

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT ATRAVÉS DE DADOS DE CATÁLOGOS DE FABRICANTE

José Tarcísio Assunção¹; Tereza Cristina Bessa Nogueira Assunção²

Universidade Federal de São João del-Rei, Depto de Engenharia Elétrica

Praça Frei Orlando, 170 – Campus Santo Antonio

36307-352 – São João del Rei – MG

¹tarcisio@ufsj.edu.br

²bessa@ufsj.edu.br

Resumo: Este trabalho apresenta um roteiro simples e prático para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente dos motores de indução rotor gaiola, a partir dos dados de catálogo do fabricante. São utilizados fatores de correção dos parâmetros do circuito equivalente em função da frequência, e é mostrado também o equacionamento do modelo proposto e o resultado de algumas simulações. O programa é elaborado em ambiente MATLAB, com interface gráfica para entrada de dados e para apresentação dos resultados do cálculo dos parâmetros do circuito equivalente e curvas características de operação do motor. O método proposto e a implementação computacional garantem resultados precisos e confiáveis.

Palavras-chave: motor de indução, parâmetros do circuito equivalente, efeito skin, saturação magnética, perdas.

1. INTRODUÇÃO

O motor de indução trifásico (MIT) de rotor tipo gaiola é o tipo dominante no mercado de motores elétricos, e participa com mais de 97% de unidades vendidas. Aos motores de indução trifásicos cabe uma parcela importante do total da energia elétrica consumida no Brasil, quase 25%, sendo uma carga representativa tanto no setor industrial com 49% referente à força motriz, segundo dados do PROCEL, PROCEL, (2006), - Programa Nacional de Conservação de Energia, como no setor comercial. Portanto, ações de conservação de energia nestes equipamentos são de grande importância.

Além disso, é cada vez maior o interesse na aplicação do MIT, e por isso é necessária uma análise mais cuidadosa do seu comportamento e desempenho, evitando assim motores sobredimensionados, que provocam uma considerável perda de energia. Neste sentido, a modelagem matemática do motor é fundamental para esta análise.

O motor de indução possui enrolamentos trifásicos distribuídos, simétricos e equilibrados no estator, que pode ser caracterizado por três bobinas concentradas. Cada fase é distribuída espacialmente por 120° no perímetro do estator, e cada enrolamento possui o mesmo número de espiras. O modelo matemático para a operação em regime permanente, chamado modelo de circuito equivalente, caracteriza a operação do motor de indução sob condição de alimentação senoidal e equilibrada, e com velocidade mecânica constante. O circuito equivalente do motor de indução trifásico é normalmente representado por fase e referido ao estator.

Para a análise do comportamento e desempenho de motores de indução e sua correta especificação em acionamentos elétricos, é necessária a determinação dos parâmetros do seu circuito equivalente.

O circuito equivalente do MIT é o primeiro passo para se obter uma análise do seu desempenho e especificação. Além disso, com o circuito equivalente, é possível calcular a queda de tensão, correntes, perdas, conjugado. Esta análise do MIT é muito importante para

uma melhor descrição do motor, que contribui para uma maior eficiência energética, segundo ASSUNÇÃO (1990), LOBOSCO et al. (1988) e NBR 7094 (1996).

Basicamente, no estudo de máquinas elétricas, em cursos de graduação, é apresentado o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução a partir dos dados obtidos nos ensaios de rotor bloqueado e a vazio. Outros métodos e ensaios para a estimação dos parâmetros do circuito equivalente do MIT têm sido apresentados em vários artigos, mas ainda não se chegou a um consenso quanto ao melhor método ou ensaio, segundo JOHNSON e WILLIS (1991), WALTERS e WILLOUGHBY (1983), CORCÓLES et al. (2002), PEDRA e SAINZ (2006).

Conforme prescrito pela NBR7094/2003 da ABNT, os fabricantes de motores elétricos devem informar as características elétricas e mecânicas de operação dos motores elétricos. Estes dados, também são obtidos dos ensaios de rotor bloqueado e a vazio além do ensaio de carregamento e de elevação de temperatura; estes ensaios caracterizam o ensaio de tipo previsto pela ABNT. Neste trabalho é apresentada de forma didática, uma metodologia para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do MIT, usando os dados de catálogo do fabricante. Assim, usando os dados de catálogos de fabricante seria possível a análise de qualquer motor e, por exemplo, comparar motores de linhas diferentes (motor padrão x motor de alto rendimento) ou motores de fabricantes diferentes.

2. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta para o cálculo dos parâmetros do MIT, a partir de dados de catálogo dos fabricantes, é apresentada a seguir.

Inicialmente, foi desenvolvido o algoritmo de cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do motor para operação na região de trabalho do motor, ou seja, operação com escorregamento próximo ao valor nominal.

Na segunda etapa, o algoritmo foi testado comparando os valores de conjugado, corrente, velocidade, rendimento e fator de potência, calculados por meio do circuito equivalente com os dados de catálogo e com os dados de ensaio de tipo do fabricante.

Na terceira etapa, as características de operação do MIT na região de alto escorregamento, especificamente na partida, são determinadas calculando o fator de saturação para a correção das reatâncias de dispersão, e a influência do efeito pelicular na resistência e reatância do rotor. Finalmente, o algoritmo foi testado comparando os resultados da simulação com os dados de fabricante. Destaca-se que, é considerado que o maior grau de saturação ocorre nos dentes de ranhura e pode ser modelada pela correção das reatâncias de dispersão, de acordo com ASSUNÇÃO (1990).

Finalmente, toda a metodologia proposta é testada comparando-se os resultados da simulação com os dados de catálogo do fabricante. Foram comparados os conjugados de partida e nominal e os valores do fator de potência e rendimento disponíveis nos catálogos de fabricantes com os valores obtidos pelo método proposto e, através dos erros calculados, é feita a validação do método desenvolvido para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do MIT. Determinado o circuito equivalente do motor de indução trifásico, de rotor gaiola, foi simulada a sua operação em regime permanente e a sua dinâmica.

O circuito equivalente do motor de indução trifásico é normalmente representado por fase e referido ao estator, conforme ilustrado na Figura 1, sendo R_1 = Resistência do estator; X_1 = Reatância de dispersão do estator; R_2 = Resistência do rotor referida ao estator; X_2 = Reatância de dispersão do rotor referida ao estator; R_m = Resistência de magnetização, X_m = Reatância de magnetização.

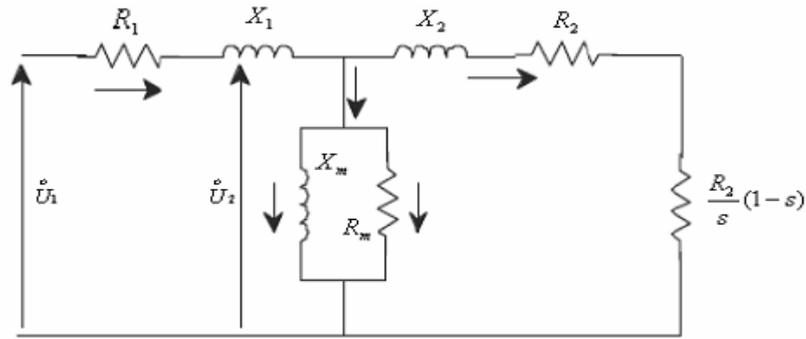


Figura 1. Circuito Equivalente do MIT.

Para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução, são usados os dados fornecidos pelo fabricante, e de acordo com a NBR 7094/2003 da ABNT, NBR 7094 (2003), o catálogo do motor deve apresentar os seguintes dados: número de fases; tensão nominal; frequência nominal; tipo de motor (rotor gaiola, rotor bobinado); potência nominal; velocidade síncrona ou número de pólos; classe de temperatura da isolamento do motor; velocidade de rotação nominal; corrente nominal; corrente com rotor bloqueado; conjugado nominal; conjugado com rotor bloqueado; conjugado máximo; rendimento a 100%, 75% e 50% da potência nominal; fator de potência a 100%, 75% e 50% da potência nominal; tempo admissível com rotor bloqueado, partindo da temperatura de operação.

2.1 Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente para a faixa normal de trabalho

Admitindo que os parâmetros do circuito equivalente do motor podem ser considerados constantes e iguais aos valores nominais na faixa normal de trabalho, ou seja, para operação com escorregamento $0 < s \leq s_n$, e que ainda a curva típica de $C = f(s)$, nesta região de operação é uma reta, nos permite escrever que:

$$C = \frac{s}{s_n} C_n \quad (1)$$

e, analogamente, tem-se:

$$C_{2n} = \frac{n_1}{n_n} C_n \quad (2)$$

sendo C_{2n} = conjugado nominal transferido no entreferro do motor, C_n = conjugado nominal disponível na ponta do eixo do motor, n_1 = velocidade síncrona; $n_n = n_1(1 - s_n) \equiv$ velocidade nominal; s_n = escorregamento nominal, P_n = potência nominal do motor.

Portanto, a potência eletromagnética do motor é:

$$P_{2n} = \frac{2\pi n_1}{60} C_{2n} = \frac{2\pi n_1}{60} \frac{C_n}{1 - s_n} = \frac{P_n + P_{AV}}{1 - s_n} \quad (3)$$

E as perdas nominais devido ao atrito e ventilação são calculadas como:

$$P_{AV} = P_{2n}(1 - s_n) - P_n \quad (4)$$

Das equações (1) e (3), obtém-se a potência eletromagnética do motor para 50% e 75% da carga nominal:

$$P_{250} = \frac{2\pi n_1}{60} \frac{0,5}{1-s_{50}} C_n \quad (5)$$

$$P_{275} = \frac{2\pi n_1}{60} \frac{0,75}{1-s_{75}} C_n \quad (6)$$

As perdas mecânicas (atrito e ventilação) variam com a velocidade do motor. No entanto, quando comparadas com as perdas totais elas são pequenas e podem ser consideradas constantes e iguais ao valor nominal na região $0 < s \leq s_n$, portanto:

$$P_{75} = P_{275}(1-s_{75}) - P_{AV} \quad (7)$$

$$P_{50} = P_{250}(1-s_{50}) - P_{AV} \quad (8)$$

que correspondem às potências disponíveis no eixo do motor para 75% e 50% da carga nominal.

Com os valores do rendimento (η) dados pelo catálogo, e a potência mecânica determinada pelas equações (7) e (8), é calculada a potência elétrica demandada para 100%, 75% e 50% da carga nominal, substituindo os valores correspondentes na equação (9); onde o subíndice X representa a carga do motor; resulta:

$$P_{1X} = \frac{P_X}{\eta_X} \quad (9)$$

e com os valores do fator de potência para cada ponto de operação ($\cos \delta_X$) e a tensão terminal por fase, obtém-se a corrente do estator para cada ponto de operação:

$$I_{1X} = \frac{P_X}{3U_{1X} \cos \delta_X} \quad (10)$$

A potência reativa, para cada ponto de operação, é calculada por:

$$Q_{1X} = 3U_{1X} I_{1X} \text{sen} \delta_X \quad (11)$$

Analisando o fluxo de potência ativa no motor e desprezando as pequenas variações das perdas no ferro na região $0 < s = s_n$, verifica-se que:

$$P_{1n} = P_{C1n} + P_{Fn} + P_{2n} \quad (12)$$

$$P_{150} = P_{C1n} D_1 + P_{Fn} + P_{250} \quad (13)$$

sendo que: $D_1 \equiv \left(\frac{I_{150}}{I_{1n}} \right)^2 \quad (14)$

Com as equações (12) e (13) e considerando a resistência do estator constante e igual ao valor nominal ($R_1 = f(\text{temperatura})$), calcula-se as perdas nominais no cobre do estator e as perdas nominais no núcleo do estator, respectivamente:

$$P_{C1n} = \frac{P_{150} - P_{250} - P_{1n} + P_{2n}}{D_1 - 1} \quad (15)$$

$$P_{FN} = -P_{1n} - P_{C1n} - P_{2n} \quad (16)$$

Então, é determinado o primeiro parâmetro do circuito equivalente do MIT; ou seja, a resistência do estator como:

$$R_{1n} = \frac{P_{C1n}}{3I_{1n}^2} \quad (17)$$

A seguir, é necessário determinar a tensão do circuito secundário:

$$\dot{U}_{2n} = \dot{U}_{1n} - \dot{Z}_{c1n} \dot{I}_{1n} \quad (18)$$

Como a reatância de dispersão do estator ainda não é conhecida, considera-se o paralelo do circuito equivalente de magnetização com o circuito do rotor, na condição nominal de operação:

$$\dot{Z}_{En} = \dot{Z}_M // \dot{Z}_2 \quad (19)$$

Com a componente real de Z_{En} da equação (19); pode-se escrever que:

$$P_{En} = P_{2n} + P_{Fn} = 3R_{En} I_{1n}^2 = 3U_{2n} I_{1n} \cos \delta_{En} \quad (20)$$

$$\text{sendo: } \cos \delta_{En} = \frac{R_{En}}{Z_{En}} \quad (21)$$

Como:

$$\dot{U}_{2n} = \dot{Z}_{En} \dot{I}_{1n} = U_{2n} \angle \delta_u = \dot{Z}_{En} \dot{I}_{1n} \angle \delta_{En} - \delta_n \quad (22)$$

considerando inicialmente que, $\delta_u = 0$ e $\delta_{En} - \delta_n = 0$ tem-se: $\delta_{En} = \delta_n$.

Empregando a equação (20) e como $\delta_{En} = \delta_n$; obtém-se:

$$U_{2n} = \frac{P_{En}}{3I_{1n} \cos \delta_n} \quad (23)$$

Com o valor da tensão secundária nominal pode-se calcular a potência reativa:

$$Q_{En} = 3U_{2n} I_{1n} \text{sen} \delta_n \quad (24)$$

Analisando o circuito equivalente, pode-se escrever que a potência reativa nominal demandada pelo estator do motor é:

$$Q_{C1n} = Q_{1n} - Q_{En} \quad (25)$$

As reatâncias nominais de dispersão do estator, do rotor e a reatância de magnetização, podem ser consideradas constantes e iguais aos valores nominais, na região normal de trabalho do motor ($0 < s = s_n$), portanto:

$$Q_{M50} = \frac{3U_{250}}{U_{2n}^2} Q_{Mn} \quad (26)$$

$$Q_{250} = \frac{I_{250}^2}{I_{2n}^2} Q_{2n} \quad (27)$$

$$\text{sendo: } D_2 = \left(\frac{I_{250}}{I_{2n}} \right)^2 = \frac{s_{50} P_{250}}{s_n P_{2n}} \quad (28)$$

Assim, a partir das equações de fluxo de potência reativa para dois pontos de carga no motor, pode-se determinar:

$$Q_{2n} = \frac{Q_{150} - Q_{C150} - D_3 (Q_{1n} - Q_{C1n})}{D_2 - D_3} \quad (29)$$

$$Q_{Mn} = Q_{1n} - Q_{C1n} - Q_{2n} \quad (30)$$

$$\text{sendo: } D_3 \equiv \left(\frac{U_{250}}{U_{2n}} \right)^2 \quad (31)$$

Como Q_{2n} é pequena comparada com P_{2n} , pode-se considerar o valor de Q_{Mn} correto, pois ele é predominante no fluxo de potência reativa do motor, e, portanto, a reatância (X_{Mn}) e a resistência (R_{Mn}) de magnetização são calculadas como:

$$X_{Mn} = \frac{3U_{2n}^2}{Q_{Mn}} \quad (32)$$

$$R_{Mn} = \frac{3U_{2n}^2}{P_{Fn}} \quad (33)$$

A potência aparente no rotor é igual a:

$$S_{2n} = \sqrt{P_{2n}^2 + Q_{2n}^2} \quad (34)$$

e a corrente nominal do rotor pode ser calculada por:

$$I_{2n} = \frac{S_{2n}}{3U_{2n}} \quad (35)$$

E, portanto, a resistência nominal (R_{2n}) e a reatância nominal de dispersão (X_{2n}) do rotor são determinadas como:

$$R_{2n} = \frac{P_{2n}}{3I_{2n}^2} \quad (36)$$

$$X_{2n} = \frac{Q_{2n}}{3I_{2n}^2} \quad (37)$$

Com as primeiras estimativas dos parâmetros do circuito equivalente, determina-se a impedância equivalente (Z_{250}) do rotor para o ponto de operação a 50% da carga nominal e, determina-se X_{1n} ; ou seja:

$$\dot{Z}_{Mn} = R_M // jX_M \quad (38)$$

$$Z_{250} = \frac{R_{2n}}{s_{50}} + jX_{2n} \quad (39)$$

$$\dot{Z}_{E50} = \dot{Z}_{Mn} // \dot{Z}_{250} \quad (40)$$

A impedância do motor é igual a:

$$\dot{Z}_{150} = \frac{\dot{U}_{1n}}{\dot{I}_{150}} \quad (41)$$

E a impedância dos enrolamentos do estator (Z_{C1n}) é calculada como:

$$\dot{Z}_{C150} = \dot{Z}_{150} - \dot{Z}_{E50} \quad (42)$$

Da equação (42) obtém-se:

$$X_{1n} = \Im(\dot{Z}_{C150}) \quad (43)$$

$$\dot{Z}_{C1n} = R_{1n} + jX_{1n} \quad (44)$$

Agora, a tensão nominal do rotor pode ser corrigida usando a equação (18), e a potência reativa do estator é recalculada como:

$$Q_{C1n} = 3 X_{1n} I_{1n}^2$$

(45)

e o valor correto da potência reativa do rotor será:

$$Q_{2n} = Q_{1n} - Q_{C1n} - Q_{Mn} \quad (46)$$

Finalmente, as equações (32), (33), (34), (35), (36) e (37) devem ser recalculadas, concluindo o cálculo dos parâmetros circuito equivalente do MIT para a sua região normal de operação.

2.2 Cálculo dos parâmetros do MIT para $s=1$

A influência do efeito pelicular, com o rotor bloqueado, nos parâmetros do rotor deve ser analisada, pois nesta condição a frequência do rotor é igual a do estator. Na partida do motor, a corrente de magnetização é muito pequena, comparada com a corrente do estator. Pode-se então, considerar que a corrente do rotor na partida (I_{2P}) é igual a corrente de partida do motor (I_{1P}), ou seja:

$$I_{2P} = I_{1P} \quad (47)$$

Desprezando-se o circuito de magnetização do circuito da Figura 1; tem-se:

$$I_{1P} = \frac{\dot{U}_{1P}}{\dot{Z}_{1P} + \dot{Z}_{2P}} \quad (48)$$

Com os valores de I_{1P} e do conjugado de rotor bloqueado, dado pelo catálogo do motor, calcula-se a resistência de partida do rotor.

$$R_{2P} = \frac{2\pi n_1}{180 I_{1P}^2} C_P \quad (49)$$

e a potência eletromagnética será igual a:

$$P_{2P} = 3R_{2P} I_{1P}^2 \quad (50)$$

A potência total demandada pelo motor, com rotor bloqueado, é igual a:

$$P_{1P} = 3R_{1n} I_{1P}^2 + P_{2P} \quad (51)$$

A potência aparente, a reativa e o fator de potência para a mesma condição são calculados como:

$$S_{1P} = 3U_{1P} \cos \delta_P \quad (52)$$

$$Q_{1P} = 3U_{1P} I_{1P} \text{sen} \delta_P \quad (53)$$

$$\cos \delta_P = \frac{P_{1P}}{S_{1P}} \quad (54)$$

Portanto, a reatância do motor na partida é:

$$X_P \equiv X_{1P} + X_{2P} = \frac{Q_{1P}}{3I_{1P}^2} \quad (55)$$

Para separar X_P em X_{P1} e X_{P2} , é necessário verificar a saturação magnética do motor. Neste trabalho, é proposto o modelamento da saturação magnética através da correção das reatâncias de dispersão, pois, o maior grau de saturação ocorre nos dentes das ranhuras do estator e, também porque a variação das reatâncias de dispersão modela de forma mais adequada o desempenho do motor durante a partida, segundo ASSUNÇÃO (1990).

Admitindo que saturação seja igual para as duas reatâncias de dispersão, a reatância equivalente X_P será:

$$X_p = K_S (X'_{1p} + X'_{2p}) \quad (56)$$

sendo: K_S = fator de saturação; X'_{1p} = reatância não saturada do estator para $s = 1$; X'_{2p} = reatância não saturada do rotor para $s = 1$.

Para a reatância de dispersão do estator pode-se desprezar a influência do efeito pelicular, então: $X'_{1p} = X_{1n}$. No entanto, para a reatância de dispersão do rotor é necessário verificar a influência do efeito pelicular. Assim, a equação (56) deve ser reescrita como:

$$X_p = K_S (X_{1n} + K_X X_{2n}) \quad (57)$$

sendo: K_X = fator de correção do efeito pelicular para a reatância do rotor. Portanto, com a equação (57) e K_X , determina-se o fator de saturação K_S .

2.3 Cálculo dos fatores devido ao efeito pelicular

Os parâmetros R_2 e X_2 , resistência e reatância do rotor, respectivamente, deverão ser corrigidos em função da frequência da tensão induzida no rotor, segundo KOSTENKO et al. (1969):

$$K_r \equiv \frac{R_{2p}}{R_{2n}} \quad (58)$$

$$K_x \equiv \frac{X_{2p}}{X_{2n}} \quad (59)$$

Os fatores de correção K_X e K_r , também são calculados como proposto por KOSTENKO et al. (1969):

$$K_r = \xi \frac{\sinh 2\xi + \operatorname{sen} 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad (60)$$

$$K_x = \frac{3}{2\xi} \frac{\sinh 2\xi - \operatorname{sen} 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad (61)$$

Sendo que:

$$\xi = H_b \sqrt{\pi \frac{\mu_0 l_b}{\rho l_r} f_n s} \quad (62)$$

e H_b = profundidade da barra; μ_0 = permeabilidade magnética; l_r, l_b = largura da ranhura e da barra, respectivamente; ρ = resistividade do material das barras do rotor.

Observando as variáveis da equação (62), verifica-se que exceto o escorregamento s , todas as variáveis são definidas pelo projeto do motor; portanto, são constantes para cada motor. Assim, pode-se agrupá-las em uma única constante, e a equação (62) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\xi = K_M \sqrt{s} \quad (63)$$

sendo K_M = constante do motor.

Substituindo as equações (58) e (63) na equação (60) resulta:

$$\frac{R_{2p}}{R_{2n}} = K_M \frac{\sinh 2\xi + \operatorname{sen} 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} \quad (64)$$

Com a equação (63) pode-se determinar através de um método numérico o valor de K_M , e com as equações (63) e (61) obtém-se o valor de K_X para $1 = s$, e K_S como:

$$K_s = \frac{X_p}{X_{1n} + K_x X_{2n}} \quad (65)$$

3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Para a verificação da proposta de cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do MIT é usado os dados de catálogo de fabricante de motores, cujas principais características de são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de catálogo do MIT.

P_n [CV]	4	15	75	150
U_n [V]	440	440	440	440
I_n [A]	5,85	19,1	87,5	181
n_n [rpm]	3468	1762	1777	1784
C_n [kgfm]	0,82	6,13	30,3	60,2
I_p/I_n	7,8	8,3	7,7	7,6
C_p/C_n	3,6	2,3	3,3	2,8

Na Tabela 2, são mostrados os parâmetros do circuito equivalente do MIT, e os fatores de correção relativos ao efeito skin e a saturação magnética, determinados conforme a metodologia proposta.

Tabela 2 – Parâmetros do circuito equivalente e fatores de correção calculados.

P_n [CV]	4	15	75	150
R_1 [Ω]	5,35	1,92	0,27	0,098
$X_{\square\square}$ [Ω]	15,36	4,86	0,84	0,51
R_2 [Ω]	12,46	0,86	0,11	0,04
X_M [Ω]	13,05	2,22	0,80	0,68
R_M [Ω]	12,46	5,68	1,52	2,00
X_M [Ω]	227,49	93,3	28,9	14,6
$X_{\square P}$ [Ω]	6,99	2,65	0,65	0,33
R_{2P} [Ω]	5,40	1,03	0,41	0,16
X_{2P} [Ω]	5,93	1,14	0,26	0,15
K_s	0,45	0,54	0,67	0,64
K_M	0	1,25	3,64	4,29
K_x	1	0,94	0,41	0,35
K_r	1	1,20	3,64	4,29

Na tabela 3 são apresentados os erros nos cálculos da corrente de partida (I_p), do conjugado de partida (C_p), fator de potência (FP) e rendimento (R) para três pontos de operação do motor (nominal, 75% e 50% do valor nominal). Como podem ser verificados, os erros são muito pequenos para os valores correspondentes a 75% e 50% da carga nominal, e erro igual à zero para os valores nominais.

Tabela 3 – Erro entre os parâmetros calculados e os do catálogo do fabricante.

P_n [CV]	Erros Percentuais			
	4	15	75	150
I_p	0,58	0,39	0,18	0,34
C_p	-0,97	-1,78	- 1,56	- 1,69
FP_n	1,44e-14	1,29e-14	- 1,23e-14	- 1,28e-14
FP_{75}	0,36	0,26	1,24	- 1,99
FP_{50}	0,36	0,71	0,57	0,37
R_n	0	1,26e-14	0	0
R_{75}	0,20	- 0,15	0,33	2,17
R_{50}	0,41	0,13	0,09	0,20

Para a condição de rotor bloqueado ($s = 1$), os erros são aceitáveis, mas, são maiores que os obtidos na região de baixo escorregamento. Algumas razões para estes erros podem ser assim resumidas:

- Os dados de corrente e conjugado de partida são mais sujeitos aos erros, pois ensaio de rotor bloqueado não é feito à tensão nominal;
- Como é previsto na norma NBR 5383 (1982), o ensaio do rotor bloqueado, deve ser executado para várias posições do rotor em relação ao estator, pois o valor da corrente e do conjugado variam com a posição relativa do rotor em relação ao estator;
- Na mesma norma, NBR 5383 (1982), é estabelecido que no catálogo de dados do motor, deve-se constar o valor máximo da corrente de partida e o valor mínimo do conjugado de partida, obtidos pelos ensaios.

Uma interface gráfica foi desenvolvida para facilitar a entrada dos dados do catálogo do fabricante e a análise do comportamento dinâmico e em regime permanente do motor de indução trifásico de rotor gaiolo, resultando em uma adequada ferramenta didática para o estudo de máquinas e acionamentos elétricos. Todos os resultados são mostrados em interfaces gráficas composta das seguintes telas: Tela principal: contém as caixas de texto para entrada dos dados de catálogo utilizados para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do MIT e da simulação da dinâmica do motor. Esta tela contém também um *link* para o catálogo do fabricante de motores e um *link* para a tela que mostra os parâmetros calculados pelo algoritmo implementado neste trabalho; Tela dos parâmetros: contém o circuito equivalente do MIT e os valores calculados para os mesmos. Outros parâmetros são apresentados nesta tela, tais como: resistência e reatância na partida, fator de saturação do MIT, e outros. Esta tela contém também os links para as telas dos resultados dos cálculos em regime permanente do motor; Tela de resultados para operação em regime permanente e simulação dinâmica do motor: esta tela pode gerar as seguintes curvas: conjugado por velocidade, conjugado por tempo, rendimento por escorregamento e fator de potência por escorregamento. O programa possui uma versão para impressão dos resultados.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentadas a tela principal com os dados de catálogo do motor de 4 CV e a tela dos parâmetros e fatores de correção do seu circuito equivalente, respectivamente. Na Figura 5 são mostrados os erros entre os valores calculados e do catálogo da corrente e conjugado de partida, fator de potência e rendimento. Na Figura 6 e 7 a resposta em regime permanente e da dinâmica do motor de 4 CV.

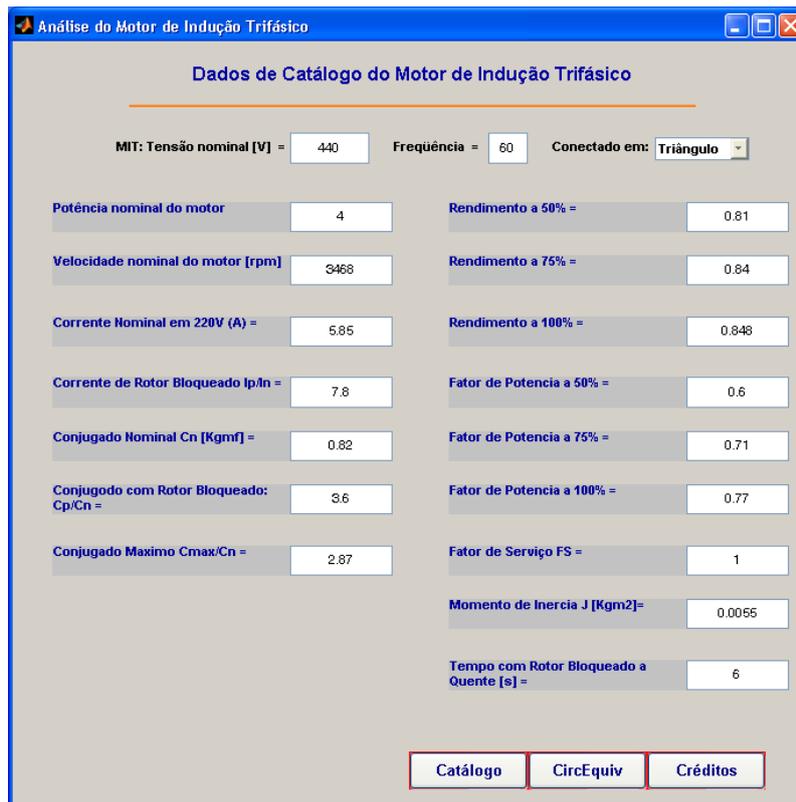


Figura 2. Dados de catálogo do MIT

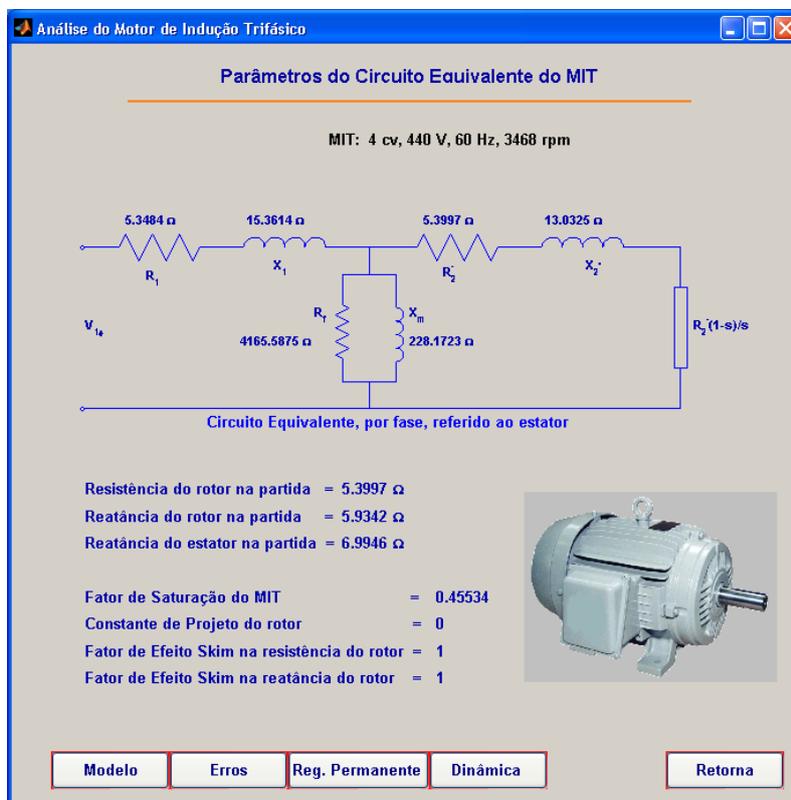


Figura 3. Parâmetros calculados do circuito equivalente do MIT

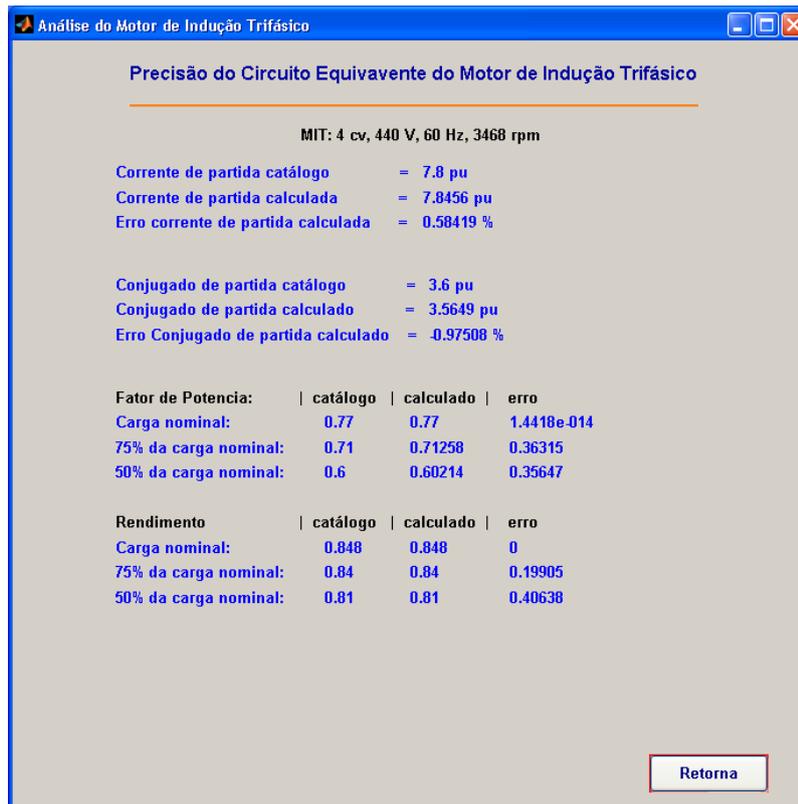


Figura 4. Comparação entre os resultados calculados e os do catálogo

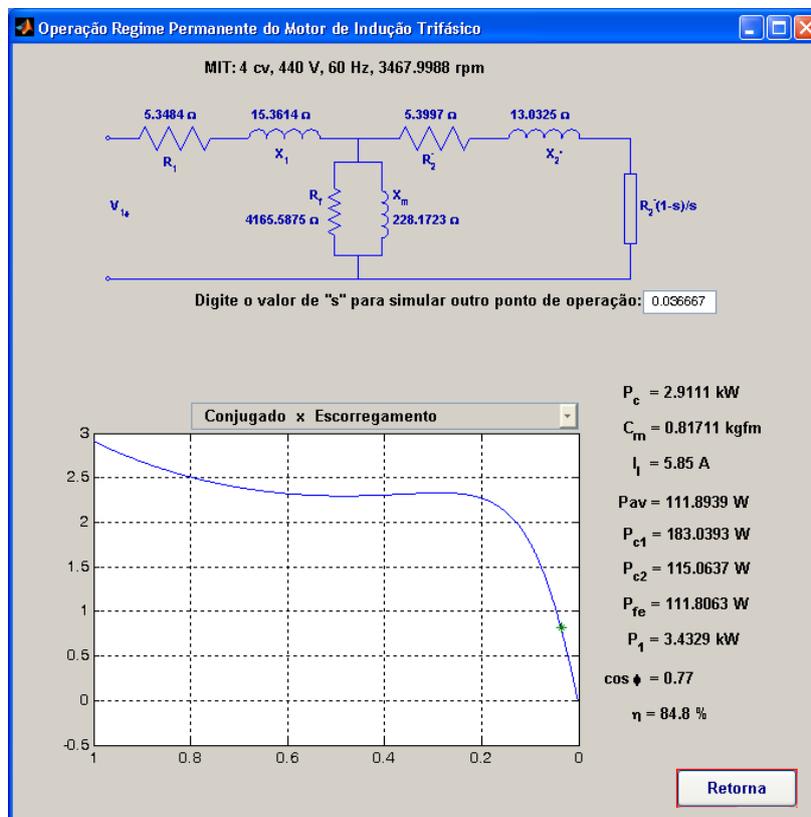


Figura 5. Operação em regime permanente do MIT

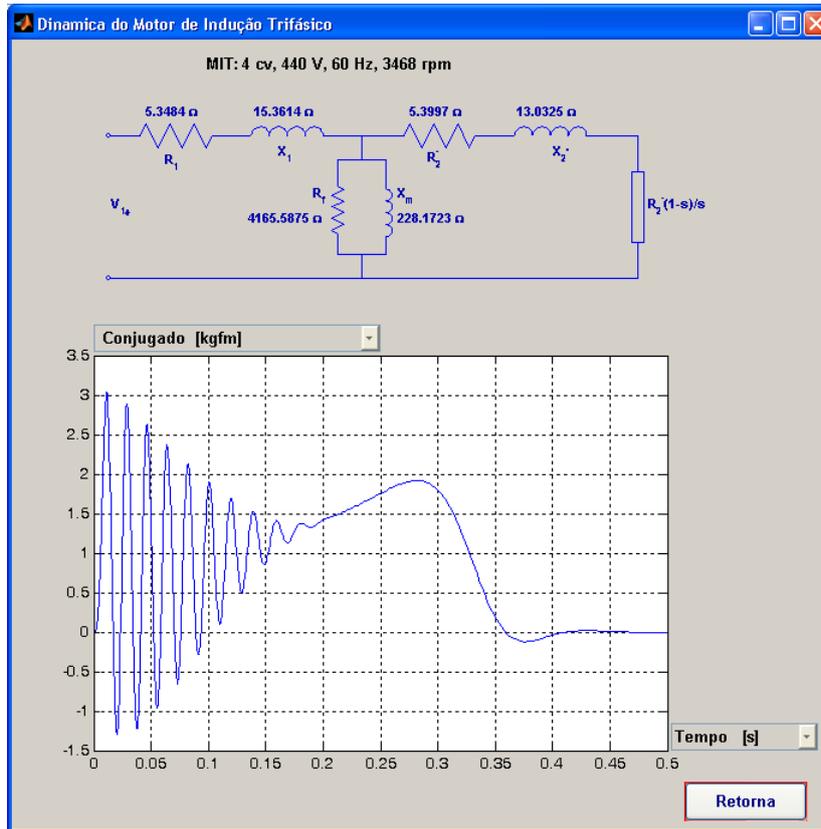


Figura 6. Dinâmica do MIT

4. CONCLUSÃO

O método proposto e implementado neste trabalho permite a análise do comportamento e desempenho do motor de indução trifásico (MIT). É uma ferramenta adequada para a simulação de acionamentos elétricos, com o objetivo de melhorar a especificação dos motores, de modo a assegurar uma maior eficiência energética. Podemos citar, por exemplo, a facilidade para comparar a eficiência de motores de fabricantes diferentes, ou até a relação custo benefício entre um motor padrão e um motor de alto rendimento. Em relação aos erros, é importante destacar que todos são inferiores às tolerâncias admitidas pela ABNT, nos resultados de ensaios de tipo dos motores de indução.

Além disso, deve-se destacar que a interface gráfica é uma adequada ferramenta didática que pode ser empregada para o estudo e análise de máquinas e acionamentos elétricos. Através desta ferramenta o aluno pode simular qualquer condição de operação de um MIT observando graficamente, a relação de cada variável do circuito equivalente com o comportamento do motor. A validade da metodologia proposta pode ser verificada também comparando os dados de ensaio de rotor bloqueado e a vazio que, normalmente executados pelos alunos no laboratório, com os resultados da simulação computacional destes ensaios com esta ferramenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSUNÇÃO; J. T., “Análise e Especificação de Motores de Indução Trifásicos com Rotor Tipo Gaiola Controlados Através do Valor Eficaz e Frequência da Tensão do Estator”, 1990, Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá.

CÓRCOLES; F., PEDRA; J., SALICHS; M. and SAINZ; L., “**Analysis of the induction machine parameter identification**”, IEEE Transactions. Energy Conversion, vol. 17, pp. 183-190, June 2002.

KOSTENKO, M; KINGSLEY, C. Jr and KUSKO, A, “**Eletrical Machines**”, Ed. Mir Publishers, Moscow, 1969.

JOHNSON; B. K., and WILLIS, J. R., “**Tailoring induction motor analytical models to fit know motor performance characteristics and satisfy particular study needs**”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, pp. 959-965, Aug. 1991.

LOBOSCO, O.S. e DIAS, J. L. P. C, “**Seleção e Aplicação de Motores Elétricos**”, Ed. McGraw-Hill : Siemens, AS, São Paulo, 351p, 1988.

NBR5383, “**Máquinas elétricas girantes – Máquinas de Indução – Determinação das Características**”, ABNT, 1982.

NBR 7094/1996, “**Máquinas elétricas girantes - Motores de indução - Especificação**”, ABNT, 2003.

PEDRA; J., SAINZ; L., “**Parameter estimation of squirrel-cage induction motors without torque measurements**”, IEE Proc.-Electr. Power Appl., vol. 153, n° 2, March 2006.

PROCEL, [on-line], [Citado em 28 de março de 2006]. <http://www.eletronbras.gov.br/procel>.

WALTERS; S. S. and WILLOUGHBY; R. D, “**Modeling induction motors for system studies**”, IEEE Transactions. Industry Applications, vol. IA-19, pp. 875-878, Sep. /Oct, 1983.

ALGORITHM FOR THE CALCULATION OF THE INDUCTION MOTORS EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS

Abstract: *This work presents a simple method for the determination of the induction motor equivalent circuit parameters from manufacturer data. In the proposed model the parameters are corrected in function of frequency and magnetic saturation and also are presented the simulation results. The proposed model and its computational implementation present accurate and reliable results.*

Key-words: *induction motor, equivalent circuit parameters, skin effect, magnetic saturation, losses.*