



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UMA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM CHÃO DE FÁBRICA

AUTORA

SHEYLA MARIA DAS NEVES DAMASCENO

ORIENTADOR

PROF. DR. JÉS DE JESUS CERQUEIRA FIAIS

CO-ORIENTADOR

PROF. DR. ANTÔNIO CEZAR DE CASTRO LIMA

SALVADOR – BA

MAIO, 2002

UMA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE
MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM CHÃO DE FÁBRICA

Por

SHEYLA MARIA DAS NEVES DAMASCENO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado
em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da
Universidade Federal da Bahia como requisito
parcial à obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SALVADOR – BA

2002

AGRADEÇO

- ✓ *à Divindade pela existência de tantas pessoas cheias de generosidade;*
- ✓ *á Neyla Maria das Neves Damasceno, minha mãe, pela oportunidade de vida;*
- ✓ *à Ivanilde Conceição Silva Souza, minha querida amiga, pelo exemplo de força e coragem;*
- ✓ *ao Professor Jês de Jesus Cerqueira Fiais pelo aprendizado, determinação e contribuição;*
- ✓ *ao Professor Antônio Cezar de Castro Lima pelo aprendizado, pela paciência, persistência e presença amiga;*
- ✓ *ao Professor Antônio Luis Aguiar pelo aprendizado, pelo carinho e atenção;*
- ✓ *ao colega Carlos Aníbal Regis Dias pelo enorme apoio, pelas incontáveis e incomensuráveis ajudas, pela enorme boa vontade e generosidade;*
- ✓ *à colega Vera Lúcia Cerqueira Pinheiro pelos incontáveis e inesquecíveis finais de semana que passamos estudando em sua casa;*
- ✓ *a Vinícius João Gonçalves Cunha pelo entusiasmo, pela amizade, perseverança e otimismo sem os quais este trabalho não seria possível;*
- ✓ *a Eduardo Telmo, Raimundo Jorge de Jesus e Kleber Vinicius Ribeiro Almeida, pelo excelente trabalho de construção da instrumentação digital dedicada;*
- ✓ *a Angel Vazquez Moran pela enorme boa vontade, pelo aprendizado e presença amiga;*
- ✓ *ao colega Walter Martins da Silva Junior pela sempre pronta boa vontade;*
- ✓ *a Napoleão Trindade Ferreira pelo empréstimo de equipamentos de medição;*
- ✓ *à Marlene Xavier, Thamy Cristina Hayashi, Laurênio Leite Sombra, Alcina, Ada Maria Cezar Costa, Eliane Bezerra de Carvalho, Cláudio Bezerra de Carvalho, Mônica Silveira, Jaciara Brandão, Julio Bautista Vidal a compreensão e o incentivo de amigos tão preciosos que ao longo deste período estiveram presentes;*
- ✓ *a Ana Christina Mascarenhas pela compreensão, pela oportunidade de trabalhar em horário parcial, sem a qual não poderia ter concluído este trabalho;*
- ✓ *à Fundação Escola Politécnica pela bolsa de estudos;*
- ✓ *a COELBA que dentro de seu programa de pesquisa e desenvolvimento para o ano de 2001, financiou o projeto de construção do Analisador Digital de Rendimento para Motores de Indução Trifásicos;*

Dedico esta dissertação de Mestrado a Lino Reis Damasceno.

Meu Pai,

O caminho que trilhei até aqui, tão cheio de paixão, começou no teu colo, melhor lugar do mundo. Foi dele que despertei para o mundo, as águas revoltas do Chico, as usinas, as máquinas gigantescas e ensurdecedoras. Foi nele que ouvi tantas vezes as tuas explicações, que me encantei com as máquinas. Foi neste lugar sagrado que descobri a magia, a lógica, o sentido que me constituem e me conduzem por mais esta caminhada que agora tenho a enorme felicidade de compartilhar contigo.

Engenharia e Poesia

*Ainda que eu padeça da ilusão do saber
Equacione todas as variáveis
Estabeleça toda a lógica*

*Ainda que eu conclua o interminável
Abarque o infinito
Argumente todas as razões*

*Ainda que eu vislumbre o invisível
Toque o intangível
Modele o inquantificável com a precisão de um Deus*

*Que eu nunca perca a Magia e o Encantamento
a Engenharia e a Poesia
Inerentes a todas as Coisas.*

*Sheyla Maria Damasceno
Janeiro 2001*

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta para avaliação do rendimento de motores de indução em chão de fábrica, através da implementação de uma metodologia adequada às condições encontradas em campo em uma instrumentação digital dedicada.

São analisados o princípio de funcionamento e as principais características elétricas e mecânicas dos motores de indução trifásicos, situando-os entre os diversos tipos de motores elétricos existentes, destacando sua importância e participação no consumo da energia elétrica.

São descritas e classificadas as perdas de energia existentes, definindo o significado do rendimento em um motor de indução trifásico, apresentando os principais fatores que podem influenciar no seu desempenho, destacando os níveis de rendimento aceitáveis definidos pela norma brasileira NBR 7094 [08] para motores da linha padrão e de alto rendimento e os principais parâmetros a serem considerados na avaliação da viabilidade econômica para projetos de *retrofit* de motores.

Algumas metodologias existentes para avaliação de rendimento em motores de indução foram estudadas, focalizando a base teórica de cada método, seu nível de exatidão e intrusão, discutindo os métodos adotados pelas normas brasileiras NBR 7094 [08] e NBR 5383 [09] e a americana IEEE 112 [14] para sua medição.

A partir de ensaios em laboratório, foram comparados os resultados experimentais obtidos selecionando as metodologias de avaliação de rendimento em motores de indução mais adequadas para as condições oferecidas por motores em campo, discutindo a exatidão para diversas condições de funcionamento do motor. Os métodos que apresentaram melhores resultados foram implementados na instrumentação eletrônica dedicada.

ABSTRACT

This work shows a proposal for the performance evaluation of induction engines on field, through the implementation of an appropriate methodology to the conditions found in a dedicated digital instrumentation on field.

The main electric characteristics and working principals of trifasic induction engines were evaluated, among the diverse types of electric engines that exist. It's importance and its participation in electric energy consume were highlighted.

The lost of energy was described and classified, defining the meaning of performance in a trifasic induction engine. The main factors that can influence its performance were presented, highlighting the acceptable performance levels defined by the Brazilian norm NBR 7094 [8] for high production standard engines and the main parameters to be considered for the economic viability evaluation for engine retrofit projects.

Some existing methodologies for the production evaluation in induction engines were studied, focalizing the theoretic base of each one, their accuracy and invasively level, discussing the methods adopted by the Brazilian norms NBR 7094 [8] and NBR [9] and the American IEEE 112 [14] for its measurement.

Based on laboratory testing, the obtained experimental results were compared to select the most appropriate production evaluation methodologies in induction engines for the conditions offered to engines on field, discussing the accuracy of several conditions for the working of the engine. The methods that showed the best results were implemented in the dedicated electronic instrumentation.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	3
1.1- OBJETIVO	6
1.2- ESTRUTURA DISSERTAÇÃO.....	6
O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	9
2.1- INTRODUÇÃO.....	9
2.2- TIPOS DE MOTORES ELÉTRICOS.....	10
2.3- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO MOTOR DE INDUÇÃO.....	14
2.4- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
PERDAS DE ENERGIA NO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	28
3.1- INTRODUÇÃO.....	28
3.2 – NORMAS	29
3.3 – DEFINIÇÕES CLÁSSICAS	32
3.4 – VARIAÇÃO DAS PERDAS.....	43
3.5 – AQUECIMENTO E DETERIORAÇÃO DA MÁQUINA.....	44
3.6 – COMENTÁRIOS FINAIS.....	48
RENDIMENTO	50
4.1- DEFINIÇÃO	50
4.2- FLUXO DE POTÊNCIA	51
4.3- FATORES QUE INFLUENCIAM O RENDIMENTO	53
4.4- LINHAS PADRÃO E DE ALTO RENDIMENTO.....	68
4.5- PROJETOS DE RETROFIT DE MOTORES	72
4.6- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DE RENDIMENTO	79
5.1- INTRODUÇÃO.....	79
5.2- MÉTODOS CLÁSSICOS DE AVALIAÇÃO DE RENDIMENTO	80
5.3- NORMAS TÉCNICAS	82
5.4- EXATIDÃO DA AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO	86
5.5- INTRUSÃO DAS METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE RENDIMENTO.....	88
5.6- MÉTODOS ALTERNATIVOS	90
5.7- MEDIÇÃO INDIRETA DE VELOCIDADE ATRAVÉS DA ANÁLISE ESPECTRAL DE HARMÔNICOS	97
SELEÇÃO DE METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DE RENDIMENTO EM CAMPO	104
6.1- INTRODUÇÃO.....	104
6.2- CONDIÇÕES LABORATORIAIS PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	105
6.3- CÁLCULO DO RENDIMENTO A PARTIR DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	108
6.4- AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DOS MÉTODOS.....	123
6.5- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	133

CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	135
7.1- CONCLUSÃO	135
7.2- PERSPECTIVAS FUTURAS	136
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	139

GLOSSÁRIO

Categorias – Os motores de indução de gaiola, trifásicos, para tensão nominal igual ou inferior a 600 V, potência nominal igual ou inferior a 630 kW (856 cv), previstos para partida direta ou estrela-triângulo são classificados quanto às suas características de partida em cinco categorias definidas a seguir:

1- Motores da Categoria N – Segundo a NBR 7094 [08], os motores da categoria N são motores com conjugado de partida normal ou seja, que satisfazem os requisitos de partida descritos abaixo, previstos para partida direta, com 2, 4, 6 ou 8 pólos e de 0,37 kW (0,5 cv) a 630 kW (856 cv).

Requisitos de Partida:

- ❖ Para estes motores o conjugado com rotor bloqueado, o conjugado mínimo de partida e o conjugado máximo, cada um expresso pela razão para o conjugado nominal, deve ter seus valores mínimos à tensão nominal conforme a Tabela 1 da NBR 7094[08].
- ❖ Devem permitir a frio duas partidas consecutivas, com retorno ao repouso entre partidas, e uma partida a quente após ter funcionado nas condições nominais. O conjugado resistente devido à carga acionada é, em cada caso, proporcional ao quadrado da velocidade e igual ao conjugado nominal à velocidade nominal, para um momento de inércia externo dado na Tabela 3 da NBR 7094 [08].
- ❖ Em cada caso, uma partida adicional é permitida somente se a temperatura do motor antes da partida não exceder a temperatura de equilíbrio térmico sob carga nominal

2- Motores da Categoria NY – Segundo a NBR 7094 [08], esta categoria inclui motores semelhantes aos de categoria N, porém previstos para partida estrela-triângulo. Para estes motores na ligação estrela, os valores mínimos do conjugado

com rotor bloqueado e do conjugado mínimo de partida são iguais a 25% dos valores indicados para os motores da categoria N, Tabela 1 da NBR 7094 [08].

Requisitos de Partida:

Os requisitos de partida são os mesmos especificados para motores da categoria N. Adicionalmente, entretanto, um conjugado resistente reduzido é necessário, pois o conjugado de partida em "estrela" pode ser insuficiente para acionar algumas cargas a uma velocidade aceitável.

3- Motores da Categoria H – Segundo a NBR 7094 [08], esta categoria inclui motores com conjugado de partida elevado, previstos para partida direta, com 4,6 ou 8 pólos e, potência nominal de 0,37 kW (0,5cv) a 160 kW (220cv).

Requisitos de Partida:

- ❖ Para estes motores o conjugado com rotor bloqueado, o conjugado mínimo de partida e o conjugado máximo, cada um expresso pela razão para o conjugado nominal, deve ter seus valores mínimos à tensão nominal conforme a tabela 4 da NBR 7094[08]. Valores superiores são permitidos.
- ❖ Devem permitir a frio duas partidas consecutivas, com retorno ao repouso entre partidas, e uma partida a quente após ter funcionado nas condições nominais. O conjugado resistente devido à carga acionada é suposto ser constante, igual ao conjugado nominal e independente da velocidade, com uma inércia externa de 50 % dos valores descritos na Tabela 3 da NBR 7094 [08].
- ❖ Em cada caso, uma partida adicional é permitida somente se a temperatura do motor antes da partida não exceder a temperatura de equilíbrio térmico sob carga nominal.

4- Motores da Categoria HY – Segundo a NBR 7094 [08], esta categoria inclui motores semelhantes aos de categoria H, porém previstos para partida estrela-triângulo. Para estes motores na ligação estrela, os valores mínimos do conjugado com rotor bloqueado e do conjugado mínimo de partida são iguais a

25% dos valores indicados para os motores da categoria H, Tabela 4 da NBR 7094 [08].

Requisitos de Partida:

Os requisitos de partida são os mesmos especificados para motores da categoria H. Adicionalmente, entretanto, um conjugado resistente reduzido é necessário, pois o conjugado de partida em "estrela" pode ser insuficiente para acionar algumas cargas a uma velocidade aceitável.

5- Motores da Categoria D – Segundo a NBR 7094 [08], esta categoria inclui motores com conjugado de rotor bloqueado elevado e escorregamento elevado, previstos para partida direta, com quatro ou mais pólos, potência nominal de 0,37 kW (0,5cv) a 110 kW (150cv).

Requisitos de Partida:

- ❖ O conjugado com rotor bloqueado expresso pela razão pelo conjugado nominal, deve ter o valor mínimo de 2,75, à tensão nominal
- ❖ O conjugado mínimo de partida e o conjugado máximo não são fornecidos porque nestes motores o conjugado diminui continuamente quando a velocidade aumenta.
- ❖ O escorregamento na potência nominal deve ser superior a 5%. São fornecidas três variações diferentes de motores quanto ao valor do escorregamento: uma com 5 a 8%, outra com 8 a 13% para utilização em prensas de perfuração, tesouras e outras máquinas de inércia elevada, onde é desejado elevar a energia armazenada em um volante sob flutuações severas de carga e para diminuir o elevado pico de demanda do sistema, a terceira incluindo motores com escorregamento de 13% ou mais, para aplicações geralmente em regime de tempo limitado, devido às perdas elevadas no rotor, como por exemplo, pontes rolantes, guinchos, elevadores, etc.

Grau de Proteção – Os invólucros dos motores elétricos, conforme as características do local em que serão instalados e sua acessibilidade, devem oferecer um determinado nível de proteção contra substâncias agressivas ao motor. Por exemplo, um equipamento que deve ser instalado em local sujeito a jatos d`água, deve possuir um invólucro capaz de suportar tais jatos, sob determinados valores de pressão e ângulo de incidência, sem que haja penetração de água.

A norma NBR 6146 define os graus de proteção dos equipamentos elétricos por meio das letras características IP, seguidas por dois algarismos. O primeiro algarismo indica o grau de proteção contra a penetração de corpos sólidos estranhos e contato acidental Tabela 01.

1º ALGARISMO	
Algarismo	Indicação
0	Sem proteção
1	Corpos estranhos com dimensões acima de 50 mm
2	Corpos estranhos com dimensões acima de 12 mm
3	Corpos estranhos com dimensões acima de 2,5 mm
4	Corpos estranhos com dimensões acima de 1,0 mm
5	Proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor
6	Totalmente protegido contra a poeira

Tabela 01 – 1º algarismo: indica o grau de proteção contra penetração de corpos sólidos estranhos e contato acidental

O segundo algarismo indica o grau de proteção contra a penetração de água no interior do motor Tabela 02.

2º ALGARISMO	
Algarismo	Indicação
0	Sem proteção
1	Pingos de água na vertical
2	Pingos de água até a inclinação de 15° com a vertical
3	Água de chuva até a inclinação de 60° com a vertical
4	Respingos de todas as direções
5	Jatos d'água de todas as direções
6	Água de vagalhões
7	Imerção temporária
8	Imerção permanente

Tabela 02 – 2º algarismo: indica o grau de proteção contra penetração de água no interior do motor

De acordo com a norma NBR 6146, a qualificação do motor em cada grau, no que se refere a cada um dos algarismos, é bem definida através de ensaios padronizados.

Embora os algarismos indicativos de grau de proteção possam ser combinados de muitas maneiras, somente alguns tipos de proteção são normalmente empregados. São eles: IP21, IP22, IP23, IP44, IP55. Os três primeiros são motores abertos e os dois últimos são motores blindados. Para aplicações especiais mais rigorosas, são comuns também os graus de proteção IPW55 (proteção contra intempéries), IP56 (proteção contra água de vagalhões) e IP65 (totalmente protegido contra poeira). Outros graus de proteção para motores, mesmo porque qualquer grau de proteção atende plenamente aos requisitos dos inferiores (algarismos menores). Por exemplo, um motor com grau de proteção IP55 substitui com vantagens os motores IP12, IP22 ou IP23, apresentando maior segurança contra exposição accidental à poeira e água. Isto permite a padronização da produção em um único tipo que atenda a todos os casos, com vantagem adicional para o comprador nos casos de ambientes menos exigentes.

Regime de Serviço – É o grau de regularidade da carga a que o motor é submetido. Os motores normalmente são projetados para o regime contínuo (a carga é constante), por tempo indefinido e igual à potência nominal do motor, mas em muitos casos a carga tem um comportamento variável. De acordo com a NBR 7094[08], para cada regime de serviço, também chamado de regime de tipo, são atribuídos os símbolos alfanuméricos definidos abaixo:

- ❖ Regime contínuo (S1) – funcionamento a carga constante de duração suficiente para que seja alcançado o equilíbrio térmico.
- ❖ Regime de tempo limitado (S2) – funcionamento com a carga constante durante um determinado tempo, inferior ao necessário para atingir o equilíbrio térmico, seguido de um período de repouso de duração suficiente para restabelecer a igualdade de temperatura com o meio refrigerante.
- ❖ Regime intermitente periódico (S3) – seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual incluindo um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico durante um ciclo de regime e no qual a corrente de partida não afete de modo significativo a elevação de temperatura.
- ❖ Regime intermitente periódico com partidas (S4) - seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo em um período de partida, um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico.
- ❖ Regime intermitente periódico com frenagem elétrica (S5) - seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo em um período de partida, um período de funcionamento a carga constante, um período de frenagem elétrica e um período de repouso, sendo tais períodos muito curtos para que se atinja o equilíbrio térmico.
- ❖ Regime de funcionamento contínuo com carga intermitente (S6) - seqüência de ciclos de regime idênticos, cada qual consistindo de um período de

funcionamento a carga constante e de um período de funcionamento em vazio, não existindo período de repouso.

- ❖ Regime de funcionamento contínuo com frenagem elétrica (S7) - seqüência de ciclos de regimes idênticos, cada qual consistindo de um período de partida, de um período de funcionamento a carga constante e de um período de frenagem elétrica, não existindo período de repouso.
- ❖ Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade de rotação (S8) - seqüência de ciclos de regimes idênticos, cada qual consistindo de um período de partida e um período de funcionamento a carga constante, correspondendo a uma velocidade de rotação pré-determinada, seguidos de um ou mais períodos de funcionamento a outras cargas constantes, correspondentes a diferentes velocidades de rotação. Não existe período de repouso.
- ❖ Regime com variações não periódicas de carga e de velocidade (S9) – geralmente a carga e a velocidade variam não periodicamente, dentro da faixa de funcionamento admissível, incluindo freqüentemente sobrecargas aplicadas que podem ser muito superiores à condição de plena carga.
- ❖ Regime com cargas constantes distintas (S10) - com cargas constantes distintas, incluindo no máximo quatro valores distintos de carga (ou cargas equivalentes), cada valor sendo mantido por tempo suficiente para que o equilíbrio térmico seja atingido. A carga mínima durante um ciclo de regime pode ter o valor zero (funcionando em vazio ou repouso).

Horário de Ponta – Corresponde ao intervalo de três horas consecutivas, definido pela concessionária, compreendido entre 17 e 22 horas, de segunda à sexta feira, independente de ser ou não ser feriado. Este é um período crítico para o sistema de distribuição da concessionária devido a elevação de demanda da rede elétrica, possuindo tarifas mais elevadas Bortoni [20].

Horário Fora de Ponta – Corresponde às horas complementares às três horas relativas ao horário de ponta anteriormente definido, acrescido do total das horas dos sábados e domingos Bortoni [20].

Período Seco - Compreende o intervalo situado entre os meses de maio a novembro de cada ano. Este período é classificado como seco porque não é o período de chuvas na região do São Francisco. Neste período a tarifa é mais cara Bortoni [20].

Período Úmido - Compreende o intervalo situado entre os meses de dezembro de um ano e abril do ano seguinte. Este período é classificado como úmido porque é o período de chuvas Bortoni [20].

Normas Técnicas

JEC – Japanese Eletrotechnical Committee

IEC – International Eletrotechnical Commission

NEMA – National Electrical Manufacturers Association

IEEE – The Institute of Electrical and Eletronics Engineers

NBR – Norma Brasileira Registrada

CAPÍTULO 1

Introdução

A crise do petróleo na década de 70 desencadeou um movimento de valorização de equipamentos elétricos mais eficientes e adoção de medidas de eficiência energética. No Brasil, cuja geração de energia elétrica é predominantemente obtida através de usinas hidroelétricas, somente a partir da segunda metade da década de 80, começou a surgir uma preocupação com o desperdício de energia. Esta preocupação deveu-se principalmente ao esgotamento do número de rios com potencial para construção de grandes hidrelétricas e, um pouco mais tarde, a crescente privatização do setor elétrico. A privatização desencadeou uma diminuição dos investimentos governamentais no setor e uma profunda mudança em todo mercado energético nacional, passando este por uma nova regulamentação da geração, transmissão, distribuição, comercialização e consumo de energia elétrica.

É cada vez maior a preocupação com o uso eficiente de energia elétrica. No caso particular do Brasil, o país encontra-se com uma defasagem entre o crescimento da geração e do consumo. Segundo o Ministério das Minas e Energia (M.M.E.) brasileiro, até 2015 será necessário quase que triplicar a oferta de energia no Brasil, o que acarretará investimentos de cerca de R\$ 200 bilhões MME [06].

A tendência atual no Brasil é a diversificação de sua matriz energética, aumentando a geração a partir de fontes como o gás natural, derivados de petróleo, solar e eólica. Esta diversificação garante uma maior confiabilidade ao sistema elétrico do país, mas em contrapartida, encarece a tarifa de energia elétrica devido à utilização de tecnologias e fontes mais onerosas.

Os custos da expansão do sistema elétrico brasileiro foram avaliados entre US\$ 47,00 e US\$ 56,00 por MWh. Já os programas de conservação de energia apresentam custos variando de US\$ 1,00 a US\$ 49 por MWh MME [06]. O uso racional de energia implica então na possibilidade de adiar investimentos na geração, viabilizando a custo reduzido a ampliação do fornecimento, maior competitividade da energia elétrica em relação a outros insumos energéticos, e a conservação dos recursos naturais, bem como o desenvolvimento sustentado.

A indústria é o setor que mais consome energia elétrica em todo o mundo. No Brasil, aproximadamente 43% de toda energia gerada MME [06] é consumida pela indústria.

Os motores elétricos representam o uso final de energia elétrica mais importante, pois são responsáveis por cerca de 49% do consumo do setor industrial, representando então aproximadamente 21% do consumo global, sem considerar que outros usos finais como ar-condicionado, refrigeração, eletrodomésticos utilizam também motores como conversores de energia Guia Técnico Motor de Alto Rendimento, CEPEL, PROCEL, ELETROBRAS [04] .

No setor comercial, os equipamentos mais significativos são acionados por motores elétricos, como os refrigeradores, aparelhos de ar condicionado e elevadores, que representam cerca de 37% do consumo do setor, contribuindo aproximadamente com mais 6% do consumo global de eletricidade Guia Técnico Motor de Alto Rendimento, CEPEL, PROCEL, ELETROBRAS [04].

Considerando os dois setores restantes, rural e governamental (que representam juntos uma demanda de 14%) e ainda diversas outras aplicações, podemos afirmar que no Brasil os motores elétricos são responsáveis por, no mínimo, 35% do consumo global de energia elétrica do país.

Se considerarmos que o consumo global de energia elétrica no Brasil durante o ano de 2000 foi de 305.570 GWh MME [06], podemos estimar que só os motores elétricos processaram mais de 97.000 GWh.

No Brasil, o parque industrial foi implantado em uma realidade diferente da atual, quando a energia elétrica era um insumo barato e relativamente abundante. O setor industrial é o menos explorado até o momento pelos programas de eficiência energética. Hoje, como os motores elétricos são responsáveis por mais de 30% do processamento total da energia elétrica consumida, a adoção de medidas que possibilitem o aumento da eficiência na operação de motores pode produzir uma razoável economia de energia.

É comum encontrar em indústrias que estão funcionando a mais de 15 anos, motores superdimensionados para a carga que acionam e/ou que já foram rebobinados, perdendo as características elétricas inicialmente definidas pelo seu fabricante. Nesta realidade, projetos de eficiência energética para a indústria têm grande potencial de redução de custos operacionais e de manutenção em motores. Normalmente, são realizados estudos para verificar a viabilidade técnica e econômica de projetos de *retrefit* de motores, ou seja da troca dos motores existentes da linha padrão por motores novos de uma linha especial de maior rendimento, adequando o novo motor a real necessidade da carga acionada. A viabilidade econômica destes projetos depende da diferença de rendimento entre os dois motores, do tempo de vida do motor existente, da adequação deste motor à carga acionada e do seu tempo de funcionamento. A exatidão da metodologia

utilizada para avaliação do rendimento de motores com tempo de vida útil avançado em chão de fábrica é de fundamental importância, podendo ser decisiva na avaliação da viabilidade econômica destes projetos.

Os motores de alto rendimento além de consumirem menos energia elétrica, diminuindo seu custo operacional, têm menos perdas e conseqüentemente menor aquecimento, sofrendo menor deterioração ao longo do tempo; o que diminui seu custo de manutenção.

O grau de intrusão do método (dificuldade de ser implementado em campo) e sua exatidão são de fundamental importância para uma boa avaliação da viabilidade técnica e econômica na adoção de sistemas energeticamente mais eficientes em projetos de *retrofit*.

1.1- Objetivo

Esta dissertação apresenta uma contribuição na definição de metodologias mais adequadas para avaliação do rendimento dos motores de indução em campo, implementando os métodos de avaliação de rendimento que apresentaram melhores resultados em uma instrumentação eletrônica dedicada, semelhante a um alicate amperímetro, para avaliação de rendimento de motores de indução em chão de fábrica.

1.2- Estrutura Dissertação

O Capítulo 02 apresenta o princípio de funcionamento e principais características elétricas e mecânicas dos motores de indução trifásicos, situando-os entre os diversos tipos de motores elétricos existentes, destacando sua importância e participação no consumo de energia elétrica.

No Capítulo 03 são descritas e classificadas as perdas de energia existentes nos motores de indução trifásicos: perdas no núcleo, perdas mecânicas, perdas por efeito joule no estator e no rotor e perdas suplementares.

No Capítulo 04, é definido o significado do rendimento em um motor de indução trifásico, apresentando os principais fatores que podem influenciar no desempenho do motor, destacando os níveis de rendimento aceitáveis definidos pela norma brasileira NBR 7094 [08] para motores da linha padrão e de alto rendimento e os principais parâmetros a serem considerados na avaliação da viabilidade econômica para projetos de *retrofit* de motores.

No Capítulo 05, são verificadas algumas metodologias existentes para avaliação de rendimento em motores de indução, focalizando a base teórica de cada método, seu nível de exatidão e grau de intrusão, discutindo os métodos adotados pelas normas brasileiras NBR 7094 [08] e NBR 5383 [09] e a americana IEEE 112 [14] para sua medição.

No Capítulo 06, a partir de ensaios em laboratório, são comparados os resultados experimentais obtidos selecionando as metodologias de avaliação de rendimento em motores de indução mais adequadas para as condições oferecidas por motores em campo, discutindo sua exatidão para diversas condições de funcionamento do motor. Os métodos que apresentaram melhores resultados foram implementados em uma instrumentação eletrônica dedicada.

O Capítulo 07 apresenta as conclusões e as perspectivas futuras delineadas a partir deste trabalho.

CAPÍTULO 2

O Motor de Indução Trifásico

Este capítulo tem como objetivo situar o alvo principal de estudo deste trabalho, ou seja, o motor de indução trifásico, entre os diversos tipos de motores existentes, definindo seu princípio de funcionamento e suas principais características elétricas e mecânicas.

2.1- Introdução

A energia elétrica em relação às outras formas de energia é extremamente útil pelas grandes facilidades que apresenta na sua geração, transporte, controle, distribuição e utilização.

O motor elétrico é um equipamento que transforma energia elétrica em mecânica, sendo simplesmente um elemento de transdução entre a energia da rede elétrica e o sistema mecânico acionado. O motor elétrico foi concebido no século XIX e, hoje é o principal uso final da energia elétrica.



Figura 2.1- Um dos primeiros motores de indução trifásico (ano 1893)

2.2- Tipos de Motores Elétricos

Existem vários tipos de motores elétricos e, de uma maneira geral, eles são classificados conforme as características de sua alimentação. Atualmente, devido à robustez e baixo custo, a grande maioria dos motores usados é de corrente alternada, sendo uma pequena parcela de corrente contínua. Com o desenvolvimento de acionamentos eletrônicos como conversores de frequência, a tendência do mercado é cada vez mais utilizar motores de corrente alternada em detrimento dos de corrente contínua. Os motores de corrente alternada são ainda classificados conforme o comportamento da sua velocidade de funcionamento e da sua ligação, trifásica ou monofásica, na rede de alimentação.

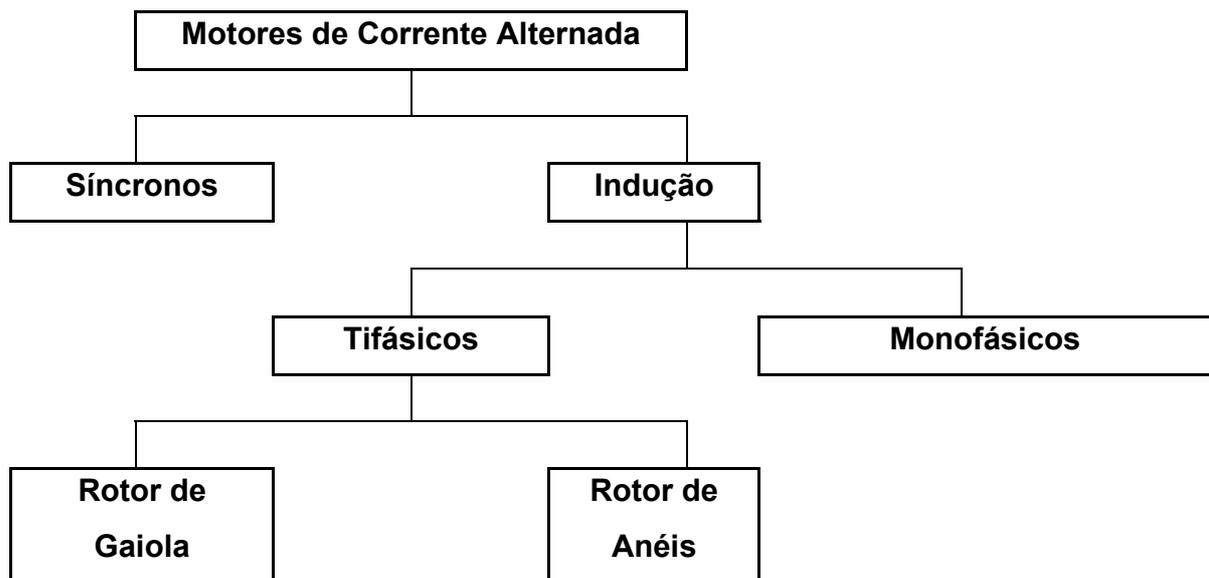


Figura 2.2 – Motores de corrente alternada classificados conforme o comportamento da velocidade e da ligação na rede

Como pode ser visto na Figura 2.2, os motores de corrente alternada podem ser classificados em Síncronos e de Indução (Assíncronos). Esta classificação está relacionada à velocidade de rotação do seu eixo.

Os motores Síncronos são aqueles que, quando em operação normal, apresentam seu eixo girando com uma velocidade angular síncrona, ou seja, sua velocidade é dada pela Equação 2.1, depende diretamente da frequência da rede e de seu número de pólos.

(2.1)

$$W_s = \frac{4 \pi f}{p}$$

Onde (W_s) é a velocidade angular síncrona do rotor em radianos mecânicos por segundo para um motor de corrente alternada, (f) a frequência da rede elétrica de alimentação em ciclos por segundo (Hz) e (p) o número de pólos do motor.

A máxima sobrecarga momentânea que uma máquina síncrona pode suportar, é determinada pelo máximo conjugado que pode ser aplicado sem perda de

sincronismo. Nestas condições, a velocidade de operação independe de sua carga, sendo constante e igual ao seu valor síncrono. Já nos motores de indução, a velocidade é influenciada pela carga. Quanto maior for a carga, mais afastada do seu valor síncrono será sua velocidade Fitzgerald[11].

Os motores de corrente alternada podem também ser subdivididos quanto à sua ligação à rede elétrica como trifásicos ou monofásicos. Os motores de indução trifásicos são também classificados de acordo com o tipo construtivo da sua parte girante. Seu rotor pode ser do tipo gaiola ou de anéis.

Quando o rotor é do tipo gaiola, a carcaça do motor é mais simples, podendo ser totalmente fechada ou não. Esta gaiola é formada por barras situadas na superfície lateral cilíndrica do rotor e curtocircuitadas entre si nas suas extremidades.

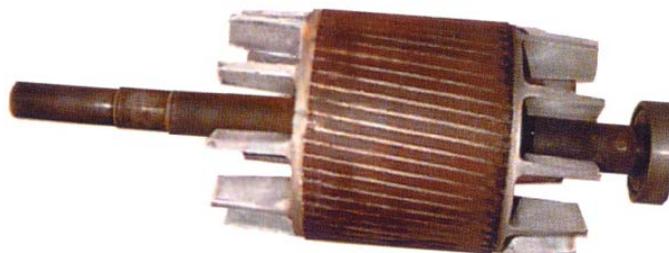


Figura 2.3 – Rotor de gaiola (Guia Operacional de Motores Elétricos PROCEL, CEPEL, ELETROBRAS [04])

As barras formam um circuito elétrico fechado em si mesmo. O número de barras, suas dimensões e formas e a resistividade do material (alumínio, cobre ou latão) definem comportamentos distintos para o motor.

Se o rotor é do tipo com anéis, o motor possui na carcaça tampas removíveis para inspeção do local das escovas. Os anéis permitem a inserção de estágios de

resistores externos ao rotor, fazendo com que o motor apresente elevado torque de partida e corrente de partida limitada.



Figura 2.4 – Rotor de anéis (Guia Operacional de Motores Elétricos PROCEL, CEPEL, ELETROBRAS [04])

Os motores de indução em gaiola são utilizados no acionamento da maioria das cargas mecânicas. Por causa de suas inúmeras vantagens, o motor de indução trifásico com rotor de gaiola é o mais utilizado no mundo inteiro. Sua aplicação abrange desde pequenos aparelhos eletrodomésticos até grandes cargas industriais, com sua potência variando desde frações de cavalos até milhares de kW. No Brasil, ele representa 75% da população de motores elétricos em operação Guia Operacional de Motores Elétricos PROCEL, CEPEL, ELETROBRAS [04]. Os motores de indução em anéis têm grande aplicação em cargas de tração. Nesta dissertação serão abordados os motores de indução trifásicos com rotor em gaiola.

Segundo relatório estatístico da ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, nos anos 80 foram vendidos mais de 2.000 motores elétricos por dia, distribuídos de acordo com a Tabela 2.1.

Potência Nominal (cv)	Participação Percentual (%)
até 1	32 a 36
de 1 a 10	54 a 59
de 10 a 40	6 a 8
de 40 a 100	0,5 a 1
de 100 a 300	0,4 a 0,5
acima de 300	menos de 0,4

Tabela 2.1 – Distribuição por potência nominal da venda média diária dos motores elétricos

Devido a sua simplicidade, robustez e baixos custos de implementação, operação e manutenção, salvo algumas exceções, o motor de indução trifásico com rotor em gaiola deve ser o primeiro tipo de motor a ser considerado para uma instalação que requeira mais de 1cv Guia Operacional de Motores Elétricos PROCEL, CEPEL, ELETROBRAS [04].

2.3- Fundamentação Teórica do Motor de Indução

2.3.1 – Princípio de Funcionamento

O motor assíncrono foi concebido no final do século XIX e, embora o seu projeto tenha apresentado uma grande evolução, a sua configuração básica e seu princípio de funcionamento persistem até hoje, de forma simples e funcional: um enrolamento que é ligado à rede de alimentação situado no estator e um segundo enrolamento situado no rotor que apresenta grandezas elétricas provenientes das induções provocadas pelo primeiro enrolamento.

Com a evolução tecnológica, a melhoria destas máquinas trouxe como pode ser visto na Figura 2.5 uma redução do seu volume e uma melhoria no seu desempenho. Os principais fatores de sua evolução foram:

- ❖ A utilização de materiais que apresentam melhores propriedades magnéticas;

- ❖ O uso de novos materiais isolantes que suportam temperaturas bem mais elevadas e possuem maior capacidade de isolação;
- ❖ As técnicas de refrigeração que possibilitam uma troca de calor mais eficaz;
- ❖ O uso de técnicas computacionais no seu projeto, definindo com maior exatidão dimensões, parâmetros básicos, formatos de ranhuras, etc.

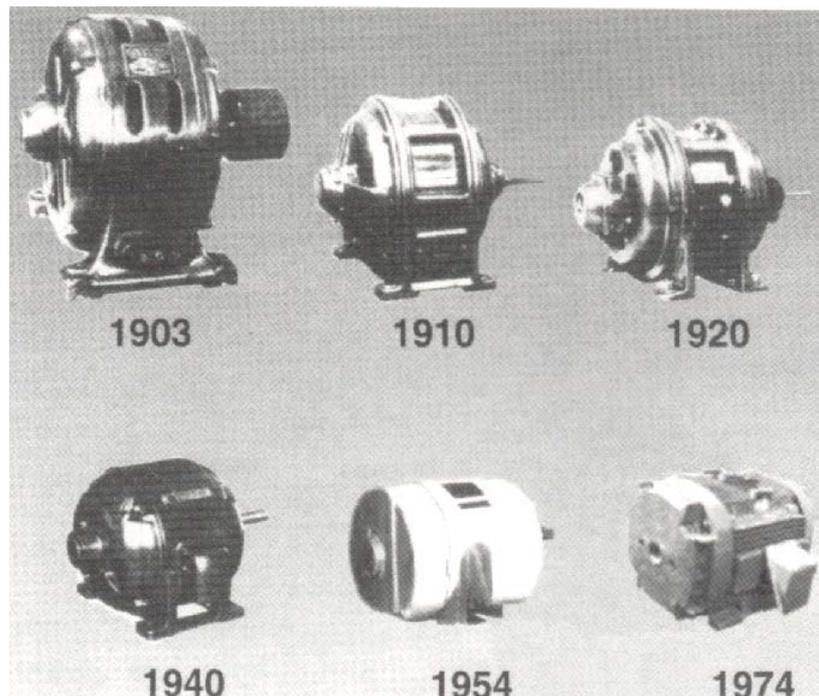


Figura 2.5 – Evolução dos motores de Indução trifásicos de gaiola de 15 HP, 4 pólos, 220V, fabricado pela General Electric Company

Já o princípio de funcionamento destas máquinas se manteve ao longo do tempo basicamente o mesmo. No motor de indução ou assíncrono a corrente alternada é fornecida ao enrolamento do estator diretamente, e ao enrolamento do rotor por indução a partir do estator, enquanto no motor síncrono o campo do rotor existe por aplicação de tensão.

Quando o enrolamento do estator de uma máquina de indução trifásica é excitado por tensões polifásicas equilibradas, é produzido no entreferro um campo

magnético girante de amplitude constante, rodando na velocidade síncrona e com sentido de giro conforme a ordem da ligação das fases na rede.

Desde que a velocidade do campo girante e a do rotor sejam diferentes, ele induz tensões nos condutores do rotor. Como o circuito do rotor é fechado, as tensões induzidas criam correntes que estabelecem um segundo campo magnético (também girante) em reação ao primeiro. Como os dois campos têm uma tendência a se alinharem, provocam o aparecimento do conjugado (torque) eletromagnético, forçando a rotação da parte móvel do motor (rotor).

Quando uma carga é acionada por um motor de indução, o seu conjugado resistente provoca uma diminuição na velocidade do rotor, aumentando a diferença entre a velocidade do rotor e a do campo girante (escorregamento). O aumento do escorregamento aumenta as correntes induzida e indutora, a potência elétrica demandada da rede e o conjugado do motor, fazendo com que o motor consiga responder satisfatoriamente ao aumento da carga Fitzgerald [11].

2.3.2 – O Circuito Equivalente

Com o objetivo de definir um modelo para o motor de indução trifásico, equacionando as grandezas elétricas e mecânicas que caracterizam este sistema físico, é possível definir um circuito equivalente representativo para este motor.

Na Figura 2.6, (V_1) é a tensão por fase no terminal do estator, (R_1) a resistência do estator por fase, (L_1) a indutância de dispersão por fase do estator, (R_c) resistência no núcleo do estator por fase, (L_m) indutância de magnetização por fase do estator, (f_1) frequência de alimentação da rede, (I_1) a corrente do estator, (I_ϕ) é a corrente necessária para criar o fluxo do entreferro resultante que pode ser decomposta em (I_m) corrente de magnetização e (I_c) componente de (I_ϕ)

responsável pelas perdas no núcleo e (E_1) a tensão induzida na saída do estator por fase Toro [12].

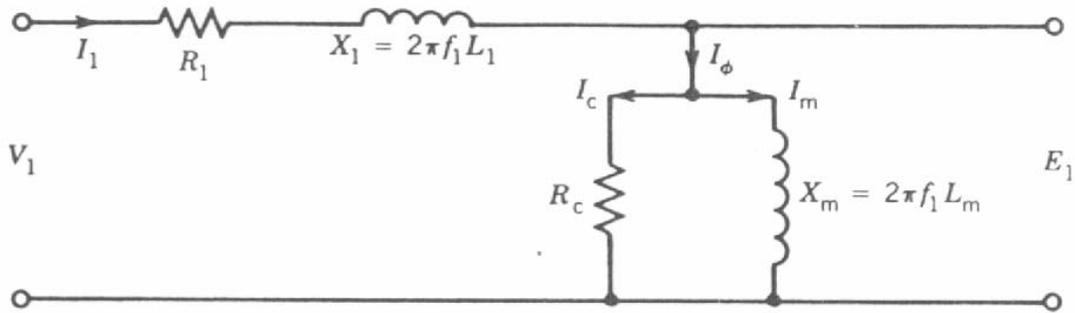


Figura 2.6 – Circuito Equivalente do Estator

O circuito equivalente do rotor, na condição de rotor parado, pode ser representado como na Figura 2.7, onde (R_2) a resistência do rotor, (X_2) a reatância de dispersão por fase no rotor dada pela Equação 2.2, (L_2) a indutância de dispersão do rotor por fase, (f_2) a frequência no rotor dada pela Equação 2.3 e (E_2) a tensão induzida por fase no rotor na frequência do rotor Toro [12].

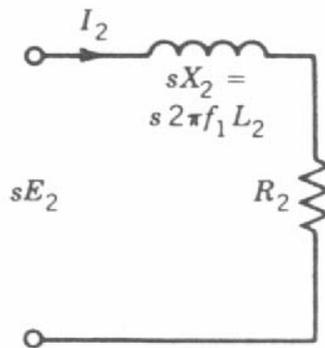


Figura 2.7 – Circuito Equivalente do Rotor Parado

$$(2.2)$$

$$X_2 = 2\pi f_2 L_2$$

$$(2.3)$$

$$f_2 = sf_1$$

No circuito equivalente por fase para um motor de indução que contemple todas as grandezas elétricas envolvidas, Figura 2.8, é necessário que o circuito do rotor tenha suas grandezas elétricas na frequência da rede (f_1), Figura 2.7, e que estas estejam referidas ao estator. Como o número de espiras na armadura do estator (N_1) e na armadura do rotor (N_2) podem ser diferentes, o índice de proporcionalidade que precisa ser considerado (a) é dado pela Equação 2.4 Toro[12].

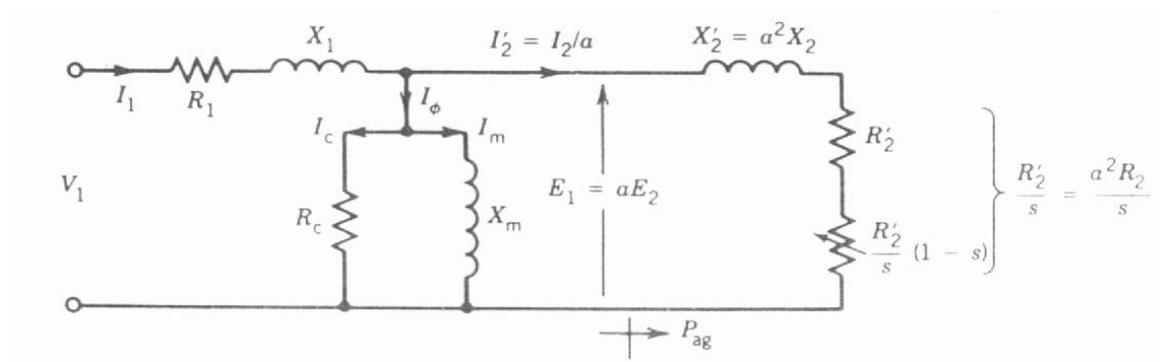


Figura 2.8 – Circuito Equivalente do Motor de Indução Monofásico

(2.4)

$$a = N_1 / N_2$$

A resistência $(R_2')/s$ é resultante do efeito combinado da carga no eixo e da resistência do rotor refletida no estator.

O circuito equivalente da Figura 2.8 é aplicado somente para motores de indução trifásicos em gaiola simples. Para motores de indução trifásicos com gaiola dupla ou com barras profundas não se aplica este modelo.

2.3.3 – Testes Para Obter os Parâmetros do Circuito Equivalente

Os parâmetros do circuito equivalente R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , R_c e X_m podem ser determinados a partir dos resultados dos ensaios em vazio, rotor bloqueado e da medição da resistência dc na armadura do estator.

A corrente por fase do estator R_1 é medida através de um teste simples com aplicação de corrente contínua. Devido ao efeito pelicular, isto é a tendência da corrente variável no tempo de se concentrar na superfície do condutor, reduzindo a área da seção transversal, a resistência do estator na corrente alternada é maior que a obtida no teste aplicando corrente contínua. Esta diferença é segundo Toro [12], desprezível.

Segundo Kosow [10], no ensaio em vazio ou circuito aberto o motor de indução é ligado a uma linha que o alimenta na sua tensão e frequência nominais e é posto a girar sem carga acoplada ao seu eixo. Neste ensaio, devem ser medidas a frequência da rede, a tensão de linha, a corrente de linha e a potência trifásica de entrada no motor.

O circuito equivalente do motor nas condições do ensaio em vazio é o descrito na Figura 2.9 Sen[17].

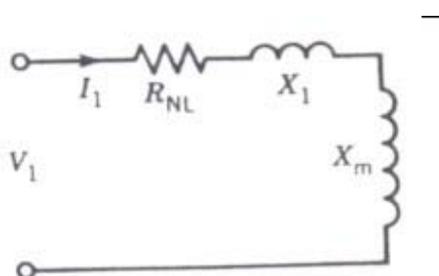


Figura 2.9 – Circuito Equivalente Monofásico do Motor de Indução em Vazio

Na Figura 2.9, (V_1) é a tensão por fase no terminal do estator, (R_{NL}) a resistência do estator por fase ou a resistência no ensaio em vazio, (X_1) a reatância de dispersão por fase do estator, (X_m) reatância de magnetização por fase do estator, (f_1) frequência de alimentação da rede, (I_1) a corrente do estator. A partir dos dados medidos e considerando o circuito equivalente do motor descrito na Figura 2.9 é possível chegar as Equações 2.5 a 2.9.

$$R_{NL} = \frac{P_{NL}}{3I_1^2} \quad (2.5)$$

Onde

P_{NL} – é a potência de entrada trifásica do motor no ensaio em vazio

$$Z_{NL} = \frac{V_1}{I_1} \quad (2.6)$$

Z_{NL} – é a impedância por fase no estator do motor no ensaio em vazio

$$V_1 = \frac{V_L / 3^{1/2}}{I_1} \quad (2.7)$$

$$X_{NL} = (Z_{NL}^2 - R_{NL}^2)^{1/2} \quad (2.8)$$

$$X_{NL} = X_1 + X_m \quad (2.9)$$

No ensaio com rotor bloqueado, o motor é desligado da alimentação e seu rotor é bloqueado, de modo que não possa girar. Uma tensão trifásica, cujo valor possa

ser gradativamente aumentado, é aplicada (a partir de um variac trifásico ou de um regulador de indução polifásico) ao estator, até que circule a corrente nominal de placa. Nesta condição, as perdas no núcleo (ferro) são desprezíveis e não há perdas mecânicas já que o motor encontra-se parado. A potência total solicitada pelo motor representa as perdas elétricas no cobre do estator e do rotor à plena carga. Neste ensaio, também devem ser medidas a frequência da rede, a tensão de linha, a corrente de linha e a potência trifásica de entrada no motor.

Nas condições do ensaio com rotor bloqueado, o circuito equivalente do motor é o descrito na Figura 2.10 Sen [17].

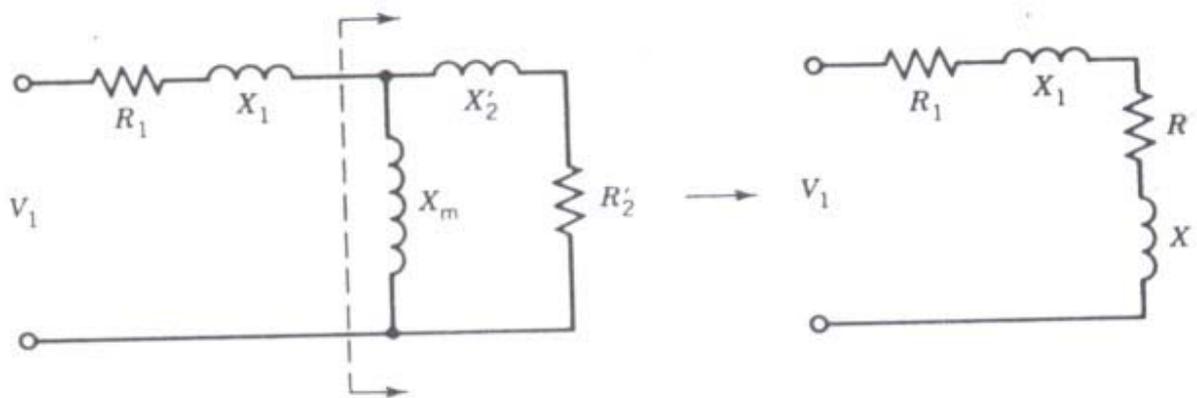


Figura 2.10 – Circuito Equivalente Monofásico do Motor de Indução com rotor bloqueado

Na Figura 2.10, (V_1) é a tensão por fase no terminal do estator, (R_1) a resistência do estator por fase, (X_1) a reatância de dispersão por fase do estator, (X_m) reatância de magnetização por fase do estator, (f_1) frequência de alimentação da rede, (I_1) a corrente do estator, (R'_2) a resistência por fase do rotor refletida ao estator, (X'_2) a reatância de dispersão por fase no rotor refletida ao estator. A partir dos dados medidos e considerando o circuito equivalente do motor descrito na Figura 2.10 é possível chegar as Equações 2.10 a 2.16.

(2.10)

$$R_{BL} = \frac{P_{BL}}{3I_1^2}$$

Onde

R_{BL} – è a resistência equivalente por fase do motor no ensaio com rotor bloccado

P_{BL} – è a potência de entrada trifásica do motor no ensaio con rotor bloccado

(2.11)

$$R'_2 = R_{BL} - R_1$$

(2.12)

$$Z'_L = \frac{V_1}{I_1}$$

Z_{BL} – è a impedância equivalente por fase do motor no ensaio con rotor bloccado

(2.13)

$$V_1 = \frac{V_L / 3^{1/2}}{I_1}$$

(2.14)

$$X_{BL} = (Z_{BL}^2 - R_{BL}^2)^{1/2}$$

(2.15)

$$X_{BL} = X_1 + X'_2 + X_m$$

Segundo Sen[17], no teste con o rotor bloccado, a reatância de magnetização X_m pode ser despreczada, já que seu módulo é muito maior que o módulo da soma de R'_2 e X'_2 Figura 2.10. A reatância equivalente no teste em vazio X_{NL} será então dada pela Equação 2.16.

(2.16)

$$X_{NL} = X_1 + X'_2$$

Ainda segundo Sen[17], con o objetivo de simplificar o circuito equivalente do motor, V_1 , R_1 , X_1 , e X_m podem ser representados pelos valores de tensão V_{th} ,

resistência R_{th} e reatância X_{th} para circuito equivalente de Thevenin Equações 2.17 a 2.18.

$$V_{th} = \frac{X_m}{[(R_1^2 + (X_1 + X_m)^2]^{1/2}} \times V_1 \quad (2.17)$$

$$R_{th} = \left(\frac{X_m}{(X_1 + X_m)} \right)^2 \quad (2.18)$$

$$X_{th} = X_1 \quad (2.19)$$

2.3.4 – Principais Variáveis Mecânicas e Elétricas para Um Motor de Indução Trifásico

A partir do circuito equivalente é possível definir e relacionar as principais variáveis mecânicas e elétricas em um motor de indução trifásico. De acordo com Sen [17], a potência transferida através do entreferro a partir do estator, P_g , pode ser descrita de acordo com a Equação 2.20.

$$P_g = I_2'^2 R_2' / s \quad (2.20)$$

Ou ainda

$$P_g = I_2'^2 [R_2' + (R_2' / s)(1-s)] \quad (2.21)$$

A parcela $I_2'^2 (R_2' / s)(1-s)$ da potência transferida através do entreferro é responsável pela potência mecânica interna desenvolvida pelo motor (P_{mi}).

$$P_{mi} = I_2'^2 (R_2'/s)(1-s) \quad (2.22)$$

Ou então

$$P_{mi} = (1-s)P_g \quad (2.23)$$

Já a parcela $I_2'^2 R_2'$ representa a fração da potência transferida através do entreferro dissipada na resistência do circuito do rotor.

$$P_{mi} = I_2'^2 R_2' \quad (2.24)$$

O conjugado eletromagnético (M_i) em Newton-metros corresponde à potência mecânica interna (P_{mi}) pode ser obtido dividindo-se a potência mecânica interna pela velocidade mecânica angular (W_m) em radianos mecânicos por segundo.

$$M_i = P_{mi} / W_m \quad (2.25)$$

onde

$$W_m = (1-s)W_s \quad (2.26)$$

A velocidade angular síncrona (W_s) em radianos por segundo depende da frequência da rede (f_1) e do número de pólos do motor (p).

$$W_s = 4\pi f_1 / p \quad (2.27)$$

O conjugado eletromagnético interno (M_i) também pode ser escrito como:

$$M_i = (1/W_s) I_2'^2 R_2'/s \quad (2.28)$$

Ou ainda a partir do circuito equivalente de Thevenin

$$M_i = \frac{3}{W_s} \times \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + R'_2)^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \times \frac{R'_2}{s} \quad (2.29)$$

Conhecendo-se o conjugado eletromagnético interno (M_i) é possível calcular a potência mecânica interna (P_{mi}) através da Equação 2.25. O conjugado interno (M_i) e a potência (P_{mi}) não são ainda os valores de saída disponíveis no eixo, pois não foram levadas em conta as perdas rotacionais descritas no Capítulo 3.

A potência mecânica de saída entregue à carga (P_M) pode ser calculada pela Equação 2.30

$$P_M = P_{mi} - P_{rot} \quad (2.30)$$

O fator de potência é um índice que relaciona a potência que o motor realmente fornece para acionar a carga e suprir suas perdas internas, chamada potência ativa, e a potência total solicitada à rede chamada potência aparente. A potência aparente engloba duas componentes distintas de potência: a potência ativa relacionada ao trabalho mecânico e às perdas e a potência reativa relacionada aos fluxos magnéticos produzidos pelos enrolamentos do estator e do rotor.

Quanto mais próximo da unidade estiver o fator de potência uma maior parcela da potência aparente fornecida pela rede elétrica estará sendo transformada em potência ativa, ou seja, retirando-se as perdas internas do motor, em potência útil fornecida pelo eixo à carga.

A legislação em vigor, Portaria 456 [22], exige que os consumidores que possuem medição de energia reativa operem com fator de potência mínimo de 0,92.

Quando um motor está funcionando, sua carga mecânica determina a relação entre as potências aparente, reativa e ativa e, conseqüentemente, o seu fator de potência. A Figura 2.11 mostra que em vazio o fator de potência é muito baixo, já que a potência ativa entregue ao motor é a necessária somente para suprir suas perdas. Efeito semelhante ao que ocorre quando o motor está em vazio ou com pouca carga, acontece quando o motor está superdimensionado. Observa-se que o fator de potência cresce proporcionalmente ao carregamento do motor, atingindo valores mais razoáveis quando o motor está operando a partir de 75% de sua potência nominal.

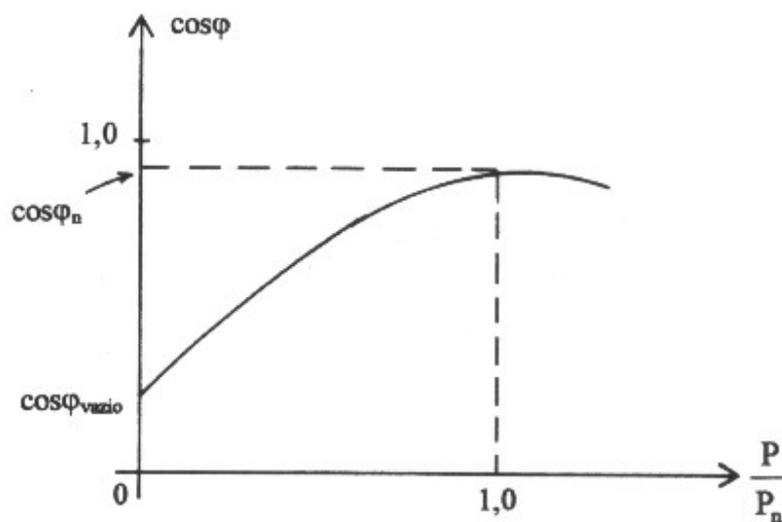


Figura 2.11 – Comportamento do fator de potência em função da carga

As principais causas do baixo fator de potência devido a motores de indução são motores trabalhando em vazio durante uma grande parte do tempo de operação, motores superdimensionados para a carga mecânica que eles acionam e grande número de motores de pequena potência em operação.

Motores com baixo fator de potência funcionam com uma maior temperatura de operação, deteriorando sua isolação mais rapidamente e, conseqüentemente, diminuindo a vida útil da máquina.

Nos Capítulos 3 e 4 serão estudados as várias perdas e o fluxo de potência em um motor de indução trifásico, objetivando encontrar a potência mecânica no eixo entregue à carga.

2.4- Considerações Finais

Este capítulo não faz um estudo teórico detalhado do motor de indução trifásico, uma vez que seu princípio de funcionamento e suas características elétricas e mecânicas são bastante conhecidos e facilmente encontradas na literatura. É, no entanto, de grande relevância para este trabalho, não podendo deixar de ser escrito, pois é a partir das considerações nele citadas que se desenvolverão os capítulos seguintes que argumentam de forma mais precisa e detalhada sobre o objetivo desta dissertação, ou seja o rendimento de um motor de indução trifásico para diferentes condições de carregamento do motor.

CAPÍTULO 3

Perdas de Energia no Motor de Indução Trifásico

Este capítulo busca apresentar as várias perdas existentes em um motor de indução trifásico, classificando-as segundo as normas brasileiras vigentes e a literatura estudada.

3.1- Introdução

As perdas determinam o aquecimento sofrido pela máquina e, conseqüentemente, a potência de saída no eixo que pode ser obtida sem excessiva deterioração da isolação. As quedas de tensões ou os componentes de corrente associados às perdas precisam ser considerados de forma apropriada em uma representação de máquinas. Estudar as perdas das máquinas é de grande importância, pois permite determinar o rendimento, o que influencia consideravelmente no seu custo operacional.

3.2 – Normas

As principais normas internacionais existentes relativas ao rendimento e perdas em motores de indução trifásicos, são a Japanese Electrotechnical Committee (JEC 37), International Electrotechnical Commission (IEC 34-2) e a National Electrical Manufacturers Association (NEMA) IEEE Standard 112 [14]. No Brasil, as normas NBR 7094 [08] e NBR 5383 [09] regulam a determinação das perdas e do rendimento em um motor de indução trifásico e são baseadas na IEEE Standard 112 [14] e, principalmente na IEC 34-2.

A NBR 7094 [08] fixa os requisitos básicos a serem atendidos pelos motores de indução, exceto os aplicados em veículos de tração. Define as várias perdas existentes, assim como o rendimento à plena carga, para cada combinação potência x velocidade síncrona, com frequência nominal de 60 Hz, para as linhas padrão e de alto rendimento. Já a NBR 5383 [09] estabelece os procedimentos a serem seguidos na execução de ensaios destinados à determinação das características das máquinas de indução, não se aplicando para máquinas de tração. Estabelece, então, as condições de ensaio que devem ser seguidas para determinação do rendimento em motores de indução.

3.2.1 – Norma Brasileira 7094 [08]

De acordo com a NBR 7094 [08], as perdas a serem incluídas para determinação do rendimento são:

- ❖ Perdas no Núcleo;
- ❖ Perdas resistivas no enrolamento do estator ($I_1^2 R_1$);
- ❖ Perdas resistivas no enrolamento do rotor ($I_2'^2 R_2'$);
- ❖ Perdas por atrito e ventilação;

❖ Perdas Suplementares

Segundo a NBR 7094 [08], a potência requerida por itens auxiliares, tais como bombas ou ventiladores externos que são necessários para a operação do motor, deve ser indicada em separado. As perdas resistivas devem ser corrigidas para uma temperatura igual à temperatura ambiente de 25°C acrescida da elevação de temperatura determinada com carga nominal pelo método da variação da resistência.

As perdas em um motor de indução trifásico podem ainda ser classificadas como fixas e variáveis. As perdas fixas são aquelas que não dependem da carga, como as perdas mecânicas (por atrito e ventilação) e as do núcleo. Já as perdas variáveis são aquelas que variam com o carregamento do motor, que são as perdas no cobre do estator e do rotor, e as perdas suplementares.

O posicionamento desta Norma com relação aos níveis de rendimento que os motores de indução trifásicos devem apresentar é discutido no Capítulo 4 desta dissertação.

3.2.2 – Norma Brasileira 5383 [09]

De acordo com a NBR 5383 [09], a perda total existente em um motor de indução pode ser considerada como a soma das seguintes perdas:

❖ Perdas independentes da corrente:

- As perdas no Ferro ou no Núcleo são perdas em vazio, no ferro e as suplementares das outras partes metálicas, exceto nos condutores.
- As perdas por atrito são perdas por atrito nos mancais e, nas escovas, excluídas as perdas do sistema de lubrificação separado. As perdas nos mancais devem ser fornecidas separadamente, sejam ou

não estes mancais fornecidos com a máquina. Quando for exigida a indicação das perdas num sistema de lubrificação separado, elas deverão ser fornecidas separadamente.

- As perdas totais por ventilação são as perdas totais por ventilação da máquina, inclusive as potências absorvidas por ventiladores que sejam parte integrante da máquina. As perdas em máquinas auxiliares, tais como ventiladores externos, bombas de água e de óleo, que não sejam parte integrante da máquina, mas são destinadas exclusivamente à mesma, devem ser incluídas somente mediante acordo entre fabricante e comprador. Quando for exigida a indicação das perdas num sistema de ventilação separado, elas devem ser fornecidas em separado.

❖ Perdas causadas pela carga:

- Perdas resistivas nos enrolamentos primários ($I_1^2 R_1$)
- Perdas resistivas nos enrolamentos secundários ($I_2'^2 R_2'$)
- Perdas elétricas nas escovas

❖ Perdas suplementares em carga:

- As perdas suplementares no ferro são as perdas suplementares introduzidas pela carga no ferro e nas demais partes metálicas, exceto os condutores.
- As perdas suplementares nos condutores são perdas por corrente de Foucault nos condutores dos enrolamentos primários e secundários, causadas pela pulsação do fluxo dependente da corrente.

As perdas suplementares em carga são às vezes designadas como perdas suplementares, porém elas não incluem as perdas suplementares em vazio.

3.3 – Definições Clássicas

De acordo com a literatura, Fitzgerald[11], Kosow[10], Sen[17], ELETROBRAS CEPEL[04], Toro[12], em um motor de indução trifásico existem perdas no núcleo (histerese ou Foucault), perdas no cobre do estator e no cobre do rotor, perdas mecânicas (atrito e ventilação) e perdas suplementares ou por dispersão Figura 3.1.

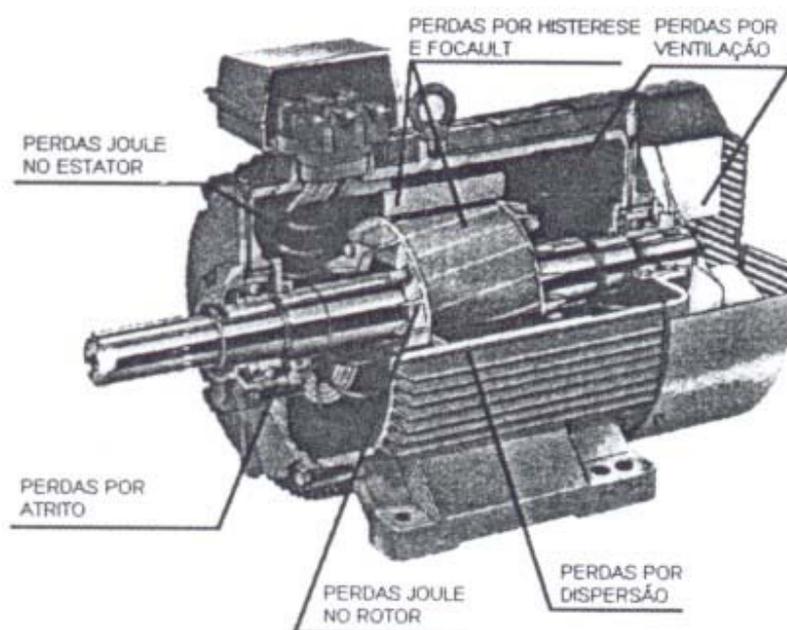


Figura 3.1 – Perdas em um motor de indução trifásico

3.3.1- Perdas no Núcleo ou no Ferro do Estator e do Rotor

São responsáveis por 15 a 30%, ELETROBRAS CEPEL[04], das perdas totais no motor. Consistem nas perdas por histerese e correntes de Foucault que se

originam da variação de densidade de fluxo no ferro da máquina, estando energizado somente o enrolamento de excitação principal. Em máquinas de indução, as perdas são confinadas quase que totalmente, no núcleo do estator. As perdas no núcleo podem ser avaliadas pela medição da potência de entrada da máquina quando ela está funcionando sem carga à velocidade ou frequência nominal e sob as condições apropriadas de fluxo ou tensão, subtraindo-se as perdas por atrito e ventilação.

Para determinação apenas do rendimento, não há necessidade de separar as perdas no ferro e as perdas por atrito e ventilação. A soma destas duas perdas é chamada de perda rotacional em vazio.

3.3.1.1 Perdas por Correntes de Foucault ou Correntes Parasitas

Em uma massa metálica ferromagnética sujeita à variação de fluxo, gera-se uma f.e.m. que produz, dentro da própria massa metálica ferromagnética condutora, correntes chamadas de parasitas. Estas correntes circulam em percursos fechados dentro do material ferromagnético, causando uma perda indesejável de potência por aquecimento.

Pela Lei de Lenz, estas correntes produzem uma força magnetomotriz que, se opõe à causa que a produz, isto é, ao movimento. Assim sendo, o efeito destas correntes constitui uma perda de potência. Segundo Toro [12], se o circuito magnético for composto de ferro sólido, a perda de potência resultante é significativa porque as correntes encontram relativamente pouca resistência. Para aumentar a resistência encontrada pelas correntes parasitas, o circuito magnético deve ser composto de lâminas finas. Com o objetivo de reduzir ainda mais esta perda de potência, é necessário que as lâminas de ferro sejam isoladas entre si. Com esta construção, o valor da f.e.m. produzida em cada lâmina será pequeno, e atuará sobre um circuito elétrico de pequena seção, o que reduzirá

consideravelmente o valor das correntes parasitas e a correspondente perda de potência.

A Equação 3.1 é uma expressão para a perda de potência produzida pelas correntes parasitas expressa em Watts Toro [12].

(3.1)

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \tau^2 v$$

onde:

K_e – constante que depende do material

f - frequência da variação do fluxo

B_m – densidade de fluxo máxima

τ - espessura das lâminas

v – volume total das lâminas

3.3.1.2 - Perdas por Histerese Magnética

O processo de magnetização e desmagnetização de um material ferromagnético numa condição cíclica e simétrica envolve um armazenamento e liberação de energia que não é totalmente reversível. Quando o material é magnetizado durante cada meio ciclo, tem-se que a quantidade de energia armazenada no campo magnético excede a que é liberada na desmagnetização Toro[12].

A perda por histerese magnética ocorre quando um núcleo ferromagnético, sujeito à magnetização, varia o valor de indução magnética em suas lâminas. Se a intensidade do campo magnético H em um núcleo ferromagnético é aumentada e posteriormente reduzida, voltando a zero, somente uma parte da energia que foi absorvida pelo campo B é devolvida. O restante desta energia é dissipado e denominado de perda por histerese.

Um ciclo de histerese isolado está indicado na Figura 3.2. A direção das setas nesta curva indica o modo pelo qual o campo magnético B varia quando H varia de zero a um valor positivo máximo, passando por zero, um valor negativo máximo e, de volta, a zero, completando desta forma um ciclo completo.

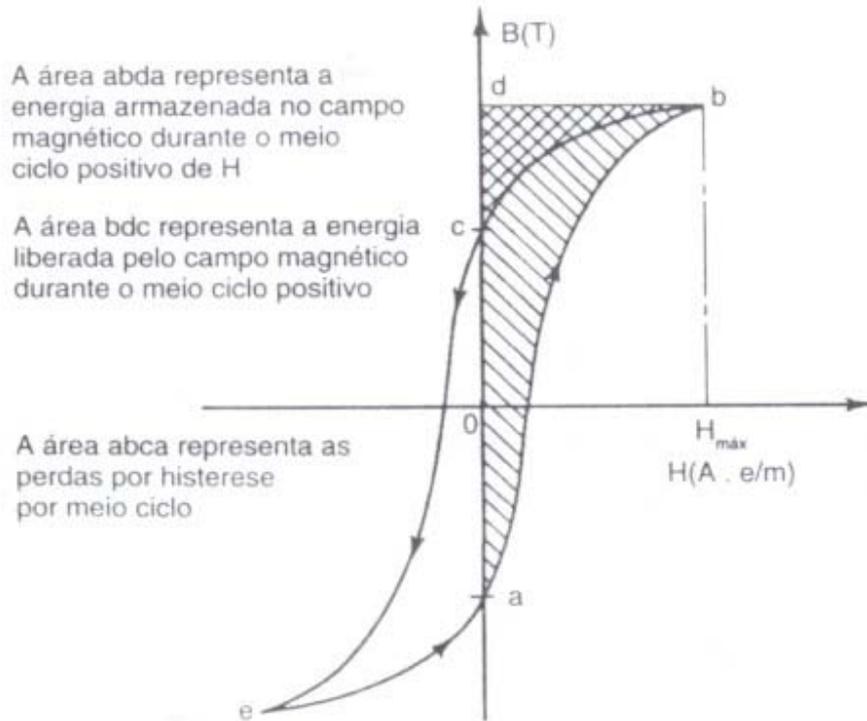


Figura 3.2 – Variação da força eletromotriz em função da corrente de excitação da máquina funcionando em vazio.

Segundo Toro [12] a potência em Watts perdida por efeito da histerese pode ser calculada pela Equação 3.2.

(3.2)

$$W_p = K_h B_m^n f v$$

onde:

K_h – constante que depende do material

n - se situa na faixa de $1,5 \leq n \leq 2,5$, dependendo do material empregado

Quando a máquina está em carga, a distribuição espacial do campo magnético é significativamente alterada pela força magnetomotriz das correntes de carga, com isso as perdas reais no núcleo aumentam muito. Por exemplo, a força magnetomotriz provocada pelos componentes harmônicos causa perdas apreciáveis no ferro perto das superfícies do entreferro. O aumento total nas perdas no ferro é classificado como parte das perdas suplementares.

As perdas por Histerese e correntes parasitas podem ser reduzidas pela diminuição da densidade de fluxo. Isto pode ser conseguido através de um melhor projeto do circuito magnético, ou ainda pelo uso de materiais magnéticos de melhor qualidade.

3.3.2 - Perdas no Cobre do Estator e do Rotor

3.3.2.1- Definição

As perdas no cobre do estator são responsáveis por 25 a 50% das perdas totais do motor, enquanto as perdas no cobre do rotor são responsáveis por 15 a 25 % das perdas totais ELETROBRAS CEPEL[04]. As perdas no cobre ou resistivas I^2R existem naturalmente em todos os enrolamentos da máquina. Por convenção, estas perdas são calculadas considerando a resistência do enrolamento medidas em corrente contínua a 75° C. Na realidade, estas perdas dependem das resistências efetivas dos enrolamentos sob condições de fluxo e frequência de funcionamento. O incremento das perdas originário da diferença entre os valores das resistências em corrente contínua e seus valores efetivos é incluído nas perdas suplementares.

Considerando as características determinadas a partir do circuito equivalente definido no Capítulo 2, as perdas resistivas nos enrolamentos do estator e do rotor podem ser equacionadas da seguinte forma:

(3.3)

$$P_{ce} = 3I_1^2 R_1$$

(3.4)

$$P_{cr} = 3 I_2'^2 R_2'$$

onde:

P_{ce} – Perda resistiva no estator

I_1 – corrente por fase estatórica

R_1 – resistência por fase estatórica

P_{cr} – Perda resistiva no rotor

$I_2'^2$ – corrente por fase rotórica referida ao estator

R_2' – resistência por fase rotórica referida ao estator

3.3.2.2- Cálculo da Corrente de Fase no Estator e no Rotor

Conhecida a potência nominal (P_{MN}) em cv do motor, a tensão de linha (V), o fator de potência [isto é, $\cos\phi$] e o rendimento (μ), a corrente absorvida pelo motor da linha de alimentação é dada por:

(3.5)

$$I_L = \frac{0,736 P_{MN}}{3^{1/2} V \cos\phi \mu}$$

A corrente de fase no estator (I_1) depende do tipo de agrupamento das fases, isto é: se estas estão agrupadas em estrela $I_1 = I_L$, ou se estão agrupadas em triângulo $I_1 = \frac{I_L}{3^{1/2}}$.

Para avaliar a corrente no rotor é necessário avaliar o número dos ampère-condutores no rotor $N_r I_2$, que não é igual ao do estator, $N_e I_1$, como nos transformadores.

Nos transformadores é possível considerar os ampère-condutores no primário iguais aos do secundário pelo fato da corrente magnetizante ser desprezível quando comparada à corrente normal, e de ser o transformador um equipamento de rendimento elevado. Estes fatos não ocorrem com o motor de indução e, por esta razão, os ampère-condutores do estator possuem valor mais elevado que os do rotor.

O cálculo do número dos ampère-condutores no rotor é laborioso e complicado, podendo, entretanto ser feito pela seguinte expressão empírica Martignoni [16]:

(3.6)

$$N_r I'_2 = M_R N_e I_1$$

onde:

M_R – constante de proporcionalidade para o número de ampère-espira entre o estator e o rotor, fornecida pela Tabela 3.1

Potência Nominal (cv)	M_R
até 1	0,66
de 1 a 2	0,7
de 2 a 5	0,75
de 5 a 10	0,8
de 10 a 15	0,82
de 15 a 50	0,85
acima de 50	0,86

Tabela 3.1 – Constante de proporcionalidade para o número de ampère-espira entre o estator e o rotor

Assim sendo, resulta:

(3.7)

$$I'_2 = \underline{M_R N_e I_1}$$

N_r

3.3.2.2- Cálculo da Resistência dos Condutores do Estator e do Rotor

Densidades de corrente de elevado valor permitem reduzir o volume da máquina, mas aumentam as perdas no cobre, provocando aquecimento exagerado. Densidades de correntes de baixo valor fazem com que as perdas no cobre se reduzam, aumentando o rendimento da máquina, mas esta fica mais volumosa e de maior custo.

A escolha da densidade de corrente deve ser feita criteriosamente obedecendo aos limites descritos na Tabela 3.2 Martignoni [16].

Local	Densidade de Corrente (A/mm ²)
Estator	$\delta = 3$ até 5
Rotor	$\delta = 4$ até 6
Anéis do Rotor	$\delta = 3$ até 6

Tabela 3.2 – Densidades Típicas de Corrente Para Diversos Locais do Motor de Indução

A densidade de corrente no rotor pode ser considerada mais elevada que no estator, pelo fato do seu movimento permitir maior dissipação de calor.

Dos valores acima descritos, os maiores devem ser usados para máquinas de pequena potência e bem ventiladas, e os menores para máquinas de grande potência ou mal ventiladas.

Estabelecida a densidade de corrente, a seção dos condutores será:

(3.8)

$$\zeta = \frac{I}{\delta}$$

onde:

I – é a corrente que deve passar através do condutor em ampéres

Uma vez determinada a seção dos condutores, é possível calcular a resistência de uma fase do estator ou rotor, conforme indicado a seguir:

Para o estator e o rotor bobinado, o cálculo da resistência de uma fase é feito por meio da Equação 3.9.

(3.9)

$$R_f = \frac{\rho}{S}$$

Onde a constante ρ do cobre a 75° C é igual a 21.6 $\Omega \times \text{mm}^2$. O comprimento do condutor por fase é calculado multiplicando-se o comprimento médio de um condutor pelo número de condutores por fase.

3.3.3 - *Perdas Mecânicas ou Rotacionais*

Segundo a ELETROBRAS CEPEL[04] perdas mecânicas são responsáveis por 2 a 15% das perdas totais e ocorrem devido ao atrito nas escovas e nos mancais, de ventilação, e da potência necessária para circular o ar através da máquina e sistema de ventilação. Por isso, estas perdas dependem dos processos de lubrificação, dos sistemas de ventilação e da velocidade de rotação da máquina.

As perdas por atrito e ventilação podem ser medidas pela determinação da potência de entrada com a máquina girando sem carga e sem excitação. Neste caso, entretanto, estaremos medindo a soma das perdas no núcleo com as perdas mecânicas. Como a segregação dessas duas perdas em vazio apresenta um grau elevado de dificuldade, estima-se valores para as perdas mecânicas, como uma função da potência nominal da máquina e da velocidade de rotação, de acordo com a Tabela 3.3.

Velocidade (rpm)	Potencial Nominal em kVA									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
250	0,0018	0,0020	0,0021	0,0022	0,0023	0,0024	0,0025	0,0026	0,0027	0,0028
750	0,0022	0,0025	0,0027	0,0028	0,0030	0,0031	0,0033	0,0034	0,0035	0,0036
1000	0,0024	0,0029	0,0031	0,0034	0,0035	0,0036	0,0037	0,0038	0,3900	0,0040
1500	0,0032	0,0037	0,0040	0,0043	0,0045	0,0047	0,0049	0,0051	0,0053	0,0054

Tabela 3.3 – Perdas mecânicas como uma fração da potência nominal

Quando o motor está operando com a carga nominal, normalmente, as perdas mecânicas são responsáveis pela menor parcela das perdas totais. As perdas por atrito podem ser diminuídas utilizando-se rolamento de baixas perdas e com uma melhor lubrificação. As perdas por ventilação podem ser reduzidas pela otimização do projeto do ventilador.

Como o motor de alto rendimento produz menores perdas nos enrolamentos e no núcleo, é menor sua necessidade de ventilação.

3.3.4 - Perdas Suplementares

As perdas suplementares são responsáveis por 5 a 20% das perdas totais ELETROBRAS CEPEL[04] e consistem das perdas que aparecem devido à distribuição não uniforme de corrente no cobre, o efeito de saturação e as imperfeições na densidade de campo magnético (devido às ranhuras do estator e do rotor). Estas imperfeições provocam perdas nos dentes das lâminas do estator e do rotor e ocasionam perdas ôhmicas nas barras das gaiolas, associadas aos harmônicos de corrente. As perdas que ocorrem nas paredes metálicas próximas ao campo magnético de dispersão produzido pelas cabeças das bobinas são também computadas nas perdas suplementares.

Nailen[07] denomina as perdas suplementares de perdas por dispersão e afirmam que estas perdas têm uma natureza extremamente complexa e dependem de fatores construtivos como o formato do rotor e o número e a forma das fendas de

ventilação. Como é uma perda de difícil quantificação, a perda por dispersão é considerada como aquela porção da perda total que é "o restante" quando todas as outras perdas são medidas.

Foram feitas aproximações na tentativa de simplificar a estimativa das perdas suplementares como, por exemplo, a norma europeia IEC 34-2 que define a perda por dispersão com o valor de 0,5% de saída da carga total.

Na Figura 3.3 a linha reta representa o valor fixado da perda por dispersão em 1,2% da potência total de saída, definido pela ANSI (American National Standards Institute) Standard C50.41-1982. A faixa entre as duas curvas mostra valores reais das perdas por dispersão para motores indução, revelando o quanto a consideração da norma se aproxima ou se afasta dos valores reais.

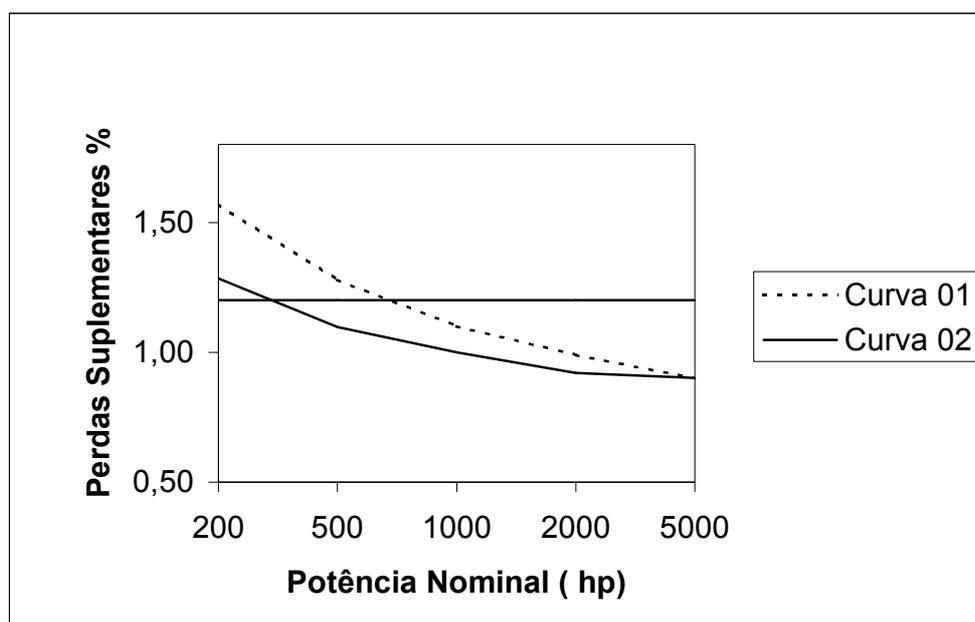


Figura 3.3 – Perdas suplementares como um percentual da potência de saída

Os elementos que mais afetam estas perdas são: o projeto do enrolamento do estator, a razão entre a largura do entreferro e a abertura das ranhuras e a razão entre o número de ranhuras do estator e do rotor.

As perdas suplementares são as mais difíceis de serem reduzidas. No entanto podem apresentar uma grande contribuição para o aumento da eficiência do motor. Elas podem ser reduzidas através de um projeto otimizado e com cuidados de qualidade na fabricação.

3.4 – Variação das Perdas

As perdas elétricas de um motor de indução trifásico dependem das condições de operação que o motor está submetido [carregamento, tensão nos terminais, velocidade]. As perdas suplementares e resistivas nos enrolamentos do estator e rotor variam com o carregamento, pois dependem da corrente. As perdas por atrito e ventilação não dependem da corrente ou da tensão nos terminais do motor, mas variam com a velocidade. Máquinas de menor número de pólos geralmente possui maior atrito e perda pelo atrito do vento.

As perdas no núcleo dependem da tensão nos terminais do motor como pode ser visto no circuito equivalente do motor de indução trifásico, Figura 2.8. De acordo com este circuito, as resistências R_1 e R_2' são responsáveis pelas perdas resistivas no estator e rotor respectivamente. Já a resistência referida ao núcleo R_m , não considerada neste circuito, depende da variação da tensão nos terminais do motor V_1 .

A Figura 3.4 abaixo apresenta o comportamento típico das diversas perdas em um motor de 10 hp e 1200 rpm. Uma máquina com diferentes características nominais apresentará uma curva diferente. Uma máquina de maior velocidade nominal possui maiores perdas mecânicas e, uma máquina mais ventilada terá perdas resistivas menores.

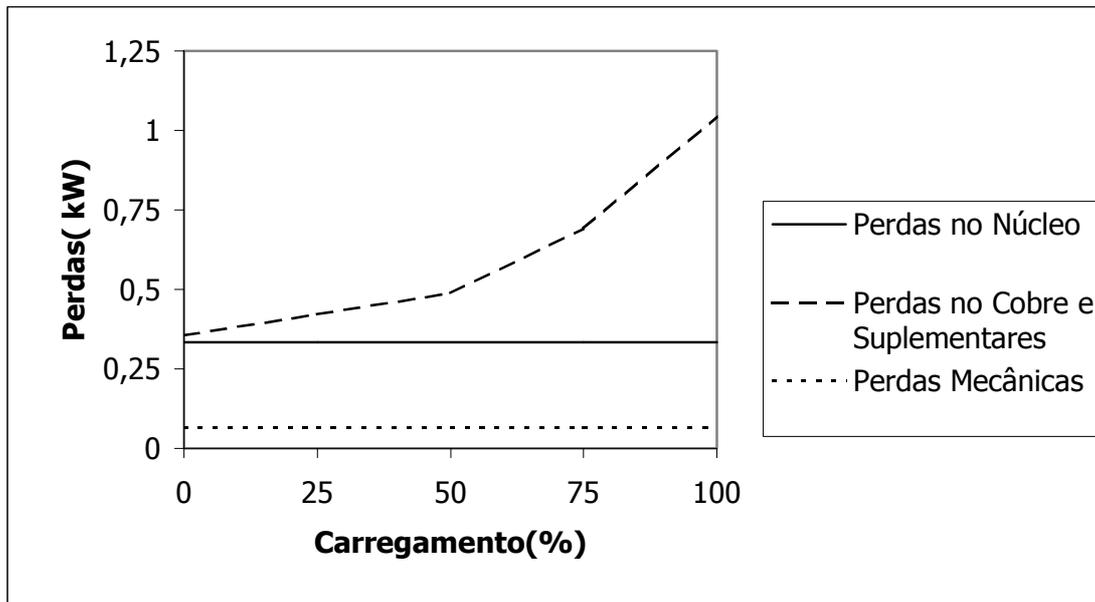


Figura 3.4 – Contribuição dos diversos tipos de perdas na potência total dissipada pelo motor, para diferentes situações de carregamento.

Para medir as diferentes perdas de energia existentes em um motor de indução trifásico, a norma 112 IEEE[14] não especifica um único teste como o padrão ideal, mas destaca diversos métodos diferentes, cada qual mais adequado a um tipo particular de motor, tamanho ou configuração. Nenhum destes métodos pode ser usado universalmente ou ser considerado perfeitamente exato. Os métodos para medição das perdas e avaliação do rendimento adotados pela IEEE 112 serão descritos detalhadamente no Capítulo 5 referente às metodologias de medição.

3.5 – Aquecimento e Deterioração da Máquina

A energia proveniente das perdas elétricas e mecânicas em motores elétricos é dissipada sob a forma de energia térmica provocando o aquecimento de diversas partes da máquina. Quanto maiores as perdas em um motor de indução maior será o seu aquecimento, aumentando a necessidade de ventilação e, conseqüentemente, reduzindo seu rendimento. O aquecimento e

conseqüentemente deterioração da isolação contribuem ainda para a redução do rendimento da máquina por provocarem o aumento das perdas por correntes parasitas e fugas entre os enrolamentos. Para garantir um funcionamento adequado da máquina, o aquecimento de cada uma de suas partes deve ser mantido dentro de certos limites definidos por norma (IEC 34-18 Rotating Electrical Machines Part 18: Functional Evaluation of Insulation Systems).

Uma questão fundamental na aplicação de máquinas elétricas é qual a máxima potência de saída que pode ser obtida. Isto depende de vários fatores pois a máquina precisa atender padrões de desempenho pré-definidos. A maior limitação está na isolação dos enrolamentos, pois os materiais isolantes conhecidos começam a deteriorar a uma temperatura relativamente baixa. Segundo Lobosco [19], todos os dielétricos são heterogêneos e variáveis [ou seja regiões de materiais aparentemente uniformes possuem diferentes resistências elétricas e, conseqüentemente, a corrente não se distribui de forma uniforme neste material]. Por isso, alguns pontos de menor resistência conduzirão maior corrente, aquecendo-se mais que as regiões de maior resistência, ocorrendo uma instabilidade térmica, que terminará por provocar uma ruptura nas regiões mais fracas do material. Segundo Fitzgerald [11], a deterioração da isolação é um fenômeno químico envolvendo uma oxidação lenta e um endurecimento(que a torna quebradiça), levando à perda de durabilidade mecânica e rigidez dielétrica.

O aquecimento em um motor é um aspecto fundamental pois sua vida útil depende diretamente da vida útil de sua isolação que por sua vez depende da temperatura de operação da máquina. A equação 3.10 relaciona a vida útil de uma máquina e sua temperatura absoluta T, considerando A e B constantes que dependem do material empregado Fitzgerald [11].

(3.10)

$$\mathbf{Vida = Ae^{B/T}}$$

A avaliação de materiais isolantes é uma análise do funcionamento baseada em ensaios de vida acelerados. A vida esperada normal e as condições de serviço variam amplamente para classes diferentes de equipamentos elétricos. Os procedimentos de ensaio dependem do tipo de equipamento e tentam geralmente simular as condições de serviço da máquina. Normalmente eles incluem os seguintes elementos:

- ❖ Choque térmico resultante de aquecimento até a temperatura de teste
- ❖ Aquecimento continuado até esta temperatura
- ❖ Choque térmico resultante de esfriamento até a temperatura ambiente ou até r menos
- ❖ Vibração e esforço mecânico tal como pode ser encontrado em condições de serviço real
- ❖ Exposição à umidade
- ❖ Ensaio dielétrico para determinar a condição da isolação

Deve ser ensaiado um número suficientemente grande de amostras, para que possam ser realizados estudos estatísticos na análise dos resultados. As relações vida-temperatura vinda desses ensaios, levam à classificação da isolação, ou do sistema de isolação, numa classe de temperatura apropriada. Cada material isolante possui uma temperatura característica, ou seja o limite superior de temperatura no qual determinado material isolante pode desempenhar satisfatoriamente sua função por um certo período.

As normas brasileiras NBR 7094 [08] e 5383 [09] definem procedimentos de testes para avaliação da elevação de temperatura e resistência da isolação respectivamente. A NEMA (National Electrical Manufactures Association) e IEC 34-18, de acordo com os limites permissíveis de temperatura usados comercialmente, classifica os motores em diversas Classes. Os critérios de

classificação são as experiências e os ensaios que demonstram ser o material capaz de funcionar à temperatura recomendada.

Segundo estas normas, os materiais isolantes utilizados em máquinas elétricas podem ter as seguintes classificações:

- ❖ Classe Y – Abrange materiais fibrosos, à base de celulose ou seda, não impregnados, não imersos em líquidos isolantes, e materiais similares, com temperatura característica de 90° C
- ❖ Classe A – Abrange materiais fibrosos, à base de celulose ou seda, impregnados com líquidos isolantes, e outros materiais similares, com temperatura característica de 105° C
- ❖ Classe E – Abrange algumas fibras orgânicas sintéticas e outros materiais similares, com temperatura característica de 120° C
- ❖ Classe B – Abrange materiais à base de poliéster e poli-imídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com este, com temperatura característica de 130° C
- ❖ Classe F – Abrange materiais à base de mica, amianto e fibra de vidro aglutinados com materiais sintéticos, usualmente silicões, poliésteres ou epóxi, com temperatura característica de 155° C
- ❖ Classe H – Abrange materiais à base de mica, asbestos ou fibra de vidro aglutinados tipicamente com silicões de alta estabilidade térmica, com temperatura característica de 180° C

- ❖ Classe C – inclui mica, vidro, cerâmica e quartzo sem aglutinante, com temperatura característica de 180° C

Os materiais das classes Y,A e E não são de uso corrente no mercado nacional ou internacional de motores elétricos. Atualmente, as classes mais utilizadas são a B e F. Por razões econômicas , a utilização de materiais classe H é restrita principalmente à máquinas de corrente contínua, onde a redução obtida na massa dos motores com a utilização de materiais dessa classe, apresenta vantagens de custo.

3.6 – Comentários Finais

Examinando as classificações acima para perdas dos motores, observa-se que elas têm algumas características artificiais, de um ponto de vista fundamental. Por exemplo, a divisão das perdas no ferro em perdas no ferro em vazio e uma parcela que aparece sob carga, ou a divisão das perdas no cobre em perdas ôhmicas e uma parcela criada pela distribuição não uniforme de corrente, ou a inclusão destas parcelas na categoria de perdas suplementares. Estas características são ditadas para facilitar os ensaios. Elas são justificadas pelo fato de que o interesse principal está na determinação das perdas totais e do rendimento da máquina, tão próximos aos valores reais quanto possível, para efetuar a comparação econômica de máquinas. Quanto maiores as perdas em um motor de indução, menor será o seu rendimento e, conseqüentemente, menor a probabilidade de sua troca por um motor de alto rendimento (*retrofit*) ser economicamente viável.

Se a avaliação do rendimento refletir de fato as reais condições de operação do motor em campo, mais confiáveis serão os resultados previstos por projetos de eficiência energética em indústrias que recomendam o *retrofit* de motores de indução. Daí a importância de verificar a exatidão de metodologias para avaliação

de rendimento em motores de indução adequadas às condições oferecidas em chão de fábrica Capítulo 6.

Vale salientar que os vários tipos de perdas de um motor não são independentes. Por exemplo, para diminuir as perdas magnéticas aumenta-se o comprimento dos condutores o que, por sua vez, aumenta as perdas resistivas. O projeto final de um motor deve ser fruto de um balanço dos vários tipos de perda, de modo a se alcançar um alto rendimento, mas mantendo-se os níveis de conjugado de partida, capacidade de sobrecarga, corrente de partida e fator de potência.

CAPÍTULO 4

Rendimento

Este capítulo define o significado do rendimento em um motor de indução trifásico, apresentando os principais fatores que podem influenciar no desempenho do motor, destacando os níveis de rendimento aceitáveis definidos pela norma brasileira NBR 7094 para motores da linha padrão e de alto rendimento e os principais parâmetros a serem considerados na avaliação da viabilidade econômica para projetos de *retrofit* em motores.

4.1- Definição

O rendimento dos motores de indução é semelhante ao de qualquer dispositivo de transformação de energia, ou seja, é a relação entre a potência de saída e a potência de entrada. No caso dos motores, é a relação entre a potência mecânica de saída entregue à carga pelo eixo do motor e a potência elétrica ativa de entrada, consumida da rede elétrica. Sua equação pode ser escrita como

(4.1)

$$\eta = \frac{P_M \times 100}{P_e}$$

onde

η - rendimento do motor de indução trifásico(%)

P_M – Potência mecânica de saída em kW

P_e – Potência elétrica de entrada kW

ou ainda

$$\eta = \frac{(P_e - \text{Perdas}) \times 100}{P_e} \quad (4.2)$$

As máquinas rotativas normalmente funcionam eficientemente, ou seja apresentam a capacidade de transformar energia elétrica em mecânica ou vice versa com baixas perdas de energia, exceto quando estão com pouca carga. De acordo com Fitzgerald [11], o rendimento de motores elétricos da linha padrão, em carga nominal, está na vizinhança de 74% para motores até 1cv, 89% para 50 cv, 93% para 500 cv e 97% para 5.000 cv. O rendimento de motores de baixa velocidade é usualmente menor que o de motores de alta velocidade, numa faixa que varia de 3 a 4%.

4.2- Fluxo de Potência

A Figura 4.1 apresenta o fluxo de potência em um motor de indução trifásico, desprezando as perdas suplementares. A potência elétrica fornecida pela rede é dissipada no estator sob a forma de perda no ferro e no cobre. A potência transferida através do entreferro é transformada em potência mecânica, responsável pela rotação do rotor e, o restante é consumido no rotor sob a forma de perda no cobre. Parte da potência mecânica responsável pela rotação do rotor é transformada em potência mecânica de saída útil, oferecida pelo eixo do rotor à

carga e, o restante é dissipado sob a forma de perda rotacional (perdas por atrito, ventilação e no núcleo do rotor).

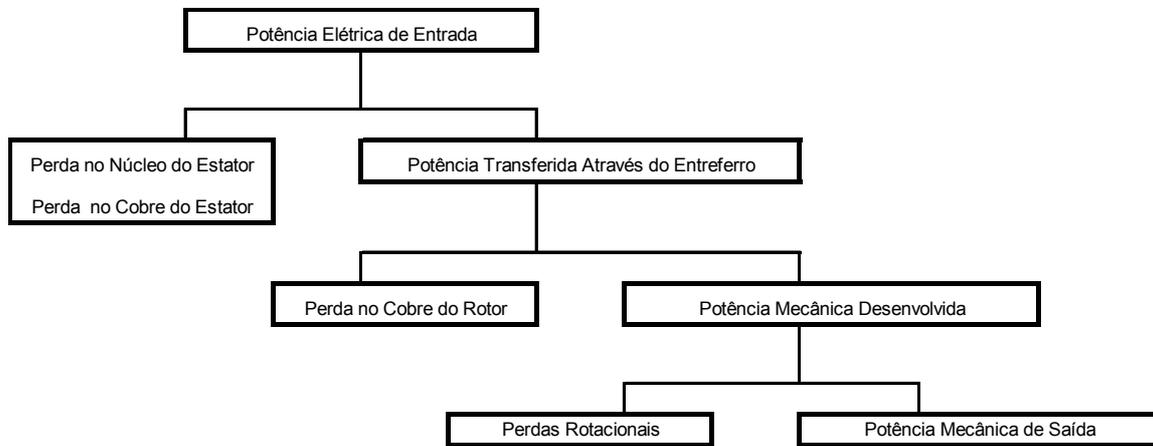


Figura 4.1 – Diagrama de fluxo de potência em um motor de indução trifásico

Considerando o circuito equivalente do motor descrito na Figura 2.8 é possível equacionar as potências transferidas através do motor e suas perdas como mostra a Figura 4.2 abaixo.

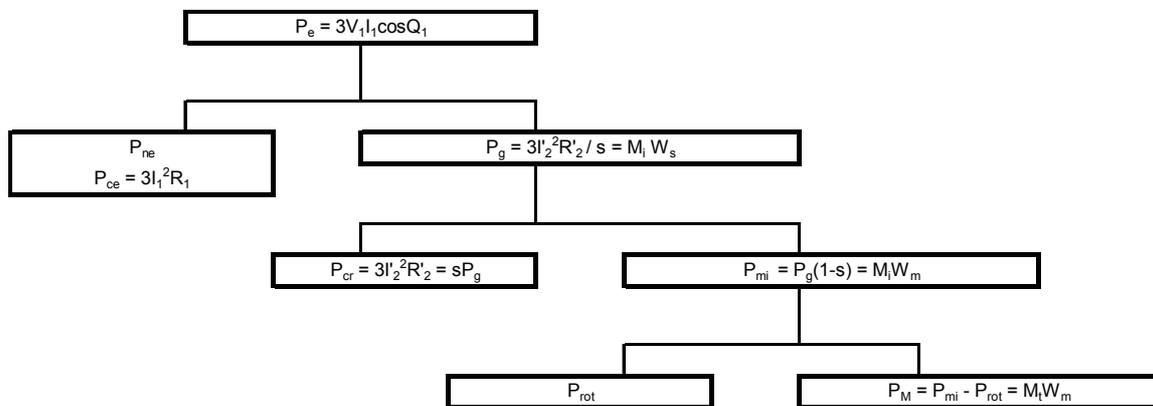


Figura 4.2 – Equações das potências em um motor de indução trifásico

onde:

P_e – potência elétrica ativa trifásica

V_1 – tensão de linha no terminal do motor

I_1 – corrente de fase no estator

$\cos\theta_1$ – fator de potência

P_{ne} – Perda no núcleo do estator

P_{ce} – Perda resistiva no estator

P_{cr} – Perda resistiva no rotor

R_1 – resistência no estator

P_g – potência transferida através do entreferro

I'_2 – Corrente no estator

R'_2/s – efeito combinado da carga no eixo e da resistência do rotor refletida no estator

s – escorregamento

M_i – torque eletromagnético interno desenvolvido

W_s – velocidade angular síncrona em radianos mecânicos por segundo

P_{mi} – potência mecânica interna desenvolvida

W_m – velocidade mecânica

P_{rot} – perdas rotacionais

P_M – potência mecânica de saída

M_t – Torque de saída no eixo do rotor

Estas equações ajudam a simplificar o cálculo do rendimento a partir dos dados do circuito equivalente do motor de indução.

4.3- Fatores que Influenciam o Rendimento

O rendimento de uma máquina varia conforme a condição de operação efetiva no chão de fábrica, e da condição de operação para a qual ela foi projetada. O desempenho e a vida útil de um motor podem variar com o seu carregamento, fator de potência, qualidade da energia fornecida pela rede elétrica e cuidados com manutenção.

4.3.1-Carregamento da Máquina

Na maioria dos motores de indução o melhor índice de rendimento é atingido na condição nominal, ou seja com 100% do carregamento nominal da máquina. Isto ocorre porque a máquina é projetada para apresentar melhor desempenho neste ponto de operação. A maioria dos motores opera, em chão de fábrica, com 2/3 ou menos de sua potência nominal Nailen[07], Hsu[05].

A potência elétrica de entrada fornecida pela rede elétrica (P_e) é absorvida sob a forma de potência mecânica útil entregue à carga (P_M) e sob a forma de perdas em vazio (P_v) e perdas resistivas no estator e rotor ($3 R'_e I_1^2$) ou seja,

$$P_e = P_M + P_v + 3 R'_e I_1^2 \quad (4.3)$$

A perda em vazio P_v é composta pela soma das perdas mecânicas ρ_m (ventilação e atrito) e as perdas no núcleo do estator e rotor ρ_{fe}

$$P_v = \rho_m + \rho_{fe} \quad (4.4)$$

Considerando R_1 e R'_2 as resistências de cada fase no estator e no rotor, $3R_1 I_1^2$ as perdas resistivas no estator e $3R'_2 I_2^2$ as perdas resistivas no rotor, podemos recorrer à expressão da resistência equivalente referida ao estator (R'_e), como nos transformadores

$$R'_e = m R'_2 + R_1 \quad (4.5)$$

Logo as perdas resistivas totais podem ser escritas pela expressão $3R'_e I_1^2$.

A partir da Equação 4.1, pode-se então escrever a equação do rendimento como

(4.6)

$$\eta = \frac{P_o \times 100}{P_M + P_v + 3 R'_e I_1^2}$$

Dividindo-se por P_M

(4.7)

$$\eta = \frac{1 \times 100}{1 + \frac{P_v}{P_o} + \frac{3 r'_e I_1^2}{P_M}}$$

Na Equação 4.7 observa-se que o rendimento varia em função da potência mecânica útil de saída no eixo. Assim sendo, é possível traçar uma curva que representa a variação do rendimento do motor em função da variação da potência mecânica de saída no eixo do rotor, ou ainda em função do carregamento do motor. A curva de rendimento adquire a forma da Figura 4.3.

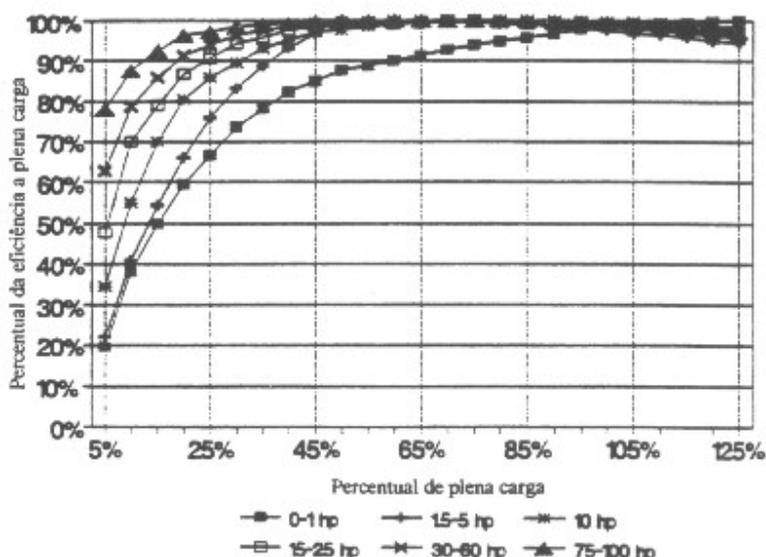


Figura 4.3 – Comportamento do rendimento em função da carga

Os motores que encontram-se superdimensionados para as cargas que acionam, apresentam uma boa oportunidade de economia de energia. A instalação de motores com potência nominal menor, mais adequada à carga acionada (repotenciação), permite seu funcionamento em um ponto de operação de melhor carregamento e, conseqüentemente, melhor rendimento. Se o novo motor além de apresentar menor potência nominal for de alto rendimento a economia de energia obtida com a troca será ainda maior.

4.3.2 – Fator de Potência

A operação de sistemas elétricos com baixo fator de potência causa uma maior solicitação de corrente da rede e conseqüente maior aquecimento dos cabos, diminuição da eficiência do sistema, produção de maior queda de tensão, aumento das perdas do motor devido ao aumento da temperatura de operação, sobrecarga no sistema, causando diminuição da vida útil da instalação.

Somente a parcela ativa da potência elétrica total fornecida pela rede ao motor é, depois de retiradas as perdas internas, transformada em potência mecânica útil oferecida pelo eixo à carga. Como a potência ativa é diretamente proporcional ao fator de potência $\cos\theta$, Equação 4.8, quanto mais próximo da unidade estiver o fator de potência do motor maior será a potência ativa em relação à potência aparente total fornecida pela rede e, conseqüentemente, maior será a potência mecânica útil fornecida pelo eixo à carga.

(4.8)

$$P_e = 3V_1I_1\cos\theta_1$$

Um motor de indução em plena carga pode apresentar fator de potência na faixa de 80 a 90%. Em geral, a medida em que a carga diminui em relação à potência nominal do motor, o seu fator de potência também decai. Os motores de indução, portanto, devem atuar o mais próximo possível da sua potência nominal, melhorando a influência do fator de potência na eficiência energética do sistema.

4.3.3- A Qualidade da Energia Fornecida Pela Rede Elétrica

A operação eficiente dos motores de indução trifásicos depende também da qualidade da rede elétrica de alimentação. O ideal é que a rede esteja equilibrada e com suas tensões apresentando amplitude e frequências constantes. O termo rede equilibrada significa que as tensões das três fases apresentam mesma amplitude e estão deslocadas entre si de 120° .

Naturalmente, os valores nominais da tensão e da frequência do motor devem ser iguais aos da rede elétrica que o alimenta. A inexistência destas condições, em geral reduz a eficiência e a vida útil dos motores. As principais distorções que ocorrem nas redes trifásicas são desequilíbrio da rede com as tensões apresentando amplitudes e/ou defasagens, alterações da amplitude da tensão, existência de forte conteúdo de harmônicos alterando o comportamento senoidal da tensão. Estas distorções serão mais detalhadas nos subitens a seguir.

4.3.3.1- Desequilíbrio da Rede

A principal causa de desequilíbrio de um sistema trifásico, é a ligação desproporcional de cargas monofásicas, tais como sistemas de iluminação e motores monofásicos nas suas três fases. A utilização de cabos com bitolas diferentes na formação de uma rede trifásica também é causa de desequilíbrio. Isto pode ocorrer em pequenas instalações onde se transformou uma rede monofásica em trifásica.

O desequilíbrio das tensões provoca vários problemas tais como desperdício de energia devido à existência de maiores perdas provocadas por altas correntes desequilibradas (redução da eficiência) e elevação da temperatura acima dos limites aceitáveis pelo motor.

A rigor, o cálculo do desequilíbrio de uma rede é feito com o uso de componentes simétricas, considerando-se a possibilidade de diferentes amplitudes das tensões e/ou defasagens diferentes de 120° . As componentes simétricas de um sistema trifásico desequilibrado são denominadas de componentes de seqüência positiva, negativa e zero. O cálculo destas componentes é realizado considerando-se as amplitudes e ângulos de fase das tensões da rede Steverson[15].

Segundo a NBR 7094 [08], um sistema trifásico é considerado praticamente equilibrado se a componente de seqüência zero não exceder 1% da componente de seqüência positiva e também se a componente de seqüência negativa não exceder 1% da componente de seqüência positiva por um período prolongado, ou 1.5% por um período curto não superior a alguns minutos.

A Figura 4.4 ilustra a influência do desequilíbrio das tensões no desequilíbrio das correntes, para as condições de partida, plena carga e vazio. Por exemplo, um desequilíbrio de 3% das tensões provoca um desequilíbrio das correntes de plena carga na faixa de 20 a 25% CEPEL, ELETROBRÁS [26].

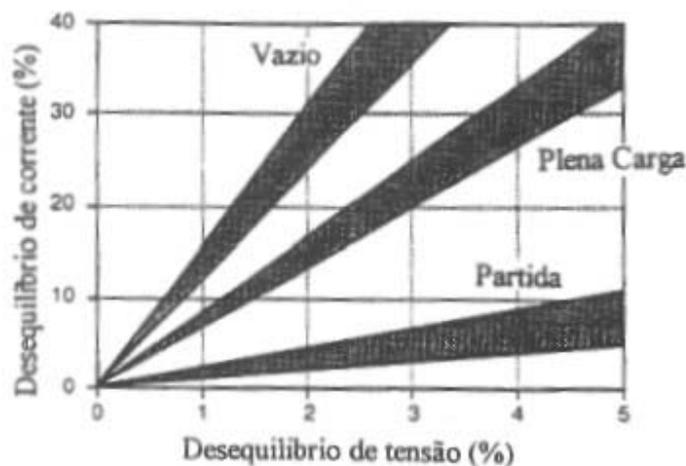


Figura 4.4 – Efeito do desequilíbrio da tensão nas correntes de um motor de indução trifásico

Um pequeno desequilíbrio de 3,5% na tensão pode aumentar as perdas do motor em 20%, diminuindo significativamente o rendimento da máquina. Um aumento de 5% ou mais pode destruí-lo rapidamente. Severos desequilíbrios (acima de 5%) causam problemas imediatos, mas pequenos valores na faixa de 1 a 2% também são prejudiciais, pois podem ocasionar significativos aumentos no consumo de energia por muito tempo sem serem detectados, principalmente se o motor estiver superdimensionado. A tensão da rede deve ser regularmente monitorada e um desequilíbrio maior do que 1% deve ser corrigido.

4.3.3.2- Alteração da Amplitude da Tensão

A eficiência e o fator de potência dos motores de indução trifásicos variam segundo o valor da tensão de alimentação. Estes motores são projetados para suportarem variações de + ou – 10% da tensão nominal.

As principais causas de alteração da amplitude da tensão são transformadores e/ou cabos subdimensionados e fator de potência reduzido.

Para que um motor de indução trifásico submetido a uma tensão de alimentação abaixo do valor nominal forneça a potência mecânica útil nominal à carga é necessário um aumento da corrente e, conseqüentemente, da temperatura e ainda redução dos torques de partida e de regime. A tensão abaixo do valor nominal geralmente é causada por uma queda de tensão excessiva ao longo da rede.

Se o motor está conectado na extremidade final de um longo cabo de alimentação, pode ser conveniente uma reconfiguração do sistema. Dependendo da causa, a tensão da rede pode ser restaurada por meio de procedimentos como ajuste do *tap* do transformador, instalação de equipamentos de ajuste automático do *tap* do transformador, se a carga varia consideravelmente ao longo do dia, instalação de

banco de capacitores que elevem a tensão ao mesmo tempo em que corrigem o fator de potência e redimensionamento dos cabos de alimentação.

Por outro lado, uma tensão acima da nominal acarreta redução do fator de potência e aumento da corrente de partida.

Como o torque dos motores de indução trifásicos é proporcional ao quadrado da tensão, motores alimentados com tensão abaixo do valor nominal apresentam dificuldades para partir ou acionar cargas de alta inércia. Por exemplo, se a tensão de alimentação for 80% do valor nominal, o torque de partida disponível é somente cerca de 64% do seu valor nominal.

O nível de tensão da rede deve ser regularmente monitorado e registrado, preferencialmente durante um ciclo completo de operação. O aparecimento repetido de alterações da tensão certamente ajuda a identificar as causas destas variações.

De acordo com o Manual Operacional de Motores Elétricos do CEPEL ELETROBRÁS [26], estudos realizados pelo PROCEL/CEMIG/EFEI para a "Avaliação do Desempenho dos Motores Elétricos Trifásicos" conduziram às seguintes conclusões, quanto à operação do motor com tensão acima ou abaixo da nominal:

- "Na operação do motor em plena carga, a variação de tensão em apenas 10% (acima e abaixo) normalmente resulta em queda do rendimento";
- "Na operação com tensão e carregamento inferiores ao nominal, o rendimento, na maioria dos motores, eleva-se e a corrente de alimentação é inferior ao valor obtido para o motor operando em plena carga";
- "Na operação com tensão superior e carregamento inferior ao nominal, ocorre o contrário, havendo queda acentuado do rendimento e elevação da corrente".

Tensão de Alimentação (%)	Rendimento (%)	Fator de Potência	Corrente Solicitada (A)
90	82,93	0,877	22,45
100	83,50	0,822	21,09
110	79,82	0,755	21,78

Tabela 4.1 – Motor de 7,5cv, operando à plena carga com tensão de alimentação variável

A Figura 4.5 obtida no Manual Operacional de Motores Elétricos do CEPEL ELETROBRÁS [26] mostra o efeito da variação de amplitude da tensão no rendimento, no fator de potência, na corrente e na velocidade de um motor de indução trifásico operando com carga constante e inferior ao seu valor nominal. Observa-se que o fator de potência é a grandeza mais afetada. Embora, nesta figura a velocidade (rpm) aparente permanecer praticamente inalterada, na realidade o que interessa é o escorregamento que pode variar de alguns pontos percentuais.

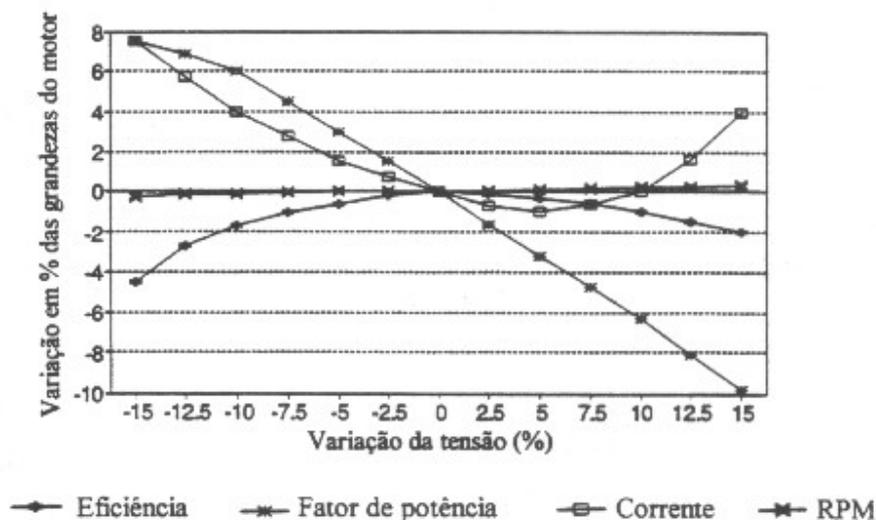


Figura 4.5 – Efeito do desequilíbrio da tensão de alimentação em um motor de indução trifásico

Os motores de alto rendimento apresentam a vantagem adicional de serem menos sensíveis à variação da amplitude da tensão, devido a melhores projetos e materiais de construção.

4.3.3.3- Harmônicos

Em uma rede elétrica ideal, a tensão de alimentação deveria ter um comportamento senoidal. Esta tensão deveria variar segundo uma senóide "pura", possuindo apenas a frequência nominal, conforme mostrado na Figura 4.6.

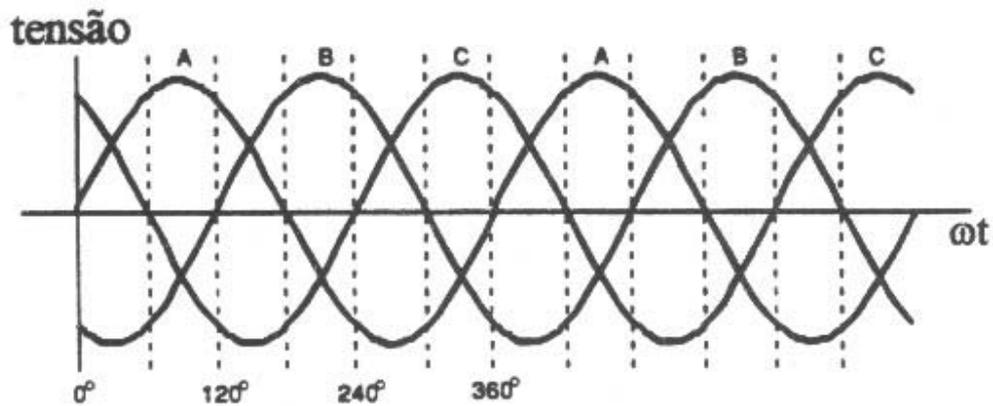


Figura 4.6 – Variação senoidal da tensão de um sistema trifásico equilibrado

Entre as diversas formas de acionamento existentes para um motor elétrico ocorre um emprego, cada vez maior, de inversores eletrônicos. A utilização de tais inversores causa distorções da forma de onda da tensão e/ou corrente. Elas passam a apresentar um comportamento diferente de uma senóide pura, contendo uma série de harmônicos. A Figura 4.7 mostra a deformação sofrida por uma onda de tensão devido à contribuição de harmônicos.

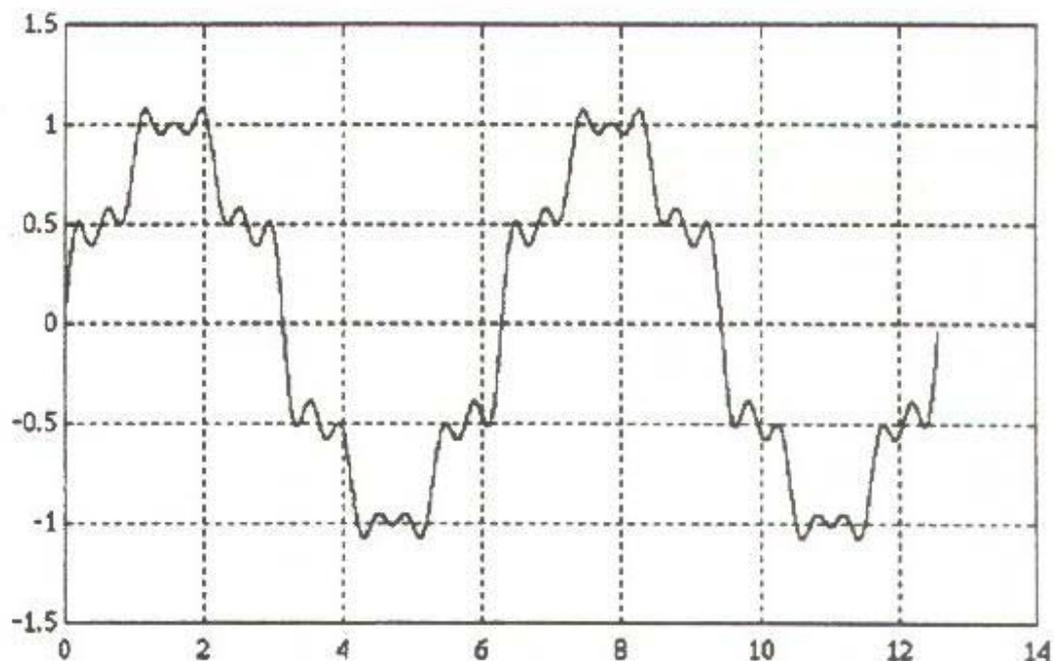


Figura 4.7 – Forma de onda alternada contendo harmônicos

Os harmônicos são também grandezas senoidais, mas de freqüências diferentes. A freqüência de cada harmônico é um múltiplo inteiro de 60 Hz.

Em geral, componentes harmônicas apresentam amplitude decrescente à medida que a sua freqüência aumenta. Isto significa que não é necessário conhecer todos os infinitos harmônicos que compõem a onda, pois a medida em que considerarmos freqüências maiores, a influência deles será menor, já que suas amplitudes serão cada vez mais reduzidas. Entretanto, quando um motor é acionado por um inversor tipo "PWM", surgem harmônicos de alta freqüência e com amplitudes muitas vezes significativas, de maneira que a soma das amplitudes das harmônicas pode superar o valor da amplitude da fundamental CEPEL ELETROBRÁS [26].

As componentes harmônicas aumentam as perdas do motor, reduzem o torque disponível para carga e provocam a existência de torques pulsantes. Em

conseqüência o motor apresenta aquecimento, vibração e redução de sua eficiência. Os harmônicos podem ainda ocasionar redução da vida útil, pela danificação dos rolamentos, fadiga no eixo ou deterioração do sistema de isolamento. Os fabricantes de motores mais modernos estão preocupados com estes efeitos, apresentando produtos com o mínimo possível de conteúdo harmônico.

Segundo a NBR 7094 [08], os motores devem funcionar adequadamente quando a rede de alimentação apresentar um Fator de Harmônico de Tensão (FHV) dentro de certos limites. O FHV deve ser calculado de acordo com a Equação 4.9

(4.9)

$$FHV = \left(\sum_{n=2}^{\infty} u_n^2 \right)^{1/2}$$

Onde u_n é o valor em por unidade (valor relativo a uma base de referência específica) do harmônico de tensão, referido, neste caso, à tensão nominal e n a ordem do harmônico.

Tanto os motores de indução trifásicos, exceto os motores de categoria N, como os motores de indução monofásicos, devem poder funcionar sob uma tensão de alimentação, cujo Fator de Harmônico de Tensão (FHV) é igual ou inferior 0,02, salvo declaração em contrário do fabricante. Os motores de categoria N devem poder funcionar sob uma tensão de alimentação cujo FHV seja igual ou inferior a 0,03.

Os dispositivos eletrônicos de acionamento dos motores de indução são os principais causadores de harmônicos na rede de alimentação. Por isso, os motores convencionais, quando alimentados por estes dispositivos, devem ter sua potência disponível no eixo reduzida de 5 a 10 %, principalmente quando trabalham com

cargas constantes. Outra solução é se especificar um motor com potência de 5 a 10% acima da solicitação da carga.

Os motores de alto rendimento suportam mais facilmente os efeitos prejudiciais dos harmônicos por apresentarem uma maior margem térmica e menores perdas. No entanto, deve-se tomar cuidado quando o motor gira a velocidades muito baixas. Nestas condições a combinação do aumento das perdas provocadas pelos harmônicos com a baixa ventilação, devido à redução da velocidade, obriga os motores terem a sua potência disponível no eixo limitada, até mesmo para os de alto rendimento.

Muitos dos componentes harmônicos podem ser minimizados com a instalação de filtros. Os filtros passivos apresentam um custo correspondente a uma parcela reduzida do valor do dispositivo de acionamento controladores de velocidade.

4.3.4- Manutenção

O motor de Indução trifásico é uma máquina robusta e, quando corretamente especificado para execução de um serviço, operando sob condições elétricas, mecânicas e ambientais adequadas, apresentará uma operação sem problema durante a maior parte de sua vida útil com bom rendimento, somente se as suas exigências de limpeza e manutenção forem regularmente feitas.

Quando um motor sofre reparo, dependendo da maneira como é feito o reparo, suas características elétricas, magnéticas ou mecânicas de projeto podem ser alteradas, aumentando suas perdas.

Um reparo mau executado, ou seja aquele que altera as características elétricas e mecânicas de projeto do motor, pode afetar as perdas existentes em um motor, descritas no Capítulo 3, de diversas formas.

4.3.4.1- Perdas Resistivas

Se o fio correto não é usado no enrolamento, mas sim outro de diâmetro inferior, as perdas resistivas aumentarão. O bobinador pode também alterar a quantidade de espiras, devido a uma contagem incorreta do número original.

A redução do número de espiras pode ser muito cara para o usuário do motor, seja pela redução da eficiência, ou pelo aumento do custo operacional, ou na diminuição da confiabilidade de operação do motor. Esta redução do número de espiras aumenta a densidade do campo magnético aumentando as perdas nos núcleos. Ela altera o valor do carregamento onde ocorre o máximo de eficiência e reduz o próprio valor da eficiência ELETROBRÁS CEPEL[26]. Por outro lado, uma redução do número de espiras diminuiria a corrente de partida, diminuindo o torque de partida da máquina.

Na maioria dos motores o rendimento máximo ocorre a partir de 75% da sua plena carga e, a maioria deles trabalha com cargas menores que a nominal. A redução do número de espiras move o ponto onde ocorre o rendimento máximo em direção às maiores cargas, reduzindo ainda mais a eficiência da maioria dos motores que trabalham bem abaixo do seu carregamento nominal.

A redução do número de espiras afeta outras características operacionais do motor como, por exemplo, a sua corrente de partida. Uma redução de 10% do número de espiras aumenta em 23% a corrente de partida, o que pode causar problemas na rede ou na proteção do motor ELETROBRÁS CEPEL[26]. Por outro lado, um aumento do número de espiras diminuiria a corrente de partida, diminuindo o torque de partida da máquina.

O fator de potência também é afetado pela diminuição do número de espiras. Como esta redução aumenta a densidade de campo magnético, isto implicará em uma maior solicitação de potência reativa da rede por parte do motor que, conseqüentemente, apresentará um fator de potência mais baixo.

A redução do número de espiras pode até reduzir as perdas resistivas no estator e no rotor, mas o aumento das perdas devido ao maior valor da densidade de fluxo pode compensar ou mesmo suplantar esta redução.

4.3.4.2- Perdas Suplementares

Avárias nos pacotes magnéticos do estator e/ou rotor, na carcaça, ou ainda nas tampas laterais que afetem a simetria do entreferro podem aumentar as perdas suplementares, já que estas perdas, de acordo com o Capítulo 3, aparecem devido à distribuição não uniforme de corrente no cobre, o efeito de saturação e as imperfeições na densidade de campo magnético (devido às ranhuras do estator e do rotor).

4.3.4.3- Perdas Mecânicas

As perdas podem aumentar com a elevação do aquecimento da máquina devido a rolamentos substituídos por outros não originais, a utilização de graxa não recomendada pelo fabricante, escassez de graxa ou por montagem inadequada.

4.3.4.4- Perdas nos Núcleos

Dependendo do carregamento da máquina, as perdas nos núcleos podem ser responsáveis por uma significativa contribuição em relação às perdas totais dos motores. Quando o motor está em plena carga, estas perdas podem corresponder a aproximadamente a 25% das perdas totais, aumentando sua participação à medida que diminui o carregamento do motor, devido ao aumento das perdas

resistivas. Isto é significativo porque a maioria dos motores não opera em plena carga. No regime contínuo uma grande parcela funciona entre 60 e 80% da sua carga nominal. Já no regime intermitente, podem operar por longos períodos em vazio ELETROBRAS CEPELO[26].

As perdas nos núcleos são causadas principalmente por correntes parasitas induzidas nos pacotes magnéticos do estator e do rotor. Estas correntes são limitadas pelo uso de finas lâminas apresentando uma adequada isolamento entre si.

O maior risco de danificar o pacote magnético do núcleo durante a manutenção, ocorre no processo de retirada do enrolamento queimado. Se o isolante é amolecido sem um devido controle da temperatura, o calor poderá destruir a isolamento entre as lâminas. O que resultará em um elevado aumento das perdas no núcleo.

4.4- Linhas Padrão e de Alto Rendimento

De acordo com a NBR 7094 [08], para motores de indução de gaiola, trifásicos, regime tipo S_1 , categorias N e H, grau de proteção IP44, IP54 ou IP55 a nominal igual ou superior a 0,75kW (1 cv) e até 150 kW (200 cv), com 2,4,6 ou 8 pólos, 60 Hz, tensão nominal igual ou inferior a 600 V, qualquer forma construtiva, são estabelecidas duas linhas padronizadas no que se refere ao rendimento de plena carga: linha padrão e linha de alto rendimento. Para quaisquer outros motores de indução não há valores de rendimento normalizados nem método de ensaio estabelecido, cabendo ao fabricante registrar o rendimento na placa de identificação e indicar o método de ensaio nas propostas e catálogos.

❖ Linha Padrão

Os motores desta linha não possuem rendimento nominal (representa o rendimento de uma grande quantidade de motores do mesmo projeto) normalizado para cada combinação potência x velocidade síncrona. Entretanto o rendimento nominal estabelecido pelo fabricante, na condição de plena carga, deve ser marcado na placa de identificação, onde o rendimento deve ser expresso em porcentagem com três dígitos. O rendimento mínimo do motor não deve ser inferior ao valor obtido, aplicando-se ao rendimento nominal a tolerância de 0,2 (1 - rendimento) para valores de rendimento maiores ou iguais a 0,851 e 0,15 (1 – rendimento) para valores de rendimento menores que 0,851.

❖ Linha de Alto Rendimento

Os motores desta linha devem possuir rendimento nominal igual ou superior ao normalizado para cada combinação potência x velocidade síncrona conforme a Tabela 4.2.

Potência Nominal		Velocidade Síncrona rpm			
kW	cv	3600	1800	1200	900
		Rendimento Nominal			
0,75	1,0		80,0	75,5	72,0
1,1	1,5	78,5	81,5	82,6	75,5
1,5	2,0	81,5	82,5	82,5	82,5
2,2	3,0	82,5	84,0	84,0	81,5
3,7	5,0	85,5	85,5	85,5	84,0
5,5	7,5	85,5	87,5	87,5	85,5
7,5	10,0	87,5	87,5	87,5	87,5
11,0	15,0	87,5	88,5	89,5	88,5
15,0	20,0	88,5	90,2	89,5	89,5
18,5	25,0	89,5	91,0	90,2	89,5
22,0	30,0	89,5	91,0	91,0	90,2
30,0	40,0	90,2	91,7	91,7	90,2
37,0	50,0	90,2	92,4	91,7	91,0
45,0	60,0	91,7	93,0	91,7	91,7
55,0	75,0	92,4	93,0	93,0	93,0
75,0	100,0	93,0	93,6	93,0	93,0
90,0	125,0	93,0	93,6	93,0	93,6
110,0	150,0	93,0	94,1	94,1	93,6
150,0	200,0	94,1	94,5	94,1	94,1

Tabela 4.2 – Menores valores de rendimento nominal a plena carga para motores de alto rendimento definidos pela NBR 7094

Este rendimento nominal, na condição de plena carga, deve ser marcado na placa de identificação, expresso em percentagem com três dígitos. O rendimento mínimo do motor não deve ser inferior ao valor obtido, aplicando-se ao rendimento nominal a tolerância de 0,2 (1 - rendimento) para valores de rendimento maiores ou iguais a 0,851 e 0,15 (1 - rendimento) para valores de rendimento menores que 0,851 NBR 7094 [08].

Os motores de alto rendimento têm os seus projetos modificados, em relação aos motores da linha padrão, objetivando a diminuição de sua perda global.

A Tabela 4.3, ELETROBRAS, CEPEL[04], mostra que em um motor de alta eficiência além de ocorrer uma redução das perdas totais, a participação percentual de cada perda também é modificada. Enquanto o percentual das perdas resistivas no estator do motor da linha *standard* é de 33,7% no motor de alta eficiência a participação percentual destas perdas alcançam 38,9%. No entanto, em termos absolutos, houve uma redução de 0,408 kW nas perdas resistivas. É interessante observar que as perdas resistivas no rotor aumentaram de 0,646 para 0,668 kW. Porém, o importante é que as perdas totais foram reduzidas.

Perdas	Motor linha Padrão		Motor Alto Rendimento		Redução de Perda(kW)
	kW	%	kW	%	
Nos Núcleos	0,725	18,5	0,18	7,7	0,545
Mecânicas	0,373	9,5	0,281	12	0,092
Resistivas no estator	1,319	33,7	0,911	38,9	0,408
Resistivas no rotor	0,646	16,5	0,668	28,6	-0,022
Suplementares	0,852	21,8	0,299	12,8	0,553
TOTAL	3,915	100	2,339	100	1,576

Tabela 4.3 – Distribuição típica das perdas para motores de 50HP, 4 pólos da linha padrão e de alto rendimento

Enquanto a maior redução ocorreu nas perdas suplementares, o decréscimo das perdas mecânicas foi mínimo.

Considerando o motor citado na Tabela 4.3, vale salientar que as perdas totais do motor de alta eficiência correspondem a somente 60% das perdas totais do motor da linha padrão. No entanto, esta substancial redução das perdas, provoca um aumento do rendimento do motor de alta eficiência de somente 4,28% em relação ao da linha padrão. Esta observação reflete a dificuldade em se aumentar a eficiência dos motores, tornando-se ainda mais difícil quando se considera motores de maiores potências.

4.5- *Projetos de Retrofit de Motores*

Após a realização de diagnósticos energéticos na indústria, uma das oportunidades de economia de energia elétrica freqüentemente encontradas por projetos de eficiência energética é fazer o *retrofit* dos motores existentes. O *retrofit* dos motores, como foi definido no Capítulo 1, consiste na troca dos motores elétricos da linha padrão que encontram-se em funcionamento nas indústrias por motores novos de alto rendimento.

A viabilidade econômica destes projetos depende diretamente de fatores como o regime de funcionamento do motor, da tarifa de energia elétrica utilizada pelo consumidor, da adequação do motor à carga acionada e, principalmente, da economia de energia obtida com a troca. Esta economia de energia depende da diferença de rendimento entre os motores da linha padrão e de alto rendimento, Equações 4.10 e 4.11 PROCEL ELETROBRÁS[04] .

(4.10)

$$EE = 0,736 \times P \times C \times H \times \left(\frac{100}{\eta_P} - \frac{100}{\eta_{Ar}} \right)$$

Onde,

EE – energia elétrica economizada em MWh por ano

P – potência nominal do motor em cv

C – percentual de carregamento do motor

H – número de horas de trabalho do motor em um ano

η_P – rendimento do motor da linha padrão existente na indústria

η_{Ar} – rendimento do motor da linha de alto rendimento

A diferença média entre os valores de rendimento da linha padrão ou convencional [*standard*] e a de alto rendimento [eficiência aumentada] é de dois pontos percentuais. Esta diferença, dependendo do regime de funcionamento do motor,

pode ou não viabilizar economicamente projetos de *retrofit* de motores na indústria.

Como a maioria dos consumidores industriais possui tarifa binômia, isto é são aplicadas tarifas diferenciadas para o consumo de energia elétrica (kWh) e a demanda (kW), é necessário portanto calcular a contribuição na diminuição da demanda de energia solicitada devido à troca do motor Equação 4.11.

(4.11)

$$DR = 0,736 \times P \times C \times 12 \times \left(\frac{100}{\eta_P} - \frac{100}{\eta_{Ar}} \right)$$

Onde,

DR – demanda retirada anual em kW

Se no decorrer do processo produtivo, a carga acionada pelo motor sofre variação, deve-se calcular o valor da economia de energia para cada intervalo de tempo em que o motor permaneceu em determinado carregamento e posteriormente adicioná-las para obtenção da economia de energia anual total referente à troca deste motor. Neste caso, para a demanda retirada deve ser considerada somente a calculada na situação de carregamento máximo, já que a título de faturamento as concessionárias só consideram a demanda máxima do período de medição.

Para calcular o tempo de retorno do investimento é necessário calcular os custos do consumo e da demanda de energia elétrica. A composição destes custos depende da tarifa de energia adotada por este consumidor e dos impostos aplicados na fatura da concessionária como o ICMS (imposto sobre a circulação de mercadorias e serviços).

Como a maioria dos consumidores industriais possui tarifas horo-sazonais, ou seja são aplicados preços diferenciados para o consumo e a demanda durante o dia nos

horários de ponta e fora de ponta e durante o ano nos períodos seco e úmido, o cálculo do custo específico médio do consumo em R\$/MWh e do custo específico médio da demanda em R\$/kW deve levar em consideração o comportamento da carga ao longo do dia e do ano. Aspectos como a sazonalidade da produção e as variações de carga inerentes ao processo produtivo contribuem para os custos específicos médios da energia.

A energia média mensal consumida em MWh (E_M) é calculada na Equação 4.12 PROCEL ELETROBRÁS[04] como o somatório da energia elétrica mensal consumida na ponta em um período de no mínimo um ano ($\sum E_p$) adicionado ao somatório da energia elétrica consumida fora de ponta em um período de no mínimo um ano ($\sum E_{fp}$), dividido pelo número de meses considerado (n). É recomendável que sempre seja considerado o período de tempo de no mínimo um ano ou um número inteiro de anos para que a sazonalidade da produção industrial e da tarifa de energia elétrica seja considerada.

(4.12)

$$E_M = \frac{\sum E_p + \sum E_{fp}}{n}$$

O custo médio do consumo de energia mensal em R\$ (C_{ME}) é calculado na Equação 4.12 PROCEL ELETROBRÁS[04] como o somatório do custo mensal da energia elétrica consumida na ponta em um período de no mínimo um ano ($\sum C_p$) adicionado ao somatório do custo mensal da energia elétrica consumida fora de ponta em um período de no mínimo um ano ($\sum C_{fp}$), dividido pelo número de meses considerado (n). Os custos referentes ao consumo e a demanda de energia podem ser obtidos nas faturas de energia e são compostos pelo valor da tarifa aplicada ao consumidor e pelos impostos cobrados em conta de energia.

(4.13)

$$C_{ME} = \frac{\sum C_p + \sum C_{fp}}{n}$$

É possível, então calcular o custo específico do consumo de energia elétrica (C_{EE}) em R\$/MWh através da Equação 4.14 PROCEL ELETROBRÁS[04].

(4.14)

$$C_{EE} = \frac{C_{ME}}{E_M}$$

Para o cálculo do custo específico da demanda de energia (C_{ED}) em R\$/kW é aplicado um raciocínio análogo utilizando as Equações 4.15,4.16 e 4.17 PROCEL ELETROBRÁS[04].

(4.15)

$$D_M = \frac{\sum D_p + \sum D_{fp}}{n}$$

(4.16)

$$C_{MD} = \frac{\sum C_{Dp} + \sum C_{Dfp}}{n}$$

(4.17)

$$C_{ED} = \frac{C_{MD}}{D_M}$$

O tempo de retorno simples (TRI_s) do investimento (I) pode ser calculado em anos na Equação 4.18 PROCEL ELETROBRÁS[04].

(4.18)

$$TRI_s = \frac{I}{(EE \times C_{EE} + DR \times C_{ED})}$$

Considerando a aplicação de uma taxa de juros anual (i) o tempo de retorno do investimento será calculado a partir da Equação 4.19 PROCEL ELETROBRÁS[04].

(4.19)

$$TRI = \frac{\log \left[\frac{(EE \times C_{EE} + DR \times C_{ED})}{((EE \times C_{EE} + DR \times C_{ED}) - i \times I)} \right]}{\log(1+i)}$$

O tempo de retorno considerado viável para investimentos em projetos de *retrofit* de motores depende do ponto de vista do investidor, consumidor industrial. Normalmente são considerados viáveis trocas de motores com tempo de retorno menor ou igual a cinco anos.

Para projetos de retrofit de motores financiados pelos programas anuais de conservação de energia das concessionárias, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) considera viáveis economicamente somente os projetos de eficiência energética cuja relação custo benefício (RCB) é menor que 0,85, Equação 4.20 ANEEL [24].

(4.20)

$$RCB = \frac{I_{\text{anualizado}}}{\text{Benefício}}$$

O investimento anualizado ($I_{\text{anualizado}}$) depende da vida útil do motor, da taxa de juros anual e dos custos do equipamento, dos serviços e, no caso de redução da potência nominal do motor, da adaptação da instalação existente.

Já o benefício depende da demanda de energia retirada da ponta, da redução do consumo de energia nos períodos de ponta e fora de ponta e dos custos de demanda e energia evitados. A demanda de energia retirada na ponta e a redução do consumo de energia dependem da diferença de rendimento entre o motor que está em campo e o motor de alto rendimento. Para avaliar o rendimento do motor que está em campo, é necessário aplicar metodologias adequadas às condições de campo com o máximo de exatidão possível Capítulo 5. Os custos de demanda e energia evitados são específicos para a realidade de cada concessionária de energia, pois são referentes aos investimentos que seriam necessários para a expansão da rede elétrica e variam com a tensão de alimentação e o fator de carga do consumidor.

Quando em diagnóstico energético é constatado que o motor encontra-se super dimensionado para a carga acionada, o tempo de retorno do investimento cai já que é possível substituí-lo por um motor de alto rendimento com menor potência nominal e, conseqüentemente, menor custo. Motores que permanecem ligados por mais tempo oferecem tempo de retorno menor .

As tarifas de energia elétricas aplicadas nos consumidores industriais são baixas, por estes consumidores serem atendidos com níveis de tensão elevados: 230, 138, 69 e 13,8 kV, o que tem dificultado a viabilização econômica de projetos de eficiência energética na indústria.

4.6- Considerações Finais

Os principais problemas encontrados na indústria referentes aos motores elétricos são. dados de catálogos incorretos, normalização necessitando revisão, grande variação do rendimento entre fabricantes para motores de mesmas características, projetos dos motores precisando ser aperfeiçoados, tensão elétrica da rede inadequada, transmissões entre motor e carga desajustadas, condições operativas e de manutenção inadequadas e assistência técnica despreparada Soares [02].

Diante deste quadro, e considerando os fatores que influenciam no desempenho de um motor de indução trifásico discutidos neste capítulo, é possível afirmar que há muito que ser melhorado nos aspectos construtivos e operacionais relativos a estes motores, proporcionando um melhor desempenho energético dos sistemas motorizados.

Além destas oportunidades de melhoria, considerando que o parque industrial brasileiro foi implantado quando a energia elétrica era um insumo barato e abundante, projetos de eficiência energética na indústria vêm apontando para excelentes oportunidades de economia de energia elétrica, através projetos de *retrofit* e adequação dos motores existentes à carga acionada.

A viabilidade econômica destes projetos depende, entre outros fatores discutidos neste Capítulo, diretamente da economia de energia proporcionada, ou seja da diferença de rendimento entre os motores da linha padrão e de alto rendimento. Como esta diferença está em média em torno de dois pontos percentuais, a exatidão da metodologia utilizada para avaliação do desempenho de motores com tempo de vida útil avançado em chão de fábrica é de fundamental importância, podendo ser decisiva na avaliação da viabilidade econômica destes projetos.

Capítulo 5

Metodologias Para Avaliação de Rendimento

Este capítulo tem como objetivo verificar algumas metodologias existentes para avaliação de rendimento em motores de indução trifásicos, focalizando a base teórica de cada método, seu nível de exatidão e grau de intrusão.

5.1- Introdução

Para a avaliação de rendimento de motores existem normas internacionais que estabelecem condições diferentes de ensaio que devem ser seguidas pelo fabricante para medição de rendimento em motores novos. As diversas normas dificultam a comparação entre valores de rendimentos nominais de placa em motores de fabricantes diferentes, além de não serem adequadas para avaliação de rendimento de motores em campo.

A avaliação de motores em campo, como apresentado no Capítulo 1, focaliza seu rendimento e carregamento em operação, verificando a eficiência energética do motor. Um método de avaliação de rendimento em campo pode consistir em um único método ou pode ser montado utilizando uma combinação de diferentes métodos tais como: Método dos Dados de Placa, do Escorregamento, da Corrente,

Estatístico, do Circuito Equivalente, das Perdas Segregadas, do Torque no Entreferro e do Torque no Eixo. A combinação de diferentes métodos, se aplicada apropriadamente para um determinado grupo alvo de motores, pode melhorar significativamente a exatidão e a intrusão na avaliação de rendimento em motores de indução Hsu [05].

5.2- Métodos Clássicos de Avaliação de Rendimento

Os métodos clássicos para avaliação de rendimento em motores de indução, amplamente encontrados na literatura, Kosow[10], Fitzgerald[11], Toro[12], Sen[17] consistem no método método do circuito equivalente e no método do torque no eixo.

5.2.1 – Método do Torque no Eixo

O método de avaliação de rendimento mais direto é o método do torque no eixo que consiste na medição da potência mecânica de saída diretamente do eixo do motor, por meio da medição do torque de saída e da velocidade, sem nenhuma necessidade de calcular suas perdas Hsu [05]. A partir daí calcula-se o rendimento utilizando-se a Equação 4.1.

A velocidade mecânica no eixo da máquina é medida através de um tacômetro e o torque de saída é medido através de um torquímetro. Para medir a velocidade, através de um tacômetro óptico, o motor deve ser parado e em seu eixo colada um pedaço de fita adesiva, que servirá como referencial para o tacômetro . Para medição do torque, o acoplamento existente deve ser retirado e substituído por um acoplamento especial, que permita que o sinal de torque seja obtido diretamente de um anel de escorregamento. Tecnologias a laser e telemedição

podem ser usadas para obter as medições diretamente do anel de escorregamento reduzindo os ruídos do sinal.

Este método clássico é o mais exato pois a potência mecânica de saída entregue à carga é calculada diretamente pela Equação 5.15. O grau de exatidão deste método vai depender da qualidade dos sensores de torque e velocidade, do ruído do sinal e do alinhamento do eixo do motor com sua carga.

Devido à necessidade de parada do motor e mudança do acoplamento, este método é altamente intrusivo não sendo adequado para medição de rendimento em campo, a não ser em condições especiais como em paradas programadas para manutenção preventiva.

5.2.2 – Método do Circuito Equivalente

O método considerado mais exato Hsu[05] e mais direto para avaliação de rendimento em motores de indução é o método que utiliza a medição do torque de saída no eixo do motor entregue à carga. Ainda que o método do circuito equivalente necessite da medição da velocidade mecânica de saída (W_m), na ausência de equipamentos e das condições necessárias para a medição do torque de saída no eixo, é possível, a partir dos parâmetros do circuito equivalente do motor, como está demonstrado no Capítulo 2, obter o torque eletromagnético desenvolvido (M_i) Equação 2.29 .

Como descrito no diagrama de fluxo de potência do motor, Figura 4.1, a potência mecânica de saída (P_M) é a diferença entre a potência mecânica desenvolvida (P_{mi}) e as perdas rotacionais (P_{rot}) Equação 2.30. A potência mecânica desenvolvida é calculada com o torque eletromagnético interno desenvolvido (M_i) e a velocidade mecânica em radianos por segundo (W_m) medida, Equação 2.25.

Através dos ensaios a vazio e rotor bloqueado, além da medição da resistência dc na armadura do estator, descritos no Capítulo 2, é possível calcular as perdas rotacionais (P_{rot}) através da Equação 5.1.

(5.1)

$$P_{rot} = P_{eca} - R_{eql} \times I_{lca}^2$$

Onde:

P_{eca} – Potência elétrica de entrada medida no ensaio de circuito aberto

R_{eql} – Resistência total equivalente entre linhas do motor de indução

I_{lca} – Corrente de linha no ensaio de circuito aberto

No ensaio a vazio, como foi apresentado no Capítulo 2, o motor de indução é ligado a uma linha que o alimenta na sua tensão nominal e é posto a girar sem carga acoplada ao seu eixo. Sob estas condições, a potência de entrada no estator de um motor de indução representa as perdas rotacionais (perdas no núcleo e mecânicas), ocorrendo uma pequena perda não desprezível no cobre do rotor e do estator. Já na condição do ensaio com rotor bloqueado, também descrito no Capítulo 2, as perdas no núcleo (ferro) são desprezíveis e não há perdas mecânicas já que o motor encontra-se parado. A potência total solicitada pelo motor representa as perdas elétricas no cobre do estator e do rotor a plena carga (P_{cer}).

Conhecendo-se a potência mecânica de saída (P_M) e a potência elétrica de entrada (P_e) descrita na Figura 4.2, calcula-se o rendimento através da Equação 4.1.

5.3- Normas Técnicas

As principais normas internacionais relativas ao rendimento em motores de indução monofásicos, Japanese Electrotechnical Committee (JEC 37), International Electrotechnical Commission (IEC 34-2) e a National Electrical Manufacturers

Association (NEMA) IEEE Standard 112[14], estabelecem condições de ensaio diferentes, chegando, portanto a valores de rendimento também diferentes para um mesmo motor avaliado. As normas brasileiras (NBR 7094[08] e 5383[09]) relativas aos motores de indução trifásicos são baseadas na IEEE Standard 112 e, principalmente, na IEC 34-9. Estas normas são periodicamente atualizadas, procurando estabelecer procedimentos modernos, consistentes e factíveis para a determinação de desempenho em motores.

Os métodos apresentados pelas normas podem ser divididos em métodos diretos e métodos indiretos. Nos métodos diretos as potências elétrica de entrada e mecânica de saída são medidas. Já nos métodos indiretos, uma delas ou as duas não são medidas diretamente.

A medição da potência mecânica de saída no eixo não é direta, mas através do produto das medições de torque e velocidade no eixo do motor.

Pelos métodos diretos o rendimento é determinado pela divisão entre a potência mecânica de saída e a potência elétrica de entrada.

Pelos métodos indiretos para o cálculo do rendimento a potência mecânica de entrada é calculada a partir da diferença entre a potência elétrica de entrada e as perdas do motor ou a potência elétrica de entrada é calculada pela soma entre a potência mecânica de saída e as perdas do motor.

5.3.1 – A Norma Brasileira NBR 5383 [09]

A NBR 5383 [09] estabelece os procedimentos a serem seguidos na execução de ensaios destinados à determinação das características de máquinas de indução, como ensaio de tensão suportável, de tensão secundária, de tensão no eixo, rendimento, etc.

Esta norma descreve alguns procedimentos diretos e indiretos para determinação do rendimento, assim como os ensaios que devem ser utilizados nestes procedimentos, não recomendando a comparação dos resultados obtidos utilizando métodos diretos e indiretos, uma vez que estes métodos são desenvolvidos baseados em hipóteses diversas.

Os procedimentos diretos para determinação do rendimento citados por esta norma são:

- Medição da potência absorvida e fornecida por uma só máquina;
- Medição da potência absorvida e fornecida por duas máquinas acopladas;
- Medição das perdas reais de uma máquina em condições determinadas

Já os procedimentos indiretos são:

- Determinação das perdas separadas para sua adição;
- Determinação das perdas totais;
- Pelo circuito equivalente;
- Pelo diagrama circular

Os ensaios definidos por esta norma são:

- Ensaio de freio;
- Ensaio com máquina calibrada;
- Ensaio em oposição mecânica;
- Ensaio em oposição elétrica;
- Determinação do rendimento pelo circuito equivalente e pelo diagrama circular

Estes métodos e ensaios dependendo de fatores como: equipamentos laboratoriais disponíveis, custo do ensaio, tempo disponível para o ensaio, exatidão exigida,

potências envolvidas, etc podem ser mais ou menos adequados para a determinação do rendimento de um motor que encontra-se em chão de fábrica.

5.3.2 – Estudo Comparativo Entre as Normas

Um estudo comparativo realizado CEPEL [02] entre as principais normas nacionais e internacionais existentes chegando às seguintes conclusões:

- Nos métodos similares de normas diferentes as principais divergências se encontram na correção da resistência em função da temperatura e na avaliação das perdas suplementares. A correção de temperatura da IEEE-112[14] difere das demais normas, apresentando uma maior grau da discriminação da temperatura com a classe de isolamento.
- Dentro de uma mesma norma, os valores obtidos por métodos diretos e indiretos são de difícil comparação entre si, pois partem de hipóteses diferentes.
- Quanto à conservação de energia, é importante a escolha de um método que avalie com maior exatidão o desempenho real do motor. O método do dinamômetro com segregação de perdas, prescrito pela IEEE-112-Método B[14], é um dos mais precisos. A causa básica é a estimação das perdas suplementares.
- O método preferencial da NBR 5383 [09] é similar ao da IEC-34-9 e estima as perdas suplementares em 0,5% da potência de entrada e considerando as perdas suplementares reais como 12% das perdas totais. Para que esta estimação de perdas represente o valor real, os rendimentos teriam que ser iguais a 95,83%. Como a grande maioria dos motores tem rendimento bem inferior a este valor, esta consideração subestima as perdas suplementares, aumentando o rendimento medido.

Embora existam sugestões de ensaio para o cálculo das perdas suplementares, a maneira usual de determiná-las é subtrair das perdas totais os valores das perdas por atrito e ventilação e resistivas no rotor e no estator. Alguns métodos do IEEE-112 admitem que as perdas suplementares podem ser estimadas em 1,8% da potência de saída nominal de motores entre 1 e 125 HP e, 1,5% para motores acima de 125 HP até 500 HP Hsu [05].

A grande variedade de métodos para avaliação de rendimento em motores de indução trifásicos contribui significativamente para a determinação de resultados diferentes de rendimento para um mesmo motor, quando avaliado utilizando os critérios adotados por normas diferentes.

5.4- Exatidão da Avaliação do Rendimento

A exatidão dos resultados da avaliação do rendimento em motores trifásicos depende da contribuição de vários fatores como: a instrumentação usada, o método de avaliação adotado, o período de amostragem dos dados medidos, a forma de calcular o erro final a partir da contribuição dos erros parciais.

A Norma IEEE 112 requer instrumentos de alta precisão, com erro individual menor que + ou - 0,5% do fundo de escala incluindo os efeitos da amplitude e do ângulo de fase. Para motores de indução trifásicos o rendimento nominal de placa é normalmente determinado de acordo com o Método B da Norma IEEE 112. Segundo Bonnet [18], com o uso das tecnologias existentes disponíveis, pode-se conseguir melhor precisão para o rendimento que a obtida com o Método B. A precisão final do rendimento é resultado da contribuição de erro nos seguintes itens e respectivos valores considerados aceitáveis:

- Precisão dos Cálculos - \pm 0,5%

- Confecção e Variedade do Material - $\pm 0,5\%$
- Precisão dos Testes - $\pm 0,5\%$

Um erro total de $\pm 1,5\%$ do rendimento, na opinião de Bonnet [18], é a soma simples da contribuição dos três fatores acima citados que ele considerou. O método normalmente utilizado para determinação do erro final de uma medição consiste na raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros de cada fator, o que significa um resultado final para o erro menor que a soma simples dos erros parciais.

A falta de exatidão dos métodos, em geral, é maior abaixo de 50% do carregamento nominal. Para os diferentes métodos básicos descritos no item 5.6 a exatidão varia de $\pm 1\%$ a $\pm 10\%$ para motores com carregamento entre 50 e 100% da potência nominal Hsu[05].

Quanto menos o método adotado utilizar as informações nominais de placa e mais realizar medições diretas sem assumir valores para a avaliação do rendimento, melhor será a exatidão do resultado final.

5.4.1 – Instrumentação

Para medições em campo são utilizados instrumentos portáteis temporários ou instrumentos instalados permanentemente. Os instrumentos de monitoração portáteis tipicamente consistem de uma garra com transformador de corrente ou captador de efeito Hall ou algum tipo de transdutor de tensão. A precisão na monitoração da potência depende do ângulo de fase e da amplitude. O desvio do ângulo de fase do transformador é diretamente dependente da amplitude da corrente. Se a compensação do desvio do ângulo de fase não for feita, o erro associado(para potência/ fator de potência) pode ser significativamente maior que o erro da amplitude. Por exemplo, se o desvio do ângulo de fase for de $1,5^\circ$, o que

é um valor típico para garras de transformação de alta precisão, resultará em uma indicação de erro de potência/ fator de potência acima de 3%, em um fator de potência da ordem de 0,7, se a compensação para o desvio de fase não for feita.

Dois outros fatores podem influenciar sensivelmente a precisão dos alicates amperímetros: o fechamento correto da garra e a posição centralizada do condutor. Sensores de efeito Hall são normalmente mais afetados pela posição descentralizada dos condutores, enquanto que o fechamento incorreto da garra afeta tanto os sensores de Efeito Hall quanto os com transformadores. Erros devido a condutores não centralizados, particularmente com sensores de Efeito Hall, podem tranquilamente exceder 1%. Já erros devido ao fechamento incorreto das garras podem facilmente exceder 1% da amplitude e desvio do ângulo de fase maior que 5° Hsu [05].

5.4.2 – Período de Amostragem

Para medições realizadas em campo é imprescindível considerar que o carregamento dos motores flutua significativamente de acordo com as necessidades do processo produtivo. Esta variação pode ocorrer durante longos períodos ou por períodos muito curtos. Para assegurar que os dados medidos realmente reflitam o verdadeiro carregamento médio do motor, é necessário coletar algumas amostras validando-as estatisticamente ou adquirir uma amostragem de dados relativamente longa, o que pode significar um intervalo de poucos segundos, minutos ou horas, dependendo da natureza da carga.

5.5- Intrusão das Metodologias de Avaliação de Rendimento

Motores que estão funcionando em ambientes industriais, com o tempo de vida útil avançado e que, em muitos casos, já foram rebobinados, diminuem

consideravelmente seu rendimento e exigem métodos de avaliação menos intrusivos. O grau de intrusão do método de avaliação em campo é determinado pelos dados que são requeridos e as dificuldades encontradas na realização destas medições.

O custo associado com mão-de-obra, material, equipamentos empregados e o tempo de desligamento necessário para a coleta de dados podem ser usados como um referencial para avaliar a intrusividade do método utilizado Hsu [05].

O planejamento do trabalho também pode contribuir para diminuir a intrusão do método. Fazer planejamento, de forma a melhor aproveitar paradas programadas de plantas industriais para manutenção preventiva, é uma forma de diminuir consideravelmente o grau de intrusão de alguns métodos que oferecem boa exatidão, mas exigem desacoplamento do motor para realização de testes.

O nível de intrusão não varia só com o método, mas depende da planta que está sendo avaliada. Se, por exemplo uma dada linha de produção já possui voltímetros instalados permanentemente, a medição de tensão diminui consideravelmente seu grau de intrusão.

A avaliação cuidadosa de cada sistema produtivo, somada a um planejamento adequado pode indicar antecipadamente qual o método de maior exatidão e menor intrusão pode ser aplicado para avaliar o rendimento em uma determinada linha de produção. A avaliação isolada do método sem considerar as características do sistema produtivo a ser estudado pode resultar em conclusões equivocadas com relação ao grau de intrusão.

5.6- Métodos Alternativos

Abaixo são descritos e classificados os diversos métodos alternativos de avaliação de rendimento em motores de indução de acordo com sua base teórica, nível de exatidão e grau de intrusão:

5.6.1 – Método dos Dados Nominais de Placa

Este é o método de avaliação em campo menos intrusivo, pois assume que o rendimento do motor é constante e igual ao valor nominal de placa. Não considera a variação do rendimento em função do carregamento do motor. Usando uma curva típica de rendimento x carregamento para motores com diferentes números de pólos e potências nominais, Figura 4.3, pode-se avaliar o potencial de exatidão deste método. Em alguns motores que possuem uma menor variação do rendimento em relação ao carregamento, este método apresenta uma maior exatidão.

Algumas condições freqüentemente encontradas em campo contribuem sensivelmente para o aumento da falta de exatidão deste método, são elas:

- O rendimento nominal dado em placa pode ser avaliado por diferentes normas tais como a IEEE Standar 112, a JEC 37 e a IEC 34-9. Estas normas não estão em concordância quanto aos métodos de avaliação, apresentando diferentes valores de rendimento para um mesmo motor.
- O rebobinamento de motores é um procedimento amplamente utilizado e oferece incertezas adicionais, mudando as características físicas do motor. As perdas no cobre em motores rebobinados podem ou não ser incrementadas dependendo da isolação das lâminas e do processo de limpeza do estator. As perdas no cobre dependem da nova extensão da bobina e da bitola do condutor. Existem algumas normas como a norma da EASA (Electrical Apparatus Service Associattion) e algumas regras que

buscam reduzir os efeitos da rebobinagem quanto a alteração das características nominais do motor.

- As condições em campo não são freqüentemente as condições ideais para funcionamento do motor, a partir das quais os dados de placa são gerados. Os circuitos de alimentação podem oferecer tensões desbalanceadas e a presença de distorções harmônicas.

Utilizando o método dos dados nominais de placa, o rendimento pode estar facilmente com um erro de 10%. Em situações de grande dificuldade de avaliação de rendimento em campo, este método pode ser usado como um indicativo do rendimento.

5.6.2- Método do Escorregamento

Este método pressupõe que a porcentagem do carregamento do motor de indução trifásico é diretamente proporcional à razão entre o escorregamento neste ponto de carregamento medido (s) e o escorregamento nominal à plena carga (s_N). Segundo Hsu [05], a potência de saída no eixo do motor (P_M) pode ser dada pela relação:

$$P_M = \frac{s}{s_N} \times P_{MN} \quad (5.2)$$

Onde a potência nominal mecânica do motor é chamada de P_{MN} .

Segundo Bortoni [20], a partir da Figura 5.1, aplicando - se semelhança de triângulos na região de operação do motor, ou seja região da curva torque x velocidade em que a velocidade de trabalho (n_t) está entre a nominal (n_N) e a velocidade síncrona (n_s), obtém-se a Equação 5.3 que relaciona o conjugado de

saída (M_t) para uma velocidade de saída (n_t) e o Conjugado de saída nominal (M_N) na velocidade nominal (n_N).

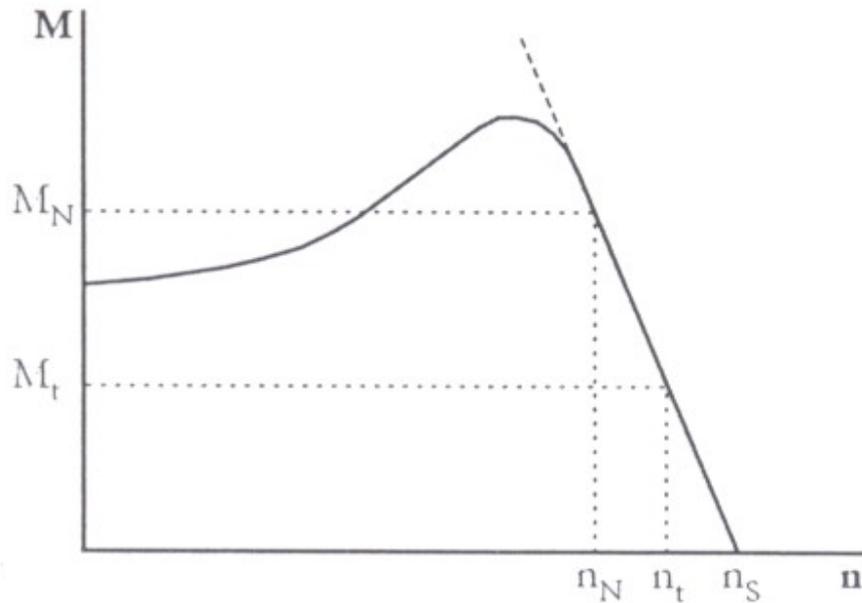


Figura 5.1 – Curva velocidade x conjugado

(5.3)

$$M_t = \frac{(n_s - n_t) \times M_N}{(n_s - n_N)}$$

A potência mecânica de saída no eixo do motor (P_M) para um determinado carregamento (C) e a potência mecânica de saída no eixo nominal (P_{MN}) podem ser calculadas através das Equações 5.4 e 5.5.

(5.4)

$$P_M = M_t \times n_t$$

(5.5)

$$P_{MN} = M_N \times n_N$$

O carregamento do motor (C) neste ponto de operação é dado pela relação entre a potência mecânica de saída no eixo do motor (P_M) e a potência mecânica de saída no eixo nominal (P_{MN}).

(5.6)

$$C = \frac{P_M}{P_{MN}}$$

Substituindo-se as Equações 5.3, 5.4 e 5.5 na Equação 5.6 o carregamento é calculado de acordo com a Equação 5.7

(5.7)

$$C = \frac{(n_s - n_t) \times n_t}{(n_s - n_N) \times n_n}$$

A potência mecânica de saída no eixo do motor (P_M) pode ser calculada como

(5.8)

$$P_M = C \times P_{MN}$$

Segundo Garcia [13] e Bortoni [20], como o escorregamento varia inversamente com o quadrado da tensão de alimentação do motor, uma variação na tensão fornecida pela concessionária (V) pode contribuir para aumentar a falta de exatidão deste método se a tensão aplicada não for considerada no cálculo do carregamento, Equação 5.9.

(5.9)

$$P_M = C \times \frac{(V)^2}{(V_N)^2} \times P_{MN}$$

Conhecendo-se a potência mecânica de saída no eixo P_M e a potência elétrica de entrada, através da Equação 4.1 calcula-se o rendimento do motor para várias condições de carregamento.

A velocidade do motor pode ser medida diretamente por um tacômetro óptico ou a partir de métodos de medição indireta como o que utiliza a análise espectral da corrente de linha, descrito no item 5.7.

A medição indireta da velocidade torna este método menos intrusivo, facilitando a avaliação de motores que se encontram em locais de difícil acesso ao eixo como em plantas industriais verticais e poços.

A principal fonte de falta de exatidão deste método está na utilização da velocidade nominal fornecida pelo fabricante. A NEMA MG-1 seção 12.46 admite uma tolerância de 20% no erro da velocidade nominal de placa do motor, o que pode tornar este método muito impreciso.

Segundo Hsu [05], como a velocidade em vazio para um motor de indução é a velocidade síncrona, a avaliação do rendimento utilizando o método do escorregamento é mais precisa para motores com baixo carregamento Figura 5.1.

5.6.3- Método da Corrente

Este método presume que a percentagem do carregamento é diretamente proporcional à razão entre a corrente de trabalho medida I_t e a corrente à plena carga I_N Hsu [05]. A potência de saída no eixo é aproximadamente dada por

$$P_M = \frac{I_t \times P_N}{I_N} \quad (5.10)$$

É possível aumentar a exatidão deste método utilizando a Equação 5.11

$$P_M = \frac{(I_t - I_{vazio}) \times P_N}{(I_N - I_{vazio})} \quad (5.11)$$

Onde V_{FF} é a tensão entre fases medida e V_N é a tensão nominal do motor.

Para o cálculo da potência mecânica de saída no eixo a partir da Equação 5.11 é necessário conhecer a corrente de linha em vazio I_{vazio} o que apesar de aumentar a exatidão, aumenta também o nível de intrusão deste método.

A medição de corrente de um motor, desde que não seja na condição de vazio, representa um baixo nível de intrusão. A NEMA MG1 seção 12.47 admite uma imprecisão da corrente nominal de placa do motor em até 10%, quando este está operando na tensão, frequência e potência de saída nominais. A corrente nominal de placa é, portanto uma fonte considerável de erro para o método da corrente.

Quanto maior o carregamento do motor, mais ele se aproxima da condição de funcionamento à plena carga e, conseqüentemente, maior a exatidão deste método.

5.6.4- Método Estatístico

O Método Estatístico é composto por equações empíricas que utilizam um número mínimo de dados medidos para estimar o rendimento. Normalmente a aplicação deste método é restrita a um grupo de motores a partir dos quais as equações foram geradas. Se as equações forem usadas para outro grupo de motores, erros significativos são adicionados à estimação do rendimento.

Os resultados estatísticos podem ser completamente diferentes para uma mesma variável. Baseadas neste Método normas como a NEMA MG1 e IEEE Standard 112 apresentam diferentes valores de desvio por perdas de carregamento para motores:

NEMA MG1

- ❖ Potência Nominal menor que 2.500 hp - desvio por perda de carregamento é de 1,2% da potência nominal
- ❖ Potência Nominal maior que 2.500 hp - desvio por perda de carregamento é de 0,9% da potência nominal

IEEE 112

- ❖ Potência Nominal entre 1 e 125 hp - desvio por perda de carregamento é de 1,8% da potência nominal
- ❖ Potência Nominal entre 126 e 500 hp - desvio por perda de carregamento é de 1,5% da potência nominal
- ❖ Potência Nominal entre 501 e 2.499 hp - desvio por perda de carregamento é de 1,2% da potência nominal

A aproximação estatística é comumente usada com outros métodos básicos. Este Método utilizado juntamente com outros métodos pode facilitar a estimação do rendimento, evitando, por exemplo, a necessidade de desacoplar o motor para realização de testes em vazio, assumindo alguns valores apresentados por normas como a IEEE 112 [14].

5.6.5- Método das Perdas Segregadas

O Método das Perdas Segregadas estima a magnitude das perdas no cobre do estator, no cobre do rotor, no núcleo, perdas suplementares e perdas por fricção e ventilação Hsu [05]. A potência de saída no eixo é calculada pela diferença entre a potência elétrica de entrada e as perdas, calculando então o rendimento a partir da Equação 4.2.

Existem inúmeros métodos de avaliação de rendimento que são baseados no método das perdas segregadas. Um exemplo é o método E da Norma IEEE 112 [14] e a NBR 5383 [09] item 12.8.

Uma vez que dados de tensão, corrente, potência de entrada e velocidade para várias situações de carregamento tenham sido coletados, as equações fornecidas na Norma IEEE 112 [14] podem ser usadas para calcular as componentes individuais das perdas.

Existem versões comerciais de métodos para avaliação de rendimento em motores baseados numa versão modificada da Norma IEEE 112 método E1 [14]. Alguns métodos empíricos usam aproximações para os valores das perdas, com o objetivo de facilitar a estimativa do rendimento comprometendo a exatidão final do rendimento.

Apesar deste método, apresentar resultados com boa exatidão, requer testes com o motor desacoplado e com rotação reversa, não sendo portanto, adequado para avaliação de motores numa planta fabril.

5.7- Medição Indireta de Velocidade Através da Análise Espectral de Harmônicos

Este método é baseado na localização de harmônicos de corrente que surgem, independentemente da frequência e da amplitude do sinal de alimentação da máquina, devido à saliências mecânicas do estator e do rotor. A partir da localização dos harmônicos característicos, determina-se a frequência fundamental da corrente de alimentação e a partir da localização dos harmônicos no espectro da corrente de linha, estima-se o escorregamento da máquina. Conhecendo-se a

freqüência fundamental e o escorregamento, estima-se a velocidade do motor Santana [01].

5.7.1 - Estimação da Freqüência Fundamental da Rede

A freqüência fundamental da rede elétrica local, apesar de ter valor nominal de 60Hz, apresenta variações relevantes em torno desse valor. Como esta metodologia para estimação de velocidade baseia-se na análise harmônica, a precisão do valor da freqüência fundamental ganha importância, sendo necessária a implementação de rotinas para estimação da freqüência fundamental da rede.

No desenvolvimento desta metodologia, Santana[01] elaborou dois algoritmos e implementou duas rotinas para a estimação da freqüência fundamental do sinal (no domínio do tempo e no da freqüência)

Para determinação da freqüência fundamental no domínio do tempo o algoritmo desenvolvido consistiu na localização de pontos de zeros com posterior determinação do tempo decorrido entre eles e conseqüentemente do período de cada ciclo. Utilizando-se este algoritmo, obteve-se para a freqüência fundamental o valor de 60,031 Hz.

A estimação da freqüência fundamental através da análise do espectro de freqüência do sinal de corrente e pode ser feita a partir da Equação 5.12.

$$f_1(f_{nh}) = \frac{f_{nh}}{n} \pm \frac{r_s}{n} \tag{5.12}$$

Como f_{nh} é o harmônico de ordem n , $f_1(f_{nh})$ é a freqüência fundamental calculada a partir do n -ésimo harmônico. A resolução com a qual o espectro do sinal é

obtido(r_s) depende da frequência de amostragem(f_s) e o do números de pontos amostrados(n) de acordo com a Equação 5.13.

$$r_s = \frac{f_s}{n} \quad (5.13)$$

A resolução espectral representa uma limitação. A solução encontrada foi fazer a estimação da frequência fundamental a partir de harmônicos característicos de ordem superior, reduzindo assim a incerteza decorrente da resolução espectral. Utilizando-se o décimo terceiro harmônico o resultado encontrado foi 60,029 Hz.

Nesta avaliação, obteve-se desempenhos equivalentes nos dois métodos. O método de estimação no domínio do tempo, porém é mais adequado para aquisições realizadas com maiores resoluções espectrais porque nessas situações a incerteza verificada na estimação no domínio da frequência aumenta sensivelmente.

5.7.2 - Determinação do Escorregamento

A densidade de fluxo magnético no entreferro $B(\theta, t)$ é dado pelo produto da permeância específica $P(\theta, t)$ e da força magneto motriz $F(\theta, t)$ Equação 5.14.

$$\mathbf{B}(\theta, t) = \mathbf{P}(\theta, t) \times \mathbf{F}(\theta, t) \quad (5.14)$$

A permeância e a força magneto motriz sofrem contribuição dos harmônicos da frequência fundamental, harmônicos da força magneto motriz no rotor e no estator, harmônicos de permeância de ranhuras no estator e no rotor, harmônicos de permeância de excentricidade no entreferro e harmônicos de permeância devido à saturação. Através desta abordagem, Santana, analisa as contribuições

da onda de permeância e da força magneto motriz na composição espectral do fluxo magnético e a conseqüente indução de harmônicos no sinal da corrente de linha.

Os harmônicos de ranhuras surgem no espectro devido à saliências mecânicas no rotor e no estator. Já os harmônicos de excentricidade no entreferro, podem ser de excentricidade estática ou dinâmica. A excentricidade estática pode ser causada por posicionamento incorreto do rotor ou do estator no momento da montagem. A excentricidade dinâmica pode ser causada ao longo da vida útil do motor devido ao dobramento da carcaça (bent-shaft), ressonância mecânica em velocidades críticas ou desgaste devido ao uso (bearing Wear).

A partir da Equação 5.14, considerando os conceitos fundamentais que definem os harmônicos citados acima, Santana[1], enuncia a ocorrência desses harmônicos nas freqüências definidas na Equação 5.15.

(5.15)

$$f_h = f_1 \left[\frac{(kR + n_d)(1-s) + n_w}{N_{pp}} \right]$$

Ou ainda,

(5.16)

$$s = 1 - \left[\frac{N_{pp} f_{hn} + n_w}{(kR + n_d)} \right]$$

Onde f_{hn} é a freqüência normalizada dada pela Equação 5.17

(5.17)

$$f_{hn} = \frac{f_{hn}}{f_1}$$

Considerando ainda que k está variando $0,1,2,\dots$, R o número de ranhuras do rotor, n_d a ordem da excentricidade do rotor, s o escorregamento em p.u., N_{pp} o número de par de pólos do motor e n_w a ordem dos harmônicos de força magneto motriz no entreferro. É necessário o conhecimento do número de ranhuras do rotor (R), informação que nem sempre está disponível. Caso não seja conhecido o número de ranhuras do rotor, pode-se estimar este valor através do ensaio em vazio proposto por Hurst[21]. Segundo Hurst[21], partindo-se de uma velocidade conhecida e atribuindo valores convenientes aos coeficientes K , n_d e n_w , obtém-se utilizando-se a Equação 5.15 o número de ranhuras do rotor.

Segundo Santana[1], considerando o motor estudado com $N_{pp} = 2$, $K = 1$, $R=44$, $n_d = 0$ e $n_w = 3$, alimentado por uma rede elétrica com frequência fundamental f_1 , a Equação 5.17 pode ser escrita da seguinte forma:

(5.18)

$$s = 1 - \frac{f_{hn} + 3}{22}$$

A Figura 5.2 mostra uma janela entre 1320 Hz (vigésimo segundo harmônico) e 1380 Hz (vigésimo terceiro harmônico) do espectro do sinal da corrente de uma das fases do motor de indução trifásico medido em laboratório. O pico do sinal, nesta janela ocorreu na frequência de 1372,3 Hz. A partir desta frequência de pico, aplica-se as Equações 5.17 e 5.18 obtendo-se o escorregamento do motor para esta condição de carregamento.

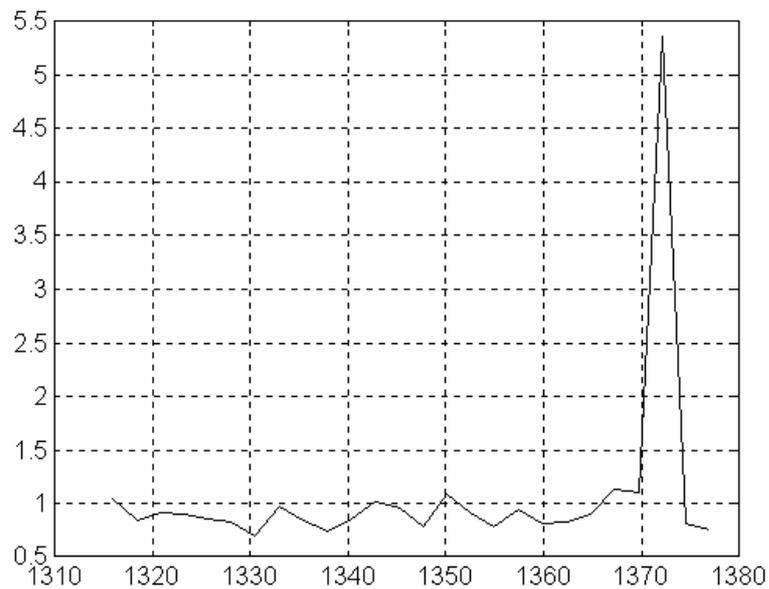


Figura 5.2 – Janela do espectro do sinal da corrente de fase de um motor de indução trifásico entre o 22º e 23º harmônicos

Conhecido o escorregamento (s) em p.u. e a velocidade síncrona (n_s) do motor, calcula-se a velocidade de saída no eixo do rotor (n) em rpm, na Equação 5.19

(5.19)

$$n = n_s(1 - s)$$

Se o carregamento do motor aumentar, a velocidade cai, o escorregamento aumenta e, conseqüentemente, a freqüência onde ocorrerá o pico de corrente, na Figura 5.2, se deslocará para a esquerda.

5.8- Considerações Finais

Os métodos de avaliação de rendimento mais precisos são também os de maior intrusão. Avaliar o rendimento de um motor de indução trifásico obedecendo as condições de ensaio definidas pelas normas, freqüentemente não é possível na avaliação de motores que estão operando em chão de fábrica, devido ao alto grau de intrusão destes métodos. Por outro lado, adotar os valores de rendimento definidos pelo fabricante do motor não é recomendável para motores que estão com o tempo de vida útil avançado, já foram rebobinados ou que trabalham em condições operacionais diferentes das recomendadas pelo fabricante.

É importante então selecionar entre os métodos existentes os que são factíveis dentro das limitações impostas pelas condições de operação dos motores e que apresentam a maior exatidão possível.

Capítulo 6

Seleção de Metodologias Para Avaliação de Rendimento em Campo

Este capítulo, a partir de ensaios em laboratório, compara os resultados experimentais obtidos selecionando as metodologias de avaliação de rendimento em motores de indução mais adequadas para as condições oferecidas por motores em campo, discutindo sua exatidão para diversas condições de funcionamento do motor. Os métodos que apresentaram melhores resultados foram implementados na instrumentação eletrônica dedicada.

6.1- Introdução

Como o alvo de estudo desta dissertação é o motor de indução em campo, foi imprescindível minimizar o grau de intrusão na seleção dos métodos para avaliação de rendimento. Como já foi estudado no Capítulo 5, existe um compromisso entre a intrusão e a exatidão do método, ou seja os métodos mais precisos são os mais intrusivos e, por isso, dificilmente podem ser aplicados em ambientes industriais.

Este capítulo tem como objetivo avaliar a exatidão dos métodos de baixo grau de intrusão aplicados em campo comparando os resultados experimentais obtidos com o Método do Circuito Equivalente, implementando os métodos que

apresentaram melhores resultados em uma instrumentação eletrônica dedicada para avaliação de rendimento de motores de indução em chão de fábrica.

6.2- Condições Laboratoriais Para Realização dos Ensaios

6.2.2- Equipamentos Utilizados

A Figura 6.1 mostra um esquema do sistema montado em laboratório para efetuar os testes necessários para avaliação das metodologias. O gerador de corrente contínua tem como função juntamente com a carga resistiva simular o carregamento do motor. A energia elétrica gerada pela máquina de corrente contínua acionada pelo motor de indução trifásico alimenta as cargas resistivas. A variação do carregamento de corrente do motor é obtida através da variação da corrente de campo do gerador de corrente contínua.

Os motores de indução trifásicos utilizados possuem potência nominal de 2 cv, 4 pólos, tensão nominal de 220/380 V (Δ/Y), corrente nominal de 6,5 A e velocidade nominal de 1725 rpm, fabricado pela WEG.

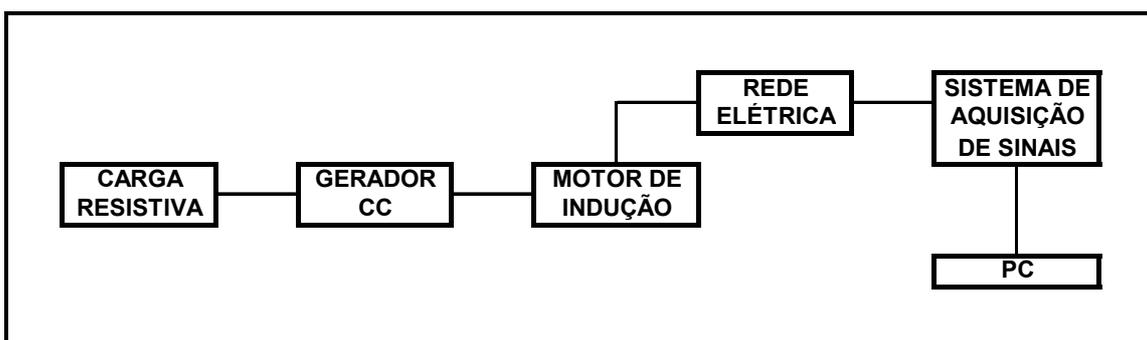


Figura 6.1 – Sistema de Medição Montado em Laboratório

O sistema de aquisição de sinais utilizado foi desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia dentro

do Programa Anual de Pesquisa e Desenvolvimento da COELBA. Este sistema de aquisição de sinais é composto por um sensor de corrente por efeito Hall LEM LA-25NP, uma placa de aquisição de dados desenvolvida no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia com taxa de amostragem de 10,0 ksp/s, conversor A/D 12 bits, corrente máxima de 15 A um computador pessoal. O equipamento, cujo o sistema de aquisição de foi implementado, fornece a avaliação do rendimento de motores de indução trifásicos em chão de fábrica por meio da medição da potência elétrica útil de entrada, usando os métodos selecionados nesta dissertação para estimar a potência mecânica de saída no eixo da máquina.

A indicação de corrente, tensão e potência elétrica do instrumento foi calibrada a partir da verificação da potência elétrica em cargas resistivas e mediante comparações com instrumentos padrões. A precisão da indicação da velocidade de saída no eixo do motor foi verificada por comparação com as indicações de um tacômetro óptico digital da MINIPA modelo MDT-2244 com precisão de + ou - (0,05% + 1dígito) com resolução de 1 rpm acima de 1000 rpm, com base de tempo utilizando cristal de quartzo a 4,194 MHz.

A potência elétrica útil de entrada é obtida a partir do uso de sensores apropriados de tensão e corrente elétrica, sendo posteriormente feito o cálculo da potência por processamento numérico. Os dados de tensão e corrente elétrica usados para o cálculo da potência elétrica útil são também usados para o cálculo dos valores eficazes para corrente e tensão, bem como para o cálculo da potência aparente e do fator de potência.

6.2.2- Metodologias Avaliadas

Dentre as metodologias para avaliação de rendimento em motores de indução trifásicos descritas no Capítulo 5 foram escolhidas as que apresentavam menor grau de intrusão e são mais utilizadas em projetos de eficiência energética em indústrias. Obedecendo a estas condições, foram selecionados então os Métodos do Escorregamento e da Corrente.

A aplicação do Método da Corrente é imediata porque os valores de corrente são medidos diretamente, estando disponíveis. Já na aplicação do Método do Escorregamento é necessária a informação sobre a velocidade de saída no eixo da máquina. Para solucionar este problema, foi adotada a medição indireta de velocidade por meio da análise das harmônicas do espectro de frequência da corrente elétrica, conforme sugerido por Hurst [21]. Esta solução possibilita a avaliação do rendimento de motores de indução sem qualquer interferência na condição normal de funcionamento do processo produtivo, tornando o Método do Escorregamento ainda menos intrusivo.

Com o objetivo de melhorar a exatidão dos resultados, os métodos do Escorregamento e da Corrente foram aplicados utilizando fatores de correção de tensão Equação 5.9 e de corrente em vazio Equação 5.11.

A partir de resultados experimentais obtidos em laboratório os Métodos da Corrente e do Escorregamento, inclusive considerando os fatores de correção, foram avaliados quanto à sua exatidão através da comparação com os resultados obtidos com a aplicação do Método do Circuito Equivalente. O comportamento destes Métodos foi verificado para diferentes condições de carregamento e de tensão de alimentação do motor.

6.3- Cálculo do Rendimento a Partir dos Resultados Experimentais

6.3.1- Método do Circuito Equivalente

Devido à não disponibilidade de sensores de torque para avaliação do rendimento através do Método do Torque no Eixo, o Método do Circuito Equivalente foi usado como referencial para avaliar a exatidão dos métodos alternativos mais adequados às condições encontradas em chão de fábrica.

Foram realizados os ensaios em vazio e com o rotor bloqueado, utilizando-se o sistema de aquisição de sinais desenvolvido no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia obtendo-se os valores de corrente, tensão e potência descritos nas Tabelas 6.1 e 6.2 para os motores medidos A e B respectivamente.

ENSAIOS					
Motor A					
ROTOR BLOQUEADO					
Corrente (A)		Tensão (V)		Potência (W)	
Fases					
S	R	RT	ST	Trifásica	
6,72	6,63	34,86	35,40	302,07	
3,85		35,13			
VAZIO					
Corrente (A)		Tensão (V)		Potência (W)	Velocidade (rpm)
Fases					
S	R	RT	ST	Trifásica	
5,12	5,02	220,47	219,15	237,110	1.796,60
2,93		219,81			
RESISTÊNCIA					
Fase R	Fase S	Fase T			
Terminais do Motor					
1 e 6	3 e 5	2 e 4			
3,95	3,86	3,87			
3,89					

Tabela 6.1 – Ensaios em Vazio e Rotor Bloqueado para o Motor A

ENSAIOS					
Motor B					
ROTOR BLOQUEADO					
Corrente (A)		Tensão (V)		Potência (W)	
Fases					
S	R	RT	ST	Trifásica	
6,55	6,55	41,64	41,64	301,24	
3,78		41,64			
VAZIO					
Corrente (A)		Tensão (V)		Potência (W)	Velocidade (rpm)
Fases					
S	R	RT	ST	Trifásica	
3,48	3,48	221,70	221,70	169,670	1.798,00
2,01		221,70			
RESISTÊNCIA					
Fase R	Fase S	Fase T			
Terminais do Motor					
1 e 6	3 e 5	2 e 4			
4,23	4,23	4,23			
4,23					

Tabela 6.2 – Ensaios em Vazio e Rotor Bloqueado para o Motor B

A partir dos valores de corrente, tensão, potência e velocidade obtidos através dos ensaios em vazio e rotor bloqueado, além dos valores das resistências por fase medidas com a aplicação de corrente contínua nos terminais dos motores, foi calculado o circuito equivalente de cada motor, de acordo com o modelo descrito no Capítulo 2, Figura 2.8, e o circuito de Thevenin, Equações 2.17, 2.18 e 2.19.

CIRCUITO EQUIVALENTE	
Motor A	
R_1	3,89
Resistência em Vazio	9,22
Impedância em Vazio	75,09
Reatância em Vazio	74,52
Resistência com Rotor Bloqueado	6,78
R	2,89
Impedância com Rotor Bloqueado	9,12
Reatância com Rotor Bloqueado	6,09
X_1	3,05
X_2	3,05
X_m	71,48
R_2	3,14
CIRCUITO EQUIVALENTE DE THEVENIN	
R_{TH}	3,58
X_{TH}	3,05
V_{TH}/V	0,9578

Tabela 6.3 – Circuitos Equivalentes para o Motor A

CIRCUITO EQUIVALENTE	
Motor B	
R_1	4,23
Resistência em Vazio	14,00
Impedância em Vazio	110,30
Reatância em Vazio	109,41
Resistência com Rotor Bloqueado	7,03
R	2,80
Impedância com Rotor Bloqueado	11,02
Reatância com Rotor Bloqueado	8,48
X_1	4,24
X_2	4,24
X_m	105,17
R_2	3,03
CIRCUITO EQUIVALENTE DE THEVENIN	
R_{TH}	3,91
X_{TH}	4,24
V_{TH}/V	0,9605

Tabela 6.4 – Circuitos Equivalentes para o Motor B

O fabricante destes motores fornece em seu catálogo as seguintes informações para a ligação em delta utilizada em 220V: corrente nominal 6,5 A, corrente em vazio 5,0 A, fator de potência nominal 0,78, torque nominal 8,17 Nm, rendimento nominal 78%.

A partir do circuito equivalente descrito na tabela 6.3, as seguintes características são atribuídas ao motor A para as condições de velocidade e tensões nominais: torque 8,42 Nm, fator de potência 0,68, corrente 6,81 A e rendimento 78 %. Já a partir do circuito equivalente descrito na Tabela 6.4, as seguintes características são atribuídas ao motor B para as condições de velocidade e tensões nominais: torque 8,71 Nm, fator de potência 0,81, corrente 7,27 A e rendimento 65 %. Comparando-se os dados do fabricante com os dados obtidos a partir do modelo

do circuito equivalente observa-se que os mesmos estão bem próximos, indicando uma boa representatividade dos circuitos equivalentes.

Utilizando o Método do Circuito Equivalente descrito no Capítulo 5, foi calculado o rendimento para diversas condições de funcionamento dos motores, ou seja diferentes níveis de carregamento de corrente [i.e., relação I/I_N] e tensão de alimentação. As tensões de referência mostradas nas tabelas são as tensões da rede sem a presença do motor de indução.

MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE										
Motor A										
Potência Mecânica Nominal (W) 1470										
Tensão Nominal (V) 220										
Corrente Nominal (A) 6,5										
Corrente (A)	Tensão (V)	Potência Elétrica Entrada Medida (W)	Velocidade (rpm)	V_{TH} (v)	S	Torque Eletromagnético	Potência Mec Desenvolvida	Perdas Rotacionais	Potência Mecânica de Saída	Rendimento (%)
Tensão 205 V de referência										
5,45	202,70	1.223,10	1.745,50	194,15	0,0303	5,3916	985,49	136,66	848,83	69,40
5,93	202,60	1.462,71	1.731,80	194,05	0,0379	6,6169	1.199,97	136,66	1.063,31	72,69
6,53	202,40	1.757,00	1.714,80	193,86	0,0473	8,0610	1.447,49	136,66	1.310,83	74,61
7,60	201,80	2.204,00	1.684,10	193,29	0,0644	10,4470	1.842,37	136,66	1.705,71	77,39
Tensão 220 V de referência										
5,45	217,95	969,41	1.769,30	208,75	0,0171	3,6238	671,41	136,66	534,75	55,16
6,09	217,15	1.441,95	1.745,50	207,99	0,0303	6,1877	1.131,00	136,66	994,34	68,96
6,50	216,70	1.675,00	1.735,20	207,56	0,0360	7,2258	1.312,95	136,66	1.176,29	70,23
7,53	216,10	2.220,45	1.704,50	206,98	0,0531	10,1551	1.812,58	136,66	1.675,92	75,48
Tensão 235 V de referência										
5,70	234,80	439,20	1.793,00	224,89	0,0039	0,9889	185,67	136,66	49,01	11,16
6,02	231,70	1.170,60	1.762,50	221,92	0,0208	4,9581	915,08	136,66	778,42	66,50
6,48	230,84	1.594,90	1.745,50	221,10	0,0303	6,9924	1.278,10	136,66	1.141,44	71,57
7,49	229,87	2.210,08	1.714,80	220,17	0,0473	10,3976	1.867,07	136,66	1.730,41	78,30

Tabela 6.5 – Rendimento do Motor de Indução Trifásico A Utilizando o Método do Circuito Equivalente

MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE										
Motor B										
Potência Mecânica Nominal (W)		1470								
Tensão Nominal (V)		220								
Corrente Nominal (A)		6,5								
Corrente (A)	Tensão (V)	Potência Elétrica Entrada Medida (W)	Velocidade (rpm)	V_{TH} (v)	S	Torque Eletromagnético	Potência Mec Desenvolvida	Perdas Rotacionais	Potência Mecânica de Saída	Rendimento (%)
Tensão 205 V de referência										
3,85	203,61	918,91	1.765,90	195,57	0,0189	3,6194	669,30	118,36	550,94	59,96
4,58	202,92	1.250,22	1.752,30	194,91	0,0265	4,9222	903,19	118,36	784,83	62,78
6,52	202,45	2.039,73	1.704,50	194,46	0,0531	9,0618	1.617,43	118,36	1.499,07	73,49
7,45	201,70	2.330,01	1.687,50	193,74	0,0625	10,2886	1.818,08	118,36	1.699,72	72,95
Tensão 220 V de referência										
3,85	219,12	825,15	1.772,70	210,47	0,0152	3,3913	629,54	118,36	511,18	61,95
4,58	218,28	1.245,56	1.755,70	209,66	0,0246	5,3182	977,76	118,36	859,40	69,00
6,48	217,22	2.060,46	1.718,20	208,64	0,0454	9,1462	1.645,62	118,36	1.527,26	74,12
7,62	216,36	2.517,00	1.690,90	207,82	0,0606	11,5490	2.044,93	118,36	1.926,57	76,54
Tensão 235 V de referência										
4,00	234,79	386,97	1.793,20	225,52	0,0038	1,0001	187,79	118,36	69,43	17,94
5,03	230,25	1.428,94	1.752,30	221,16	0,0265	6,3373	1.162,87	118,36	1.044,51	73,10
6,38	229,23	2.076,60	1.725,00	220,18	0,0417	9,4458	1.706,26	118,36	1.587,90	76,47
7,64	228,16	2.446,88	1.708,00	219,15	0,0511	11,1543	1.995,01	118,36	1.876,65	76,70

Tabela 6.6 – Rendimento do Motor de Indução Trifásico B Utilizando o Método do Circuito Equivalente

6.3.2- Métodos Alternativos Avaliados em Laboratório

6.3.2.1- Método da Corrente

No Método da Corrente o carregamento é calculado a partir das correntes medidas e nominal a plena carga. Multiplicando-se o carregamento pela potência mecânica nominal obtém-se a potência mecânica de saída do eixo Equação 5.4 e conhecendo-se a potência elétrica medida calcula-se o rendimento Equação 4.1. O rendimento foi calculado utilizando-se este Método, para diversas condições de carregamento e tensão de alimentação dos motores A e B obtendo-se os resultados descritos nas Tabelas 6.7 e 6.8.

Com o objetivo de melhorar a exatidão deste Método foi adotado um fator de correção utilizando a corrente Equação 5.11. A utilização do fator de correção alterou sensivelmente a exatidão deste Método como será discutido no item 6.4.

MÉTODO DA CORRENTE

Motor A

Potência Mecânica Nominal (W)	1.470,00					
Potência Elétrica Nominal (W)	1.981,00					
Tensão Nominal (V)	220,00					
Corrente Nominal (A)	6,50					
Corrente em Vazio (A)	5,07					
						Rendimento
Corrente (A)	Tensão (V)	Carregamento (%)	Potência Mecânica Saída (W)	Potência Elétrica Entrada Medida (W)	Rendimento (%)	FC Corrente (%)
Tensão 205 V de referência						
5,45	202,70	83,85	1.232,54	1.223,10	100,77	31,94
5,93	202,60	91,23	1.341,09	1.462,71	91,69	60,44
6,53	202,40	100,46	1.476,78	1.757,00	84,05	85,42
7,60	201,80	116,92	1.718,77	2.204,00	77,98	118,00
Tensão 220 V de referência						
5,45	217,95	83,85	1.232,54	969,41	127,14	40,30
6,09	217,15	93,69	1.377,28	1.441,95	95,51	72,72
6,50	216,70	100,00	1.470,00	1.675,00	87,76	87,76
7,53	216,10	115,85	1.702,94	2.220,45	76,69	113,89
Tensão 235 V de referência						
5,70	234,80	87,69	1.289,08	439,20	293,51	147,46
6,02	231,70	92,62	1.361,45	1.170,60	116,30	83,43
6,48	230,84	99,69	1.465,48	1.594,90	91,89	90,88
7,49	229,87	115,23	1.693,89	2.210,08	76,64	112,56

Tabela 6.7 – Rendimento do Motor de Indução Trifásico A
Utilizando o Método da Corrente

MÉTODO DA CORRENTE						
Motor B						
Potência Mecânica Nominal (W)			1.470,00			
Tensão Nominal (V)			220,00			
Corrente Nominal (A)			6,50			
Corrente em Vazio (A)			3,48			
						Rendimento
Corrente (A)	Tensão (V)	Carregamento (%)	Potência Mecânica Saída (W)	Potência Elétrica Entrada Medida (W)	Rendimento (%)	FC Corrente (%)
Tensão 205 V de referência						
3,85	203,61	59,23	870,69	918,91	94,75	19,53
4,58	202,92	70,46	1.035,78	1.250,22	82,85	42,79
6,52	202,45	100,28	1.474,07	2.039,73	72,27	72,50
7,45	201,70	114,62	1.684,85	2.330,01	72,31	82,95
Tensão 220 V de referência						
3,85	219,12	59,23	870,69	825,15	105,52	21,75
4,58	218,28	70,46	1.035,78	1.245,56	83,16	42,95
6,48	217,22	99,69	1.465,48	2.060,46	71,12	70,87
7,62	216,36	117,23	1.723,29	2.517,00	68,47	80,07
Tensão 235 V de referência						
4,00	234,79	61,54	904,62	386,97	233,77	65,26
5,03	230,25	77,43	1.138,23	1.428,94	79,66	52,88
6,38	229,23	98,15	1.442,86	2.076,60	69,48	67,97
7,64	228,16	117,54	1.727,82	2.446,88	70,61	82,77

Tabela 6.8 – Rendimento do Motor de Indução Trifásico B Utilizando o Método da Corrente

6.3.2.2- Método do Escorregamento

No Método do Escorregamento o carregamento é calculado a partir das velocidades síncrona, nominal e de trabalho da máquina Equação 5.7. Multiplicando-se o carregamento pela potência mecânica nominal obtém-se a potência mecânica de saída do eixo Equação 5.8 e conhecendo-se a potência elétrica medida calcula-se o rendimento Equação 4.1.

Com o objetivo de melhorar a exatidão deste Método é possível aplicar um fator de correção de tensão Equação 5.9. Os valores de rendimento calculados utilizando esta metodologia estão descritos nas Tabelas 6.10 e 6.11.

A velocidade de trabalho da máquina foi obtida através da medição direta utilizando um tacômetro digital e através de medição indireta utilizando o método da análise espectral de harmônicos, descrito no Capítulo 5, implementado no sistema para avaliação de rendimento desenvolvido pela equipe do departamento de engenharia elétrica da UFBA obtendo os resultados descritos na Tabela 6.9.

Velocidade (rpm)			
Tacômetro	Medição Indireta	Erro	Variância
1.793,00	1.793,18	-0,18	0,03
1.789,00	1.789,77	-0,77	0,59
1.788,00	1.786,36	1,64	2,69
1.780,00	1.779,54	0,46	0,21
1.772,00	1.772,77	-0,77	0,59
1.763,00	1.762,54	0,46	0,21
1.752,00	1.752,27	-0,27	0,07
1.742,00	1.742,05	-0,05	0,00
1.733,00	1.731,82	1,18	1,39
1.725,00	1.725,00	0,00	0,00
1.718,00	1.718,18	-0,18	0,03

Tabela 6.9 – Velocidade de saída no eixo

Os resultados obtidos através da medição indireta utilizando o método da análise espectral de harmônicos foram excelentes, sendo utilizados para o cálculo do rendimento através do Método do Escorregamento.

MÉTODO DO ESCORREGAMENTO

Motor A

Potência Mecânica Nominal (W)	1.470
Potência Elétrica Nominal (W)	1.981
Tensão Nominal (V)	220
Escorregamento Nominal	0,0417
Velocidade Nominal (rpm)	1.725
Velocidade Síncrona (rpm)	1.800
	Rendimento

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (rpm)	S	Carregamento (%)	Potência Mecânica Saída (W)	Potência Elétrica Entrada Medida (W)	Rendimento (%)	FC Tensão (%)
Tensão 205 V de referência								
5,45	202,70	1.745,50	0,0303	73,53	1.080,89	1.223,10	88,3734	75,0211
5,93	202,60	1.731,80	0,0379	91,29	1.341,99	1.462,71	91,7468	77,8080
6,53	202,40	1.714,80	0,0473	112,93	1.660,05	1.757,00	94,4818	79,9694
7,60	201,80	1.684,10	0,0644	150,87	2.217,78	2.204,00	100,6252	84,6649
Tensão 220 V de referência								
5,45	217,95	1.769,30	0,0171	41,98	617,17	969,41	63,6648	62,4838
6,09	217,15	1.745,50	0,0303	73,53	1.080,89	1.441,95	74,9606	73,0310
6,50	216,70	1.735,20	0,0360	86,91	1.277,59	1.675,00	76,2740	74,0030
7,53	216,10	1.704,50	0,0531	125,82	1.849,56	2.220,45	83,2964	80,3694
Tensão 235 V de referência								
5,70	234,80	1.793,00	0,0039	9,70	142,61	439,20	32,4701	36,9857
6,02	231,70	1.762,50	0,0208	51,09	750,98	1.170,60	64,1533	71,1583
6,48	230,84	1.745,50	0,0303	73,53	1.080,89	1.594,90	67,7719	74,6151
7,49	229,87	1.714,80	0,0473	112,93	1.660,05	2.210,08	75,1125	82,0033

**Tabela 6.10 – Rendimento do Motor de Indução Trifásico A
Utilizando o Método do Escorregamento**

MÉTODO DO ESCORREGAMENTO

Motor B

Potência Mecânica Nominal (W)	1.470
Tensão Nominal (V)	220
Escorregamento Nominal	0,0417
Velocidade Nominal (rpm)	1.725
Velocidade Síncrona (rpm)	1.800

Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (rpm)	S	Carregamento (%)	Potência Mecânica Saída (W)	Potência Elétrica Entrada Medida (W)	Rendimento (%)	FC Tensão (%)
Tensão 205 V de referência								
3,85	203,61	1.765,90	0,0189	46,54	684,21	918,91	74,4585	63,7775
4,58	202,92	1.752,30	0,0265	64,61	949,72	1.250,22	75,9639	64,6267
6,52	202,45	1.704,50	0,0531	125,82	1.849,56	2.039,73	90,6765	76,7865
7,45	201,70	1.687,50	0,0625	146,74	2.157,07	2.330,01	92,5775	77,8165
Tensão 220 V de referência								
3,85	219,12	1.772,70	0,0152	37,41	549,88	825,15	66,6395	66,1075
4,58	218,28	1.755,70	0,0246	60,12	883,73	1.245,56	70,9506	69,8456
6,48	217,22	1.718,20	0,0454	108,64	1.596,96	2.060,46	77,5050	75,5586
7,62	216,36	1.690,90	0,0606	142,59	2.096,09	2.517,00	83,2773	80,5443
Tensão 235 V de referência								
4,00	234,79	1.793,20	0,0038	9,43	138,55	386,97	35,8037	40,7794
5,03	230,25	1.752,30	0,0265	64,61	949,72	1.428,94	66,4630	72,8004
6,38	229,23	1.725,00	0,0417	100,00	1.470,00	2.076,60	70,7888	76,8532
7,64	228,16	1.708,00	0,0511	121,46	1.785,43	2.446,88	72,9676	78,4808

**Tabela 6.11 – Rendimento do Motor de Indução Trifásico B
Utilizando o Método do Escorregamento**

6.4- Avaliação da Exatidão dos Métodos

6.4.1- Método da Corrente

Para o motor A, Tabela 6.12, o Método da Corrente com fator de correção apresentou resultados para o rendimento mais próximos dos obtidos através do Método do Circuito Equivalente, ou seja com menor variância, 403,52 e 5.102,73, para a condição de alimentação na tensão nominal e acima desta respectivamente.

Já para o motor B, Tabela 6.13, o fator de correção de corrente só apresentou menor variância quando para tensões de alimentação acima da nominal, 689,28. Na tensão nominal, os Métodos da Corrente com e sem fator de correção apresentaram variâncias muito próximas, ou seja 463,53 e 434,60 respectivamente.

O erro médio é predominantemente positivo, o que revela a tendência geral deste método em apresentar valores maiores que o real. No motor A, é sempre positivo tanto para o Método da Corrente sem fator de correção 60,40, 117,27 e 350,81 quanto para o Método da Corrente com fator de correção 1,71, 44,84 e 206,80.

Já no motor B, o erro médio é sempre positivo para o Método da Corrente sem fator de correção 53,00, 46,66 e 209,31 e para o Método com fator de correção só é positivo para tensões de alimentação acima da nominal 24,67. Este comportamento pode ser mais bem observado através dos gráficos das Figuras 6.2 e 6.3.

COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Motor A

Carregamento (%)	MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE	MÉTODO DA CORRENTE					
	Rendimento (%)	Rendimento (%)	Erro	Variância	Rendimento FC Corrente (%)	Erro	Variância
Tensão 205 V de referência							
83,85	69,40	100,77	31,37	984,08	31,94	-37,46	1.403,25
91,23	72,69	91,69	19,00	361,00	60,44	-12,25	150,06
100,46	74,61	84,05	9,44	89,11	85,42	10,81	116,86
116,92	77,39	77,98	0,59	0,35	118,00	40,61	1.649,17
Total / Média			60,40	358,63		1,71	829,84
Tensão 220 V de referência							
83,85	55,16	127,14	71,98	5.181,12	40,30	-14,86	220,82
93,69	68,96	95,51	26,55	704,90	72,72	3,76	14,14
100,00	70,23	87,76	17,53	307,30	87,76	17,53	307,30
115,85	75,48	76,69	1,21	1,46	113,89	38,41	1.475,33
Total / Média			117,27	1.238,96		44,84	403,52
Tensão 235 V de referência							
87,69	11,16	293,51	282,35	79.721,52	147,46	136,30	18.577,69
92,62	66,50	116,30	49,80	2.480,04	83,43	16,93	286,62
99,69	71,57	91,89	20,32	412,90	90,88	19,31	372,88
115,23	78,30	76,64	-1,66	2,76	112,56	34,26	1.173,75
Total			350,81	16.523,44		206,80	5.102,73

Tabela 6.12 – Avaliação do Método da Corrente Para Motor de Indução Trifásico A

COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Motor B

Carregamento (%)	MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE	MÉTODO DA CORRENTE					
	Rendimento (%)	Rendimento (%)	Erro	Variância	Rendimento FC Corrente (%)	Erro	Variância
Tensão 205 V de referência							
83,85	59,96	94,75	34,79	1.210,34	19,53	-40,43	1.634,58
91,23	62,78	82,85	20,07	402,80	42,79	-19,99	399,60
100,46	73,49	72,27	-1,22	1,49	72,50	-0,99	0,98
116,92	72,95	72,31	-0,64	0,41	82,95	10,00	100,00
Total / Média			53,00	403,76		-51,41	533,79
Tensão 220 V de referência							
83,85	61,95	105,52	43,57	1.898,34	21,75	-40,20	1.616,04
93,69	69,00	83,16	14,16	200,51	42,95	-26,05	678,60
100,00	74,12	71,12	-3,00	9,00	70,87	-3,25	10,56
115,85	76,54	68,47	-8,07	65,12	80,07	3,53	12,46
Total / Média			46,66	434,60		-65,97	463,53
Tensão 235 V de referência							
87,69	17,94	233,77	215,83	46.582,59	65,26	47,32	2.239,18
92,62	73,10	79,66	6,56	43,03	52,88	-20,22	408,85
99,69	76,47	69,48	-6,99	48,86	67,97	-8,50	72,25
115,23	76,70	70,61	-6,09	37,09	82,77	6,07	36,84
Total			209,31	11.677,89		24,67	689,28

Tabela 6.13 – Avaliação do Método da Corrente Para Motor de Indução Trifásico B

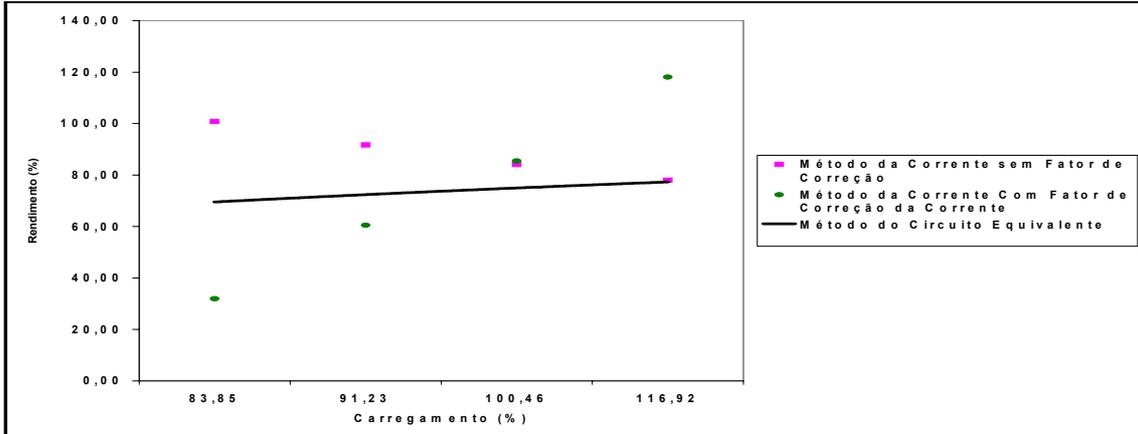


Figura 6.2 a – Tensão de alimentação 205 V

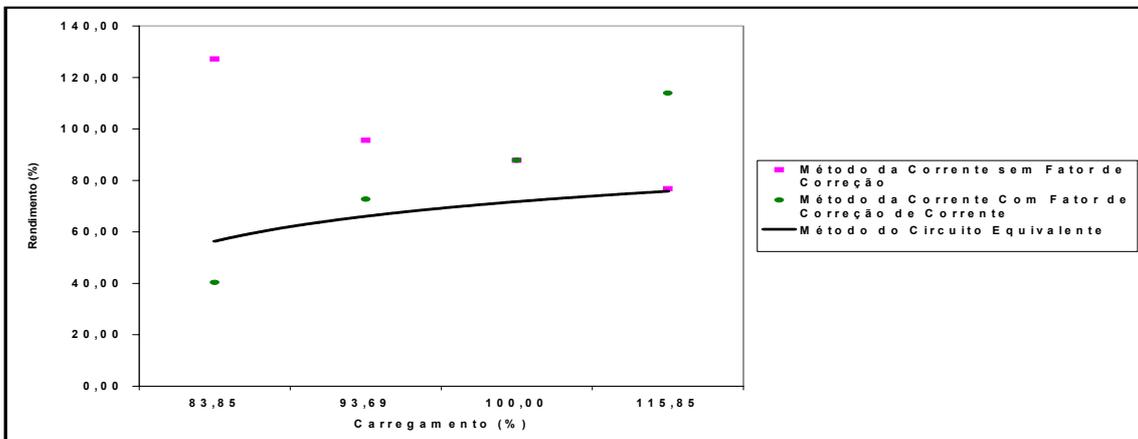


Figura 6.2b – Tensão de alimentação 220 V

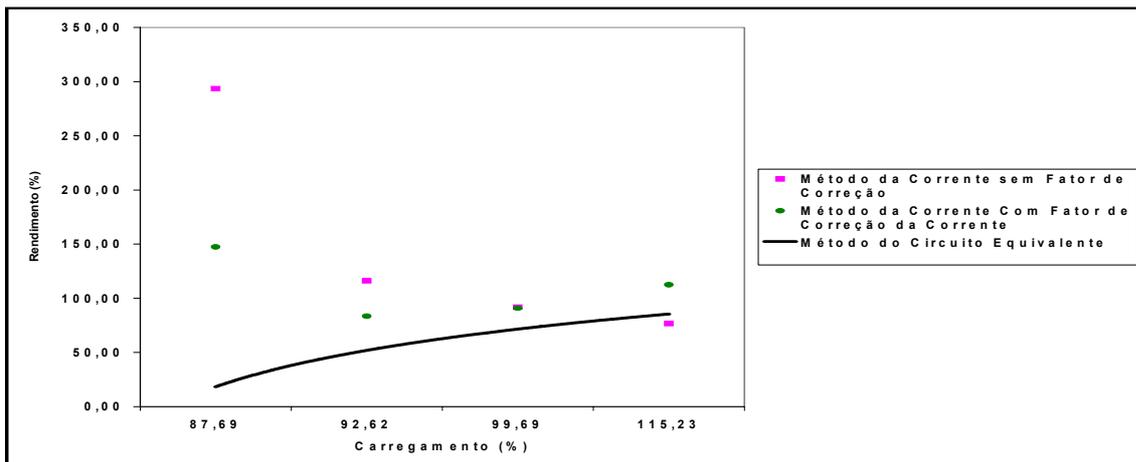


Figura 6.2c – Tensão de alimentação 235 V

Figura 6.2 – Curvas Carregamento x Rendimento Utilizando o Método da Corrente Para o Motor A

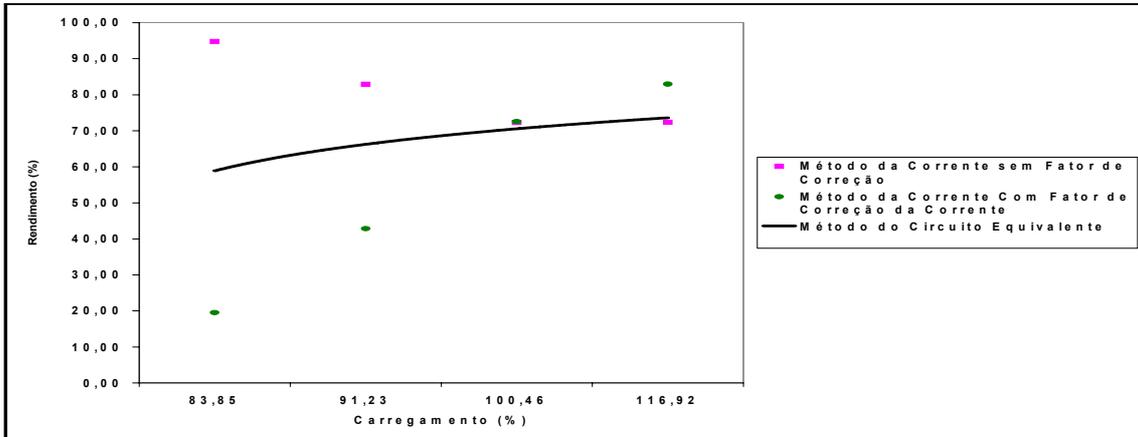


Figura 6.3 a – Tensão de alimentação 205 V

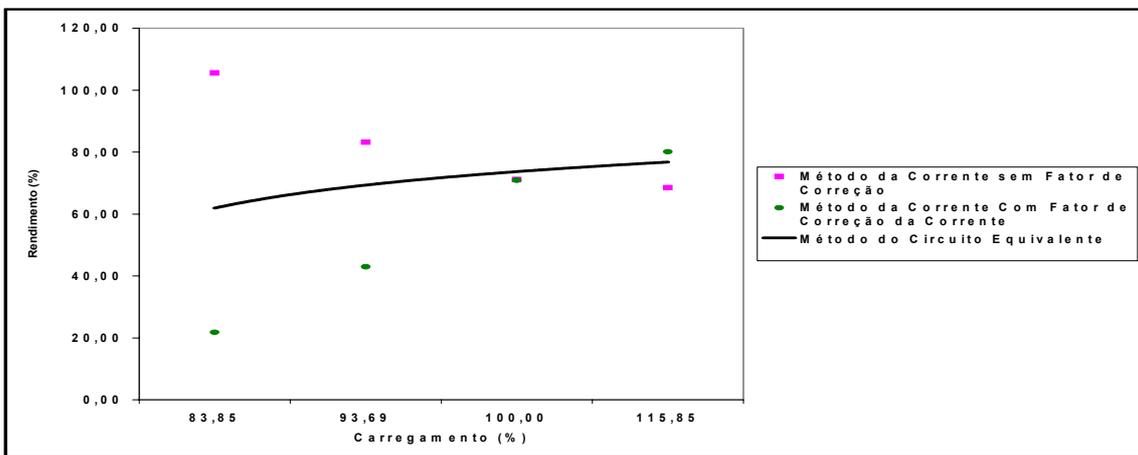


Figura 6.3b – Tensão de alimentação 220 V

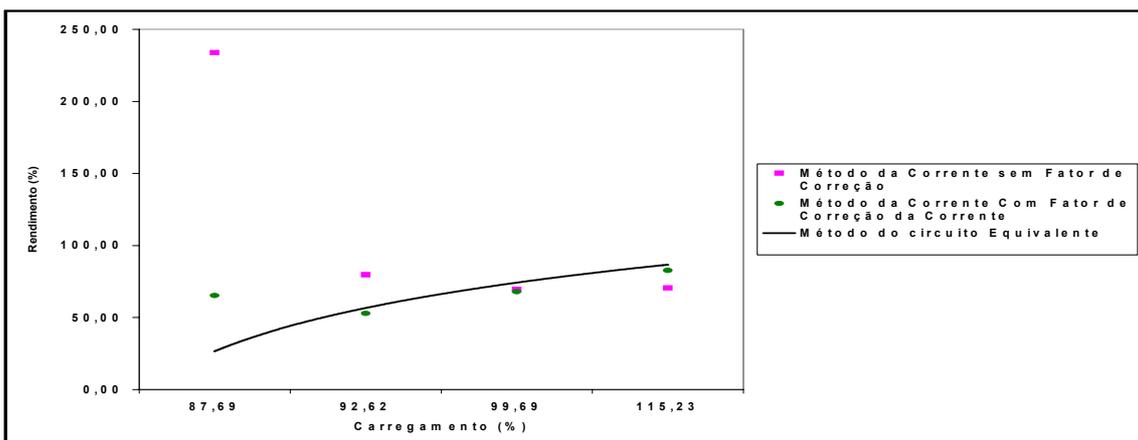


Figura 6.3c – Tensão de alimentação 235 V

Figura 6.3 – Curvas Carregamento x Rendimento Utilizando o Método da Corrente Para o Motor B

6.4.2- Método do Escorregamento

Quando os motores foram alimentados na tensão nominal 220 V ou abaixo dela 205 V, o Método do Escorregamento com o fator de correção da tensão apresentou resultados para o rendimento com menor variância, 34,85 e 21,65 no motor A e 13,16 e 7,22 no motor B. Ou seja, mais próximos dos obtidos utilizando o Método do Circuito Equivalente Tabelas 6.14 e 6.15. Quando sujeito a uma tensão de alimentação acima da nominal, o Método do Escorregamento sem fator de correção da tensão apresentou resultados mais precisos, 121,06 para o motor A e 131,27 para o motor B.

O erro médio é sempre positivo tanto para o método sem fator de correção 81,51, 28,36 e 11,97 no motor A; 64,50, 16,77 e 1,81 no motor; quanto para o método com fator de correção 23,37, 20,05 e 37,24 no motor A e 13,84, 10,45 e 24,70 no motor B. Este comportamento do erro médio revela a tendência geral deste método em apresentar valores maiores que o real, como pode ser melhor observado através dos gráficos das Figuras 6.4 e 6.5.

COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Motor A

Carregamento (%)	MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE	MÉTODO DA ESCORREGAMENTO					
	Rendimento (%)	Rendimento (%)	Erro	Variância	Rendimento FC Tensão (%)	Erro	Variância
Tensão 205 V de referência							
83,85	69,40	88,37	18,97	359,86	75,02	5,62	31,58
91,23	72,69	91,75	19,06	363,28	77,81	5,12	26,21
100,46	74,61	94,48	19,87	394,82	79,97	5,36	28,73
116,92	77,39	101,00	23,61	557,43	84,66	7,27	52,85
Total / Média			81,51	418,85		23,37	34,85
Tensão 220 V de referência							
83,85	55,16	63,66	8,50	72,25	62,48	7,32	53,58
93,69	68,96	74,96	6,00	36,00	73,03	4,07	16,56
100,00	70,23	76,27	6,04	36,48	74,00	3,77	14,21
115,85	75,48	83,30	7,82	61,15	80,37	4,89	23,91
Total / Média			28,36	41,18		20,05	21,65
Tensão 235 V de referência							
87,69	11,16	32,47	21,31	454,12	36,99	25,83	667,19
92,62	66,50	64,15	-2,35	5,52	71,16	4,66	21,72
99,69	71,57	67,77	-3,80	14,44	74,62	3,05	9,30
115,23	78,30	75,11	-3,19	10,18	82,00	3,70	13,69
Total			11,97	121,06		37,24	177,97

Tabela 6.14 – Avaliação do Método da Corrente Para Motor de Indução Trifásico A

COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Motor B

Carregamento (%)	MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE Rendimento (%)	MÉTODO DO ESCORREGAMENTO					
		Rendimento (%)	Erro	Variância	Rendimento FC Tensão (%)	Erro	Variância
Tensão 205 V de referência							
83,85	59,96	74,46	14,50	210,25	63,78	3,82	14,59
91,23	62,78	75,96	13,18	173,71	64,63	1,85	3,42
100,46	73,49	90,68	17,19	295,50	76,79	3,30	10,89
116,92	72,95	92,58	19,63	385,34	77,82	4,87	23,72
Total / Média			64,50	266,20		13,84	13,16
Tensão 220 V de referência							
83,85	61,95	66,64	4,69	22,00	66,11	4,16	17,31
93,69	69,00	70,95	1,95	3,80	69,85	0,85	0,72
100,00	74,12	77,51	3,39	11,49	75,56	1,44	2,07
115,85	76,54	83,28	6,74	45,43	80,54	4,00	16,00
Total / Média			16,77	16,54		10,45	7,22
Tensão 235 V de referência							
87,69	17,94	35,80	17,86	318,98	40,78	22,84	521,67
92,62	73,10	66,46	-6,64	44,09	72,80	-0,30	0,09
99,69	76,47	70,79	-5,68	32,26	76,85	0,38	0,14
115,23	76,70	72,97	-3,73	13,91	78,48	1,78	3,17
Total			1,81	102,31		24,70	131,27

Tabela 6.15 – Avaliação do Método da Corrente Para Motor de Indução Trifásico B

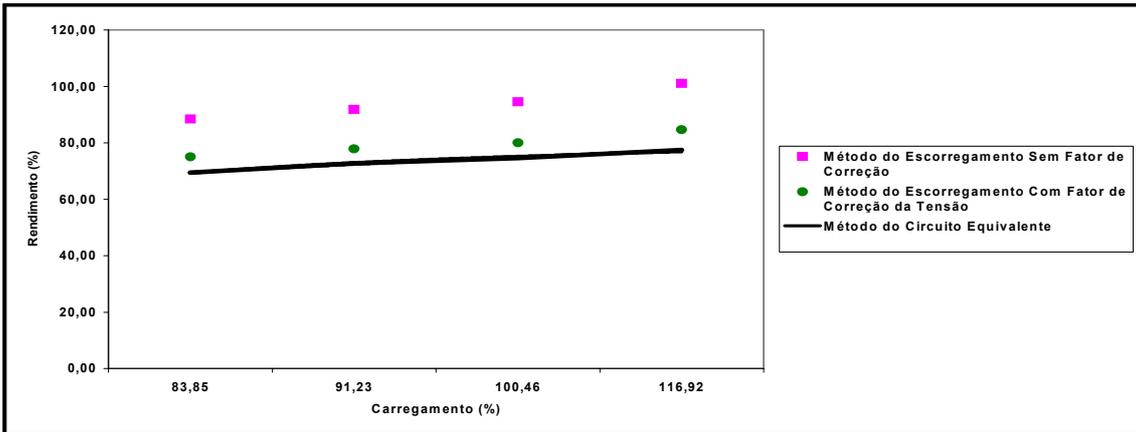


Figura 6.4a - Tensão de alimentação de 205 V

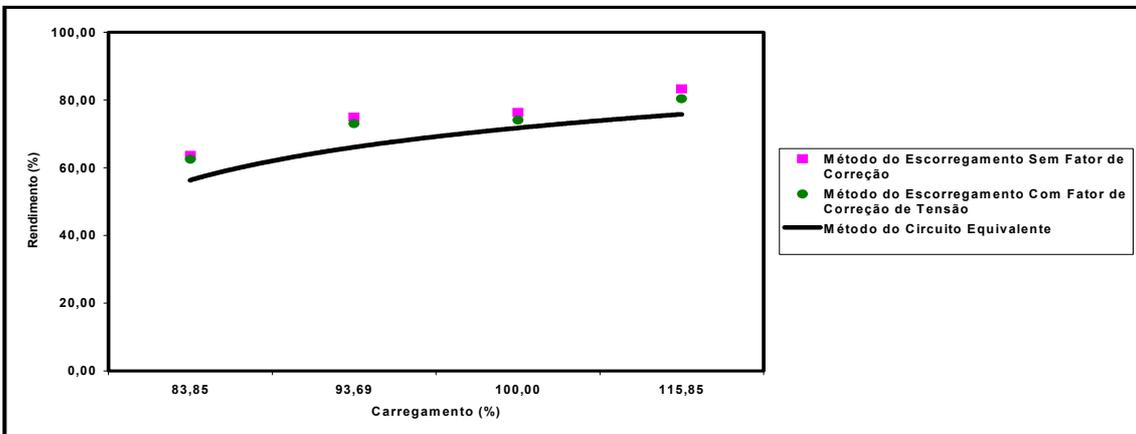


Figura 6.4b - Tensão de alimentação de 220 V

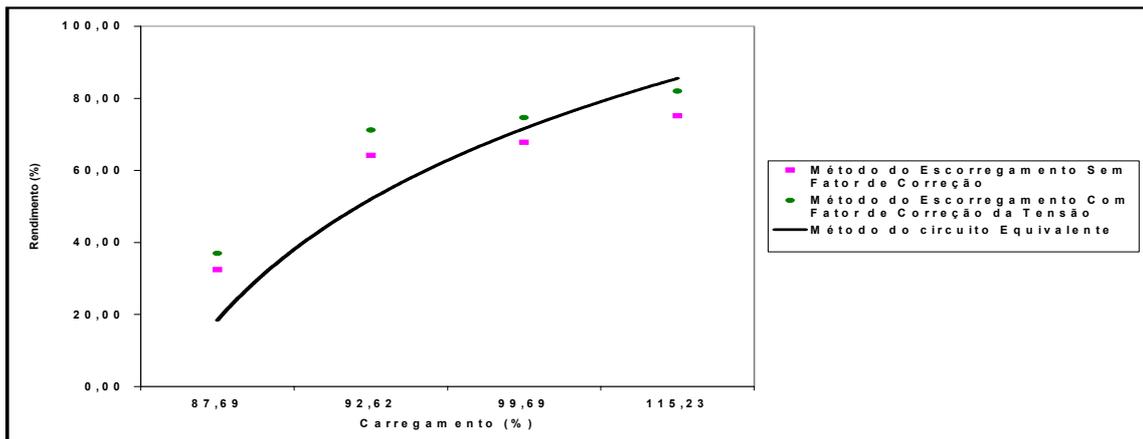


Figura 6.4c - Tensão de alimentação de 235 V

Figura 6.4 – Curva Carregamento x Rendimento Utilizando o Método do Escorregamento Para o Motor A

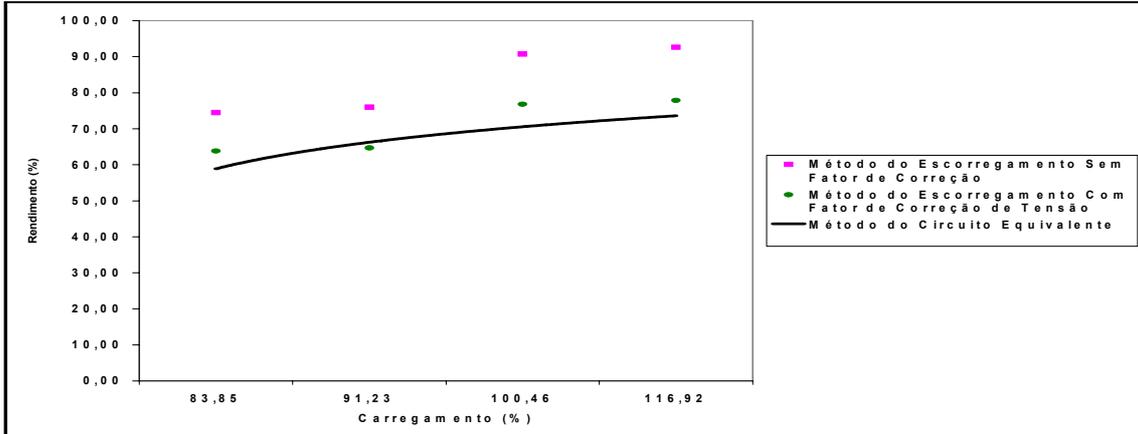


Figura 6.5a - Tensão de alimentação de 205 V

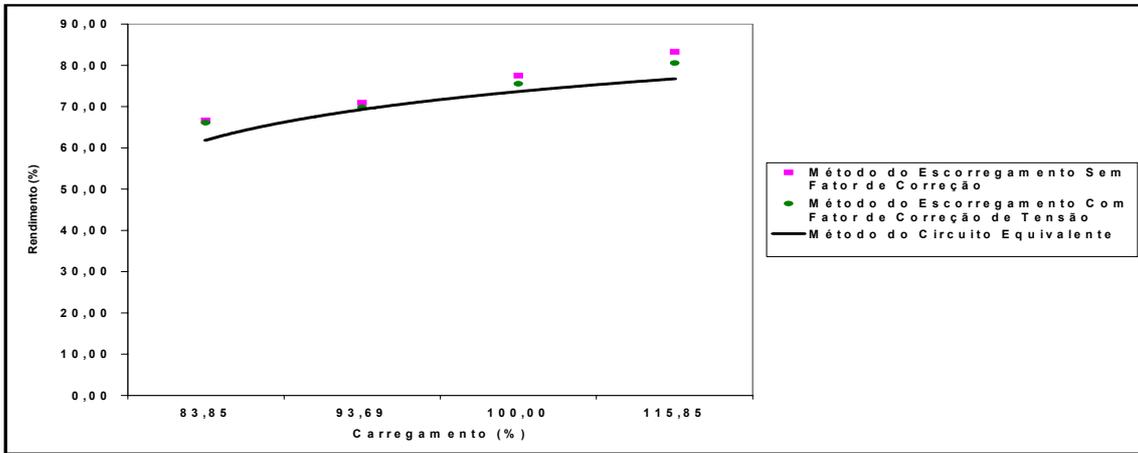


Figura 6.5b - Tensão de alimentação de 220 V

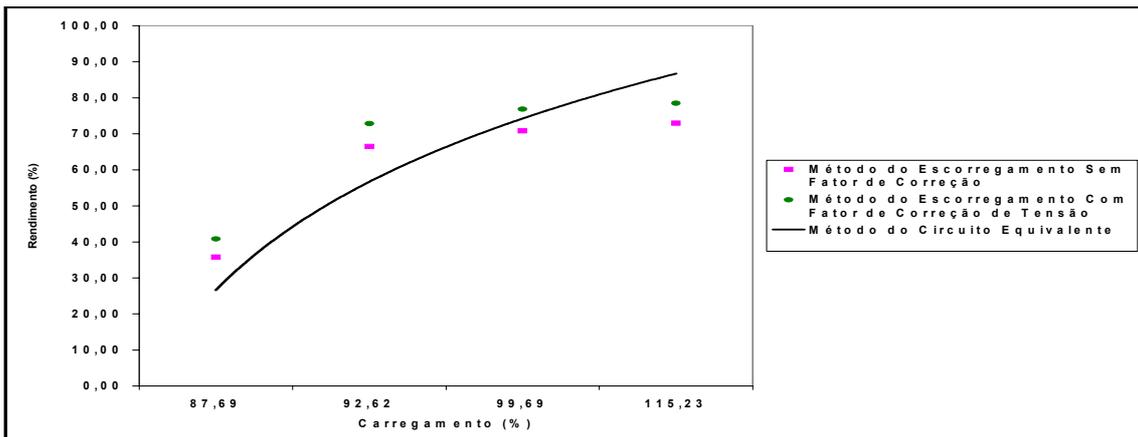


Figura 6.5c - Tensão de alimentação de 235 V

Figura 6.5 – Curva Carregamento x Rendimento Utilizando o Método do Escorregamento Para o Motor B

No Método do Escorregamento, quando aplicado o fator de correção da tensão ocorre uma pequena variação do rendimento com o carregamento e uma maior variação com o nível de tensão aplicado. Ainda assim, a falta de exatidão deste Método pode ser muito elevada, se considerada a potência elétrica nominal. Como a NEMA MG-1 seção 12.46 admite uma tolerância de 20% no erro da velocidade nominal de placa do motor, mesmo considerando a potência elétrica medida para o cálculo do rendimento, esta metodologia pode apresentar resultados muito imprecisos.

6.5- Considerações Finais

Para algumas situações de carregamento o Método da Corrente apresentou rendimento acima de 100%, o que não é possível. Esta situação ocorreu para carregamentos abaixo de 80% da nominal. Este método apresentou resultados menos precisos para carregamentos mais baixos. O Método da Corrente com fator de correção de corrente apresenta valores de rendimento maiores que 100% para condições de carregamento acima da nominal. Como a NEMA admite uma imprecisão da corrente nominal de placa do motor em até 10%, quando este está operando na tensão, frequência e potência de saída nominais, a corrente nominal de placa é, uma fonte considerável de erro para o Método da Corrente.

Todos os métodos apresentaram baixo desempenho quando os motores estavam operando em condições próximas a corrente em vazio.

Os melhores resultados foram obtidos através da aplicação do Método do Escorregamento com correção de tensão com menor erro médio e menor variância. Quando a tensão de alimentação é maior que a nominal, no entanto, o

Método do Escorregamento sem fator de correção apresentou melhores resultados para os dois motores avaliados.

Capítulo 7

Conclusão e Perspectivas Futuras

7.1- Conclusão

A realidade mundial atual é crítica e dependente de soluções para a crescente necessidade de um produto cada vez mais imprescindível, escasso e caro: energia. A busca de fontes de energia mais baratas e menos agressivas ao meio ambiente, assim como de sistemas produtivos energeticamente mais eficientes é de vital importância para garantir a continuidade de nossa civilização. A aplicação de projetos que visam eficientizar sistemas consumidores de energia existentes é cada vez mais aplicado, inclusive através de programas financiados pelo governo brasileiro, concessionárias de energia e agentes financeiros internacionais.

Projetos de eficiência energética em grandes consumidores industriais têm como um dos seus principais alvos os motores elétricos de indução que são responsáveis pelo processamento de cerca de 49 % de toda a energia elétrica consumida neste setor Guia Técnico Motor de Alto Rendimento, CEPEL, PROCEL, ELETROBRÁS [04]. O diagnóstico energético de motores, através da avaliação do rendimento e carregamento da máquina fornece subsídios para tomada de decisão quanto à manutenção e possibilidade de *retrofit* da máquina.

As dificuldades encontradas em campo e a necessidade de selecionar métodos de avaliação de rendimento e carregamento precisos que garantam uma maior confiabilidade aos estudos de viabilidade econômica destes projetos, norteou o desenvolvimento deste trabalho, que nasceu de uma proposta de construção de uma instrumentação para avaliação de rendimento em motores de indução adequada às condições normalmente oferecidas em campo.

O desenvolvimento do estudo descrito nesta dissertação selecionou metodologias de menor grau de intrusão e máxima exatidão possível que foram implementadas no equipamento.

O equipamento encontra-se em fase conclusiva de construção de protótipo, estando com a placa de aquisição de sinais montada e software dedicado para processamento de sinais testado e pronto.

7.2- Perspectivas Futuras

Devido às limitações econômicas, não foi possível testar as metodologias para avaliação de rendimento em um universo de motores mais amplo, ou seja para diversas potências e velocidades nominais. Através do estudo, foi possível verificar que as metodologias existentes não se comportam de forma uniforme para diferentes condições de carregamento, frequência e tensão de alimentação. Com o objetivo de garantir a confiabilidade na aplicação deste equipamento em um universo amplo de motores de indução, o estudo das metodologias de avaliação do rendimento pode, no futuro, ser ampliado através da aplicação dos ensaios e testes comparativos aqui descritos em uma amostragem mais diversificada de motores de indução.

É possível ampliar a aplicabilidade do equipamento desenvolvido de maneira que além de avaliar o carregamento, a velocidade e o rendimento de motores de indução, forneça um diagnóstico de estado indicando possíveis defeitos existentes ou prevendo seu o aparecimento. A detecção de condições irregulares de funcionamento do motor pode ser feito através do estudo do comportamento das harmônicas de corrente Altug[25]. O que permite um melhor planejamento para efetuar manutenções preventivas, evitando a necessidade de manutenções corretivas.

Como foi discutido no Capítulo 4, a qualidade da energia fornecida pela concessionária é de fundamental importância para o bom funcionamento do motor de indução. Uma outra ampliação possível da aplicabilidade do equipamento consiste na avaliação da qualidade de energia fornecida pela concessionária, verificando a amplitude e a frequência das tensões da rede elétrica.

O Método do Escorregamento para avaliação do rendimento em motores de indução implementado no equipamento pressupõe o cálculo da velocidade através do método de medição indireta de velocidade utilizando a análise espectral de harmônicos. A aplicabilidade das metodologias implementadas para motores acionados por conversores de frequência só é verdadeira se a frequência fundamental for calculada previamente, como foi discutido no Capítulo 5. Uma possibilidade de melhoria do equipamento, possibilitando sua utilização em motores com velocidade variável, consiste portanto em implementar a determinação da frequência fundamental.

O método da análise espectral de harmônicos para o cálculo da velocidade necessita que o número de ranhuras do rotor seja previamente fornecido Capítulo 5. Como o número de ranhuras de um motor de indução não é um dado de placa nem de catálogo, é possível diminuir o grau de intrusão da metodologia utilizada implementando-se seu cálculo através do método utilizado por Hurst[21].

Ainda considerando o fato das metodologias apresentarem resultados mais ou menos precisos dependendo das condições operacionais do motor, a metodologia para avaliação de rendimento em motores de indução utilizada pelo equipamento pode ser resultado da combinação de diferentes metodologias dependendo de sua adequação às condições do sistema avaliado, podendo, inclusive utilizar metodologias mais intrusivas e precisas desde que sejam factíveis nas condições oferecidas em campo. Uma possibilidade de aprimoramento e continuidade deste trabalho consiste em desenvolver uma metodologia de avaliação de rendimento para a instrumentação através da combinação de vários métodos utilizando lógica nebulosa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- 01-** Anderson M. Santana, A.C.C. Lima, A.L. Aguiar, "Estimação de Velocidade de Motores de Indução Trifásicos", Universidade Federal da Bahia, Eletricidade Moderna, março de 2000.
- 02-** George A. Soares, Omar A. Kristoschek Filho, CEPEL e Ronaldo de Paula Tabosa, Eletrobrás/PROCEL, "Eficiência Energética em Motores: Impactos no Setor e Análise de Mercado", Eletricidade Moderna, pp 138-156, abril de 2000.
- 03-** Benedito Carraro, secretário de energia, Brasil, "O Setor Energético do Brasil no Mercosul", Seminário Portugal – Brasil Sobre Energia, Março de 2000.
- 04-** ELETROBRÁS, PROCEL & CEPEL, "Guia Técnico Motor de Alto Rendimento", agosto de 1998.
- 05-** John S. Hsu, John D. Kueck, Mitchell Olszewski, Don A. Casada, Pedro J. Otaduy and Leon M. Tolbert, "Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods", Transactions on Industry Applications, vol.34, nº 1, pp 117-125, January/February 1998.
- 06-** ELETROBRAS, Comitê Técnico Para Estudos de Mercado, "Mercado de Energia Elétrica Brasileiro, Relatório Analítico, Ciclo 2000", Maio de 2001.
- 07-** Richard L. Nailen, "Can Field Tests Prove Motor Efficiency?", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, nº 3, pp 391-396, may/june 1989.

- 08-** ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7094, "Máquinas Elétricas Girantes – Motores de Indução – Especificação", novembro de 1996.
- 09-** ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5383, "Máquinas Elétricas Girantes – Máquinas de Indução Determinação das Características", novembro de 1982.
- 10-** Irving I. Kosow, "Máquinas Elétricas e Transformadores", Editora Globo, 1972
- 11-** A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, Alexander Kusko, "Máquinas Elétricas", Editora Mcgraw-Hill do Brasil, LTDA, 1975
- 12-** Vicent Del Toro, "Fundamentos de Máquinas Elétricas", Editora Prentice Hall do Brasil Ltda, 1994
- 13-** A. G. Pinto Garcia, "Avaliação de Motores Elétricos e Análise da Viabilidade de Uso de Unidades de Alto Rendimento", Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow, da Fonseca, Curso de Pós-graduação Latu-senso para Formação de Consultores no Uso Eficiente de Energia, RJ, 2000.
- 14-** IEEE, "Std,112, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators", 1984.
- 15-** William D. Stevenson, "Elementos de Análise de Sistemas de Potência", Editora Mcgraw-Hill do Brasil, 1974.
- 16-** Alfonso Martignoni, "Máquinas de Corrente Alternada", Editora Globo, 1973.

- 17-** P.C.Sen, "Principles of Electric Machines and Power Eletronics", Editora John Wiley & Sons, 1997
- 18-** Austin H. Bonnett, "An Update On AC Induction Motor Efficiency", IEEE Transations on Industry Applications, vol. 30, nº 5, pp 1362-1372, setember/october 1994.
- 19-** Orlando Silvo Lobosco, José Luis da Costa Dias, "Seleção e Aplicação de Motores Elétricos", vol 1, Editora Mcgraw – Hill - Siemens S.A.
- 20-** E. C. Bortoni e A. H. M. Santos, "Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos", capítulo Acionamentos com Motores de Indução Trifásicos, Editora da EFEI, 2001.
- 21-** J. S. Hurst, T.G. Habetler, "Sensorless Speed Mensurement Using Corrent Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives", IEEE Transations on Power Electronics 11(1), pp 66-73, 1996.
- 22-** ANEEL, Portaria 466, "Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica", dezembro de 1997
- 23-** Saulo Campanha, Delly Oliveira Filho, Antônio Alves Soares e Rubens Alves de Oliveira, "Inversores de Freqüência no Controle de Motores de Irrigação", Universidade Federal de Viçosa.
- 24-** ANEEL, "Manual Para Elaboração do Programa Anual de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica", setembro de 2001

- 25-** S. Altug, M. Y. Chow, "Fuzzy Inference Systems Implemented on Neural Architectures for Motor Fault Detection and Diagnosis", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 46, pp 1069-1079, december 1999
- 26-** ELETROBRÁS, CEPEL, PROCEL, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, "Guia Operacional de Motores Elétricos", versão 1.0, 1998

