escorregamento a ser considerado no circuito equivalente é igual a (n_S-n_R)/n_S, onde n_S é a velocidade do campo girante ($n_S = (120f)/p$, onde f é a frequência (Hz) e p é o número de polos do motor). A potência de saída (P_S) é dada pelo produto do torque desenvolvido pelo motor (em N.m) e a rotação (em rad/s), a potência de entrada é soma dos valores obtidos em dois wattímetros e o rendimento é a relação entre as potências de saída e de entrada.

Uma comparação entre os parâmetros obtidos com a nova metodologia e os obtidos pela metodologia clássica também foi realizada com os resultados apresentados na Tab. 3. Observa-se que a maior diferença absoluta foi da ordem de 23,10%. A diferença calculada assume a metodologia clássica como referência.

Tabela 3: Parâmetros obtidos e a diferença entre as metodologias.

parâmetro	metodologia clássica	metodologia adotada	diferença (%)
R_1 (Ω)	10,50	10,50	0,00
R_2 (Ω)	5,61	5,10	-10,00
X_2 (Ω)	8,35	9,20	9,24
X_1 (Ω)	5,68	6,26	9,27
R_P (Ω)	2056	1940	-5,98
X_M (Ω)	166	174	4,60
P_{AeV} (W)	64,6	84,0	23,10

As Figs. 3 e 4 ilustram o comportamento da corrente de linha em função da velocidade do motor para os diferentes conjuntos de dados disponíveis, e os pontos destacados são aqueles medidos experimentalmente.

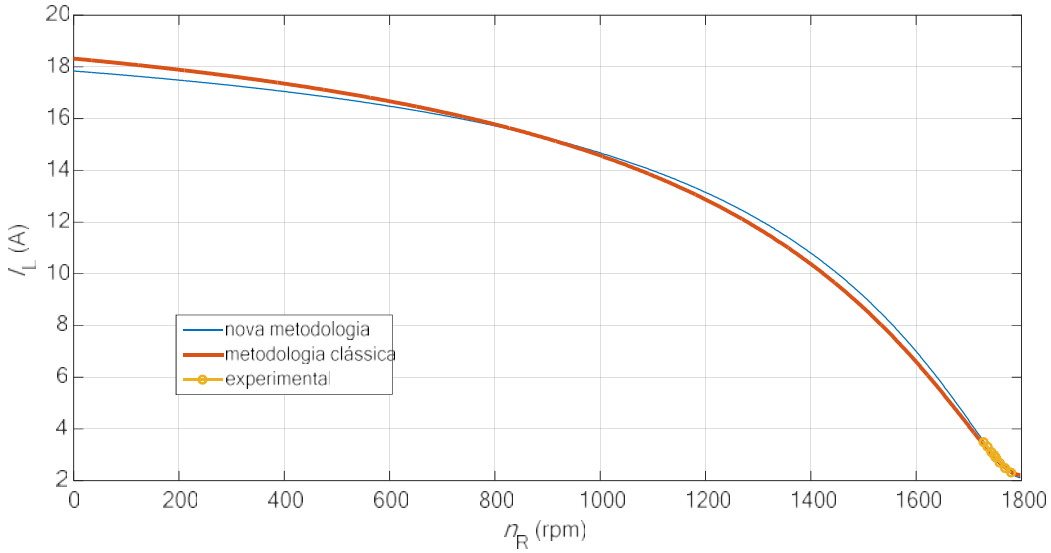


Figura 3: Corrente de linha em função da velocidade do motor.

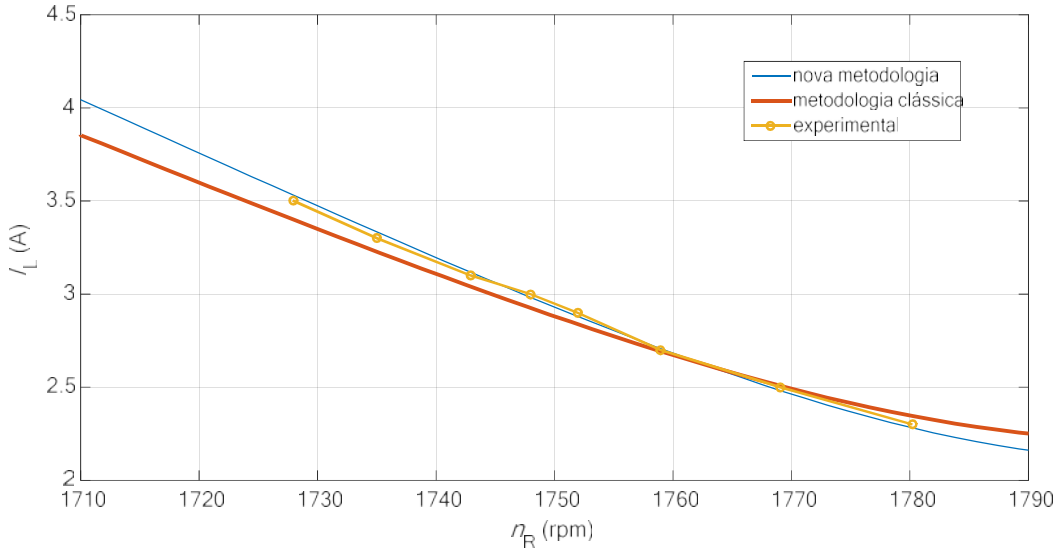


Figura 4: Corrente de linha em função da velocidade do motor: visão ampliada.

Pelas Figs. 3 e 4, observa-se uma boa concordância entre todos os resultados, destacando a relação praticamente linear entre corrente e velocidade na região de operação do motor. Embora a Fig. 3 apresente no eixo das abscissas valores de rotações que partem de 0 rpm, rotações abaixo de 1730 rpm só devem ocorrer durante a partida do motor, pois caso contrário, representariam uma elevada sobrecarga ao motor na operação em regime (em 220 V, a corrente nominal é de 3,02 A). Em suma, o motor é projetado para operar próximo da velocidade síncrona de 1800 rpm. Entretanto, a máquina opera sempre a uma velocidade inferior, pois trata-se de um motor assíncrono, motivo que justifica a representação em *zoom* apresentada na Fig. 4 a partir da Fig. 3. Outros resultados apresentados a seguir também consideram esse fato.

As Figuras 5 e 6 ilustram o comportamento da potência de saída em função da velocidade do motor.

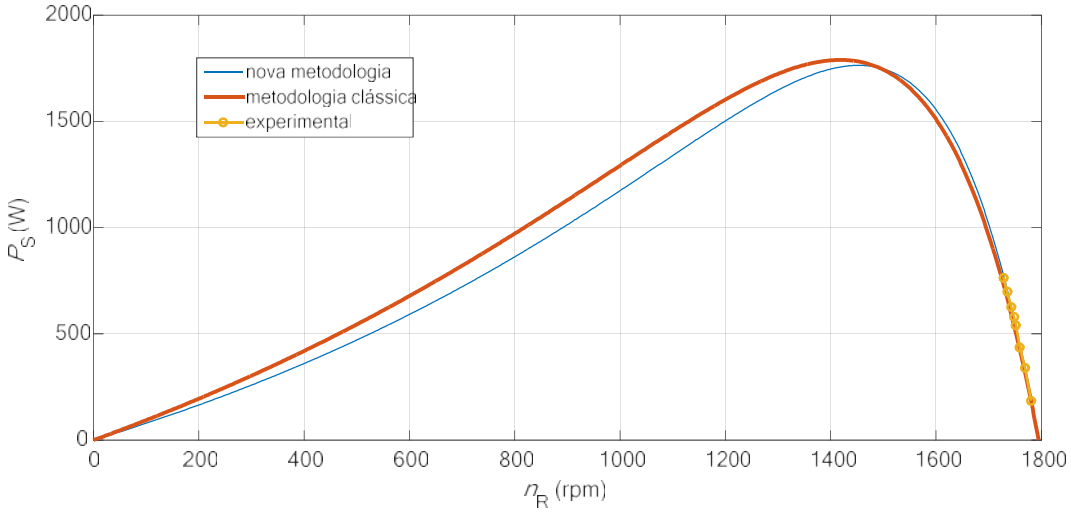


Figura 5: Potência de saída em função da velocidade do motor.

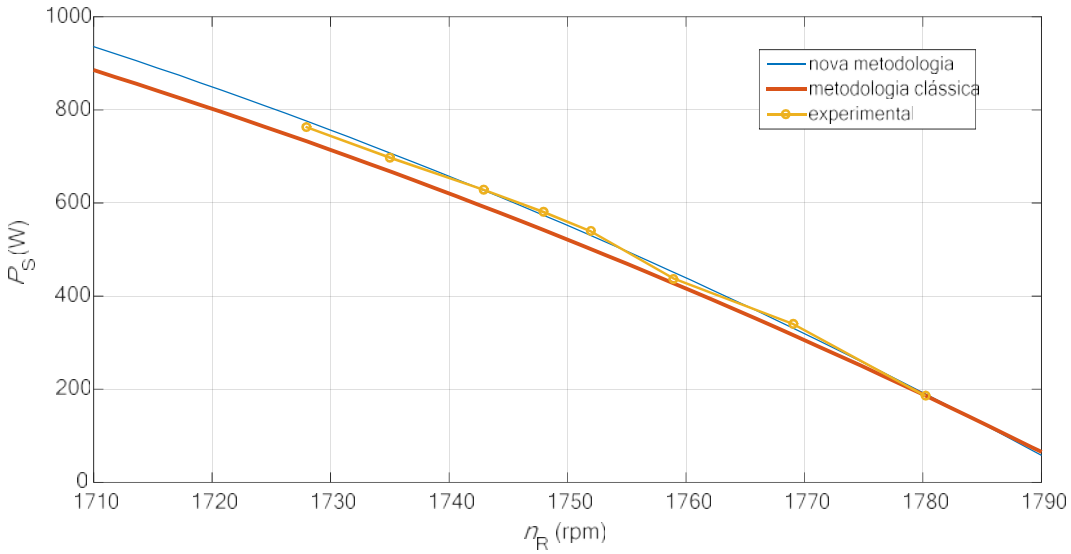


Figura 6: Potência de saída em função da velocidade do motor: vista ampliada.

Pelas Figs. 5 e 6 observa-se novamente uma boa concordância entre todos os resultados, destacando a relação praticamente linear entre potência e velocidade na região de operação do motor.

Por fim, as Figs. 7 e 8 ilustram o comportamento do rendimento em função da velocidade do motor.

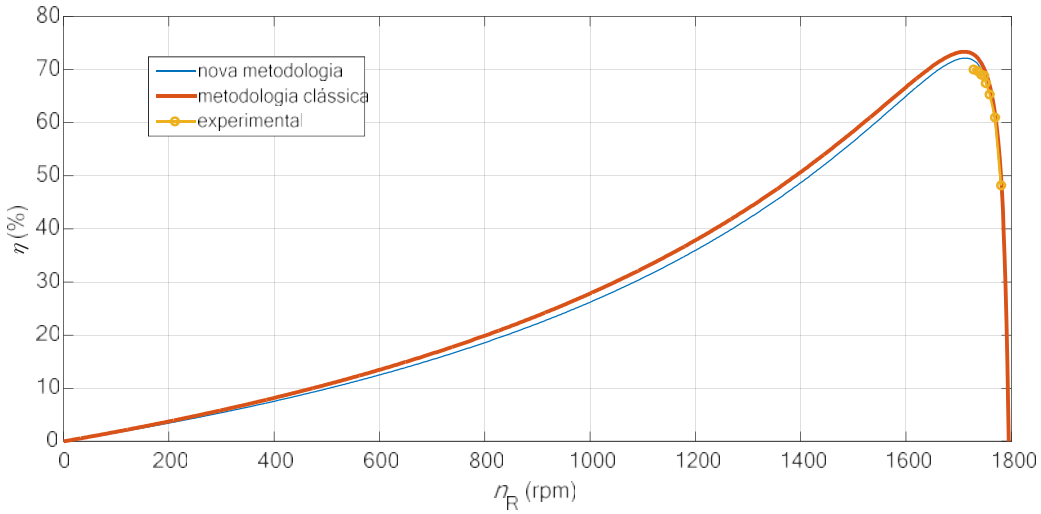


Figura 7: Rendimento em função da velocidade do motor.

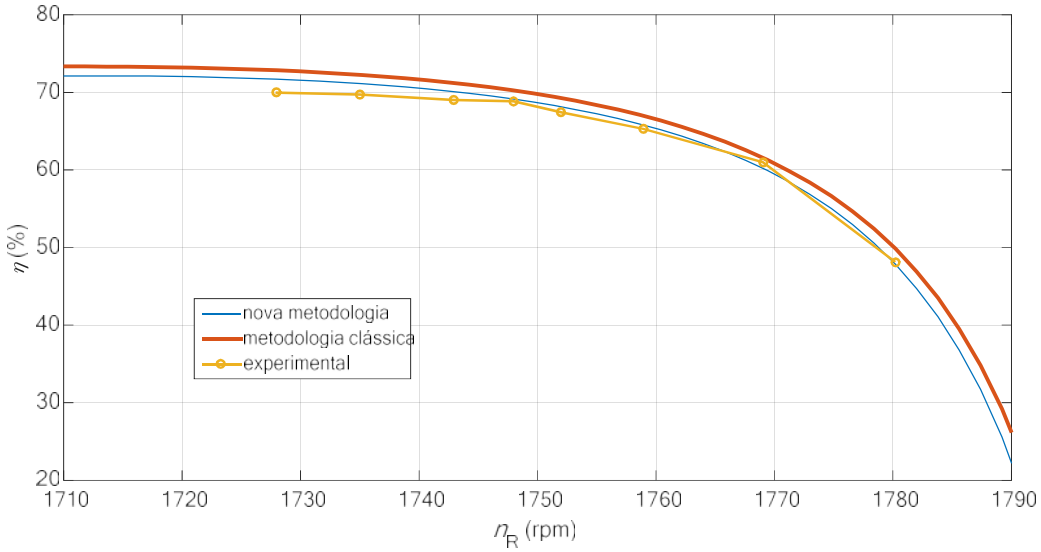


Figura 8: Rendimento em função da velocidade do motor: visão ampliada.

Pelas Figs. 7 e 8 observa-se mais uma vez uma boa concordância entre todos os resultados. Particularmente em relação à Fig. 8, observa-se que o rendimento permanece estável para velocidades entre 1710 e 1750 rpm, reduzindo consideravelmente para velocidades acima de 1750 rpm.

5 Considerações finais

Ao fazer uso de um modelo equivalente para o motor de indução trifásico, destaca-se que é possível a realização de análises detalhadas, simulações e cálculos para estimar o comportamento do motor em diferentes condições de operação. Isso inclui o estudo da partida do motor, variações de carga, controle de velocidade, eficiência energética e até mesmo a interação do motor com o sistema elétrico ao qual está conectado.

Este artigo utilizou de resultados experimentais referentes ao ensaio com carga de um motor de indução trifásico para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente da máquina. Os parâmetros otimizados visaram à minimização da soma dos erros quadráticos associados à corrente de linha (I_L), potência de saída (P_S) e rendimento (η). Ainda, o intervalo de busca para cada um dos parâmetros foi limitado em valores plausíveis, facilitando o encontro da solução ótima. O conjunto de parâmetros obtido apresentou resultados superiores quando comparado ao obtido por meio da metodologia clássica, evidenciando uma melhor aderência aos resultados experimentais quando aplicado no circuito equivalente.

Referências

[1] M. L. Barnes e C. A. Gross, “Comparison of Induction Machine Equivalent Circuit Models,” *Proceedings of the Twenty-Seventh Southeastern Symposium on System Theory*, Starkville, MS, USA, p. 14-17, 12 mar. 1995. Disponível em: https://doi.org/10.1109/SSST.1995.390620

[2] P. Drozdowski, “Extended circuit oriented models of induction machines for Simulink and Spice,” *2017 International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Naleczow, Poland, pp. 1-6, 18 jun. 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ISEM.2017.7993567

[3] S. S. Dhamal e M. V. Bhatkar, “Modelling and Simulation of Three-Phase Induction Motor to Diagnose the Performance on Inter-Turn Short Circuit Fault in Stator Winding,” *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, Greater Noida, India, p. 1166-1172, 28 set. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8674900

[4] C. A. Wengerkievicz, “Estudo e Desenvolvimento de Metodologias Não-Intrusivas para Estimação de Rendimento de Motores de Indução Trifásicos em Operação,” Tese de Doutorado, Doutorado em Engenharia

Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/229319/PEEL2031-T.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.

[5] S. J. Chapman, "Fundamentos de Máquinas Elétricas," 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

[6] S. D. Umans, "Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley," 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014..

[7] B. Kidd, "Vector-Based Magnetic Circuit Modelling of Induction Motors," *Magnetism*, vol. 2, no. 2, pp. 130-151, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/magnetism2020010.

[8] H. F. V. 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, Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2016. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/81543/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Hugo_Silva.pdf.

[9] C. A. Oliveira, "Plataforma para ensaios de motores de indução trifásicos e simulação de cargas mecânicas: acionamento, operação e monitoramento com auxílio de fonte programável," Dissertação de Mestrado, Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/22951/1/PlataformaEnsaiosMotores.pdf.