

ANÁLISE ECONÔMICA EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

PAULO HENRIQUE OLIVEIRA REZENDE¹, DÉCIO BISPO²

Resumo — O trabalho apresenta uma completa metodologia, sob o enfoque da eficiência energética, para estudo e aplicação de técnicas de diagnóstico energético em motores de indução, tendo em vista que estas são as principais cargas industriais. Inicia-se demonstrando através de equacionamentos, como obter os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução por dois métodos. Posteriormente, são expostas três formas de se obter as curvas características do motor. No entanto é finalizado o trabalho, mostrando como verificar as condições operacionais do motor e como analisar economicamente uma possível troca do motor padrão por um de alto rendimento, exemplificando todo o tema abordado através de um estudo de caso.

Palavras - chaves — Curvas características, dimensionamento, eficiência energética, equacionamento, motor de indução.

Abstract — This work presents a complete methodology, a focus on energy efficiency for the study and application of energetic diagnostic techniques in induction motors, considering that these are the main industrial loads. It begins by demonstrating equations and how to obtain the equivalent circuit parameters of induction motor using two methods. Thereafter, are exposed three ways to obtain the characteristic curves of the motor. From these data the work is completed, showing how to check the motor operating conditions and economic analysis as a possible motor swap for a standard high-performance, all these issues are exemplified through a case study.

Keywords — Characteristic curves, energy efficiency, equation, induction motor, specification.

¹ Faculdade de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia.. FEELT/UFU - Avenida João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica - Uberlândia (MG) - Brasil - CEP 38400-902. e-mail: paulohenrique16@gmail.com

² Faculdade de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia. FEELT/UFU - Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Mônica - Uberlândia (MG) - Brasil - CEP 38400-902. e-mail: deciobispo@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

A aprovação da “Lei de Eficiência Energética” (Lei nº 10.295 de 17.out.2001 - BRASIL, 2001b), cuja tramitação no Congresso Nacional iniciou em 1990, vem instituir a etiquetagem obrigatória no Brasil, mecanismo de reconhecida eficácia para melhorar o uso eficiente de energia. O primeiro equipamento a ser regulamentado foi o motor elétrico trifásico, através do Decreto 4.508, de 11 Dezembro 2002. Estima-se que este equipamento pode chegar a consumir 32% da energia elétrica do país.

Programas de Etiquetagem (como o PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem) e Padronização (agora aqui introduzido com a Lei de Eficiência Energética) são técnicas consagradas e hoje adotadas em mais de 25 países. No entanto, cabe indagar-se qual a economia a ser obtida com a Lei. Esta é uma pergunta difícil porque envolve várias questões: como (com que carregamento e rendimento) e quanto (horas/ano) operam os motores? E, o que é pior, onde estão os dados?

Estimativas têm sido feitas, chegando a apontar uma economia de 43%. Este trabalho pretende a partir de dados coletados no laboratório de Eficiência Energética a elaboração de diagnósticos energéticos, estimar o impacto da Lei e verificar que projeções podem ser feitas para o cenário nacional.

Diante disso, conhecer o uso da energia elétrica no Brasil é de suma importância, pois é uma informação essencial para estudo e tentativa de redução ou uso racional de energia no país.

1.1. Consumo de energia por setor e energético

A Figura 1.1 mostra a evolução do consumo de energia total na indústria brasileira.

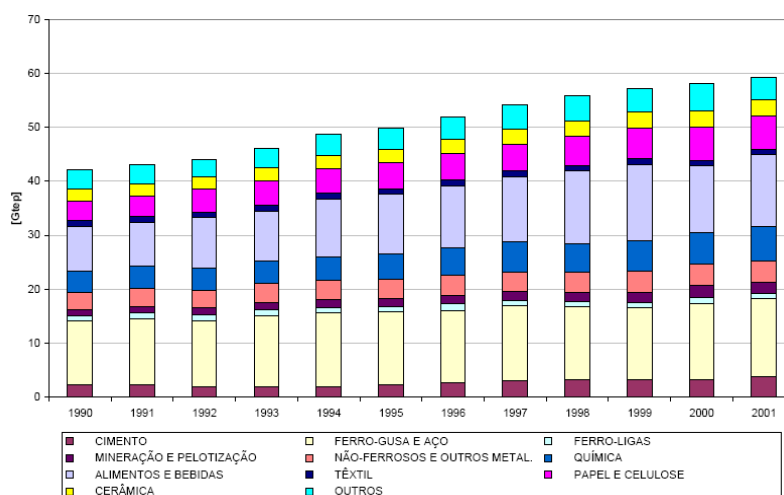


Figura 1.1 - Consumo de energia na indústria por setor.

Nota-se uma tendência de aumento em todo o período, com uma aparente manutenção da participação dos setores. Esta participação pode ser mais bem vista na Figura 1.2, onde foram utilizados os dados de 2001.

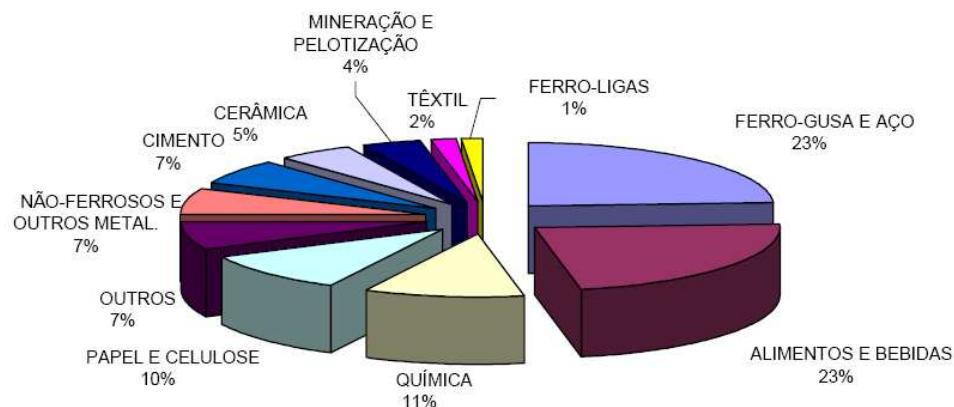


Figura 1.2 - Participação dos setores no consumo de energia (2001)

O setor ferro-gusa e aço utilizam preponderantemente coque de carvão mineral e carvão vegetal, como observam Tolmasquim e Szklo, representando 65% da energia consumida. No setor de alimentos e bebidas, destaca-se o consumo de bagaço de cana, responsável por 2/3 da energia consumida. Em termos de fontes de energia, a participação relativa para o consumo da indústria está na Figura 1.3. Eletricidade é a principal fonte, com 1/5 de contribuição, seguindo-se o bagaço de cana, com maiores consumos que os combustíveis fósseis.

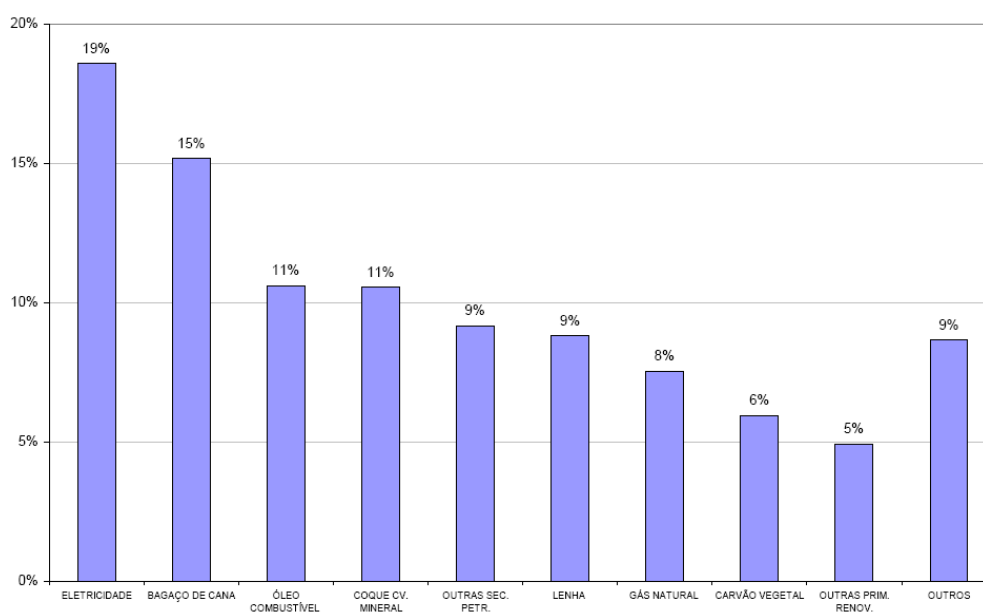


Figura 1.3 - Energéticos utilizados na indústria (2001).

1.2. Principal carga elétrica da indústria

No Brasil, o setor industrial é responsável por 44% do consumo da energia elétrica produzida no país, dentro dos quais os motores elétricos são responsáveis por aproximadamente 55% do consumo, o que corresponde a cerca de 30% da energia total gerada. Estudos mostram que economizar custa menos que gerar a mesma quantidade de energia, portanto qualquer iniciativa de otimizar o seu consumo é de grande importância (Freitas, 2008).

Como os motores de indução trifásicos são responsáveis por grande parcela do consumo desta energia é interessante iniciar um estudo considerando justamente esses motores. Para tal, em primeira instância, deve-se analisar o seu dimensionamento, pois se os mesmos estiverem mal especificado, ocorrerá desperdício de energia, fato este que pode ser evitado. Para analisar o dimensionamento dos motores, serão utilizadas suas curvas características, que retratam o comportamento dos mesmos, sendo estas levantadas ou obtidas diretamente do fabricante, por meios de ensaios laboratoriais ou por meio de equações originadas do circuito equivalente (Locatelli, 2004).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi feito na Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) na Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Os ensaios foram realizados no laboratório de Eficiência Energética do Convênio UFU/ ELETROBRÁS.



Figura 2.1 - Laboratório de Eficiência Energética UFU.

O laboratório possui quatro bancadas de testes, sendo quatro cargas diferentes, composto por um ventilador, uma bomba, uma esteira e um compressor.

Todas as bancadas são controladas por um supervisor que liga a bancada onde está acoplado o motor ao microcomputador, em que pelo monitor é possível visualizar e controlar todos os pontos de operação do motor desejados. A Figura 2.2 mostra uma foto do painel do supervisor aberto, que controla a bomba.



Figura 2.2 - Painel do supervisor.

As medições foram realizadas no motor da marca 'WEG', com os seguintes dados na Tabela 2.1. Esses motores que foram ensaiados são motores extras que não estavam acoplados a nenhuma bancada ligada a um supervisor, desta forma, o motor ficou livre para a análise e os dados obtidos diretamente por instrumentos de medição.

Tabela 2-1 - Dados de Placa dos Motores

STANDARD	
Potência: 1.5 cv	1.1HP
Velocidade: 3370 rpm	60 Hz
CAT N	Reg S1
MAX Amb 40°C	Alt 1000m
FS 1.15	Isol B
Ip / In 7.5	Ip 55
220 /380 V	4.27 / 2.47 A
H 78.6%	cosφ 0.86

Na Figura 2.3 são mostrados os dois motores usados para o trabalho, sendo o da linha padrão azul e o de alto rendimento verde.



Figura 2.3 - Motor de indução Standard e alto rendimento.

A Figura 2.4 mostra os alicates Wattímetro que foram utilizados em medições para coleta de dados para o trabalho.



Figura 2.4 - Wattímetros alicates.

3. METODOLOGIA

A seqüência de informações que viram a seguir se organizam de maneira a informar o leitor como se proceder uma completa análise de eficiência energética em motores de indução.

A análise aborda desde obtenção do circuito equivalente do motor de indução a um estudo econômico para verificação de possível troca do motor da linha padrão por um de alto rendimento.

3.1. Obtenção dos parâmetros elétricos do circuito equivalente do motor de indução

Nessa seção serão abordados dois métodos para se encontrar os parâmetros elétricos do circuito equivalente do motor de indução, pois este serão de imensa necessidade para dar continuidade ao trabalho, uma vez que todos os estudos posteriores serão embasados nesses parâmetros do motor.

Os métodos elaborados nessa sessão são aproximados mas, porém com bastante aceitação no assunto tratado nesse trabalho garantindo resultados rápidos e confiáveis.

3.1.1. Desenvolvimento a partir dos dados de placa do motor

Esse método descreve como encontrar os parâmetros procurados utilizando apenas dados de placa do motor de indução e algumas considerações a ser feita em momento oportuno.

Os parâmetros procurados são os mostrados na Figura 3.1.

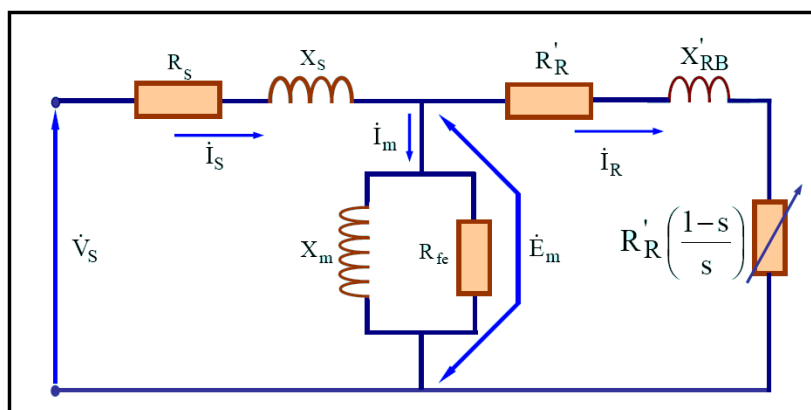


Figura 3.1 - Circuito equivalente do motor de indução.

Para iniciar o estudo, a elaboração de um fluxo de potência facilitará bastante o entendimento e visualização das equações descritas nesse processo.

A figura 3.2 mostra como é dada a distribuição de potência no motor de indução, desde a potência de entrada até a potência disponibilizada no eixo.

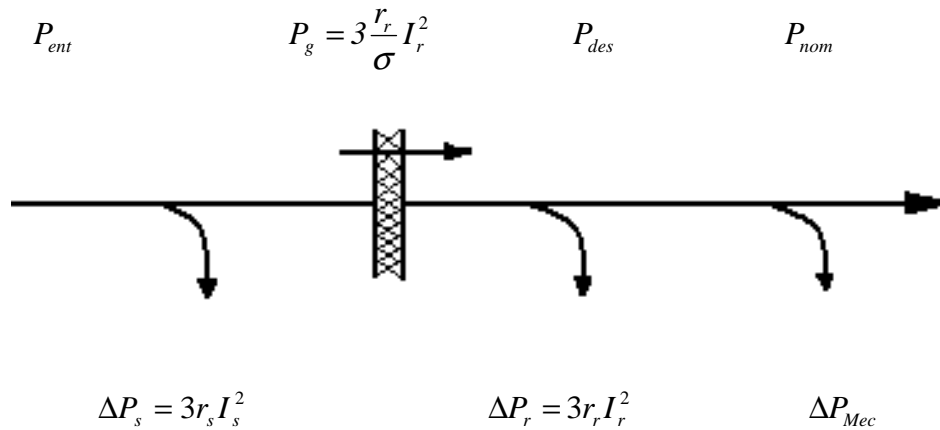


Figura 3.2 - Fluxo de Potência no Motor de Indução

Observando o fluxo de potência acima, conclui-se que as perdas totais no motor pode ser dada pela potência de entrada da rede menos a potência mecânica no eixo do motor. Isso é representado pela equação abaixo:

$$\Delta P_t = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi - P_n \times 736 \quad (3.1)$$

Faz-se agora a primeira estimativa desse método, onde se supõe que as perdas mecânicas são iguais a metade das perdas elétricas. Essa afirmação é concebida por dados estatísticos analisados em diversos ensaios anteriores. Com isso é possível escrever a equação:

$$\Delta P_{Mec} = \frac{\Delta P_t}{2} \quad (3.2)$$

Pelo fluxo de potência tem-se que a potência desenvolvida é a soma das potências nominal entregue pela máquina mais a parcela de potência que é perdida nas perdas mecânicas, equacionando o que foi exposto, tem-se:

$$P_{des} = \Delta P_{Mec} + P_{nom} \quad (3.3)$$

Dando continuação ao estudo, é preciso conhecer qual parcela de corrente fornecerá potência ativa e o quanto irá para magnetização da máquina. Essas parcelas são mostradas na Figura 3.1 ajudando a visualização para melhor entendimento da explicação.

Essas correntes são obtidas pelas expressões abaixo:

$$I_R = I_S \times \cos \varphi \quad (3.4)$$

$$I_m = I_S \times \sin \varphi \quad (3.5)$$

Dando continuidade ao equacionamento percebe-se que a potência desenvolvida é a potência transferida através do entreferro menos as perdas no rotor, em forma de expressão têm-se o seguinte:

$$P_{des} = P_g - \Delta P_t \quad (3.6)$$

$$P_{des} = \frac{3r_r(1-\sigma)}{\sigma} I_r^2 \quad (3.7)$$

Com essas equações apresentadas pode-se começar a manipular e desenvolver expressões para encontrar os parâmetros elétricos do motor, justamente o objetivo desse capítulo.

Para obter o primeiro parâmetro buscado, basta isolar a resistência do Rotor na equação 3.7, obtendo o seguinte:

$$r_r = \frac{P_{des} \sigma_n}{3I_n^2(1-\sigma_n)} \quad (3.8)$$

Sabe-se que o escorregamento da máquina nominal é representado por:

$$\sigma_n = \frac{\omega_s - \omega_n}{\omega_s} \quad (3.9)$$

Obtido o valor da resistência do rotor é possível calcular as perdas provocadas pelo aquecimento, ou seja, o efeito Joule no rotor da máquina, para isso utiliza-se a expressão abaixo:

$$\Delta P_r = 3r_r I_m^2 \quad (3.10)$$

Neste ponto é hora de se fazer a segunda consideração para dar continuidade ao equacionamento, onde a perda mecânica é igual à soma das perdas variáveis com a carga na condição de rendimento máximo. Novamente isso é verdade devido aos tratamentos estatísticos de outros ensaios anteriores. Traduzindo o que foi falado em equação, tem-se:

$$\Delta P_{Mec} = \Delta P_s + \Delta P_r \quad (3.11)$$

Fazendo um rearranjo matemático na equação 3.11, as perdas no estator podem ser calculadas desta maneira:

$$\Delta P_s = \Delta P_{Mec} - \Delta P_r \quad (3.12)$$

Com o valor das perdas Joulicas no estator, podemos encontrar o valor da segunda variável de interesse, a expressão 3.13 mostra como encontrar o valor da resistência do estator:

$$r_s = \frac{\Delta P_s}{3I_s^2} \quad (3.13)$$

Obtidos os valores das resistências, resta então encontrar os valores das reatâncias do circuito equivalente que estar sendo procurado.

Nesse embasamento e com conhecimento básico de circuitos elétricos, a reatância de magnetização pode ser encontrada da seguinte forma:

$$X_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_o} \quad (3.14)$$

Voltando na teoria de motores de indução e de ensaios de rotor bloqueado, conclui-se que a impedância de rotor bloqueado pode ser escrita como:

$$Z_{bl} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_p} \quad (3.15)$$

Aplicando a teoria de circuitos elétricos novamente, calcula-se a indutância de rotor bloqueado, cuja fórmula está descrita abaixo:

$$X_{bl} = \sqrt{Z_{bl}^2 - (r_s + r_r)^2} \quad (3.16)$$

Para muitos casos que necessita desses parâmetros, esses resultados mostrados já são suficientes, mas quando se precisa separar a indutância de rotor bloqueado, utiliza-se de uma relação válida para quando as constantes de tempo do rotor e estator são iguais.

$$\frac{r_s}{X_s} = \frac{r_r}{X_r} = \frac{r_{bl}}{X_{bl}} \quad (3.17)$$

Com é possível encontrar todos os parâmetros elétricos do circuito equivalente do motor de indução utilizando somente dados de placa do motor, sem a utilização de ensaios algum.

Essa técnica é muito utilizada em situações em que é necessário realizar os testes no motor, mais o mesmo não pode parar de funcionamento, ou não possuem de todos os recursos de instrumentos para ensaiá-los, sendo os dados de placa a única informação necessária para prosseguir no estudo.

3.1.2. Desenvolvimento a partir dos ensaios laboratoriais

Outra maneira de se obter os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução é através de alguns ensaios clássicos da engenharia elétrica. Lembrando que esse também é um método aproximado, pois utiliza equações desenvolvidas no método anterior para substituir variáveis encontradas nos ensaios mencionados.

3.1.2.1. Ensaio a vazio

Neste ensaio, aplica-se tensão nominal no motor, e medem-se as correntes em cada fase e depois obtêm-se a média geométrica entre elas. Além da corrente a vazio, é medido também o valor da potência a vazio, utilizando o método dos dois Wattímetros.

A montagem pode ser feita conforme a Figura 3.4.

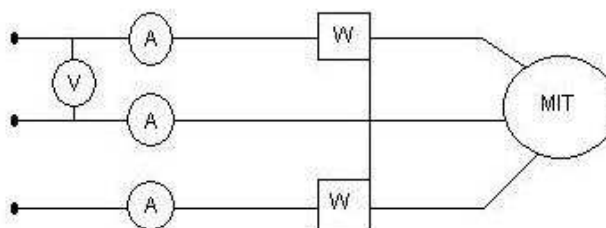


Figura 3.3 - Esquema de montagem do ensaio a vazio .

Realizado o ensaio e de posse de todos os parâmetros elétricos medidos no ensaio, pode-se obter a reatância de magnetização substituindo os valores do ensaio na equação 3.18.

$$X_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_o} \quad (3.18)$$

3.1.2.2. Ensaio de rotor bloqueado

Neste ensaio é bloqueado o eixo do motor com alguma ferramenta apropriada e aplica-se tensão até a corrente alcançar seu valor nominal. Mede-se então a tensão de curto circuito e a potência de curto circuito também.

Como os Wattímetros indicam potência ativa, pode-se dizer que o valor dessa potência é a dissipada nos resistores do circuito equivalente, desta forma tem-se:

$$W_{cc} = 3(r_s + r_r)I_{cc}^2 \quad (3.19)$$

Isolando a parte resistiva tem-se:

$$r_s + r_r = \frac{W_{cc}}{3I_{cc}^2} \quad (3.20)$$

Logo a seguir será mostrado como encontrar o valor de cada resistência separado. Mas com esses dados já obtidos é possível encontrar a impedância de rotor bloqueado, onde a equação 3.21 mostra como é o cálculo:

$$Z_{bl} = \frac{U_{cc}}{\sqrt{3}I_{cc}} \quad (3.21)$$

Relembrando novamente a teoria de circuitos elétricos é possível encontrar a reatância de rotor bloqueado pela a equação 3.22:

$$X_{bl} = \sqrt{Z_{bl}^2 - (r_s + r_r)^2} \quad (3.22)$$

3.1.2.3. Medição da resistência do estator

Esse ensaio pode não ser muito comum igual aos já apresentados anteriormente, mais também é de fácil entendimento. Consiste em obter alguns valores para então poder se calcular o valor da resistência do estator.

O esquema abaixo indica de forma clara o esquema a ser montado:

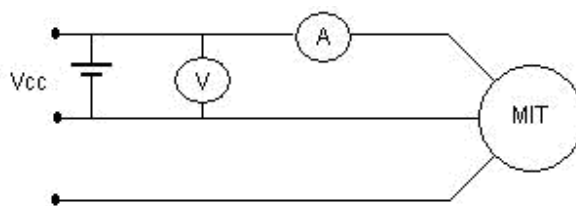


Figura 3.4 - Esquema para medição da resistência do estator.

Para obter os valores procurados, é necessário medir outros parâmetros. Ou seja, aplica-se uma tensão contínua para cada combinação de 2 fases, medindo então os valores de tensão e corrente a cada par de combinação. Assim pela Lei de Ohm é possível saber o valor da resistência em cada par de fases:

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.23)$$

Desta forma é obtido um R_{AB} , R_{BC} e R_{CA} em que a média desses valores é o valor da resistência do estator:

$$r_{S\Delta} = \frac{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}{3} \quad (3.24)$$

Mas a resistência do estator encontrado acima é para a configuração delta, como as equações desenvolvidas são em estrela, é necessária a conversão do $r_{S\Delta}$ para r_{SY} :

$$r_{SY} = \frac{r_{S\Delta}}{2} \quad (3.25)$$

Finalmente para se encontrar a resistência do rotor, basta utilizar a Equação 3.26, deixada sem mexer algumas equações anteriores:

$$r_r = \frac{W_{cc}}{3I_{cc}^2} - r_{SY} \quad (3.26)$$

Para separar a indutância de rotor bloqueado, pode-se utilizar o mesmo procedimento do método anterior.

Agora o primeiro passo para começar a fazer o estudo de eficiência energética está demonstrado. Essa etapa é bastante importante, pois é a partir dessa que pode-se partir para o estudo do motor sem nenhum dado construtivos do mesmo, onde se utiliza somente os dados de placa e se possível alguns ensaios laboratoriais simples.

3.2. OBTENÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR

Existem alguns métodos para obtenção das curvas características dos motores, nesse trabalho será comentado três métodos, mais somente um será analisado e explicado passo a passo.

- **Obtenção das curvas características do fabricante.**

É o método mais simples e rápido de se obter as curvas dos motores, porém motores com mais tempo de uso, são bastante difícil de encontrar essa informação a respeito do mesmo. Além de que motores mais velhos têm grandes chances de algumas de seus conjuntos de bobinas terem sido trocadas implicando em que os parâmetros originais do motor não são mais aqueles de quando foi lançado pela fábrica. Sendo por esta situação que esse método não pode ser aplicado na tentativa de obtenção das curvas de alguns motores.

- **Obtenções das curvas características através de medições diretas no motor.**

Como o interesse é a plotagem das curvas de Corrente X Carga, Fator de Potência X Carga, Escorregamento X Carga, Rendimento X Carga, são essas cinco grandezas que serão medidas durante o funcionamento normal do motor. Após todas as medições são plotados os gráficos através de qualquer programa que se faça interpolação dos pontos e gere as curvas.

- **Obtenções das curvas características utilizando dados dos parâmetros construtivos do motor.**

Esse é o método que será exposto e comentado nesse trabalho. Caracteriza-se por ser um dos mais teóricos, pois ele se suporta no modelo matemático do circuito equivalente do motor de indução trifásico.

Antes de se traçar as curvas é necessário um estudo do circuito do motor, para que se possa obter as equações de onde serão plotadas as curvas.

A partir do circuito equivalente da Figura 3.1 é possível deduzir equações que auxiliarão na construção das curvas.

O circuito acima mostra que a potência total P_g transferida através do entreferro desde o estator é:

$$P_g = n_f I_2^2 \left(\frac{R_2}{S} \right) \quad (3.27)$$

As perdas do rotor podem ser calculadas por:

$$P_{Rotor} = n_f I_2^2 R_2 \quad (3.28)$$

Agora, a potência eletromagnética, P_{mec} , desenvolvida pelo motor pode ser determinada subtraindo a dissipação de potência do rotor da potência de entreferro:

$$P_{mec} = P_g - P_{rotor} \quad (3.29)$$

$$P_{mec} = (1 - S)P_g \quad (3.30)$$

$$P_{rotor} = SP_g \quad (3.31)$$

Somando X_2 com (R_2/S) , e colocando em paralelo com jX_m , resulta em:

$$Z_f = \frac{-X_2 X_m + j \left(\frac{R_2 X_m}{S} \right)}{\frac{R_2}{S} + j(X_2 + X_m)} \quad (3.32)$$

Onde essa impedância Z_f representa o paralelo entre grandezas do rotor e a impedância de magnetização, possuindo uma parte real e uma imaginária:

$$Z_f = R_f + j X_f \quad (3.33)$$

Finalmente, a impedância de entrada total do circuito é:

$$Z_{Ent} = R_1 + j X_1 + Z_f \quad (3.34)$$

A potência total transferida através do entreferro desde o estator é:

$$P_g = n_f I_2^2 \left(\frac{R_2}{S} \right) \quad (3.35)$$

Mas, modificando essa equação, I_2 é a parcela de corrente que passa por X_2 e R_2/S no circuito equivalente, e considerando o circuito como uma única impedância de entrada em série com a fonte, a corrente I_1 é a mesma para essa impedância. Dessa forma, I_1 é calculada da seguinte maneira:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_{Ent}} \quad (3.36)$$

Obtida a corrente, podemos substituir na equação 3.35, considerando que a única resistência que dissipa potência em Z_f é R_f , pois, a potência dissipada em Z_f é a mesma dissipada em (R_2/S) . Assim, podemos escrever:

$$P_g = n_f I_2^2 R_f \quad (3.37)$$

A potência mecânica pode ser calculada por:

$$P_{mec} = (1 - S) P_g \quad (3.38)$$

Finalmente, a potência de saída no eixo (carregamento do motor) é obtida subtraindo da potência mecânica as perdas rotacionais:

$$P_{Eixo} = P_{Mec} - P_{Rot} \quad (3.39)$$

Para o cálculo do rendimento dos motores, precisa-se encontrar primeiro a potência de entrada e, assim, calcular o rendimento em si:

$$P_{ENT} = n_f VI \cos \varphi \quad (3.40)$$

$$\eta = \frac{P_{Eixo}}{P_{Ent}} \times 100\% \quad (3.41)$$

Com essas equações pode se plotar as curvas características dos motores com ajuda de um software. No estudo em questão foi utilizado o MATLAB, onde foi criado laços que variava o escorregamento em cada equação. Desta forma é possível traçar as curvas característica em função do carregamento de uma maneira clara e satisfatória.

4. RESULTADOS

Como forma de mostrar os resultados do estudo, foi elaborado um estudo de caso com um problema que utiliza todo o raciocínio desenvolvido no trabalho e alguns novos conceitos de análise econômica para se verificar custos e economia financeira gerada pelo estudo.

4.3. Estudo de Caso

A equipe de manutenção elétrica de uma indústria de alimentos desconfiaram de um dado motor em uma parte da linha de produção, estava operando com certa “folga”. Diante disso, requisitou que um engenheiro fizesse um estudo de eficiência energética. O motor em questão possui 15 anos de operação e não possui nenhuma curva características. Devido o regime de trabalho do motor (S1), o mesmo não pode sofrer paradas.

O motor em questão esta com sua placa de identificação danificada, ocultando o nome do fabricante e revelando somente dados elétricos e mecânicos do mesmo.

Abaixo segue os dados que estão visíveis em sua placa de identificação:

$$P_N = 100 \text{ cv};$$

$$U = 440 \text{ V};$$

$$FP = 0,87;$$

$$N_N = 1770 \text{ rpm.}$$

$$I_N = 117 \text{ A};$$

$$I_p = 7,3 I_N;$$

$$\eta = 0,89;$$

Ao se iniciar o estudo de eficiência energética e prosseguir para o diagnóstico energético é necessário se ter em mãos as curvas características do motor. No texto mencionase que o motor não possui as curvas e que não se sabe qual é o fabricante. Mediante a isso e da informação que o motor não poderá ser retirado do local, para realização dos ensaios, o

melhor método a ser utilizado para obter as curvas características é o 3º método, onde se utiliza os parâmetros construtivos do motor.

Este necessita dos parâmetros construtivos do motor, em que serão utilizados os dados de placa do motor, para obter os parâmetros procurados do mesmo.

Utilizam-se agora as equações discutidas na seção 3 deste trabalho.

As perdas totais são calculadas mediante a equação:

$$\Delta P_t = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi - P_n \times 736$$

$$\Delta P_t = \sqrt{3} \cdot 440 \cdot 117 \cdot 0,87 - 100 \cdot 736 = 3974,39 \text{ W}$$

A potência mecânica é calculada pela equação:

$$\Delta P_{Mec} = \frac{\Delta P_t}{2}$$

$$\Delta P_{mec} = \frac{3974,39}{2} = 1987,19 \text{ W}$$

A potência desenvolvida é obtida pela equação:

$$P_{des} = \Delta P_{Mec} + P_{nom}$$

$$P_{des} = 1987,19 + 100 \cdot 736 = 75587,19 \text{ W}$$

A parcela de correntes que vai para o rotor é obtidas pela equação:

$$I_R = I_s \times \cos \varphi$$

$$I_R = 117 \cdot 0,87 = 101,79 \text{ A}$$

Já a corrente de magnetização é obtida pela equação:

$$I_m = I_s \times \sin \varphi$$

$$I_m = 117 \cdot 0,49 = 57,68 \text{ A}$$

Utilizando as equações abaixo encontram-se os valores do escorregamento e conseqüentemente da resistência do rotor referido ao estator.

$$\sigma_n = \frac{\omega_s - \omega_n}{\omega_s}$$

$$\sigma_n = \frac{1800 - 1770}{1800} = 0,0166$$

Logo o valor da resistência do rotor é:

$$r_r = \frac{P_{des} \sigma_n}{3I_n^2 (1 - \sigma_n)}$$

$$r_r = \frac{75587,19 \cdot 0,0166}{3 \cdot (117)^2 \cdot (1 - 0,0166)} = 0,03106 \Omega$$

Diante dos valores obtidos, já é possível calcular pela equação as perdas no rotor:

$$\Delta P_r = 3r_r I_m^2$$

$$\Delta P_r = 3 \cdot 0,03106 \cdot (101,79)^2 = 965,45 \text{ W}$$

Utilizando a equação abaixo, encontra-se o valor das perdas Joulicas no estator:

$$\Delta P_s = \Delta P_{Mec} - \Delta P_r$$

$$\Delta P_s = 1987,19 - 965,45 = 1021,74 \text{ W}$$

De posse desses dados é possível calcular com a ajuda da equação abaixo a resistência do estator:

$$r_s = \frac{\Delta P_s}{3I_s^2}$$

$$r_s = \frac{102,17}{3 \cdot (117)^2} = 0,02487 \Omega$$

Continuando os cálculos, utiliza-se a equação a seguir a fim de se obter a reatância de magnetização.

$$X_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_o}$$

$$X_m = \frac{440}{\sqrt{3} \cdot 57,68} = j4,404 \Omega$$

A impedância de rotor bloqueado é obtida pela equação:

$$Z_{bl} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_p}$$

$$Z_{bl} = \frac{440}{\sqrt{3} \cdot 7,3 \cdot 117} = 0,2974 \Omega$$

Utiliza-se ainda a equação a seguir e obtêm-se a reatância de rotor bloqueado:

$$X_{bl} = \sqrt{Z_{bl}^2 - (r_s + r_r)^2}$$

$$X_{bl} = \sqrt{(0,2974)^2 - (0,02487 + 0,03106)^2} = j0,2921 \Omega$$

Para separar a reatância, utiliza-se a equação:

$$\frac{r_s}{X_s} = \frac{r_r}{X_r} = \frac{r_{bl}}{X_{bl}}$$

$$X_s = \frac{0,02487}{0,02487 + 0,03106} \cdot 0,2921 = j0,1298 \Omega$$

Finalmente obtêm-se a reatância do rotor referido ao estator:

$$X_r = X_{bl} - X_s$$

$$X_r = 0,2921 - 0,1298 = j0,1623 \Omega$$

Realizando toda a seqüência anterior, foi possível encontrar todos os parâmetros elétricos e mecânicos do motor a ser estudado pelo engenheiro.

De posse desses dados, é possível avançar mais um passo. O diagnóstico energético já pode ser realizado, tendo em vista que com os dados obtidos para a construção das curvas fica bastante simples, onde basta substituir os valores encontrados no código feito no software MATLAB^R e plotar as curvas características do motor procurado.

A seguir a curva característica de Corrente X Carregamento, será o ponto de partida para toda a análise seguinte.

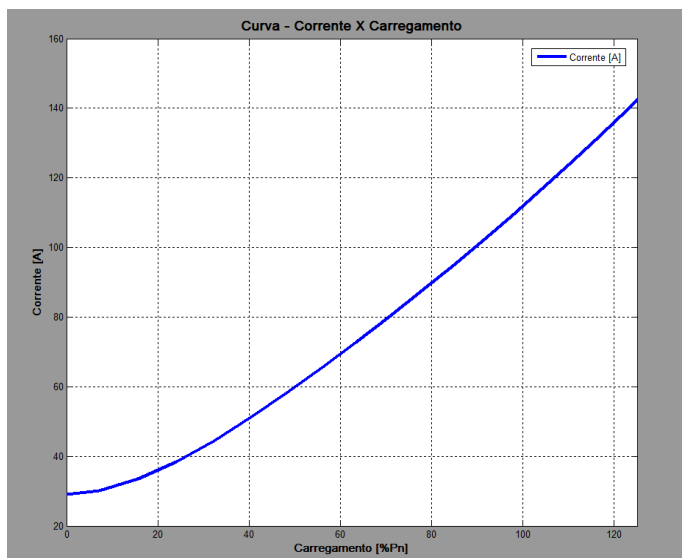


Figura 4.1 - Curva Corrente X Carregamento.

A fim de iniciar o procedimento foram feitas as medições de corrente nas 3 fases do motor, os valores obtidos seguem a baixo:

$$I_a = 56,2 \text{ A}; I_b = 58,7 \text{ A}; I_c = 56,1 \text{ A}.$$

Calcula-se o valor médio das 3 correntes, onde obtêm-se um valor de 57 A. Introduz esse valor no eixo de corrente no gráfico e segue na horizontal até a curva que representa a corrente, nesse ponto desce um reta perpendicular (vertical) até o eixo do carregamento (seguindo o sentido das setas), verificando assim qual é o real carregamento do motor.

Seguem-se as curvas características de Corrente, Fator de Potência e Rendimento, todas em função do carregamento do motor, representado no desenho o procedimento descrito acima em setas de cor verde.

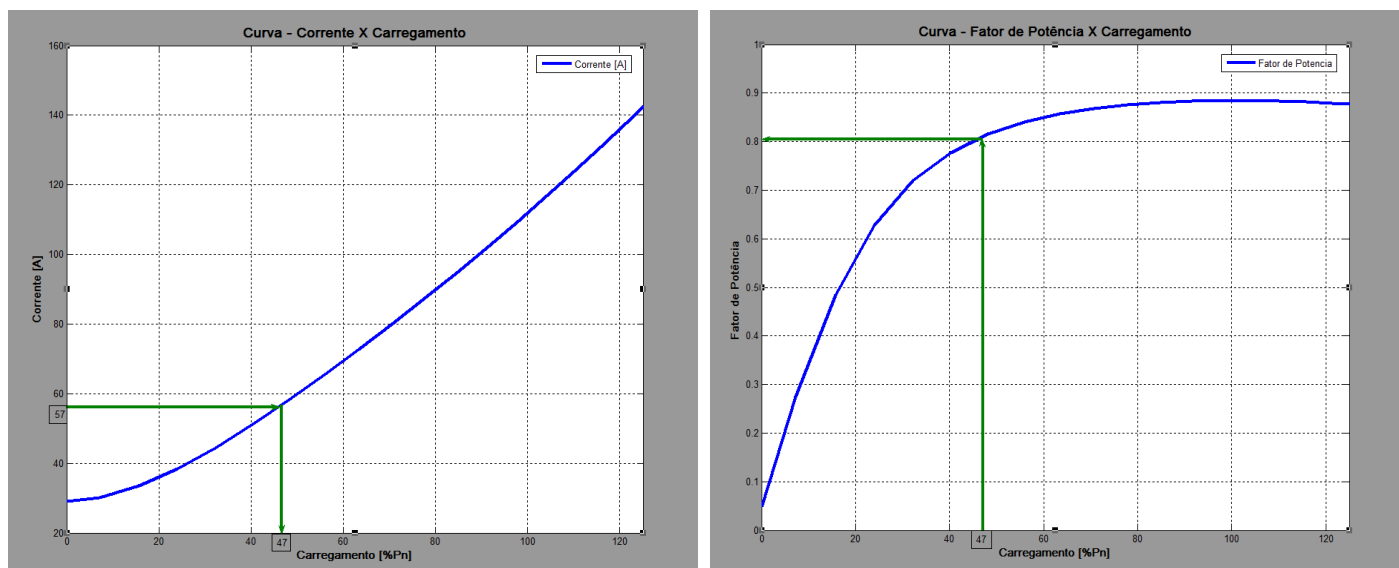


Figura 4.2 – (a) Corrente para o carregamento especificado (b) Fator de Potência para o carregamento especificado

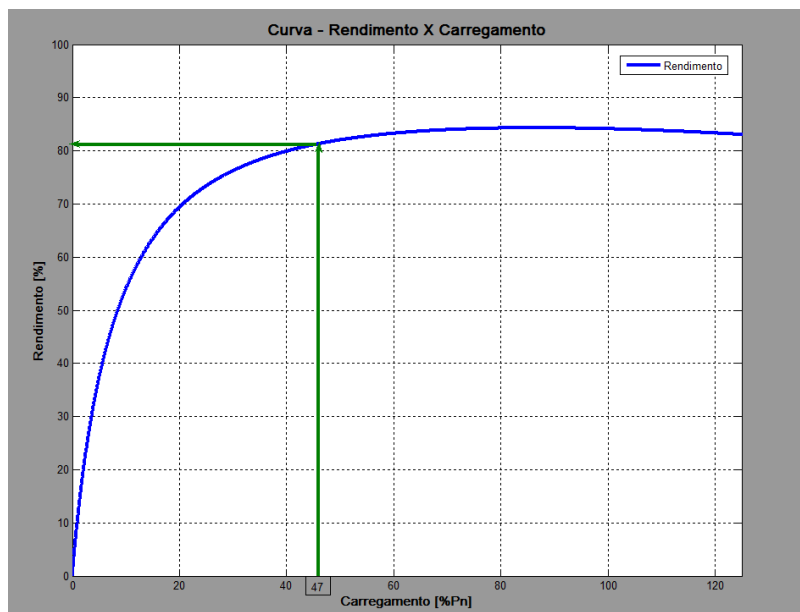


Figura 4.3 - Rendimento para o carregamento específico.

Como esses valores encontrados nos gráficos, são pertinentes a continuidade do processo.

Quando o motor apresenta carregamento abaixo de 50% da potência nominal, recomenda-se troca imediata desde que o novo motor consiga partir a carga antes do tempo de rotor bloqueado.

Sendo assim, sabe-se que o motor trabalha 12 horas por dia totalizando 3168 horas por ano de operação. Os cálculos que serão efetuados ao longo do trabalho são considerando o período de um ano.

Para dar início à análise energética, a equação abaixo auxilia o cálculo da energia consumida pelo motor no tempo estipulado.

$$Energia = \frac{(Pot_{motor} \times Carreg \times h \times 0,736)}{\eta}$$

$$Energia = \frac{100 \cdot 0,47 \cdot 3168 \cdot 0,736}{0,81} = 135,29 \text{ MWh}$$

O cálculo da potência do novo motor é dado pela equação:

$$Pot_{real} = Pot_{motor} \times Carreg = 47 \text{ cv}$$

Apenas 47% da potência do motor estão sendo requisitada pela carga. Diante disso escolhe o motor com a potência imediatamente superior a esse valor encontrado.

Sendo assim, o provável motor para substituição apresenta seus dados abaixo:

P_N : 50 HP	$J = 0,33095 \text{ Kg.m}^2$
F : 60 Hz	N_N : 1770
M_N : 200 Nm	$\eta(100\%)$: 92,5
V : 220/380/440 V	$Tr(s) = 16 \text{ seg.}$
$F.P.$ (100%): 0,86	$M_p/M_N = 230\%$
I_p / I_n : 6,6	$M_M/M_N = 230\%$

Antes de afirmar que esse seria o motor ideal para a substituição, julga-se coerente analisar qual é o tempo que o novo motor parte a carga acoplada em seu eixo. Sabe-se que a carga mecânica é uma esteira com uma inércia de $J_c = 15 \text{ Kg.m}^2$ e um conjugado de $M_c = 190 \text{ N.m}$.

Pela descrição do texto, conclui-se que se trata de uma carga com conjugado constante. Desta maneira é exposto na seqüência o procedimento para o tempo de partida do mesmo.

Cálculo do tempo de partida:

A equação que segue é a base para esse cálculo:

$$M_{med} - M_c = \frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \frac{n}{t_p}$$

Precisa-se encontrar o valor do conjugado médio do motor, para substituir na equação acima. Para isso é utilizado à equação abaixo:

$$M_{med.motor} = 0,45 \cdot \left(\frac{M_p}{M_n} + \frac{M_m}{M_n} \right) \cdot M_n = 414 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Substituindo os valores na equação inicial (para encontrar o t_p), encontra-se:

$$t_p = 12,68 \text{ seg.}$$

Satisfazendo a condição:

$$t_p < 0,8 t_{rbl}$$

$$12,68 \text{ seg} < 12,8 \text{ seg. (OK)}$$

O tempo de partida do motor acoplado a dada carga é inferior a 80% do tempo de rotor bloqueado do mesmo, desta maneira o novo motor está apto a substituir o antigo de 100 cv.

Escolhido o motor é possível conhecer qual é o seu novo carregamento para a carga acionada.

Se tratando de um motor de uma linha conhecida do fabricante WEG de motores, é possível encontrar sua curva característica no site do fabricante.

Para encontrar o novo carregamento, é bastante simples e direto, utilizando a equação:

$$Carreg_{novomotor} = \frac{Pot_{real}}{Pot_{novomotor}} \times 100\% = 94\%$$

Realizando os mesmo procedimentos no motor antigo, encontra-se na curva todos os pontos de operação do motor para o atual carregamento.

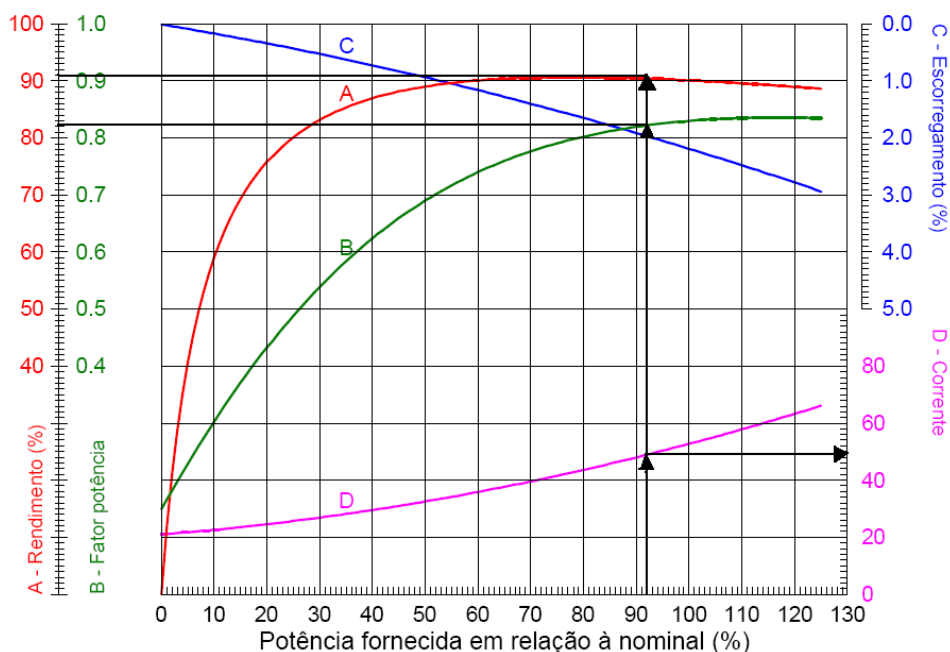


Figura 4.4 - Curva característica do motor de 50 cv.

Conforme mostrado o consumo de energia anual do novo motor é dado pela equação:

$$Energia_2 = \frac{(Pot_{novomotor} \times Carreg_{novomotor} \times h \times 0,736)}{\eta} = 119,767 \text{ MWh}$$

A economia de energia elétrica gerada pela diferença de consumo dos dois motores é calculada como:

$$Energia_{eco} = Energia_1 - Energia_2 = 15,53 \text{ MWh}$$

Conseqüentemente a economia financeira, considerando o preço da tarifa igual a R\$ 0,15/KWh, é calculada pela equação:

$$Economia = Energia_{eco} \times Tarifa = R\$ 2329,5 / ano$$

Dando continuidade ao estudo, será analisado a partir de agora a viabilidade econômica de uma possível troca do motor escolhido anteriormente, por um motor de alto rendimento.

Para essa análise supõem agora que o motor opere em um regime de carga variável ao longo do dia, sendo cada intervalo descrito abaixo:

$T_1 = 2h$	-	$I_a = 49,7 \text{ A}$	$I_b = 51,1 \text{ A}$	$I_c = 49,8 \text{ A}$
$T_2 = 4h$	-	$I_a = 35,1 \text{ A}$	$I_b = 34,6 \text{ A}$	$I_c = 36,2 \text{ A}$
$T_3 = 3h$	-	$I_a = 28,5 \text{ A}$	$I_b = 29,6 \text{ A}$	$I_c = 28,9 \text{ A}$
$T_4 = 3h$	-	$I_a = 41,5 \text{ A}$	$I_b = 40,9 \text{ A}$	$I_c = 41,1 \text{ A}$

- Considerando que o mesmo trabalha 22 dias no mês durante 12 meses no ano.
- O preço da tarifa elétrica a considerar é R\$ 0,15/KWh.
- A taxa de juros considera é 1% ao mês.
- O preço do motor de linha padrão é R\$ 5890,00 enquanto que o de alto rendimento custa R\$ 8173,6.

Para determinar as perdas em cada intervalo do ciclo de trabalho, faz-se necessário o cálculo as médias das três correntes de fase. Para depois inserir na curva características e obter para cada intervalo um valor de rendimento para o motor da linha padrão e outro de correspondente para o motor de alto rendimento.

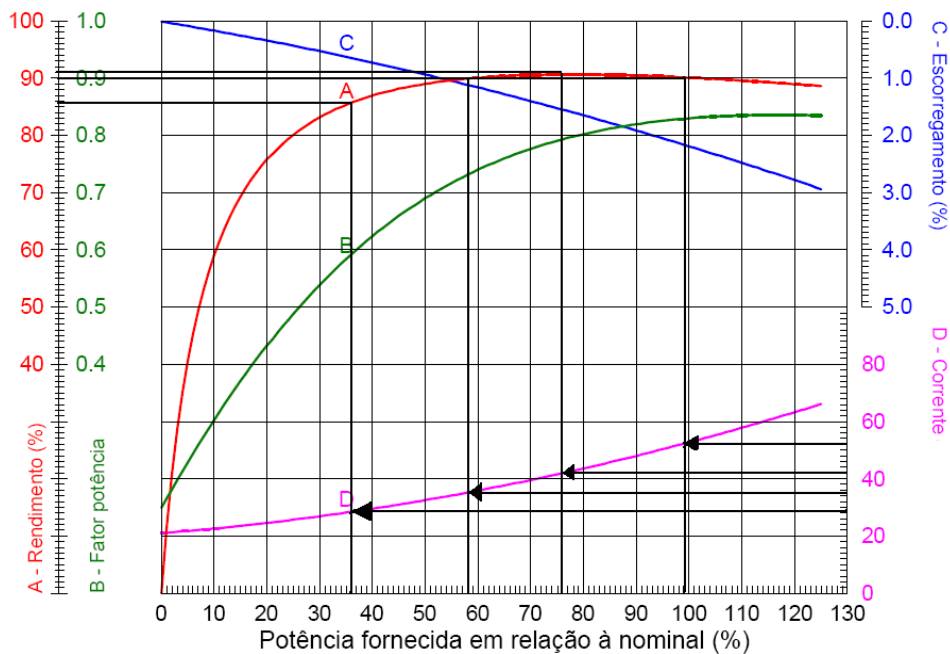


Figura 4.5 - Rendimentos para motor de 50 cv da linha padrão.

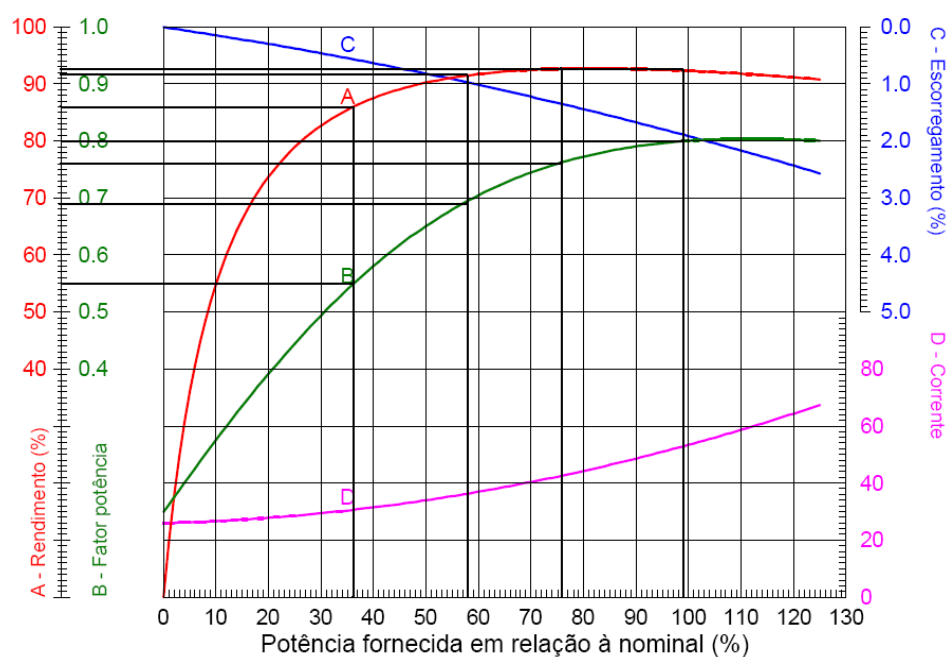


Figura 4.6 - Rendimento para o motor de 50 cv de alto rendimento.

Utilizando a equação abaixo, calcula-se para cada intervalo do ciclo de trabalho a diferença das perdas, comparado quando se substitui um motor da linha padrão por um de alto rendimento:

$$\Delta P_p = P_s \cdot 100 \cdot \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right)$$

A soma de todos os 4 intervalos do ciclo é demonstrado pela equação:

$$\Delta P_p = \sum_{i=1}^n P_s \cdot 100 \cdot \left(\frac{1}{\eta_1^i} - \frac{1}{\eta_2^i} \right)$$

Realizado os cálculos, conforme a equação acima e depois as diferença das perdas totais calculados, tem-se:

$$\Delta P_p^1 = 1,947 \text{ KW} ; \Delta P_p^2 = 0,888 \text{ KW} ; \Delta P_p^3 = 1,599 \text{ KW} ; \Delta P_p^4 = 0,908 \text{ KW} ; \Delta P_p^T = 5,342 \text{ KW}$$

A redução do consumo de energia elétrica com a substituição do motor de linha padrão por um de alto rendimento é determinada pela equação abaixo aplicada a cada intervalo do ciclo de operação durante um mês é calculada como:

$$\Delta C_n = \Delta P_p^n \cdot H$$

Dessa maneira tem-se:

$$\Delta C_1 = 85,668 \text{ KWh} ; \Delta C_2 = 78,144 \text{ KWh} ; \Delta C_3 = 105,534 \text{ KWh} ; \Delta C_4 = 59,928 \text{ KWh}$$

A energia elétrica economizada ao longo do mês levando em consideração o ciclo completo com todos os intervalos é calculada como:

$$\Delta C_T = \Delta P_p^1 \cdot H_1 + \Delta P_p^2 \cdot H_2 + \dots + \Delta P_p^n \cdot H_n = 329,27 \text{ KWh}$$

A economia financeira mensal é obtida através da equação:

$$\Delta E = \Delta C \cdot C_K = \text{R\$ } 49,39 / \text{mês}$$

O tempo de retorno simples é obtido através da equação:

$$T_{rs} = \frac{\Delta C_a}{\Delta E} = 3,9 \text{ anos}$$

A energia economizada ao longo da vida útil do motor será calculada pela equação abaixo e utiliza-se um valor de vida útil média (estatístico) para o motor em questão de 28,5 anos.

$$C_{VU} = \Delta P_p \cdot H \cdot V_U = 112611,7 \text{ KWh}$$

O valor retornado em moeda financeira ao longo da vida útil é calculado pela equação:

$$C_{rs} = \Delta P_p \cdot H \cdot C_k \cdot V_U - \Delta C_a = R\$ 14607,95$$

5. CONCLUSÃO

Com o homem e sua atividade industrial apareceu a poluição ambiental. A rápida industrialização e urbanização dos países em desenvolvimento têm levado a um aumento severo na poluição: água que está inapta para o consumo, altos níveis de concentração de poluentes no ar e aumento da quantidade de resíduos sólidos urbanos e resíduos perigosos, além disso, dispostos inadequadamente. O consumo de energia é uma das principais causas da degradação do meio ambiente.

É evidente a relevância atual do tema Eficiência Energética e sua relação com os motores de indução trifásicos, sendo estes responsáveis por cerca de 35% do consumo total de energia elétrica do país. Dessa forma, facilmente constata-se a importância de se reduzir gastos de energia com estes equipamentos.

A idéia de obter um método para obter as curvas características partiu da necessidade e dificuldade de obtê-las. Constatava-se que os motores mais antigos, em quase sempre não possuíam curvas características, dificultando a análise energética.

Motores que já foram rebobinados pelo menos uma vez, não possuem mais características elétricas e mecânicas iguais de quando foram construídos. Uma vez que quando vão retirar a bobina do estator o método mais comum é esquentá-lo com maçarico, até que as bobinas de soltem. O motor sofrido essa avaria fica impróprio para se utilizado os seus dados de placa para se obter os parâmetros do circuito equivalente. Recomenda-se nesse caso a realização de ensaios laboratoriais para medir as grandezas corretamente.

No final do trabalho foi elaborado um estudo de caso com uma linguagem e uma seqüência bastante simples, de como escolher e aplicar os métodos discutidos ao longo do texto. Tornando uma maneira mais fácil para o entendimento do leitor.

Em particular, no estudo proposto de caso proposto, foi possível constatar que de fato o motor estava trabalhando com “folga” como a equipe de manutenção tinha previsto. O mesmo operava com apenas 47% da sua potência nominal, gerando um desperdício de energia, uma vez que o seu rendimento e fator de potência trabalham com valores bem abaixo do nominal, comprovados pela curva característica.

Esse motor foi substituído por um de 50 cv, que somente afirmou a escolha calculando o tempo de aceleração e verificado que consegue partir a carga antes que ele atinja seu tempo de rotor bloqueado. O novo motor trabalha com carregamento de 94%, onde opera com uma corrente menor, cerca de 50 A enquanto operava com uma de 57 A no motor antigo.

Foi feito também o completo estudo financeiro de viabilidade para substituição do novo motor por um de mesma potência, porém de alto rendimento. Calculado o tempo de retorno do investimento maior inicialmente, chegou-se em um valor de 3,9 anos. Sendo o prazo máximo viável para esse tempo de 4 anos. Onde períodos maiores não são lucrativos, tendo em vista que a vida média útil do motor é de 13,3 anos. E é importante ressaltar que quanto maior for à potência do motor, mais compensador vai ser a troca por motores de alto rendimento.

Portanto conclui-se que os métodos abordados nesse trabalho são bastante úteis para quem deseja estudar eficiência energética nos motores de indução, principalmente em sistemas industriais onde se encontra o maior número de motores sobredimensionados. Trazendo métodos e técnicas simplificadas, porém com resultados bem satisfatórios quanto o levantamento das curvas, quanto o diagnóstico energético e ainda a abordagem financeira completa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAS, J.C. Energy Efficient Motors – Selection and applications, **Marcel Dekker Inc.**, 1982.

BISPO, D.; SILVA, V. P.; BELINOVSKI, K. D.; SILVA, S. F. P. Análise na especificação do motor de indução trifásico em função do seu carregamento. **ABRAMAN (Associação Brasileira de Manutenção)**, Recife, Brasil, setembro/2009.

BRASIL. Decreto 4.508 de 11.dez.02. Dispõe sobre a regulamentação específica que define os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importados, para comercialização ou uso no Brasil, e dá outras providências. **D.O.U.**, Brasília, DF, 12.dez.2002.

FILIPPO FILHO, G. **Motor de Indução**. São Paulo: Érica, 2000.

FITZGERALD, A. E. **Máquinas Elétricas: Conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas**. 3ª ed. São Paulo: Mcgraw-Hill, 1975.

FREITAS P. C. F. D.; BISPO, A. C.; DELAIBA, S.F.P. Análise comparativa dos rendimentos dos motores da linha padrão e de alto rendimento sob o enfoque da eficiência energética. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (Sbse)**, Belo Horizonte, Brasil, 2008.

GELLER, H. S. Energy revolution: policies for a sustainable future. Washington: Island Press, 2003.

GELLER, H. S. et al. Policies for advancing energy efficiency and renewable energy use in Brazil. Washington: Island Press, 2003.

KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 4ª ed. Porto Alegre: Globo, 1982.

LOCATELLI, E. **Programa de efficientização industrial**. Módulo Motor Elétrico. Eletrobrás/Procel: Rio de Janeiro, 2006.

LOPES, F. A.; LISBOA, M. L. V. O projeto da eletrobrás/procel com recursos do banco mundial e GEF. XVI SNPTEE. Campinas, outubro de 2001. Disponível em: <http://www.xviisnp tee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xvi/14_Seca o_II_Sce/sce-002.pdf.> Acesso em: 02 de agosto de 2009.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço energético nacional 2002: Ano Base 2001. Brasília, dezembro de 2002. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>.> Acesso em: 28 de setembro de 2009.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço de Energia Útil. Ano base 1993. Brasília, 1995. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>.> Acesso em: 28 de setembro de 2009.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Apresentação de dados sobre o sistema interligado nacional. Disponível em: <<http://Www.Ons.Org.Br/Ons/Sin/Index.Htm>.> Acesso em: 17 de junho de 2009.

REZENDE, P. H. O e BISPO, D. Obtenção das curvas características de motores originadas do circuito equivalente. **IV ENEEEL (Encontro Nacional dos estudantes de Engenharia Elétrica)**. Fortaleza, Brasil, julho/2009.

REZENDE, P. H. O e BISPO, D. Estudo da eficiência energética e dimensionamento de motores de indução trifásicos a partir da plotagem de suas curvas características. **VI International Conference on Engineering and Computer Education**. Buenos Aires, Argentina, março/2009. p. 956-960.

REZENDE, P. H. O, BISPO, D. Obtenção do circuito equivalente do motor para um possível levantamento de suas curvas características. **VII CEEL (Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica)**, Uberlândia, Brasil, setembro/2009.