

14^o Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

ESTUDO E ANÁLISE DE UM MÉTODO EFICIENTE AO DIMENSIONAR UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

GUSTAVO PAULO SILVA¹, DANILO B. DO VALLE², CLAUDINER M. DE SEIXAS³

¹Graduando em Engenharia Elétrica, IFSP, Câmpus Votuporanga, paulo.gustavo@aluno.ifsp.edu.br

²Doutor em Engenharia Elétrica, Docente, IFSP-GPAI, Câmpus Votuporanga, danilo.valle@ifsp.edu.br

³Doutor em Engenharia Elétrica, Docente, IFSP-GPAI, Câmpus Votuporanga, claudiner@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.03.03.04-9 Máquinas Elétricas e Dispositivos de Potência

RESUMO: O principal objetivo deste estudo foi determinar os parâmetros do circuito equivalente de um Motor de Indução Trifásico (MIT), com base na metodologia descrita por Chapman (2013). Para atingir esse fim, foram conduzidos ensaios experimentais em laboratório, complementados por simulações computacionais, com o intuito de avaliar a eficácia do método proposto pelo autor. Trabalhos futuros estão planejados para comparar os resultados obtidos aqui com os do método apresentado por Umans (2014), a fim de determinar qual abordagem é mais eficiente.

PALAVRAS-CHAVE: Motor de Indução Trifásico; Máquinas elétricas; Parametrização; Ensaio; Determinação dos parâmetros.

Study and analysis of an efficient method for sizing a three-phase induction motor.

ABSTRACT: The main objective of this study was to determine the parameters of the equivalent circuit of a Three-Phase Induction Motor, based on the methodology described by Chapman (2013). To achieve this goal, experimental laboratory tests were conducted, complemented by computational simulations, in order to assess the effectiveness of the method proposed by the author. Future work is planned to compare the results obtained here with those of the method presented by Umans (2014), in order to determine which approach is more efficient.

KEYWORDS: Three Phases Induction Motor; Electric Machines; Parameterization; Tests; Definition of parameters.

INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos (MIT) são dispositivos elétricos que transformam energia elétrica em energia mecânica através da indução eletromagnética. Eles têm duas partes principais: o estator, com enrolamentos trifásicos alimentados por corrente alternada, e o rotor, que pode ser de gaiola de esquilo ou bobinado. O campo magnético do estator induz uma corrente no rotor, criando torque e rotação.

Os motores de indução trifásicos são amplamente empregados na indústria devido à sua simplicidade, custo acessível, eficiência e longa durabilidade. Segundo Alves (2021), aproximadamente 70% da energia industrial é consumida por esses motores. Portanto, é crucial realizar estudos para aprimorar seu desempenho e reduzir o consumo de energia.

Uma maneira de analisá-los é com um circuito equivalente, que reflete parâmetros elétricos como resistência e reatância. Isso ajuda a calcular corrente, potência, torque e eficiência. Para determinar esses parâmetros, ensaios em laboratório são realizados, sendo esse o foco do estudo.

O artigo apresenta noções básicas dos MIT, seu circuito equivalente e métodos de ensaio. Também oferece resultados práticos e experimentais. O objetivo é dar uma visão abrangente dessas máquinas cruciais para a indústria e sociedade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o entendimento dos métodos que serão descritos, é necessário apresentar o circuito equivalente por fase de um MIT, definido pela Figura 1.

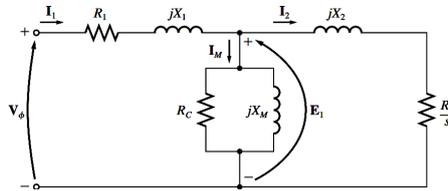


Figura 1: Circuito equivalente por fase de um MIT Chapman (2013).

Na Figura 1, V_ϕ é a tensão no terminal do estator, I_1 é a corrente do estator, R_1 é a resistência do estator, X_1 é a reatância de dispersão do estator, I_M é a corrente de excitação, R_C é a resistência representativa das perdas no núcleo, X_M é a reatância de magnetização, E_1 é a força contra eletromotriz, X_2 é a reatância de dispersão do rotor e R_2 é a resistência do rotor.

A metodologia empregada para determinar os parâmetros da Figura 1 baseou-se na abordagem descrita por Chapman (2013) e será apresentada a seguir.

Ensaio CC

Nesse procedimento, uma tensão contínua variável é aplicada com precisão aos enrolamentos do estator configurados em Y. A tensão e a corrente elétrica são monitoradas, sendo crucial que a corrente coincida com a nominal do enrolamento conectado em Y. O experimento foi realizado conforme ilustrado na Figura 2. Observa-se que houve uma modificação nos terminais, permitindo a obtenção das leituras de V_{AB} e I_A , V_{BC} e I_B , e V_{CA} e I_C . Os valores médios de tensão e corrente são calculados através da média aritmética das leituras.

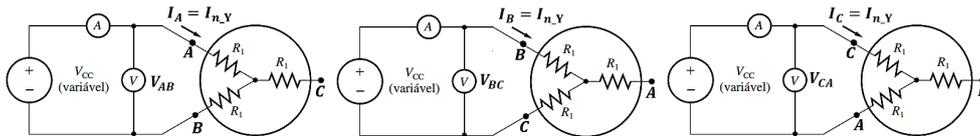


Figura 2: Ensaio CC, adaptado de Chapman (2013).

De posse dos valores de tensão e corrente, pode-se determinar o valor da resistência R_1 , conforme Equação (1).

$$R_1 = \frac{V_{Mcc}}{2I_{Mcc}} \quad (1)$$

Ensaio Rotor Bloqueado

O objetivo do ensaio de rotor bloqueado é determinar as reatâncias de dispersão (X_1 e X_2) do MIT, bem como a resistência do rotor (R_2). Nesse ensaio, o eixo do motor é mantido completamente imobilizado, e uma tensão reduzida é aplicada. Essa tensão é então aumentada gradualmente até se alcançar a corrente nominal (no caso específico, da configuração Δ).

Para essa análise, aplicou-se o teorema de Blondel para medir a potência trifásica total consumida pelo motor quando este está conectado em configuração Δ . A medição foi realizada com o auxílio de dois wattímetros digitais, denominados como W_1 e W_2 , que já consideram as tensões entre as duas fases e a referência (fase B), bem como as correntes de linha das fases nas quais estão inseridos. Para obter todas as informações necessárias sobre tensões e correntes de linha, foi suficiente adicionar apenas um amperímetro e um voltímetro à configuração, conforme ilustrado na Figura 3.

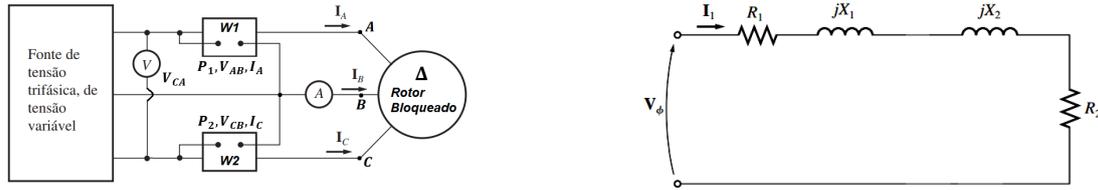


Figura 3: Ensaio bloqueado, adaptado de Chapman (2013) e circuito equivalente correspondente.

Conforme destacado por Chapman (2013), devido ao bloqueio do rotor do motor, o escorregamento é unitário, tornando $\frac{R_2}{s} = R_2$. Além disso, $R_C \gg |R_2 + jX_2|$ e $X_M \gg |R_2 + jX_2|$, o que permite que o ramo de magnetização seja negligenciado. Com base nesse cenário, o circuito equivalente representado na Figura 1 pode ser reconfigurado conforme o esquemático da Figura 3.

Com base nos dados coletados pelos instrumentos, calculam-se os valores médios de tensão de linha (V_{LMrb}) e de corrente de linha (I_{LMrb}), através da média aritmética das leituras. A potência trifásica ($P_{3\phi rb}$) é a soma das leituras dos dois wattímetros.

Como o circuito equivalente de um MIT é por fase, é necessário converter as grandezas de linha para valores de fase. Dado que o ensaio foi conduzido na configuração Δ , os valores por fase são $V_{\phi rb} = V_{LMrb}$, $I_{\phi rb} = \frac{I_{LMrb}}{\sqrt{3}}$ e $P_{\phi rb} = \frac{P_{3\phi rb}}{3}$.

De posse dos valores médios, por fase, pode-se obter o fator de potência, conforme Equação (2).

$$f_P = \cos \theta = \frac{P_{\phi rb}}{V_{\phi rb} I_{\phi rb}} \quad (2)$$

O módulo da impedância de entrada do circuito de rotor bloqueado (Figura 3) pode ser expresso pela Equação (3).

$$|Z_{rb}| = \frac{V_{\phi}}{I_1} = \frac{V_{\phi rb}}{I_{\phi rb}} \quad (3)$$

Portanto, pelo triângulo de impedâncias, pode-se obter os valores de R_{rb} e X_{rb} , conforme Equação (4).

$$Z_{rb} = R_{rb} + jX_{rb} = |Z_{rb}| \cos \theta + j |Z_{rb}| \sin \theta \quad (4)$$

Agora, é possível fazer a divisão da resistência de rotor bloqueado nas resistências do rotor e do estator. Como já se conhece o valor de R_1 do ensaio CC, a resistência do rotor é determinada pela Equação (5).

$$R_2 = R_{rb} - R_1 \quad (5)$$

Conforme mencionado por Chapman (2013), é possível isolar as reatâncias de dispersão do rotor e do estator da reatância de rotor bloqueado, utilizando a Tabela 1 como guia de referência.

Tabela 1: X_1 e X_2 em função de X_{rb}

Classe	A	B	C	D	Rotor Bobinado
X_1	$0,5X_{rb}$	$0,4X_{rb}$	$0,3X_{rb}$	$0,5X_{rb}$	$0,5X_{rb}$
X_2	$0,5X_{rb}$	$0,6X_{rb}$	$0,7X_{rb}$	$0,5X_{rb}$	$0,5X_{rb}$

O motor ensaiado se enquadra na Categoria B da Tabela 1, portanto, é possível obter a reatância de dispersão do rotor (X_2) e do estator (X_1) utilizando a Equação (6).

$$X_1 = 0,4X_{rb} \quad \text{e} \quad X_2 = 0,6X_{rb} \quad (6)$$

Ensaio a Vazio

No ensaio a vazio, que corresponde à operação do motor sem carga no eixo, são obtidas informações sobre a corrente de magnetização e avaliadas as perdas rotacionais da máquina.



Figura 4: Ensaio a vazio, adaptado de Chapman (2013) e circuito equivalente correspondente.

A disposição dos equipamentos de medição permanece a mesma que a utilizada no ensaio de rotor bloqueado, mas agora sob tensão e frequência nominais. A partir das leituras obtidas, são calculados os valores médios da tensão de linha (V_{LMvz}) e da corrente de linha (I_{LMvz}), por meio da média aritmética das leituras. A potência trifásica ($P_{3\phi vz}$) é determinada pela soma das leituras dos dois wattímetros.

Novamente é necessário converter as grandezas de linha para valores de fase. Dado que o ensaio foi conduzido na configuração Δ , os valores por fase são $V_{\phi vz} = V_{LMvz}$, $I_{\phi vz} = \frac{I_{LMvz}}{\sqrt{3}}$ e $P_{\phi vz} = \frac{P_{3\phi vz}}{3}$.

Neste ensaio, onde o rotor é livre para girar, a velocidade do eixo do motor se aproxima da velocidade de sincronismo, resultando em um escorregamento muito reduzido. Portanto, a relação $\frac{R_2}{s}$ assume valores muito elevados. Como resultado, o circuito equivalente mostrado na Figura 1 pode ser redesenhado conforme o apresentado na Figura 4.

Obtido os valores de tensão e corrente, é determinado a reatância de magnetização, apresentado na Equação (7).

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{\phi}}{I_{1,vz}} \approx X_1 + X_M \quad (7)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção é apresentado os resultados práticos obtidos em laboratório e a simulação do circuito equivalente obtido pelo método. A Tabela 2 apresenta os dados do motor ensaiado no laboratório.

Tabela 2: Dados do Motor ensaiado

Motor de indução trifásico - gaiola de esquilo - Categoria N			
Potência (kW/CV)	0,37/0,5	Rendimento	0,782
Tensão (V) (Δ/Y)	220/380	f_P	0,70
Corrente (A) (Δ/Y)	1,77/1,02	velocidade (rpm)	1700 rpm

Os valores obtidos no ensaio CC são apresentados na Tabela 3.

Substituindo os valores de V_{Mcc} e I_{Mcc} apresentados na Tabela 3, na Equação (1), obtém-se a resistência do circuito estatório $R_1 = 17,558 \Omega$.

Tabela 3: Leituras coletadas no ensaio CC

Tensão CC	$V_{AB} = 35,87V$	$V_{BC} = 36,10 V$	$V_{CA} = 35,64 V$	$V_{Mcc} = 35,87V$
Corrente CC	$I_A = 1,02A$	$I_B = 1,02A$	$I_C = 1,02A$	$I_{Mcc} = 1,02A$

Os valores obtidos no ensaio de circuito de rotor bloqueado são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Leituras obtidas no ensaio de rotor bloqueado

Tensão (Linha) RB	$V_{AB} = 59,9 V$	$V_{BC} = 59,9 V$	$V_{CA} = 61,4 V$	$V_{LMrb} = 60,4 V$
Corrente (Linha) RB	$I_A = 1,787A$	$I_B = 1,773A$	$I_C = 1,751A$	$I_{LMrb} = 1,770A$
Potência RB	$W_1 = 96W$	$W_2 = 8W$		$P_{3\phi rb} = 104W$

Ao substituir V_{LMrb} , I_{LMrb} e $P_{3\phi rb}$ apresentados na Tabela 4, no equacionamento do ensaio de rotor bloqueado, foram obtidos os valores de $R_2 = 15,636 \Omega$, $X_1 = 19,559 \Omega$ e $X_2 = 29,339 \Omega$.

Os valores obtidos no ensaio a vazio são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Leituras obtidas no ensaio a vazio

Tensão (Linha)	$V_{AB} = 220,7 V$	$V_{BC} = 220,2 V$	$V_{CA} = 222,6 V$	$V_{LMvz} = 221,167$
Corrente (Linha)	$I_A = 1,228A$	$I_B = 1,217A$	$I_C = 1,229A$	$I_{LMvz} = 1,225A$
Potência a vazio	$W_1 = 161W$	$W_2 = -105W$		$P_{3\phi vz} = 56W$

De forma similar, ao substituir os valores de V_{LMvz} , I_{LMvz} e $P_{3\phi vz}$ apresentados na Tabela 5, no equacionamento do ensaio a vazio, foi obtido $X_M = 293,226 \Omega$.

O circuito equivalente do motor ensaiado, com os parâmetros previamente calculados, é apresentado na Figura 5.

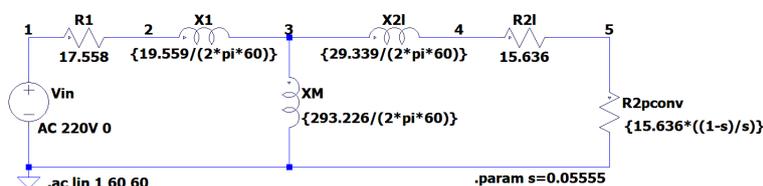


Figura 5: Circuito equivalente MIT.

Considerando que o motor possui 4 polos e sua velocidade nominal é de 1700 r.p.m., conforme apresentado na Tabela 2, o escorregamento a plena carga deste motor é de 5,555%. Para este escorregamento, os resultados da simulação estão apresentados na Figura 6.

```

--- AC Analysis ---
frequency: 60 Hz
V(1): mag: 220 phase: -3.70101e-015° I(X21): mag: 0.68457 phase: -6.07319°
V(2): mag: 208.47 phase: 3.54003° I(X1): mag: 0.999468 phase: -47.1817°
V(4): mag: 192.69 phase: -6.07319° I(R2pconv): mag: 0.68457 phase: -6.07319°
V(5): mag: 181.986 phase: -6.07319° I(R21): mag: 0.68457 phase: -6.07319°
V(3): mag: 193.734 phase: -0.122591° I(R1): mag: 0.999468 phase: -47.1817°
I(Xm): mag: 0.660698 phase: -90.1226° I(Vin): mag: 0.999468 phase: 132.818°

```

Figura 6: Resultados da simulação para valores de plena carga.

A partir da Figura 6 pode-se verificar que a corrente consumida pelo motor é $\bar{I}_1 = 0,999 \angle -47,18^\circ$ A e o fator de potência é $\cos(-47,18^\circ) = 0,68$. Comparando esses valores com os dados fornecidos na Tabela 2, pode-se concluir que o método proposto por Chapman (2013) é eficaz e simples para a determinação dos parâmetros de um MIT.

A Figura 7 apresenta o diagrama de fluxos de um MIT e será utilizada para o cálculo da potência de saída do motor.

As perdas rotacionais são obtidas a partir do ensaio a vazio (Tabela 5) e expressas por $P_{rot} =$

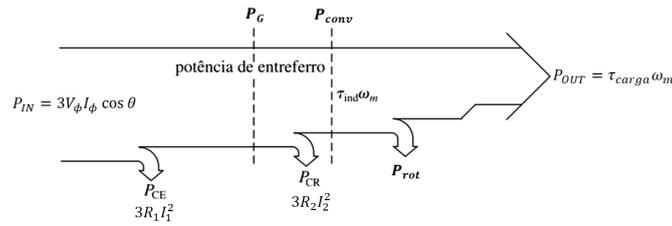


Figura 7: Diagrama de fluxo de potência, adaptada de Chapman (2013).

$P_{in,vz} - P_{CE,vz}$, conforme apresentado na Equação (8).

$$P_{rot} = P_{3\phi vz} - 3 \cdot I_{\phi,vz}^2 \cdot R_1 = 56 - 3 \cdot 0,707^2 \cdot 17,538 = 29,7W \quad (8)$$

Conhecido as perdas rotacionais e baseando-se no diagrama de fluxo de potência da Figura 7 obteve-se a Tabela 6.

Tabela 6: Balanço energético do MIT

$P_{IN} =$	$3 \cdot I_1 \cdot V_\phi \cdot \cos(\theta)$	$=$	$3 \cdot 0,999 \cdot 220 \cdot 0,679$	$=$	$447,692 W$
$P_{CE} =$	$3 \cdot I_1 ^2 \cdot R_1$	$=$	$3 \cdot 0,999^2 \cdot 17,558 $	$=$	$52,509W$
$P_{CR} =$	$3 \cdot I_2 ^2 \cdot R_2$	$=$	$3 \cdot 0,684^2 \cdot 15,636 $	$=$	$21,974W$
$P_{Rot} =$					$29,7W$
$P_{total} =$					$343,48W$

CONCLUSÕES

Em resumo, este estudo buscou avaliar a eficácia do método de dimensionamento proposto por Chapman (2013) para determinar os parâmetros de um Motor de Indução Trifásico (MIT). Os resultados demonstram uma correspondência próxima entre os parâmetros calculados e os valores indicados na placa do motor, validando assim a utilidade desse método. Estudos futuros serão conduzidos para comparar esses resultados com o método proposto por Umans (2014), a fim de determinar qual abordagem é mais eficaz.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

D.B.V e C.M.S contribuíram na concepção do projeto, com a redação, revisão e edição do trabalho e análise de dados, enquanto G.P.S conduziu a metodologia e os experimentos e a redação do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, ao meu orientador, ao GPAI (Grupo de Pesquisa em Automação e Inovação) e ao PIBIFSP pela dedicação e apoio a execução do trabalho.

REFERÊNCIAS

Diego Guterres Palma Alves. Estudo sobre motor de indução trifásico com rotor bobinado. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Pampa, Curso de Engenharia de Energia, 2021. 82 p.

Stephen J. Chapman. *Fundamentos de máquinas elétricas*. Amgh, November 2013.

Stephen D Umans. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. AMGH Editora, 2014.