

Motores de Alto Rendimento

Dimensionamento e Viabilidade Econômica

Norberto Augusto Júnior, Ivan Eduardo Chabu – PEA - EPUSP.

Resumo—A proposta do trabalho é apresentar e discutir aspectos técnicos e econômicos para o dimensionamento e análise de investimento para motores trifásicos industriais que operem com velocidade constante e alimentação diretamente da rede. A metodologia e procedimentos de cálculo desenvolvidos são empregados em programa aplicativo, “Smart Motor”, que propõe o dimensionamento do motor para acionar carga variável de ciclo determinado. O programa realiza análise econômica e fornece indicadores financeiros que permitem ao usuário a escolha da melhor alternativa entre as linhas de motores Standard ou Alto Rendimento.

Termos Indexados — Dimensionamento de Motores, Motor Alto Rendimento e Viabilidade Econômica.

I. INTRODUÇÃO

No Brasil, a energia elétrica é historicamente oferecida pelo aumento da produção ou pelo lado da oferta. A escassez de recursos, o crescimento da demanda, o controle dos impactos ambientais e a longa maturação dos projetos voltados à hidroeletricidade, indicam como importante alternativa a busca de eficiência energética pelo lado do consumidor final, ou seja, pelo lado da demanda.

Quanto ao perfil do consumo de energia elétrica, registra-se que praticamente 23% de toda energia elétrica produzida é consumida através dos motores elétricos.

Assim o melhor projeto, fabricação e dimensionamento nos dos motores elétricos implica em resultados imediatos, disponibilizando substancial quantidade de energia elétrica à custos significativamente mais atraentes quando comparados com os custos da produção ou da oferta.

II. ALTERNATIVAS NA APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS

Os três principais fabricantes de motores elétricos nacionais, Kohlbach, Eberle e WEG, seguindo a tendência dos maiores fabricantes mundiais, oferecem ao mercado duas linhas de produtos para aplicação industrial, uma denominada Standard e a outra de Alto Rendimento. As características técnicas, elétricas e mecânicas, são semelhantes e uma vez definida a potência nominal do motor, qualquer das linhas atende perfeitamente o acionamento da carga. A linha de Alto Rendimento é de preço de aquisição de 20 a 50% mais elevado que a linha Standard, porém apresenta menor consumo de energia em operação ou menor custo operacional.

III. PROPOSTA DO TRABALHO

Os próprios fabricantes oferecem programas de análise técnica e econômica para a decisão da melhor alternativa entre suas linhas de produtos. As considerações são de que os motores operam de modo contínuo, com carga permanentemente constante e rendimento nominal, ou seja, de plena carga.

A família de curvas de rendimentos dos motores mostra que nas cargas superiores a 50 % da potência nominal, o rendimento é relativamente constante variando no estreito intervalo de 1 à 3 % (um a três por cento). Todavia, nos motores que operam com cargas variáveis, nos baixos carregamentos, apresentam queda substancial nos valores de rendimento e o critério de análise dos fabricantes distorce totalmente o cálculo da energia consumida no ciclo bem como a análise econômica.

A questão central é com o conhecimento prévio do ciclo e das características da carga dimensionar a potência adequada, evitando desnecessários superdimensionamentos e decidir corretamente, entre os três fabricantes nacionais, qual linha de motor que apresenta a melhor vantagem econômica, considerando os reais rendimentos com cargas variáveis e a energia consumida durante os processos de partidas.

IV. DIMENSIONAMENTO DO MOTOR ELÉTRICO

Os critérios para o adequado dimensionamento do motor elétrico são listados nos seguintes itens fundamentais:

- A. Dimensionamento pelo critério de Potência Eficaz;
- B. Dimensionamento pelo critério do Conjugado Máximo Motor;
- C. Dimensionamento pelo critério dos conjugados motor e resistente de partida;
- D. Dimensionamento pelo critério do Tempo de Aceleração;
- E. Dimensionamento pelo critério da Potência Disponível.

A. Dimensionamento pelo critério de Potência Eficaz

O conceito de potência eficaz, P_{EF} , do motor de ciclo intermitente e cargas variáveis, com tensão e rotação constantes e ventilação normal é justificado pela igualdade da quantidade de calor Q_C , gerado pelas perdas na condição de potência constante e nominal durante o período T e a quantidade de calor gerado pelo mesmo motor submetido ao ciclo intermitente Q_i , durante o idêntico período T .

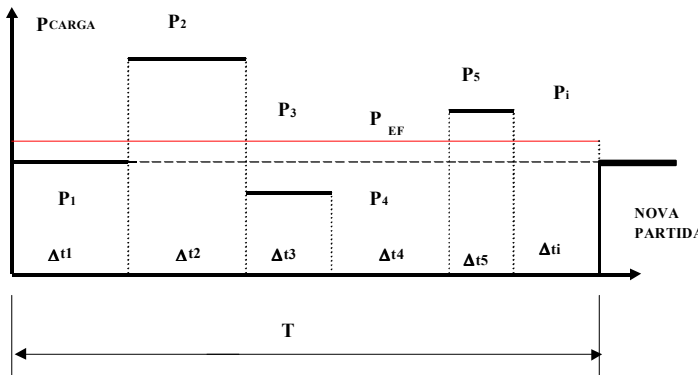


Figura 1 – Ciclo de cargas variáveis

No ciclo constante: $Q_C = A \cdot T + B \cdot P_n^2 \cdot T$,

As constantes A e B representam respectivamente as parcelas das perdas fixas e variáveis do motor

No ciclo intermitente $Q_i = A \cdot T + B \cdot \sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot \Delta t_i$ e $T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$

Impondo as mesmas quantidades de calor desenvolvidas nos ciclos de carga constante e variável:

$$Q_C = Q_i, \text{ ou } A \cdot T + B \cdot P_n^2 \cdot n \cdot T = A \cdot T + B \cdot \sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot \Delta t_i$$

$$\therefore P_{EF} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot \Delta t_i}{T}} \quad (1)$$

Experimentalmente verificou-se que a constante K_v , fator de ventilação, introduzida na expressão (1) corrige convenientemente o valor da potência eficaz nos aumentos de temperatura devido aos estágios de desligamento e repouso.

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot \Delta t_{if}}{\sum [\Delta t_{if} + \frac{\Delta t_{ir}}{K_v}]}} \quad (2)$$

Δt_{if} Período do motor ligado em funcionamento com a carga P_i ,

Δt_{ir} Período do motor desligado e em repouso,

K_v Coeficiente de ventilação, depende do tipo de ventilação

A potência nominal do motor, P_n , deve ser inicialmente superior ao valor da potência eficaz, P_{EF} , logo:

$$P_n > P_{EF} \quad (3)$$

A norma ABNT NBR 7094 estabelece que a potência nominal desenvolvida pelo motor é para locais de altitudes limitadas a 1.000 m e temperaturas ambiente máxima de 40° C.

Nas temperaturas ambientes superiores a 40° C além da redução da capacidade do meio refrigerante há a limitação do sobreaquecimento produzido pelas próprias perdas do motor em operação. Altitudes acima de 1.000 metros possuem ar rarefeito que reduzem a capacidade de refrigeração do motor.

O fabricante Weg apresenta no catálogo técnico uma tabela com coeficientes de correção, K_{TH} , da potência nominal dos motores classe de isolamento B, em função das variáveis altitude (H) em metros e temperatura máxima ambiente (T_A) em °C,

$$P'_{EF} = P_{EF} / K_{TH} \quad (4)$$

O valor da potência nominal, P_n , deve ser superior a potência eficaz, corrigida P'_{EF} :

$$P_n > P'_{EF} \quad (5)$$

$\begin{matrix} H (m) \\ T_A (^\circ C) \end{matrix}$	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
10	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
15	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	0,99
20	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	0,99	0,93
25	1,05	1,05	1,05	1,05	0,98	0,93	0,88
30	1,04	1,04	1,04	0,92	0,92	0,87	0,82
35	1,02	1,02	0,96	0,91	0,86	0,81	0,77
40	1,00	0,94	0,89	0,85	0,80	0,76	0,72
45	0,92	0,87	0,83	0,78	0,74	0,70	0,67
50	0,85	0,80	0,76	0,72	0,68	0,65	0,62
55	0,77	0,74	0,70	0,66	0,63	0,60	0,57
60	0,71	0,67	0,64	0,60	0,57	0,52	0,52

Tabela de Coeficientes de Correção da Potência Nominal, K_{TH}

B. Dimensionamento pelo critério do Conjugado Máximo Motor

Outro aspecto do dimensionamento que deve ser considerado é que nos ciclos de carga variáveis há momentos que o maior conjugado resistente da carga, C_{Rmax} , é superior ao conjugado nominal do motor. Mesmo para esta condição o motor escolhido deve possuir conjugado máximo, C_{Mmax} , superior ao maior conjugado resistente, incluindo margem de segurança de pelo menos 20 %, ou :

$$C_{Mmax} > 1,2 \cdot C_{Rmax} \quad (6)$$

C. Dimensionamento pelo critério dos conjugados motor e resistente de partida

Para a adequada aceleração, no momento da partida, o conjugado motor, C_{MP} também deve ser sempre superior ao conjugado resistente C_O . Logo:

$$C_{MP} > C_O \quad (7)$$

D. Dimensionamento pelo critério do Tempo de Aceleração

A precisão do cálculo do tempo de aceleração, t_{AC} ,

resume-se à precisão da determinação dos conjugados médios do motor e da carga.

As diversas cargas mecânicas aplicadas ao motor, de maneira geral, podem ser caracterizadas e classificadas em cinco diferentes tipos, de acordo com a equação da variação do conjugado resistente da carga pela rotação.

As cargas mecânicas em geral podem ser apresentadas pela equação genérica:

$$C_{\text{carga}} = C_0 + K_c \cdot n^e \quad (8)$$

C_0 Conjugado de partida da carga.

K_c Constante.

n Rotação da carga

e Expoente, que poderá ser: -1, 0, 1 ou 2.

Assim, o conjugado de aceleração desenvolvido, C_{AC} , é determinado por:

$$C_{AC} = C_M - C_{\text{carga}} \quad (9)$$

A adequada aceleração do repouso até a rotação de regime é obtida com C_{AC} sempre positivo. O tempo de aceleração, t_{AC} , deve ser limitado afim de que o excessivo aquecimento do processo de partida não danifique o motor.

A Norma ABNT NBR 7094, item 6.1.1.6 - Requisitos de partida - especifica que o número de partidas dos motores industriais à frio, na temperatura ambiente, é no máximo de duas consecutivas e na condição de motor quente, que encontrava-se em funcionamento, apenas uma.

Nos sistemas rotativos, a equação geral da mecânica que relaciona o conjugado de aceleração (C_{AC}) e a aceleração angular ($d\omega/dt$) da massa inercial J_t no período de aceleração é determinada pela equação:

$$C_{AC} = C_M - C_{\text{carga}} = J_t \cdot d\omega / dt, \quad (10)$$

J_t Momento de inércia total do rotor e da carga ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$).

Portanto o tempo total de aceleração, t_{AC} , contado entre o momento da partida e a rotação de regime é o somatório dos Δt , determinado para todos os pontos nas respectivas curvas do conjugado motor, C_M e do conjugado resistente C_R .

Todavia, os métodos aproximados com os valores médios dos conjugados motor e resistente são recomendados pelos fabricantes de motores. Os resultados são comprovados pelas aplicações práticas e amplamente empregados. A Figura 2, exemplifica a determinação gráfica dos conjugados médios motor, resistente e de aceleração.

O conjugado de aceleração médio, C_{ACM} é determinado por:

$$C_{ACM} = C_{MM} - C_{RM} \quad (11)$$

Assim, na equação (10) o tempo de aceleração é determinado entre o repouso, $\omega_1 = 0$ até o regime ω_2 por:

$$t_{AC} = \{ [(2 \cdot \pi \cdot n) / 60] \cdot J_t \} / C_{ACM} \quad (12)$$

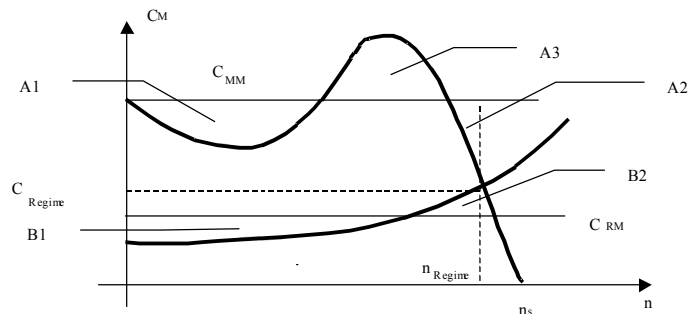


Figura 2 Curvas para determinação dos conjugados médios, motor e resistente

Os conjugados médios do motor e da carga são determinados como segue:

$$C_{MM} \text{ é para a condição: } A1 + A2 = A3$$

$$C_{RM} \text{ é para a condição: } B1 = B2$$

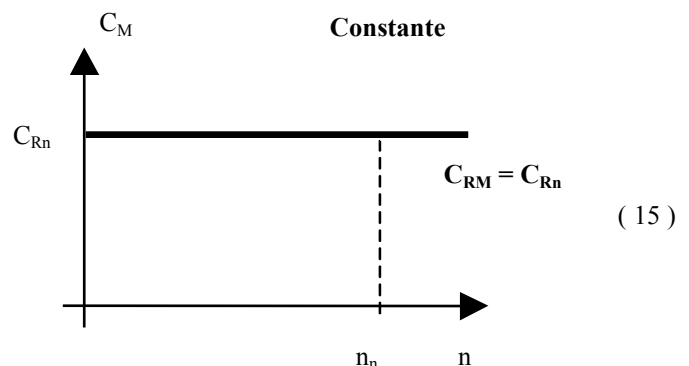
Nos motores categoria N e H, o Conjugado Médio Motor, C_{MM} , recomendado nos catálogos dos fabricantes é determinado com os valores do conjugado motor de partida, C_{MP} e o conjugado motor máximo, C_{Mmax} :

$$C_{MM} = 0,45 \cdot (C_{MP} + C_{Mmax}) \quad (\text{categoria N}) \quad (13)$$

$$C_{MM} = 0,60 \cdot C_{MP} \quad (\text{categoria D}) \quad (14)$$

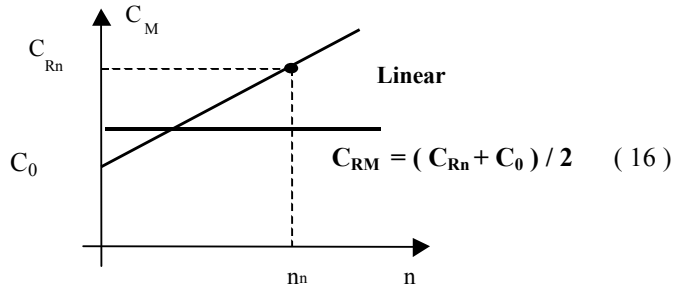
As equações para determinação dos conjugados resistentes médios, C_{RM} são definidas pela característica específica de cada carga aplicada ao motor.

1) Conjugado Resistente Constante



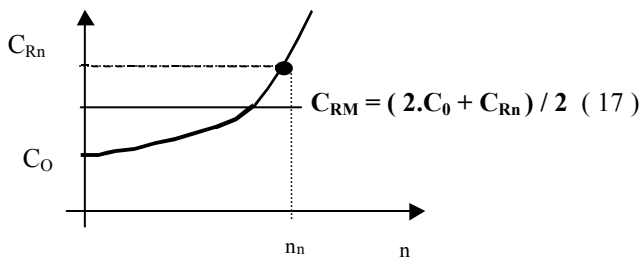
Conjugado resistente à rotação nominal do motor

2) Conjugado Resistente Linear

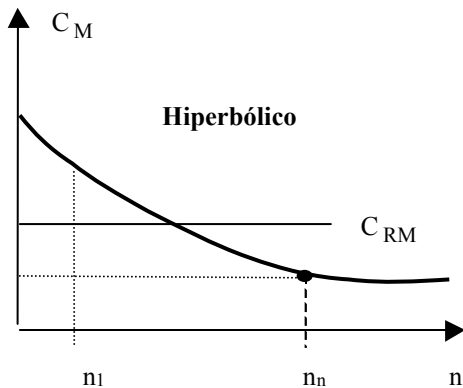


C_0 Conjugado de partida resistente

3) Conjugado Resistente Parabólico



4) Conjugado Resistente Hiperbólico



$$C_{RM} = C_{Rn} \cdot n_n [\ln (n_n / n_1)] / [n_n - n_1] \quad (18)$$

5) Conjugado Resistente Nulo

No caso de partida do motor em vazio, ou seja, sem carga, o conjugado médio de aceleração é o próprio conjugado médio motor.

6) Conjugado Resistente Não Definido

Neste caso não é possível a determinação do conjugado resistente médio sem o conhecimento prévio da curva conjugado resistente pela rotação. A solução é obtida através de métodos gráficos.

Os conjugados de aceleração médio para cada tipo de carga, C_{ACM} , são determinados para cada tipo de carga e pela categoria do motor pela expressão [12].

O Tempo Máximo de Rotor Bloqueado (t_{MRB}) é o tempo máximo que o motor poderá permanecer com as correntes de

rotor e estator nos valores de partida, suportando um acréscimo de aquecimento, logo após o funcionamento de regime, sob condições nominais e que não ultrapasse os limites de temperaturas de pico estabelecidos em normas.

Os tempos de rotor bloqueado apresentadas em catálogos dos fabricantes de motores estão sempre referenciados à classe térmica B. Para os motores que apresentam limitações pelo tempo máximo de rotor bloqueado na classe de isolamento B é possível substituir a classe térmica por outra de nível térmico superior, F ou H, e portanto aumentar o tempo de rotor bloqueado. A construção é considerada especial e de preço de aquisição aumentado.

Afim de que a temperatura máxima durante o pico da partida não ultrapasse os limites da classe térmica os fabricantes recomendam que o tempo de aceleração, t_{AC} , seja inferior a 80% o tempo máximo de rotor bloqueado, t_{MRB}

$$t_{AC} \leq 0,8 \cdot t_{MRB} \quad (19)$$

E. Dimensionamento pelo critério da Potência Disponível

Nos momentos de partida e aceleração, as perdas Joule nos enrolamentos são excessivas e o acréscimo de temperatura não é desprezível. Em muitas aplicações para reduzir o tempo de frenagem o motor não é apenas desenergizado, mas também desacelerado com o auxílio de c.c aplicada ao enrolamento do estator ou ainda por reversão elétrica.

A potência disponível para o motor acionar a carga é conceituada como a potência que poderá ser requerida do motor mesmo submetido a partidas, frenagens ou reversões, sem comprometer a sua integridade ou dos materiais isolantes e determinada na Ref. [1]

$$P_{Disp} = P_n \cdot \sqrt{\frac{3600 - k_{pfr} \cdot N_p \cdot t_{AC} \cdot \left(\frac{I_p}{I_n}\right)^2}{3600 - 2 \cdot N_p \cdot t_{AC}}} \quad (20)$$

P_{Disp}	Potência disponível, para o motor acionar a carga.
k_{pfr}	Coefficiente em função de: partida $k_{pfr} = 1$ frenagem $k_{pfr} = 3$ reversão $k_{pfr} = 4$
N_p	Número de partidas, frenagens ou reversões por hora
$\frac{I_p}{I_n}$	Relação entre as correntes de partida e nominal do motor
t_{AC}	Tempo de aceleração

A potência disponível para o motor operar satisfatoriamente no ciclo de carga estabelecido e suportar as condições de partida e eventuais frenagens deve ser superior a potência eficaz corrigida e exigida.

Concluindo, para a correta definição da potência nominal do motor, a inequação deve ser plenamente satisfeita:

$$P_n > P_{Disp} > P'_{EF} \quad (21)$$

V. VIABILIDADE ECONÔMICA

Inicialmente é importante estabelecer que no projeto o conceito de investimento é a diferença entre os custos de aquisição entre as duas linhas de motores, Alto Rendimento e Standard. A decisão de investir em projetos de conservação de energia envolvendo aplicação de motores de Alto Rendimento requer maiores investimentos iniciais que ao longo do tempo gradativamente são compensados pelos menores custos operacionais.

Os custos de aquisição dos motores são obtidos das listas de preços dos fabricantes com aplicação dos descontos comerciais. Nos projetos já implantados e com unidades existentes a serem substituídas é conveniente contabilizar os custos adicionais inerentes a substituição, tais como os custos de adaptação da instalação para a nova unidade e do número de horas paralisadas.

Nos custos operacionais são considerados apenas o custo da energia consumida pelo motor em funcionamento. Quanto aos demais custos operacionais, normalmente envolvem a manutenção, são considerados semelhantes para as duas linhas de motores, Alto Rendimento e Standard.

As receitas do projeto são os custos anuais da energia elétrica evitada e determinadas pela diferença entre os consumos anuais de energia das duas linhas de motores.

A. Determinação da energia absorvida em um ciclo de carga, na condição de regime

Na condição de regime, a energia absorvida pelo motor no ciclo de t estágios de carga é:

Período (horas)	P_{mec} (kW)	Rendimento η (%)	P_{ABS} (kW)	Energia Consumida no Regime (kWh)
t_1	P_1	η_1	P_1 / η_1	$P_1 \cdot t_1 / \eta_1$
t_2	P_2	η_2	P_2 / η_2	$P_2 \cdot t_2 / \eta_2$
t_3	Zero	Zero	Zero ou P_{ABS0}	(Zero ou $P_{ABS0} \cdot t_3$)
t_t	P_t	η_t	P_t / η_t	$P_t \cdot t_t / \eta_t$

Particularmente no intervalo de tempo t_3 a potência fornecida pelo motor é nula. Poderá então ocorrer duas situações de consumo de energia, uma com motor desligado e em repouso e potência absorvida nula e outra com o motor ligado em estado de espera, absorvendo a potência de vazio, P_{ABS0} .

Assim a energia absorvida pelo motor em regime no ciclo, E_{cicloR} é determinada pela equação:

$$E_{cicloR} = P_1 \cdot t_1 / \eta_1 + P_2 \cdot t_2 / \eta_2 + (\text{Zero ou } P_{ABS0}) \cdot t_3 + \dots + P_t \cdot t_t / \eta_t \quad (22)$$

O período do ciclo, T em horas é determinado por:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_t \quad (23)$$

B. Determinação da energia absorvida na partida

No acionamento da carga desde o repouso até a velocidade de regime é necessário fornecer energia ao motor suficiente para acelerar as partes girante do próprio rotor, da carga, do acoplamento e ainda suprir as perdas do sistema

Conforme demonstrado na Ref. [1] a energia dissipada no enrolamento do rotor, $E_{partida\ rotor}$, durante a aceleração desde o repouso até o regime é determinado por:

$$E_{partida\ rotor} = \frac{J_t \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot [C_M - C_R]} \quad (24)$$

Com facilidade demonstra-se pelo circuito equivalente do motor que a energia dissipada no enrolamento do estator, $E_{partida\ estator}$, é:

$$E_{partida\ estator} = [R_1 / R'_2] \cdot E_{partida\ rotor} \quad (25)$$

R_1 Resistência ôhmica, por fase, do estator.

R'_2 Resistência ôhmica, por fase, do rotor, referida ao estator.

Portanto, a energia total dissipada nos enrolamentos durante uma partida, $E_{partida}$:

$$E_{partida} = E_{partida\ rotor} + E_{partida\ estator} \quad (26)$$

A energia total absorvida nas partidas, E_{ABSP} , é o somatório das energias dissipadas em cada uma das N_p partidas do ciclo.

$$E_{ABSP} = \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{J_T \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot (C_M - C_{Ri})} + \left[\frac{R_1}{R'_2} \right] + \frac{J_T \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot (C_M - C_{Ri})} \right) \quad (27)$$

C. Determinação da energia total consumida em um ciclo de carga

A energia total consumida em um ciclo é determinada pela soma das energias consumidas na partida e regime

$$E_{ciclo} = E_{partida} + E_{cicloR} \quad (28)$$

$$E_{ciclo} = \{ [P_1 \cdot t_1 / \eta_1 + P_2 \cdot t_2 / \eta_2 + (\text{Zero ou } P_{ABS0}) \cdot t_3 + \dots + P_t \cdot t_t / \eta_t] +$$

$$+ \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{J_T \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot (C_M - C_{Ri})} + \left[\frac{R_1}{R'_2} \right] + \frac{J_T \cdot \omega_s^2 \cdot C_M}{2 \cdot (C_M - C_{Ri})} \right) \} \quad (29)$$

D. Determinação da energia anual consumida pelo motor

A energia anual consumida é determinada por:

$$E_{anual} = 12 \cdot E_{ciclo} \cdot H_m / T \quad (30)$$

E_{anual} Energia anual consumida pelo motor em kWh
 H_m Número de horas de operação do motor por mês

E. Determinação do custo anual da energia consumida

O custo anual da energia consumida ou custo anual operacional, CO_{anual} em R\$ / Ano é :

$$CO_{\text{anual}} = CE \cdot E_{\text{anual}} = 12 \cdot E_{\text{ciclo}} \cdot CE \cdot Hm / T \quad (31)$$

CE Custo Médio da Energia da Concessionária em R\$ / kWh.

$$E_{\text{anual}} = 12 \cdot Hm / T \left\{ [P_1 \cdot t_1 / \eta_1 + P_2 \cdot t_2 / \eta_2 + (\text{Zero ou } P_{\text{ABS0}}) \cdot t_3 + \dots + P_t \cdot t_t / \eta_t] + \right.$$

$$\left. \sum_{i=1}^{n_p} \left(\frac{J_r \cdot W_s^2 \cdot C_{\text{dt}}}{2(C_{\text{dt}} - C_{\text{RL}})} + \left[\frac{R_1}{R_2} \right] + \frac{J_r \cdot W_s^2 \cdot C_{\text{dt}}}{2(C_{\text{dt}} - C_{\text{RL}})} \right) \right\} \quad (32)$$

F. Custo do Projeto

1) Investimento Inicial

O investimento inicial é a diferença entre os custos iniciais das duas linhas de motores.

$$II = CI_{\text{AR}} - CI_{\text{ST}} \quad (33)$$

II Investimento Inicial

CI_{AR} Custo Inicial ou Preço de Aquisição do motor de Alto Rendimento

CI_{ST} Custo Inicial ou Preço de Aquisição do motor Standard

2) Receitas do Investimento

As receitas consideradas são aquelas obtidas anualmente até o final do projeto e geradas pelo custo da energia evitada. Trata-se da economia do consumo de energia pela decisão de aplicar motor da linha de Alto Rendimento. As receitas do investimento são determinadas pela diferença dos custos operacionais anuais entre as duas linhas de motores.

$$RI = CO_{\text{ST}} - CO_{\text{AR}} \quad (34)$$

RI Receita Anual do Investimento ou Custo da Energia Evitada

CO_{ST} Custo Operacional Anual do Motor Standard

CO_{AR} Custo Operacional Anual do Motor Alto Rendimento

$$RI = CE \cdot (Energia_{\text{St}} - Energia_{\text{AR}}) \quad (35)$$

$Energia_{\text{St}}$ Energia anual consumida pelo motor Standard em kWh

$Energia_{\text{AR}}$ Energia anual consumida pelo motor Alto Rendimento em kWh

A economia anual de energia, ΔEE_{anual} é determinada por:

$$\Delta EE_{\text{anual}} = (Energia_{\text{St}} - Energia_{\text{AR}}) \quad (36)$$

Logo:

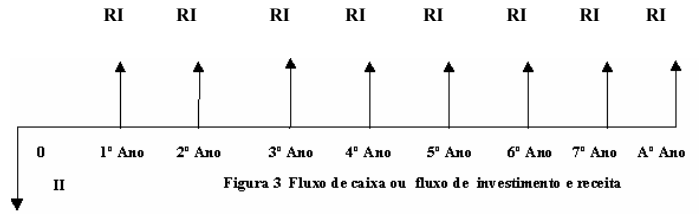
$$RI = CE \cdot \Delta EE_{\text{anual}} \quad (37)$$

Fluxo de Investimento e Receita

O fluxo de caixa ou de investimento e receita são representados na figura 3

G. Avaliação Econômica do projeto

Os métodos tradicionais de análise econômica são considerados suficientemente precisos e adequados ao projeto.



Os métodos abordados são:

- 1) Vantagem Financeira – VF
- 2) Tempo de Retorno do Capital, ou “pay - back”
- 3) Valor Presente Líquido – VPL
- 4) Índice de Lucratividade - I_L
- 5) Taxa Interna de Retorno – TIR

1) Vantagem Financeira – VF

A Vantagem Financeira, VF, é definida pela diferença monetária entre o custo total do motor Standard e o custo total do Alto Rendimento para determinado número A de anos.

$$VF = CT_{\text{ST}} - CT_{\text{AR}} \quad (38)$$

O custo total para cada linha de motor para todos os A anos de operação ou de análise é determinada:

$$CT_{\text{ST}} = CI_{\text{ST}} + CO_{\text{ST}} \quad \text{motor Standard} \quad (39)$$

$$CT_{\text{AR}} = CI_{\text{AR}} + CO_{\text{AR}} \quad \text{motor Alto Rendimento} \quad (40)$$

das equações [33], [34] e [38] resulta:

$$CI_{\text{ST}} - CI_{\text{AR}} = -II$$

$$CO_{\text{ST}} - CO_{\text{AR}} = RI$$

$$VF = RI \cdot A - II = RI_T - II \quad (41)$$

$RI_T = RI \cdot A$ Receita totalizada para os A anos

Na determinação da Vantagem Financeira não são considerados a taxa de juros do capital e a taxa de aumento da energia elétrica do decorrer do projeto, que não deixa de ser considerável imprecisão para longos períodos de análise.

No início do projeto a Vantagem Financeira é negativa e posteriormente, com o decorrer do tempo, torna-se positiva. Vantagem Financeira positiva aponta no período analisado, custo total do motor Standard superior ao custo total do motor de Alto Rendimento.

A questão é se o tempo decorrido para Vantagem Financeira se tornar positiva é atraente para o usuário ou empreendedor. Vantagem Financeira nula representa o tempo de retorno do capital investido, ou tempo de “pay – back”.

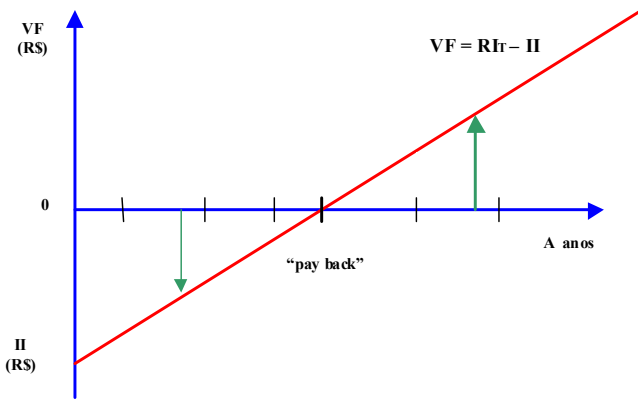


Figura 4 Métodos: Vantagem Financeira e pay - back”

2) Tempo de Retorno do Capital, ou “pay - back”

O método do tempo de retorno do capital investido ou “pay - back” está fundamentado no conceito de tempo no qual a soma das receitas provenientes de determinado projeto reproduz o total do capital investido para sua implantação.

O “pay back”, tempo no qual o investimento inicial, II, é equivalente ao número de receitas anuais, RI, é determinado por :

$$T_{\text{pay - back}} = \text{II} / \text{RI} \quad (42)$$

3) Valor Presente Líquido – VPL

Outro método utilizado para longo prazo é do Valor Presente Líquido, VPL, e está fundamentado no conceito do valor da soma de todos os investimentos e receitas referendadas a uma única data pela taxa de juros.

No projeto, o investimento é único e realizado na data inicial, pelo acréscimo de investimento na aplicação do motor de Alto Rendimento e apresentado como II.

As receitas anuais, que traduzem o custo da energia evitada, são acrescidas no decorrer do tempo, pela taxa de crescimento do custo da energia elétrica.

Na expressão de RI, o valor do custo médio da energia, CE, é afetado pela taxa de aumento da energia, e (%).

Os valores de CE_1, CE_2, \dots, CE_A são custos médios futuros da energia (R\$ / kWh) projetados pela taxa de aumento da energia elétrica, e (%), nos respectivos anos, 1º, 2º, ..., Aº

As receitas anuais, no 1º, 2º, ..., Aº anos, são determinadas:

$$RI_1 = CE_1 \cdot \Delta EE_{\text{anual}}$$

$$RI_2 = CE_2 \cdot \Delta EE_{\text{anual}}$$

$$RI_A = CE_A \cdot \Delta EE_{\text{anual}}$$

A soma das receitas anuais, referendadas ao presente pela taxa de juros, RI_{TP} , é:

$$RI_{TP} = RI_{P1} + RI_{P2} + \dots + RI_{PA} \quad \text{ou,}$$

$$RI_{TP} = (CE_{P1} + CE_{P2} + \dots + CE_{PA}) \cdot \Delta EE_{\text{anual}}$$

$$CE_{TP} = CE_{P1} + CE_{P2} + \dots + CE_{PA} \quad \text{e}$$

$$RI_{TP} = CE_{TP} \cdot \Delta EE_{\text{anual}} \quad (43)$$

Assim, o custo da energia, CE (R\$ / kWh), acrescida da

taxa de aumento anual, e (pu), e referendada ao presente pela taxa de juros anual, j (pu), nos A anos do projeto é determinada por:

Anos	CE (R\$ / kWh)	CE _P (R\$ / kWh)
1º	CE ₁ = CE	CE _{P1} = CE / (1+j)
2º	CE ₂ = CE.(1+e)	CE _{P2} = CE.(1+e) / (1+j) ²
3º	CE ₃ = CE.(1+e) ²	CE _{P3} = CE.(1+e) ² / (1+j) ³
Aº	CE _A = CE.(1+e) ^(A-1)	CE _{PA} = CE.(1+e) ^(A-1) / (1+j) ^A

CE₁, CE₂, ..., CE_A Custo da Energia nos anos 1º, 2º, ..., Aº projetadas ao futuro pela taxa de aumento da energia elétrica (e), R\$ / kWh.

CE_{P1}, CE_{P2}, ..., CE_{PA} Custo da Energia no final dos anos 1º, 2º, ..., A, referendadas ao presente pela taxa de juros (j), R\$ / kWh.

A soma de todos os custos anuais referendados ao presente, CE_{P1}, CE_{P2}, ..., CE_{PA}, equivalem a soma dos termos de uma progressão geométrica de n termos de razão q e primeiro termo a₁, ou

$$q = (1+e) / (1+j) \quad \text{e} \quad a_1 = CE_{P1} = CE / (1+j).$$

1º caso: para q ≠ 1 ou e ≠ j:

$$CE_{TP} = CE \left[\frac{\left[\frac{1+e}{1+j} \right]^A - 1}{e - j} \right] \quad (44)$$

2º caso: para q = 1 ou e = j

$$CE_{TP} = [CE / (1+j)] \cdot A \quad (45)$$

CE_{TP} soma das parcelas CE_{P1}, CE_{P2}, CE_{P3}, ..., CE_{PA}

Com o valor de CE_{TP} calcula-se RI_{TP} na Equação 43

Assim, o Valor Presente Líquido, VPL do projeto é:

$$VPL = RI_{TP} - \text{II} = CE_{TP} \cdot \Delta EE_{\text{anual}} - \text{II} \quad (46)$$

O critério de viabilidade econômica do projeto, pelo método do Valor Presente Líquido, é que VPL seja necessariamente positivo ou as receitas referendadas ao presente devem ser superiores aos investimentos, RI_{TP} > II.

4) Índice de Lucratividade - I_L

A relação entre a soma de todas as receitas, referendadas à data do início do projeto, RI_{TP} e o investimento para a sua implantação, II, é denominada índice de lucratividade, I_L, ou ainda relação benefício / custo, definido o projeto como viável ara I_L > 1.

$$I_L = RI_{TP} / \text{II} \quad (47)$$

5) Taxa Interna de Retorno – TIR

A Taxa Interna de Retorno, i_r , é uma taxa equivalente de juros que aplicada aos valores do fluxo de caixa e referenciados à data de início do projeto torna nulo o Valor Presente Líquido.

O critério de viabilidade econômica, é que a Taxa Interna de Retorno seja superior a taxa de juros do investimento ou de atratividade para o usuário ou investidor.

A captação de recursos poderá ser realizada por linhas incentivadas e específicas para conservação de energia provenientes de percentual das receitas brutas das concessionárias, Reserva Global de Reversão - RGR, ou por linhas normais de financiamentos.

No projeto o investimento é único e inicial, II. Então a soma das receitas anuais, RI_T , devem ser referendadas ao presente, início do projeto pela taxa de retorno interna.

Assim, a Equação [43], da soma das receitas anuais, referendadas ao presente é transformada em:

$$RI_{Tir} = CE_{TPir} \cdot \Delta EE_{\text{anual}} \quad (48)$$

CE_{TPir} , é a soma dos termos CE_P com o valor da taxa interna de retorno i_r e determinada conforme apresentado para CE_{TP} , Equações [44] e [45]. Na hipótese da taxa interna de juros resultar diferente da taxa de crescimento da energia elétrica, e $\neq i_r$, determina – se CE_{TPir} por :

A taxa interna de retorno é determinada pela resolução da equação:

$$CE_{TPir} = CE \left[\frac{\left[\frac{1+e}{1+i_r} \right]^A - 1}{[e - i_r]} \right] \quad (49)$$

$$II = RI_{Tir} = CE_{TPir} \cdot \Delta EE_{\text{anual}} \quad (50)$$

A solução desta equação para o valor de i_r , taxa interna de retorno, é obtida pela escolha do número A de anos de análise e pelos métodos matemáticos de tentativas e aproximações sucessivas.

CONCLUSÃO

Importante vantagem econômica é conseguida pela substancial redução do consumo de energia elétrica através do correto dimensionamento dos motores aplicados em acionamentos de velocidade constante e cargas variáveis, principalmente quando a operação é realizada com motores de Alto Rendimento utilizados acima de 2200 hs/ ano.

O trabalho motiva os usuários a racionalizar o uso de energia elétrica, identificar oportunidades de ganhos financeiros e comprovar as vantagens quando da escolha da linha de motor entre os principais fabricantes nacionais.

A análise econômica é apresentada em cenário econômico

com taxas de juros e taxas de aumento do custo de energia elétrica e permite a comparação entre os custos totais dos motores das linhas Standard e Alto Rendimento.

A metodologia de cálculo apresentada aprimora a determinação da energia consumida através motores pelo fato de considerar o valor do rendimento no real carregamento e não utilizando apenas o rendimento nominal para qualquer condição de carga.

No aspecto financeiro são abordadas as ferramentas clássicas de análise de investimentos e consideradas suficientes para decisão da escolha da linha de motor de melhor alternativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LOBOSCO, O. S., DIAS, J. L. P. DA Seleção e Aplicação de Motores Elétricos. Vol. 1 e 2; Ed. McGraw-Hill 1.988
- [2] JORDÃO, RUBENS GUEDES, Máquinas Síncronas; Ed. Universidade de São Paulo, 1980
- [3] COGO, J. R., SÁ, J. S., OLIVEIRA, A. F.º., Economia de Energia em Motores de Indução Trifásicos - Revista Eletricidade Moderna, abril, 1996 - nº 265
- [4] NAU, L. S., Motores Elétricos de Indução: O que muda com a nova NBR 7094 - Revista Eletricidade Moderna nº 263 março, 1997
- [5] NAILEN, L.R., Utility Rebates for Efficient Motors – The Outlook For Demand – Side Management – IEEE – Transactions On Industry Applications, Vol. 33, nº 1, January/February, 1997
- [6] BONNET, A. H., Understanding Efficiency in Squirrel - Cage Induction Motors, IEE Transactions on Industry Applications, Vol. 16, July/August, 1980
- [7] HEINTZ, J. R., HOUTON, R. L., NEMA NOMINAL EFFICIENCY - WHAT IS IT AND WHY?, IEE Transactions on Industry Applications, Vol. A-17, September/October, 1981
- [8] HENZEL, J., Understanding Premium-Efficiency Motor Economics, Plant Eng., pp 83-86, December 10 - 1992
- [9] BONNETT, H., Reliability Comparison Between Standard and Energy Efficient Motors - IEE Transactions on Industry Applications, On Industry Applications Vol. 33, nb. 1, January/February, 1997
- [10] JORDAN, E. H., Energy Efficient Electric Motors And Their Applications – Second Edition, Plenum Press, New York And London - 1994
- [11] Manual da Administração de Energia Nº 2– Força Motriz – Agencia para aplicação de Energia de São Paulo –1997
- [12] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 5383 – Máquinas Elétricas Girantes – Máquinas de Indução - Determinação das Características –1982 NBR 7094 – Máquinas elétricas Girantes – Motores de Indução – Especificação, Nov/1996 NBR 5432 – Máquinas Elétricas Girantes – Dimensões e Potências Nominais, Ago/1983
- [13] NEMA – National Electric Manufactures Association: MG1-12 – Motors And Generators
- [14] IEC 34-12 Methods For Determining Losses And Efficiency Of Rotating Electric Machinery Form Tests
- [15] SIEGFRIED, K., Motores de Alto Rendimento, Uma Economia Viável?, Eletricidade Moderna, Outubro, 1998
- [16] ALBUQUERQUE, P. C., Motores de Alto Rendimento: Vale a Pena Pagar Mais? Eletricidade Moderna – Agosto/1982
- [17] SENS, M. R., Avanços Tecnológicos nos Motores Elétricos, Eletricidade Moderna, Abril 1985
- [18] Catálogo Geral – Motores elétricos- Edição 2000 – Weg
- [19] Motores Elétricos Trifásicos - Edição 2000 - Catálogo Kohlbach
- [20] Motores Elétricos Trifásicos - Industrial - Edição 2000 – Catálogo Eberle.