



FERRAMENTA DIDÁTICA PARA A SELEÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

José Tarcísio Assunção – tarcisio@ufsj.edu.br

Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Praça Frei Orlando, 160.

36.307-352 – São João del-Rei – Minas Gerais

Tereza Cristina Bessa Nogueira Assunção – bessa@ufsj.edu.br

Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Praça Frei Orlando, 160.

36.307-352 – São João del-Rei – Minas Gerais

Diego Antonio Miarelli – diegomiarelli@yahoo.com.br

Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Praça Frei Orlando, 160.

36.307-352 – São João del-Rei – Minas Gerais

***Resumo:** O objetivo principal, deste artigo, é desenvolver uma ferramenta didática para a seleção e especificação de motores elétricos de indução trifásicos (MIT), proporcionando a otimização do uso de energia elétrica em instalações industriais. O programa computacional desenvolvido possui uma interface gráfica para a entrada de dados, orientando o usuário para o fornecimento dos dados necessários; para a seleção e especificação do MIT. A ferramenta desenvolvida permite também avaliar dentre as soluções possíveis, a melhor seleção, do ponto de vista de eficiência energética. O programa computacional desenvolvido é avaliado através da especificação e seleção do motor para uma correia transportadora.*

***Palavras-chave:** Motor de indução, Conjugado, Carga, Regime de operação, Especificação.*

1 INTRODUÇÃO

A correta seleção de um motor do elétrico para uma determinada aplicação é determinante no seu custo inicial e principalmente, no custo de sua operação. O emprego de um motor de potência insuficiente pode acarretar um funcionamento inadequado do sistema a ele acoplado, resultando em uma baixa produtividade ou provocar avarias prematuras do motor com a redução de sua vida útil. Por outro lado, um motor de potência nominal acima da necessária, além de um custo inicial maior,

Secretaria Executiva: Factos Eventos.

Rua Ernesto de Paula Santos 1368, salas 603/604. Boa Viagem Recife - PE CEP: 51021-330

PABX:(81) 3463 0871

E-mail: cobenge2009@factos.com.br

resultará na operação com menor rendimento e fator de potência. Todas estas consequências são indesejáveis do ponto de vista técnico e econômico. Em um contexto mais amplo, a correta aplicação e seleção de motores elétricos assume uma grande importância na atualidade devido ao crescente custo e escassez de energia que se verifica não apenas no Brasil, mas também em outros países. Segundo as estatísticas, cerca de 60-70% de toda a energia elétrica produzida é convertida em energia mecânica por meio de motores elétricos. Em setores industriais este percentual chega a 80% e em setores comerciais a 50%. Portanto, a otimização do consumo de energia elétrica passa necessariamente pela redução do consumo de motores elétricos, o qual pode ter um valor significativo, considerando-se a sua vida útil estimada de 15 a 20 anos. Sistemas motrizes são responsáveis por cerca de 50% do total da energia elétrica consumida nas indústrias (PROCEL, 2009). Estes dados revelam a importância dos sistemas motrizes como fonte consumidora de energia elétrica e como campo para a implementação de medidas, objetivando o aumento de sua eficiência energética, que estão ligadas diretamente à uma seleção e especificação adequada dos motores elétricos. Conforme a Tabela 1, pode ser observado que, em um universo de 6108 motores avaliados, 37,75% encontravam-se provavelmente superdimensionados pois operam com carregamento inferior a 70% da potência nominal (MARACH, 2001), sendo I/I_N a relação entre a corrente de operação e a corrente nominal do motor.

Tabela 1- Carregamento de motores avaliados em diagnósticos energéticos.

Condição de carregamento de motores		
Faixa de ocorrência	Número de motores	Total [%]
$30\% < I/I_N < 40\%$	311	5
$40\% < I/I_N < 50\%$	523	8,6
$50\% < I/I_N < 60\%$	700	11,5
$60\% < I/I_N < 70\%$	772	12,6
$70\% < I/I_N < 80\%$	709	11,6
$80\% < I/I_N < 90\%$	554	9,1
$90\% < I/I_N < 100\%$	1989	32,6
Indeterminado	550	9
Possíveis não adequados	2306	37,7
Total	6108	100

Secretaria Executiva: Factos Eventos.

Rua Ernesto de Paula Santos 1368, salas 603/604. Boa Viagem Recife - PE CEP: 51021-330

PABX:(81) 3463 0871

E-mail: cobenge2009@factos.com.br

Para cada aplicação pode existir um grande número de opções de motores elétricos que variam em termos de características, custos de aquisição, de operação e tecnologia de fabricação. A correta análise de cada uma destas alternativas exige um conhecimento bastante sólido do princípio de operação dos motores elétricos e dos principais fatores que influenciam o seu desempenho.

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um programa computacional de um roteiro para a correta seleção e especificação de motores elétricos de indução trifásicos, de rotor tipo gaiola, (MIT) que são os motores elétricos mais usados em instalações industriais. O programa é desenvolvido em ambiente MATLAB, com interface gráfica para entrada e saída de dados, proporcionando a capacidade de uma cuidadosa análise das cargas e condições de operação do MIT. A correta seleção e especificação de um motor elétrico é trabalhosa pois exige a análise e avaliação de muitas variáveis em um método de tentativa e erro. Assim, a ferramenta desenvolvida reduz o trabalho e o tempo de execução dos cálculos, permitindo uma melhor condição para a avaliação das opções disponíveis no mercado.

Para avaliar as melhores destas opções disponíveis no mercado, é proposto que a seleção e especificação do motor de indução trifásico (MIT) se inicie testando o melhor motor indicado pelo software DBMotor; disponível para “download” no “site” do PROCEL-ELETROBRÁS.

2 SELEÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

Para a correta seleção e especificação do MIT, é necessário que o mesmo satisfaça às exigências requeridas a sua aplicação específica, o que significa que o motor deve atender às solicitações térmicas e mecânicas; ou seja, basicamente deve ser capaz de:

- Acelerar a carga em tempo suficientemente curto, para que o aquecimento não venha a danificar as características físicas dos materiais isolantes;
- Operar no regime especificado sem que a temperatura de suas diversas partes ultrapasse a classe de isolamento, ou que o ambiente possa vir a provocar a destruição do mesmo;
- Operar no regime de operação especificado garantindo uma operação estável do motor mesmo sob pequenas variações da tensão de alimentação e ou variações de carga.

A verificação destas três condições básicas garante que o motor selecionado atende às solicitações térmicas e mecânicas do acionamento. Entretanto, sob o ponto de vista de eficiência energética, o motor deve ainda funcionar com valores de rendimento e fator de potência dentro da faixa ótima para a qual foi projetado.

3 DADOS PARA A SELEÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DO MOTOR

A seleção e especificação do MIT são feitas por tentativa e erro; avaliando se o motor selecionado atende às solicitações térmicas e mecânicas impostas pela carga a ser acionada. Assim, para a correta especificação do motor são usados os dados de catálogo

Secretaria Executiva: Factos Eventos.

Rua Ernesto de Paula Santos 1368, salas 603/604. Boa Viagem Recife - PE CEP: 51021-330

PABX:(81) 3463 0871

E-mail: cobenge2009@factos.com.br

dos fabricantes dos motores elétricos; que devem obedecer a NBR7094/2000 [NBR7094, 2000], além das características da fonte de alimentação, do ambiente, e da carga. Com os dados apresentados na Figura 1, e que serão analisados a seguir, são definidas todas as características nominais do MIT.

3.1 Características da rede de alimentação

A tensão nominal do MIT deve ser compatível com a tensão e frequência da rede de alimentação. A qualidade elétrica da fonte de alimentação deve garantir o fornecimento de energia elétrica dentro dos limites máximos de variação conforme NBR7094/2000 [NBR7094, 2000]. É necessário informar também a tensão de partida. Para a especificação do MIT para acionamentos de velocidade variável, utilizando inversores de frequência, são usadas as curvas de correção do conjugado motor em função da distorção harmônica da tensão e a influência da velocidade de operação na ventilação de motores autoventilados.

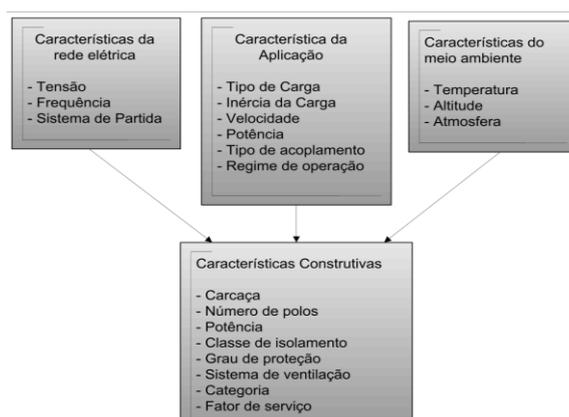


Figura 1. Dados básicos para a seleção e especificação do MIT.

3.2 Característica da aplicação

Como ilustrado na Figura 2, o tipo de carga é identificado pela sua característica conjugado x velocidade. O regime de operação do acionamento deve ser identificado e classificado conforme os regimes tipos padronizados pela NBR7094, e mostrados na Figura 3. Na prática os regimes são usualmente mais irregulares que os regimes tipo; porém, para testar e estabelecer o desempenho de um motor ou proceder a sua seleção, o regime – tipo a ser considerado, é aquele que mais se aproxima do regime real com relação à solicitação térmica.

Secretaria Executiva: Factos Eventos.

Rua Ernesto de Paula Santos 1368, salas 603/604. Boa Viagem Recife - PE CEP: 51021-330

PABX:(81) 3463 0871

E-mail: cobenge2009@factos.com.br

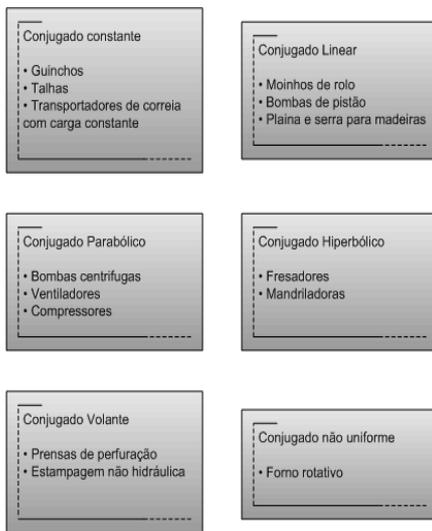


Figura 2. Característica Figura Conjugado x Velocidade das Cargas



Figura 3. Regimes Tipo de Operação

3.3 Potência mecânica da carga

Uma revisão dos cálculos da potência mecânica da carga foge ao objetivo deste artigo, pois estes são fornecidos nos manuais de engenharia mecânica. E, normalmente, a potência mecânica ou o conjugado nominal da carga é fornecido pelo seu fabricante. Entretanto, é importante destacar que para uma melhor eficiência energética de um sistema motriz é necessária uma avaliação detalhada da carga acoplada ao motor elétrico.

Para a seleção e especificação do motor é necessário determinar a potência e o conjugado da carga referida ao eixo do motor; incluindo o rendimento mecânico do acoplamento. O conjugado da carga pode ser referido ao eixo do motor usando a "Equação (1)" e a relação entre potência mecânica e conjugado é dado pela "Equação (2)".

$$C = \frac{C_c}{Z\eta} \quad (1)$$

$$P = \frac{2\pi}{60} n C \quad (2)$$

sendo: C_c = conjugado da carga em [Nm]; η = rendimento mecânico total; Z = razão entre a velocidade da carga e velocidade do MIT; P = potência mecânica em [W]; n = velocidade do motor em [rpm].

Secretaria Executiva: Factos Eventos.

Rua Ernesto de Paula Santos 1368, salas 603/604. Boa Viagem Recife - PE CEP: 51021-330

PABX:(81) 3463 0871

E-mail: cobenge2009@factos.com.br

Para cargas de regime de operação diferente do regime contínuo (S1); determina-se, através da "Equação (3)", uma carga equivalente, ou seja, uma carga que impõe ao MIT uma solicitação térmica equivalente.

$$P_{EF} = \sqrt{\frac{\sum_1^i (P_{Ci}^2 \times t_{Ci})}{\sum_1^i t_{Ci} + \left(\frac{t_R}{k_V}\right)}} \quad (3)$$

sendo: P_{Ci} = potência da carga, durante o intervalo de tempo t_{Ci} ; t_R = tempo de retorno; k_V = constante que modela o efeito da ventilação durante o tempo de repouso do MIT, $k_V = 3$ para motores autoventilados.

4 SELEÇÃO E ESPECIFICAÇÃO

O processo de seleção e especificação do MIT consiste em um método de tentativa e erro para a seleção adequada um motor elétrico de fabricação seriada. Isto significa que é necessário dispor dos dados de catálogo dos fabricantes de motores, que são fornecidos conforme a NBR7094/2000 da ABNT. Estes dados podem ser obtidos diretamente do fabricante ou, como já citado, pode-se usar o programa DBMotor; disponibilizado pelo PROCEL-ELETROBRÁS.

4.1 Potência nominal do MIT

A potência nominal do MIT é o valor nominal garantido pelo fabricante do motor para a operação condições de trabalho bem definida e limitada. Portanto, quando as reais condições da instalação são diferentes dos valores de referência é necessário determinar a potência admissível do MIT (P_{AD}) para as novas condições de trabalho.

4.2 Características do ambiente

Os dados de catálogos dos motores de indução trifásicos, são fornecidos para a operação do motor em instalações de temperatura ambiente média de até 40 °C e altitude de até 1000 m. Para a operação do MIT em condições ambientes diferente dos valores de referência é necessário a correção da potência nominal do motor; determinando-se a potência admissível do MIT como proposto na "Equação (4)".

$$P_{AD} = P_N \sqrt{\frac{\theta_{AD}}{\theta_N}} \quad (4)$$

Secretaria Executiva: Factos Eventos.

Rua Ernesto de Paula Santos 1368, salas 603/604. Boa Viagem Recife - PE CEP: 51021-330

PABX:(81) 3463 0871

E-mail: cobenge2009@factos.com.br

$$\theta_{AD} = 40 - \theta_A + \theta_N \left(1 - \left(\frac{H - 1000}{10000} \right) \right) \quad [^\circ\text{C}] \quad (5)$$

sendo: θ_{AD} = temperatura admissível; θ_N = temperatura da classe de isolamento; θ_A = temperatura ambiente; H = altitude da instalação.

4.3 Número de manobras por hora

Os dados de catálogo do MIT pressupõem apenas duas partidas por hora, sendo a primeira a frio. Assim, para uma carga intermitente com um número maior de manobras por hora (partidas, frenagens ou inversão do sentido de rotação) a potência do MIT deve ser corrigida como em "Equação (6)".

$$P_{AD} = \sqrt{\frac{3600 - k n t_\alpha \left(\frac{I_p}{I_N} \right)^2}{3600 - 2 n t_\alpha}} \quad (6)$$

sendo: k = constante que varia com o tipo de manobra; $k = 1$ para partida, $k = 3$ para frenagem por contracorrente, $k = 4$ para inversão no sentido de rotação; t_α = tempo da manobra; I_p/I_N = relação entre a corrente de partida e a corrente nominal do motor.

4.4 Cálculo do tempo de partida do MIT

O tempo de uma manobra de partida é função da inércia da carga acionada, referida à velocidade do motor (J), e do conjugado de aceleração do motor (C_A), pois $C_A = J dw/dt$. O conjugado de aceleração é a diferença entre o conjugado motor e o conjugado resistente da carga. Como, a curva característica conjugado x velocidade do MIT é complexa e não é fornecida pelos catálogos dos motores, o conjugado de aceleração (C_A) é determinado de forma aproximada pelas "Equações (7), (8) e (9)", propostas por Lobosco (LOBOSCO, 1988).

$$C_C = \text{const.} \Rightarrow C_A = 0,45(C_P + C_K) - C_C \frac{n_C}{n} \quad (7)$$

$$C_C \approx kn \Rightarrow C_A = 0,45(C_P + C_K) - 0,5C_C \frac{n_C}{n} \quad (8)$$

$$C_C \approx kn^2 \Rightarrow C_A = 0,50 \left(C_P + C_K - C_C \frac{n_C}{n} \right) \quad (9)$$

$$C = (\text{volante}) \rightarrow C_A = 0,50[C_P + C_K] \quad (10)$$

Secretaria Executiva: Factos Eventos.

Rua Ernesto de Paula Santos 1368, salas 603/604. Boa Viagem Recife - PE CEP: 51021-330

PABX:(81) 3463 0871

E-mail: cobenge2009@factos.com.br



Assim, o tempo de partida pode ser determinado pela "Equação (11)".

$$t_p = \frac{2\pi J}{60 C_A} n \quad (11)$$

sendo: C_p = conjugado de partida do motor; C_k = conjugado máximo do motor.

O conjugado de partida e conjugado máximo deve ser corrigido se o MIT partir com tensão reduzida (U_p), usando-se a "Equação (12)".

$$C'_p = C_p \left(\frac{U_p}{U_N} \right)^{2,2} ; C'_k = C_k \left(\frac{U_p}{U_N} \right)^{2,0} \quad (12)$$

Determinada a potência da carga faz-se a primeira seleção do motor e em seguida, verifica-se se o motor escolhido atende às solicitações térmicas e mecânicas da carga; através dos testes listados a seguir; conforme o regime de operação.

4.5 Regime de operação S1

Para atender as solicitações térmicas e mecânicas impostas pela carga operando no regime S1 é suficiente escolher um motor de potência nominal (P_N) maior ou igual a potência da carga (P_C) e verificar se:

$$t_p \leq t_{bl} \quad (13)$$

Sendo: t_{bl} = tempo de rotor bloqueado a quente. Este dado de catálogo também deve ser corrigido se a tensão de partida do MIT for reduzida; da seguinte forma:

$$t'_{bl} = t_{bl} \left(\frac{U_N}{U_p} \right)^{2,0} \quad (14)$$

4.6 Demais regimes de operação com velocidade de operação constante

Para os demais regimes de operação é necessário que o primeiro motor escolhido tenha potência nominal maior ou igual à potência eficaz da carga e:

$$P_{AD} \geq P_{ef} \quad (15)$$

$$\frac{C_k}{C_c} > 1,8 \quad (16)$$

Se, o motor selecionado não atende, simultaneamente, as solicitações térmicas e mecânicas, é necessário escolher e testar outro motor. Entretanto, é importante observar que a potência admissível do MIT, também pode ser corrigida se o motor possui fator de serviço $F_s > 1$; fazendo:

$$P'_{AD} = F_s \cdot P_{AD} \quad (17)$$

Secretaria Executiva: Factos Eventos.

Rua Ernesto de Paula Santos 1368, salas 603/604. Boa Viagem Recife - PE CEP: 51021-330

PABX:(81) 3463 0871

E-mail: cobenge2009@factos.com.br



Ou, para uma classe de isolamento superior fazendo:

$$\text{classe B} \rightarrow F \Rightarrow P'_{AD} = 1,146 \cdot P_{AD} \quad (18)$$

$$\text{classe B} \rightarrow H \Rightarrow P'_{AD} = 1,25 \cdot P_{AD} \quad (19)$$

4.7 Demais regimes de operação com velocidade de operação variável

Neste caso, admite-se que o motor é alimentado por um inversor de frequência e, o conjugado ou a potência nominal do motor deve ser corrigidos para compensar o aumento das perdas devido aos harmônicos da fonte de alimentação e o efeito da variação de velocidade para os motores autoventilados. Recomenda-se consultar o fabricante do inversor para uma avaliação mais precisa, mas genericamente, pode-se usar as curvas de correção proposta pela norma NEMA MG1 Part 30, (WEG, 2006).

5 FERRAMENTA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDA

Como mostrado, o processo de seleção é por tentativa e erro e a seleção e especificação mais adequada depende da disponibilidade dos dados de catálogo de fabricantes e uma criteriosa avaliação do custo x benefício de cada alternativa. Os dados de catálogo podem ser obtidos junto aos fabricantes ou através do programa DBMotor, disponibilizado pela ELETROBRÁS. Este programa, na atual versão, possui um banco de dados nominais de 2640 motores de indução trifásicos.

O programa desenvolvido apresenta todas as soluções possíveis, para que o usuário possa decidir qual a solução mais adequada à sua realidade. Dentre as soluções possíveis; o programa avalia a disponibilidade de um motor com carcaça aumentada; um motor com classe de isolamento superior; ou simplesmente o motor de maior potência.

A ferramenta computacional foi desenvolvida em MATLAB e, a seguir são mostradas algumas telas do programa de seleção e especificação de motores de indução trifásico, de rotor tipo gaiola. Como exemplo, é especificado um motor para o acionamento de um transportador de correias.

A Figura 6 mostra uma montagem com três telas de entrada e saída de dados com os dados nominais do MIT selecionado e os dados da carga (transportador de correias).

6 CONCLUSÃO

O programa computacional desenvolvido automatiza, de forma didática, toda a metodologia recomendada, na pequena literatura técnica disponível sobre a especificação e seleção de um MIT, e motiva os usuários a uma análise mais criteriosa na seleção ou na reavaliação dos motores atualmente usados, racionalizando o uso da energia elétrica, e principalmente identificando as oportunidades de redução de custos operacionais e eficiência energética. O programa permite de forma rápida a avaliação de um número maior de possíveis soluções.

Secretaria Executiva: Factos Eventos.

Rua Ernesto de Paula Santos 1368, salas 603/604. Boa Viagem Recife - PE CEP: 51021-330

PABX:(81) 3463 0871

E-mail: cobenge2009@factos.com.br



Especificação do Motor de Indução Trifásico	Dados da Carga	MIT escolhido:
Tensão: 230	Conjugado: Constante	Números de polos: 6
Frequência: 60	Potência: 62	Potência: 9.2 (Número de polos)
Inversor: não	Acoplamento direto: Não	Velocidade: 1160
Características do Ambiente		
Temperatura: 55	Velocidade: 382	In: 32.9
Altitude: 2000	Inércia: 0.0032	Ip/In: 6
Avançar	Fator de redução: 3	Cn: 7.72
	Rendimento: 0.95	Cp/Cn: 2.1
	Calcular	Cmáx/Cn: 2.5
		Jm: 0.13645
		Tbt: 15
		Avançar

Figura 6. Telas da Ferramenta Computacional desenvolvida

A disponibilidade de bancos de dados de motores elétricos, como o DBMotor, facilita incluir uma avaliação da eficiência energética no roteiro de seleção e especificação de um motor de indução trifásico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Procel. (2009). <http://www.eletrobras.gov.br/procel>. Acesso em 05/05/2009.
- Lobosco, O. S. et al (1988). “Seleção e Aplicação de Motores Elétricos” McGraw-Hill.
- Ministério das Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional 2008*. [citado em 13 de abril de 2009]. <http://www.mme.gov.br/>
- NBR7094/2000 (2000). *Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, NBR 7094: Máquinas Elétricas Girantes – Motores de Indução, 2000*.
- Marach, L. C. (2001). *Metodologia para determinar a substituição de motores sobredimensionados*, Revista Eletricidade Moderna, pp. 320-329, Agosto, 2001.
- Guia Técnico WEG (2006). *Motores de Indução alimentados por conversores de Frequência PWM*.

Abstract: *This paper presents an easy and simple rule for an adequate selection and specification of electrical motors, so that it's providing a careful analysis of the usual characteristics of electrical drives. The main purpose for an adequate selection of motor is the optimization of electrical energy, principally at industrial installations. The performed computer program presents a graphical user interface for the data input and the result of the selection and specification of the electrical motors. The effectiveness of the computer program is verified by simulation of a conveyor belt.*

Keywords: *Induction Motor, Load, Specification, Application Regime, Torque.*

Secretaria Executiva: Factos Eventos.

Rua Ernesto de Paula Santos 1368, salas 603/604. Boa Viagem Recife - PE CEP: 51021-330

PABX:(81) 3463 0871

E-mail: cobenge2009@factos.com.br