

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



ANÁLISE DE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA
DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO

CÁSSIO TERSANDRO DE CASTRO ANDRADE

FORTALEZA

2009

Cássio Tersandro de Castro Andrade

**ANÁLISE DE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA
DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO**

Dissertação submetida à Universidade Federal do
Ceará, como requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.

Fortaleza, julho de 2009

ANÁLISE DE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO

Cássio Tersandro de Castro Andrade

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.

Orientador

, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora

Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.

, Dr.

, Dr.

, Dr.

Fortaleza, julho de 2009

Ofereço,

Aos meus amados pais, Raimundo Andrade e Maria de Jesus, pela dedicação incondicional, pelo apoio e por terem me propiciado uma vida de harmonia e felicidade.

Às minhas queridas esposa e filha, Fabíola e Sofia, pelo amor, companheirismo, e principalmente pela felicidade que me propiciam a cada instante.

Às minhas irmãs, Rossana e Tarciane, pelo carinho e apoio familiar, com o qual os desafios da vida ficam mais fáceis de superar.

AGRADECIMENTOS

À minha amada esposa Fabíola pela prazerosa vida familiar e pelo apoio irrestrito nos momentos de dúvida, e ao fruto do nosso amor, a bela Sofia.

Ao Professor Ricardo Silva Thé Pontes, pela amizade, pelas orientações valiosas e apoio em todas as atividades do Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ) da Universidade Federal do Ceará (UFC)..

Aos Professores Alexandre Rocha Filgueiras e Otacílio da Mota Almeida pela amizade e apoio irrestrito nesta minha retomada à vida acadêmica, pelo otimismo, confiança e dedicação neste projeto

Ao Professor Francisco Neiva Parente (em memória) pela inspiração inicial.

Ao Sr. Fernando Irineu Pessoa (em memória) por compartilhar sua visão inovadora e pelas primeiras oportunidades na área de eficiência energética.

Ao amigo Elio Daniel pela inestimável ajuda na fase de coleta de dados deste trabalho no LAMOTRIZ e no GPEC e principalmente por ser co-responsável pela “conexão” entre estes dois laboratórios.

Aos amigos Adson, Rodrigo, Victor e Wilkley por propiciarem uma rápida e proveitosa acomodação no LAMOTRIZ.

Cássio Tersandro de Castro Andrade

*“Verdadeira riqueza é apenas a riqueza interior da alma,
Todo o resto traz mais problemas do que vantagens.”
Provérbio Grego, 150 A.C.*

*“Mais vale o Saber do que o Ter”
Avó Maria Teodora*

RESUMO

Resumo da dissertação apresentada à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ANÁLISE DE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO

Cássio Tersandro de Castro Andrade

Este trabalho apresenta o estado da arte dos métodos para determinação da eficiência de motores de indução trifásicos, ressaltando os aspectos de precisão, intrusão ao processo, coleta de dados e obtenção de resultados. Para atingir este objetivo são descritos os princípios de operação desta máquina, com destaque para os componentes que contribuem para as perdas existentes na mesma. Em conjunto com a descrição das perdas e como introdução para o entendimento dos métodos de cálculo de eficiência, um Método padronizado de alta precisão para o cálculo de cada uma das perdas da máquina é apresentado (Método E1 do Padrão IEEE 112-1998) e posteriormente é utilizado como base em uma avaliação de alguns métodos aqui tratados. Em sua parte final são apresentados os resultados dos testes realizados em dois motores de indução com diferentes características de eficiência (Padrão e Alto Rendimento) comparando diversos métodos para o cálculo da eficiência destacando as características de precisão e intrusão ao processo, a primeira como essencial para uma posterior avaliação econômica de qualquer investimento a ser feito no processo em que a máquina está inserida, e a segunda como oportunidade para disseminar a utilização destes métodos junto ao consumidor final.

Número de páginas: 130.

Palavras-chave: motores de indução, eficiência, motor de alto rendimento, métodos, operação, perdas.

ABSTRACT

Abstract of dissertation presented at Universidade Federal do Ceará as partial fulfillment of the requirements for the Master degree of in Electrical Engineering.

ANALYSIS OF METHODS FOR EFFICIENCY DETERMINATION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS

Cássio Tersandro de Castro Andrade

This work presents the state of art of the methods for determining the efficiency of three-phase induction motors, highlighting the aspects of accuracy, process intrusion, data collection and delivering results. In order to achieve this purpose it is described the operation principles of this machine, with a detailed look on the power losses. The existing methods for the efficiency determination of the machine are classified and described according to their calculation mode, with emphasis on the high accuracy IEEE standardized method E1, which is used as a basis for evaluation of the others methods. The methods are compared based on laboratory tests performed in two induction motors with different efficiency characteristics (Standard and High Efficiency), highlighting the characteristics of accuracy and process intrusion, showing that the first one is essential for further economic analysis to support any investment to be made in the process in which the motor is inserted, and the second one is important as an opportunity to spread the use of these methods with the final user.

Number of pages: 130.

Keywords: Induction motors, efficiency, high efficiency motor, methods, operation, losses.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS	xv

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO.....	01
1.1 JUSTIFICATIVA.....	03
1.2 OBJETIVO.....	05
1.3 ESTRUTURA	06

CAPÍTULO II

MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	08
2.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO.....	08
2.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS.....	12
2.3 EFICIÊNCIA: PADRONIZAÇÃO DE ÍNDICES	15
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	19

CAPÍTULO III

PERDAS DE POTÊNCIA.....	20
3.1 PERDAS RESISTIVAS.....	21
3.1.1 Fatores que afetam a Resistência de um Material Condutor.....	22
3.1.1.1 Temperatura.....	22
3.1.1.2 Efeito Pelicular.....	24
3.1.1.3 Efeito Proximidade.....	25
3.1.2 Elementos Condutores da Máquina de Indução.....	25
3.1.3 Cálculo das Perdas Resistivas.....	27
3.2 PERDAS MAGNÉTICAS	29
3.2.1 Perdas por Histerese.....	30
3.2.1 Perdas Clássicas.....	31
3.2.1 Perdas por Excesso.....	33

3.2.2 Circuito Magnético da Máquina de Indução.....	34
3.2.3 Cálculo das Perdas Magnéticas.....	36
3.3 PERDAS MECÂNICAS	38
3.3.1 Descrição das Perdas Mecânicas.....	39
3.3.1.1 Perdas por atrito nos rolamentos.....	39
3.3.1.2 Perdas por atrito nos anéis V'Ring.....	40
3.3.1.3 Perdas na ventilação externa.....	41
3.3.1.4 Perdas por atrito na rotação do rotor e pela ventilação nos ventiladores internos (anéis de curto-circuito).....	42
3.3.2 Cálculo das Perdas Mecânicas.....	42
3.4 PERDAS SUPLEMENTARES.....	43
3.4.1 Descrição das Perdas Suplementares	46
3.4.1.1 Perdas nos condutores do estator devido ao fluxo de dispersão nas ranhuras.....	47
3.4.1.2 Perdas nas partes finais da estrutura da máquina.....	48
3.4.1.3 Perdas nas superfícies do estator e do rotor.....	49
3.4.1.4 Perdas resistivas e de pulsação no rotor.....	50
3.4.1.5 Perdas resistivas no rotor devido ao fluxo de dispersão phase belt.....	52
3.4.1.6 Perdas extras no núcleo em motores com barramentos skewed.....	53
3.4.1.7 Outras perdas suplementares.....	54
3.4.2 Cálculo das Perdas Suplementares.....	54
3.4.2.1 Medição Indireta.....	55
3.4.2.1 Medição Direta.....	56
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57

CAPÍTULO IV

MÉTODOS PARA O CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE

MOTORES DE INDUÇÃO.....59

4.1 MÉTODOS DAS PERDAS SEGREGADAS.....	61
4.1.1 Método E1 do Padrão IEEE 112-1996.....	62
4.1.2 Método de Hirzel (E1 modificado).....	63
4.1.3 Método da Ontario Hidro de Perdas Segregadas.....	64
4.1.4 Analisador de Performance de Motores da Nielsen Engineering.....	64
4.1.5 Método E1 modificado de Becnel, Kilgore e Merrill.....	65
4.1.6 Analisador de Motores da Vogelsang & Benning.....	65
4.1.7 Método ECNZ.....	65
4.1.8 Método Eletrônico da ANGUS.....	66
4.2 MÉTODOS DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	66
4.2.1 Método F1 do Padrão IEEE 112-1996.....	68
4.2.2 Método Ontário Hidro simplificado.....	69
4.2.3 Método de Dell' Aquila do Rotor Bloqueado.....	69
4.2.4 Método ORMEL96.....	70

4.2.5 Método de Pillay, Levin, Otaduy e Kueck.....	70
4.2.6 Método de Bin Lu, Habetler e Harley.....	71
4.2.7 Método de El-Ibiary.....	72
4.3 MÉTODOS DO ESCORREGAMENTO	73
4.3.1 Método Padrão de Escorregamento.....	75
4.3.2 Método Ontário Hidro do escorregamento compensado.....	75
4.3.3 Método do limite superior de escorregamento.....	75
4.3.4 Motor Master+.....	76
4.4 MÉTODOS DA CORRENTE/OUTROS.....	77
4.4.1 Método da Corrente.....	78
4.4.2 BD Motor.....	78
4.4.3 Método de Hsu, Scoggins e Sorenson do torque no entreferro.....	78
4.4.4 Método SILEX de Torque no Entreferro.....	79
4.4.5 Método SENTECH de medição de torque de eixo.....	79
4.4.6 Método de Ho e Chen.....	80
4.4.7 Método eh-star.....	80
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE.....83

5.1 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS TESTES.....	84
5.1.1 Bancada de Ensaios.....	84
5.1.2 Equipamentos de Potência.....	85
5.1.2.1 Motores.....	85
5.1.2.2 Freio Eletromagnético.....	86
5.1.2.3 Fonte de Tensão Variável.....	88
5.1.3 Equipamentos de Medição.....	95
5.1.3.1 Velocidade do eixo.....	89
5.1.3.2 Temperatura de enrolamento.....	90
5.1.3.3 Resistência.....	91
5.1.3.4 Corrente, Tensão e Potência.....	91
5.2 RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO E1(IEEE 112-1996).....	92
5.2.1 Perdas Resistivas no estator e no rotor.....	92
5.2.2 Perdas Magnéticas e Mecânicas	95
5.2.3 Perdas Suplementares.....	97
5.2.4 Curva de Eficiência dos Motores.....	98
5.2.5 Análise da Eficiência dos Motores Padrão e Alto Rendimento.....	99
5.3 COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA O CÁLCULO DE EFICIÊNCIA.....	101
5.3.1 Análise dos Métodos das Perdas Segregadas	102
5.4.2 Análise do Método do Circuito Equivalente.....	103
5.4.3 Análise dos Métodos do Escorregamento	105
5.4.4 Análise dos Métodos da Corrente/Outros	106

5.4 A ANÁLISE ECONÔMICA E A PRECISÃO DO CÁLCULO DA EFICIÊNCIA..	108
5.4.1 Cálculo do Retorno do Investimento.....	108
5.4.1.1 Retorno de investimento simplificado.....	108
5.4.1.2 Valor Atual do Investimento.....	109
5.5.2 Influência da Precisão da Eficiência no Retorno do Investimento.....	111
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	114
CONCLUSÕES	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
APÊNDICE A.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Evolução Anual do Custo Médio da Energia para um Consumidor Industrial/COELCE.....	02
Figura 2.1 – Diagrama de Blocos de um sistema de conversão eletromecânica de energia.....	08
Figura 2.2 – Operação da máquina de indução.....	09
Figura 2.3 – Curva típica de torque versus velocidade de uma máquina de indução	10
Figura 2.4 – Circuito equivalente de uma máquina de indução em operação.....	11
Figura 2.5 – Motor de Indução com rotor em gaiola.....	13
Figura 2.6 – Esquema de padrão de medidas de carcaça de motores.....	14
Figura 2.7 – Curva de eficiência de uma máquina de indução.....	15
Figura 2.8 – Comparação entre índices mínimos de eficiência para motores.....	19
Figura 3.1 – Diagrama de Sankey de um motor de indução.....	21
Figura 3.2 – Influência da Temperatura sobre a resistência de condutores.....	25
Figura 3.3 – Representação simplificada do Efeito Pelicular.....	26
Figura 3.4 – Relação entre a Resistência CA e CC em função da ordem harmônica para cabos de seção 2,5-50-95 e 240 mm ²	26
Figura 3.5 – Enrolamento do estator	27
Figura 3.6 – Condutores do rotor.....	28
Figura 3.7 - Representação da resistência dos enrolamentos do estator em ligações delta e estrela.....	29
Figura 3.8 - Curva B x H característica de um material ferromagnético.....	32
Figura 3.9 – Rotação orbital de um elétron.....	33
Figura 3.10 – Representação da magnetização de um material ferromagnético.....	34
Figura 3.11 - Influência da direção do corte na curva de magnetização.....	35
Figura 3.12- Curva de histerese de um material ferromagnético.....	36
Figura 3.13 – Efeito das correntes parasitas na curva de magnetização.....	38
Figura 3.14 - Efeito da espessura das chapas e da resistência elétrica do material nas perdas.....	39
Figura 3.15 - Vista transversal do circuito magnético de uma máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo.....	41
Figura 3.16 - Direção do fluxo magnético em uma máquina de indução.....	42
Figura 3.17 - Circuito equivalente de um motor de indução.....	43
Figura 3.18 – Perdas Mecânicas e Magnéticas a partir do teste a vazio.....	43
Figura 3.19 - Detalhe do motor de indução.....	45
Figura 3.20 - Detalhes da Circulação de calor em um motor de indução.....	47
Figura 3.21 - Efeito de uma ranhura sobre a densidade de fluxo no entreferro	49
Figura 3.22 - Efeito da distribuição de um enrolamento distribuído de dois pólos sobre a forma de onda da força magnetomotriz.....	50
Figura 3.23 - Caminhos de fluxos de dispersão em um motor de indução.....	50
Figura 3.24 - Distribuição das Perdas suplementares para um motor de 75 CV de 4 pólos.....	52
Figura 3.25 - Partes finais dos condutores do rotor e do estator.....	54
Figura 3.26 - Pulsações na densidade de fluxo magnético na região do entreferro (os efeitos das ranhuras estão exagerados).....	55
Figura 3.27 - Efeito zig-zag da densidade de fluxo na região do entreferro.....	57
Figura 3.28 - Influência da relação entre o número de ranhuras e as perdas zig-zag.....	57
Figura 3.29 - Detalhe de um rotor com barramento skewed.....	59
Figura 3.30 - Comparação entre valores medidos de Perdas Suplementares (curvas) e os valores dos Padrões internacionais.....	63
Figura 4.1 - Circuito equivalente de uma fase do motor de indução trifásico.....	72
Figura 4.2 - Circuito equivalente de uma fase do motor de indução trifásico com representação de perdas suplementares.....	76
Figura 4.3 - Circuito equivalente CC da fonte, do injetor de sinal e das resistências estatóricas do motor de indução.....	76
Figura 4.4 - Resultados da aplicação do método de detecção de velocidade.....	77
Figura 4.5 – Característica de Torque x Escorregamento de um motor de indução.....	79
Figura 4.6 - Circuito de testes do Método eh-star.....	85
Figura 5.1 - Diagrama da bancada de ensaio de motores.....	91
Figura 5.2 - Característica física do FEACI.....	93
Figura 5.3 – Circuito de alimentação das bobinas de campo: (1) rede elétrica, (2) autotransformador varivolt, (3) transformador abaixador, (4) retificador ponte completa e (5) impedância	

equivalente das bobinas de campo.....	93
Figura 5.4 - Curva do conjugado em função da corrente aplicada ao FEACI.....	94
Figura 5.5 - Detalhe do encoder e da forma de diagrama de pulsos gerados.....	95
Figura 5.6 - Transdutor de Temperatura e Transmissor MTT 101.....	96
Figura 5.10 - Resultados do teste a vazio com redução de tensão.....	101
Figura 5.11 - Perdas Suplementares dos motores em função da carga.....	103
Figura 5.12 - Curva de Eficiência dos Motores de 10 CV/4 Pólos.....	104
Figura 5.13 - Comparação das perdas entre motores Padrão e Alto Rendimento de 10 cv/4 pólos.....	105
Figura 5.14 - Distribuição Percentual das perdas nos motores Padrão e de Alto Rendimento.....	106
Figura 5.15 - Métodos das Perdas Segregadas aplicados em um motor de Alto Rendimento de 10cv/4 pólos.....	108
Figura 5.16 - Método do Circuito Equivalente aplicado em um motor de Alto Rendimento de 10cv/4 pólos.....	109
Figura 5.17 - Métodos dos Escorregamento aplicados em um motor Padrão de 10cv/4 pólos.....	110
Figura 5.18 - Métodos da Corrente e Potência aplicados em um motor de Alto Rendimento de 10cv/4 pólos.....	111
Figura 5.19 - Economia Anual com a substituição de um motor de 10 cv/4 pólos do tipo Padrão por um de Alto Rendimento.....	115
Figura 5.20 - Valor Atual da Economia com a substituição de um motor de 10 cv/4 pólos do tipo Padrão por um de Alto Rendimento.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Perdas em equipamentos de Sistemas de Potência.....	03
Tabela 1.2: Comparação de custos de aquisição e de operação de motores de indução.....	04
Tabela 2.1 - Índices de Eficiência Nominal Mínimos.....	18
Tabela 2.2 - Redução de Perdas dos Motores Premium em relação aos Motores de Alto Rendimento.....	20
Tabela 3.1 - Temperatura de operação por classe de isolamento.....	30
Tabela 3.2 - Valores assumidos para perdas suplementares.....	62
Tabela 4.1 - Métodos das Perdas Segregadas.....	87
Tabela 4.2 - Métodos do Circuito Equivalente.....	87
Tabela 4.3 - Métodos do Escorregamento.....	88
Tabela 4.4 - Métodos da Corrente/Outros.....	88
Tabela 5.1 - Dados dos Motores da Bancada.....	92
Tabela 5.2 - Medidas de Resistência CC e Temperatura do Enrolamento.....	98
Tabela 5.3 - Resultados do teste a vazio.....	101
Tabela 5.4 - Valores das perdas mecânicas e magnéticas.....	102
Tabela 5.5 - Comparação dos Métodos de Perdas Segregadas com o Método E1.....	108
Tabela 5.6 - Comparação do Método do Circuito Equivalente com o Método E1.....	109
Tabela 5.7 - Comparação dos Métodos do Escorregamento com o Método E1.....	110
Tabela 5.8 - Comparação dos Métodos de Corrente e Potência com o Método E1.....	112
Tabela 5.9 - Retorno do Investimento na troca de um motor de 10 CV utilizando diferente métodos para calcular a eficiência.....	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LAMOTRIZ	Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes
UFC	Universidade Federal do Ceará
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
NBR	Norma Brasileira
IEC	International Electrotechnical Commission
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ANSI	American National Standards Institute
SAE	Society of Automotive Engineers
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada

CLP
MIT
FEACI

Controlador Lógico Programável
Motor de Indução Trifásico
Freio Eletromagnético por Ação de Correntes Induzidas

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Nome	Unidade	Abreviatura
m	Massa	quilograma	[kg]
F	Força	Newton	[N]
T	Conjugado	Newton.metro	[N.m]
P	Potência	Watt	[W]
ω	Velocidade angular	radiano/segundo	[rad/s]
s	Escorregamento		
p	Número de pólos	metro/segundo	[m/s]
r_s	Resistencia equivalente do estator	Ohm	[Ω]
r_r	Resistencia equivalente do rotor	Ohm	[Ω]
x_s	Reatância de dispersão do estator	Ohm	[Ω]
x_r	Reatância de dispersão do rotor	Ohm	[Ω]
x_m	Reatância de magnetização	Ohm	[Ω]
T	Conjugado motor	Newton.metro	[N.m]
P_J	Perdas resistivas de potência	Watt	[W]
P_{Fe}	Perdas Magnéticas de potência	Watt	[W]
P_{Mec}	Perdas mecânicas de potência	Watt	[W]
P_{Sup}	Perdas suplementares de potência	Watt	[W]
η	Eficiência		
ρ_c	Resistividade do material	Ohm.metro	$\Omega.m$;
ℓ	Comprimento do condutor	metro	m;
S	Área da seção reta do condutor	metro ²	m ²
$t^{\circ}C$	Temperatura	Celsius	[$^{\circ}C$]
R	Resistência elétrica	Ohm	[Ω]
W	Trabalho, Energia	Joule	[J]
B	Vetor densidade de fluxo magnético	Tesla (weber/metro ²)	[T], [Wb/m ²]
H	Vetor Intensidade de campo magnético	Ampère/metro	[A/m]
Φ	Fluxo magnético	Weber	[Wb]
I	Corrente elétrica	Ampère	[A]
V	Potencial elétrico	Volt	[V]
f	Frequência	Hertz	[Hz]
w_h	Área interna do ciclo de histerese	Joule/metro ³	J/m ³
v	Volume	litro	[l]
d	Espessura da lâmina do material	metro	m;
σ	Condutividade elétrica	ohm.metro	$\Omega.m$;
m_v	Densidade específica.		
Q	Vazão	metro ³ /segundo	[m ³ /s]
F_{mm}	Força magnetomotriz	Ampère-espira	[A.e]

Capítulo I

INTRODUÇÃO

O Motor de Indução Trifásico (MIT) é o mais utilizado nas atividades industriais e, como consequência, é o equipamento responsável por uma grande parcela da energia elétrica consumida no mundo. As razões para este domínio podem ser resumidas em suas três principais características: robustez, baixo custo de aquisição e alta eficiência. As duas primeiras são fáceis de medir e avaliar, o preço é baixo pela utilização em larga escala do produto e também pela relativa simplicidade de sua construção; a robustez vem de suas características construtivas, da facilidade de manutenção e da capacidade de operação com uma grande diversidade de cargas e em condições ambientais adversas, o que resulta em uma grande durabilidade.

A terceira característica citada, a alta eficiência, é a que apresenta um maior grau de dificuldade na determinação. Os fabricantes apresentam esta característica para alguns pontos de operação da máquina (50%, 75%, e 100% da carga nominal), obtidos em testes laboratoriais padronizados que, dependendo das condições de operação da máquina, manutenção e tempo de uso, podem não representar fielmente as características de operação da máquina no seu uso final. A eficiência da máquina representa o quanto da potência entregue na entrada da mesma é efetivamente transformado em trabalho útil, no caso da máquina operando como um motor, ou o quanto é transformado em energia elétrica, no caso de um gerador, ou seja, trata-se da relação entre a potência na saída com a potência na entrada da máquina.

Apesar da simplicidade na definição, o cálculo da eficiência é de difícil execução, principalmente pela dificuldade de medição da potência mecânica no eixo da máquina. Sem o conhecimento preciso da eficiência da máquina, todos os cálculos que visem uma melhoria deste índice, seja por substituição da máquina por uma mais eficiente, seja para detectar deficiências em sua manutenção, ou até para dimensionar mudanças de padrões de operação, ficam comprometidos.

Este tema passou a ter a maior importância nas últimas décadas devido aos crescentes aumentos no custo da energia elétrica, que induzem os usuários a procurar formas de redução

de consumo, e ainda pelas crescentes preocupações ambientais, que pressionam para um melhor aproveitamento da energia retirada da natureza.

O aumento do custo da energia pode ser mais bem visualizado na Figura 1.1, que mostra a evolução do custo médio da energia¹ (R\$/MWh) para um consumidor industrial de médio porte atendido pela Companhia Energética do Ceará - COELCE.

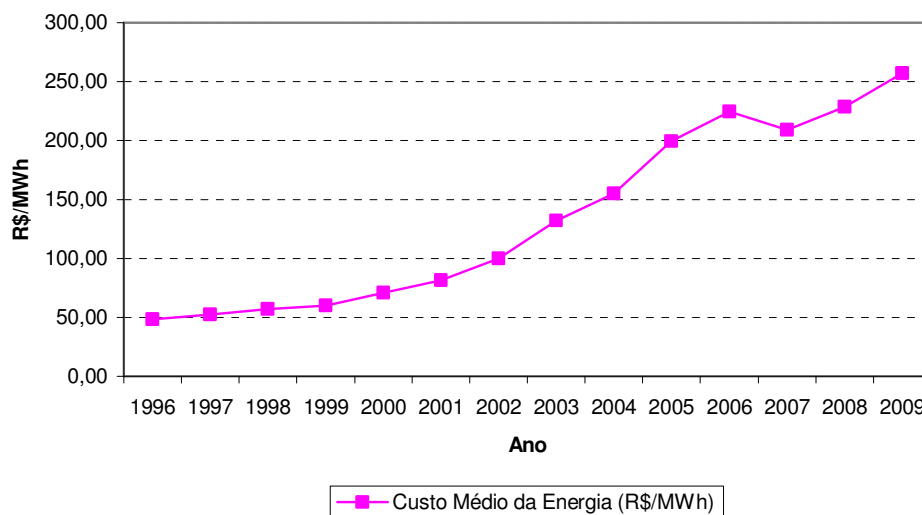


Figura 1.1 – Evolução Anual do Custo Médio da Energia para um Consumidor Industrial/COELCE.

Os dados da Figura 1.1 comprovam a tendência de aumento do custo de energia em valores acima da inflação. No exemplo acima, os custos da energia aumentaram a uma média anual de 16,6% durante os últimos dez anos. Há que se considerar a recomposição tarifária ocorrida logo após o período de privatizações (final da década de 1990), porém, mesmo após esta recomposição, a tendência de aumento tem sido mantida.

Neste custo estão incluídas as perdas de energia que estão presentes em todo o sistema elétrico. A Redução destas perdas torna-se então um fator importante tanto para o consumidor final como para todos os participantes do processo de gerar, transmitir e distribuir energia. A estes participantes foram adicionados uma nova legião de interessados: ambientalistas, políticos, representantes de órgãos governamentais da área ambiental, e por que não dizer, uma crescente parcela da sociedade que se preocupa com as conseqüências ambientais da utilização de energia.

¹Tarifa com impostos para Consumidor Industrial HoroSazonal Verde, Fator de Carga - 0,38, Demanda Fora da Ponta - 800 kW, Demanda na Ponta - 200 kW

O Consumidor final, que no fim das contas paga o custo da energia, passou a ser, consciente ou inconscientemente, o ator principal desta peça com público exigente e participativo. A sua importância cresce quando se verifica que o uso final da energia está associado a um processo de geração e transmissão de energia desde um insumo energético natural, e que este processo consome em perdas até 75% do poder energético deste insumo. A Tabela 1.1 resume algumas perdas que afetam o sistema de geração, transmissão, distribuição e uso final de energia elétrica.

Tabela 1.1 – Perdas em equipamentos de Sistemas de Potência [1].

Componentes do Sistema Elétrico	Perdas em carga nominal (%)
Chave Seccionadora (15-230 kV)	0,002-0,015
Geradores	.0,09-3,5
Disjuntor de potência	0,005-0,02
Reator limitador de Corrente (600 V- 15 kV)	0,09-0,3
Transformadores	0,4-1,90
Contator de Média Tensão	0,02-0,15
Barramentos (abaixo de 500 V)	0,05-0,50
Disjuntor de baixa tensão	0,13-0,34
Painel de controle de motores	0,01-0,40
Cabos	1,00-4,00
Motores – 1-10 CV	14,00-35,00
– 10-200 CV	6,00-12,00
– 200-1500 CV	4,00-7,00
– acima de 1500 CV	2,30-4,00
Retificadores	3,00-9,00
Conversores estáticos de frequência	4,00-15,00
Capacitores (perdas em W/VAR)	0,50-2,00
Iluminação (lm/W)	3,00-9,00

Esta é uma tabela simplificada que não inclui todos os equipamentos existentes entre o insumo energético e o uso final, porém dá uma idéia das perdas existentes no processo.

O que chama atenção na Tabela 1.1 é que o equipamento que apresenta maior proporção de perdas é também o principal responsável pelo consumo de energia elétrica, o motor elétrico de indução. Daí a necessidade de atenção com este item e esta atenção se inicia com o conhecimento das características de operação desta máquina, mais especificamente com o conhecimento de sua eficiência. Este é o foco deste trabalho.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com os recentes aumentos no custo de energia elétrica ficou evidenciado o fato de que o custo de aquisição de equipamento elétrico está sendo reduzido em relação ao custo de operação do mesmo. No caso do motor de indução trifásico, que apresenta valores de potências consideráveis e normalmente opera em regime contínuo, esta diferença está muito grande. A Tabela 1.2 exemplifica estes custos para alguns motores com característica de operação moderada (2.400 horas anuais), considerando o custo médio atual da energia mostrado na Figura 1.1, e com o motor operando com 70% de sua carga nominal durante toda a sua vida útil.

Tabela 1.2 – Comparação de custos de aquisição e de operação de motores de indução²

Motor	Vida Útil (anos)	Custos (R\$)	
		Aquisição	Operação
10 CV	20	1.395,00	97.542,00
50 CV	23	4.961,00	538.083,00
250 CV	30	26.900,00	3.474.045,00

Estes valores indicam que ações que envolvem investimentos para melhoria de eficiência da máquina, tais com a substituição por modelos mais eficientes, podem ter sua viabilidade econômica mais atrativa. Entretanto, esta análise passa pelo conhecimento das características de operação da máquina, em particular, de sua eficiência.

Esta preocupação com a determinação da eficiência de motores de indução remete ao início de sua popularização no final do século dezenove, no entanto registros em anais de congressos de Engenharia Elétrica mostram trabalhos com datas do início do século vinte [2]. O fato é que este assunto tem sido objeto de estudo desde muito tempo, e recentemente registrou-se um aumento da preocupação da comunidade científica sobre o tema, que resultaram no desenvolvimento e implantação de vários métodos para o cálculo da eficiência de motores de indução. Encontram-se trabalhos desenvolvidos em vários países e no Brasil em particular, por iniciativa da Eletrobrás [3], que lançou o software BDMotor com este objetivo.

²Tarifa de abril de 2008 com impostos para Consumidor Industrial HoroSazonal Verde, Fator de Carga - 0,38, Demanda Fora da Ponta - 800 kW, Demanda na Ponta - 200 kW; Preços dos Motores Weg de abril de 2008.

No entanto, apesar desta popularização, nota-se que o consumidor final ainda não incorporou esta rotina em seu cotidiano da operação e manutenção de suas instalações elétricas. Isto se deve principalmente à dificuldade de implantação da maioria destes métodos, o que deixa esta área sob a responsabilidade de consultorias especializadas contratadas ocasionalmente para a elaboração de diagnósticos energéticos.

Daí resulta a necessidade do conhecimento destes métodos, no que diz respeito principalmente à sua precisão, coleta de dados e obtenção de resultados, e com isso identificar o grau de dificuldade da disseminação deste tipo de ferramenta entre os usuários finais e ainda ressaltar a importância dos mesmos na análise econômica para a melhoria da eficiência da máquina e dos processos em que a mesma está inserida. Em uma fase posterior, abre-se a possibilidade da implantação de um método que alie facilidade de coleta de dados e precisão nos resultados de eficiência.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho se propõe a pesquisar o estado da arte dos métodos para determinação da eficiência de motores de indução trifásicos, ressaltando os aspectos de precisão, intrusão ao processo.

Para conhecer o processo de determinação da eficiência é preciso inicialmente conhecer detalhadamente o objeto da análise, que neste caso são as perdas existentes no motor de indução. Para atingir este objetivo inicialmente serão descritos os princípios de operação desta máquina, para depois serem analisados detalhadamente todos os componentes que contribuem para as perdas existentes na mesma.

Em conjunto com a descrição das perdas e como introdução para o entendimento dos métodos de cálculo de eficiência, será apresentado um Método padronizado de alta precisão para o cálculo de cada uma das perdas da máquina (Método E1 do Padrão IEEE 112-1996). Este Método será utilizado como base na avaliação de alguns métodos aqui tratados.

O Objetivo final do trabalho é comprovar a importância da determinação da eficiência de um motor de indução, destacando as características de precisão e intrusão ao processo, a primeira como essencial para uma posterior avaliação econômica de qualquer investimento a ser feito no processo em que a máquina está incluída [4], e a segunda como oportunidade para disseminar a utilização destes métodos junto ao consumidor final.

1.3 ESTRUTURA

O desenvolvimento da dissertação segue o seguinte roteiro: relato das justificativas, objetivo e desenvolvimento da dissertação; descrição dos princípios de funcionamento do MIT; descrição detalhada das perdas de potência em um MIT; análise do estado da arte dos métodos para determinação de eficiência de motores de indução; e apresentação de resultados de testes realizados em laboratório utilizando alguns dos métodos tratados no item anterior e destacando a importância da precisão no método na análise econômica.

Estes itens foram divididos da seguinte forma:

➤ **Capítulo I – Introdução:**

Justifica a escolha do tema apresentando alguns dados do setor elétrico ressaltando a importância do MIT neste contexto; apresenta o objetivo do trabalho; e descreve o desenvolvimento do mesmo.

➤ **Capítulo II – Motor de Indução Trifásico:**

Apresenta os princípios básicos de funcionamento do Motor de Indução Trifásico, abordando a transformação eletro-magnético-mecânica de energia e as características de eficiência; descreve as características construtivas da máquina; e apresenta uma introdução às iniciativas regulamentais para padronizar os índices mínimos de eficiência destas máquinas.

➤ **Capítulo III – Perdas de Potência:**

Descreve o fluxo de potência através do motor de indução com destaque para as perdas durante o processo; cada uma das perdas é detalhada com ênfase em suas causas e indicando formas de redução das mesmas; em cada uma das perdas descritas é apresentado um método para o seu cálculo, baseado do Método E1 do padrão IEEE 112-1996 [5].

➤ **Capítulo IV – Métodos para o Cálculo de Eficiência de Motores de Indução:**

Apresenta o estado da arte dos métodos de cálculo de eficiência de motores de indução, dividindo-os pela forma do cálculo em Métodos das Perdas Segregadas, Métodos do Circuito Equivalente, Métodos do Escorregamento, e Métodos da Corrente/Outros. São

apresentados cerca de trinta métodos com uma avaliação dando ênfase na precisão, invasão ao processo e dificuldade de coleta de dados.

➤ **Capítulo V – Resultados Experimentais e Análise:**

São descritos a bancada de ensaio e os equipamentos utilizados para os testes realizados nos motores, comparando-os com as recomendações do Padrão IEEE para a implantação do Método E1; são apresentados os resultados da aplicação do Método E1 nos dois motores de 10 CV da bancada de ensaios e, a partir dos dados levantados, são implementados alguns dos métodos analisados no Capítulo anterior, comparando os mesmos com o Método E1; finalizando com a descrição de duas análises utilizadas para o cálculo do retorno do investimento na substituição de motores e comprovando a influência da precisão da forma de cálculo da eficiência nos resultados do cálculo econômico.

➤ **Capítulo VI – Conclusões:**

São apresentadas as conclusões do presente trabalho com ênfase nos resultados obtidos que comprovam a necessidade de um método preciso para o cálculo da eficiência e apontando para a necessidade de desenvolvimento de um método que alie precisão com pouca invasão ao processo do qual a máquina faz parte.

Capítulo II

MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Este capítulo apresenta os princípios básicos de funcionamento de um motor de indução trifásico, iniciando uma análise nas perdas geradas no processo de conversão eletromecânica de energia desta máquina. Para tanto, além das interações entre os sistemas elétrico, magnético e mecânico, são apresentadas as características construtivas de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo, o modelo mais utilizado.

O capítulo é finalizado com a introdução do conceito de eficiência do motor de indução, enfatizando as metas impostas via normatização para a melhoria deste índice e alertando para algumas consequências desta abordagem. O objetivo do capítulo é apresentar o motor de indução sob a ótica de eficiência e introduzir alguns desafios que serão tratados com mais detalhes nos capítulos posteriores.

2.1. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

Uma máquina de indução é uma das realizações práticas de um sistema de conversão eletromecânica de energia, convertendo energia elétrica em mecânica e vice-e-versa através de um acoplamento eletromagnético. A representação básica de um sistema de conversão eletromecânica de energia está representada na figura abaixo:

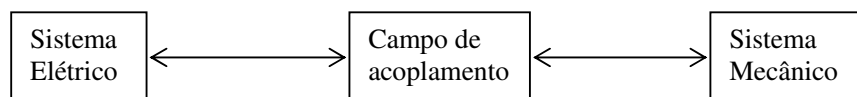


Figura 2.1 – Diagrama de Blocos de um sistema de conversão eletromecânica de energia

Em uma máquina de indução, o campo de acoplamento, meio de interação entre o sistema elétrico e mecânico, é um campo magnético. Simplificando os aspectos construtivos da máquina, temos que a mesma é formada por uma parte fixa, denominada **estator**, onde um enrolamento trifásico está inserido em núcleo de material ferromagnético; e uma parte rotativa, denominada **rotor**, onde um enrolamento trifásico curtocircuitado também está

inserido em um núcleo de material ferromagnético. As duas partes estão separadas entre si por uma distância denominada **entreferro**.

O sistema elétrico é formado pelos condutores acoplados no estator e no rotor da máquina; o campo de acoplamento é o circuito magnético formado pelo núcleo de material ferromagnético existente no estator e no rotor e pelo entreferro; o sistema mecânico é representado pelo eixo do rotor da máquina. Cada um dos componentes deste sistema de conversão eletromecânica de energia apresenta perdas durante o processo: o sistema mecânico dissipará calor devido a fricção, o sistema elétrico devido à resistência dos condutores, e os materiais ferromagnéticos dos campos magnéticos apresentam perdas por histerese e correntes parasitas [6].

A Figura 2.2 mostra os mecanismos básicos de conversão eletromecânica de energia que permitem a operação da máquina de indução.

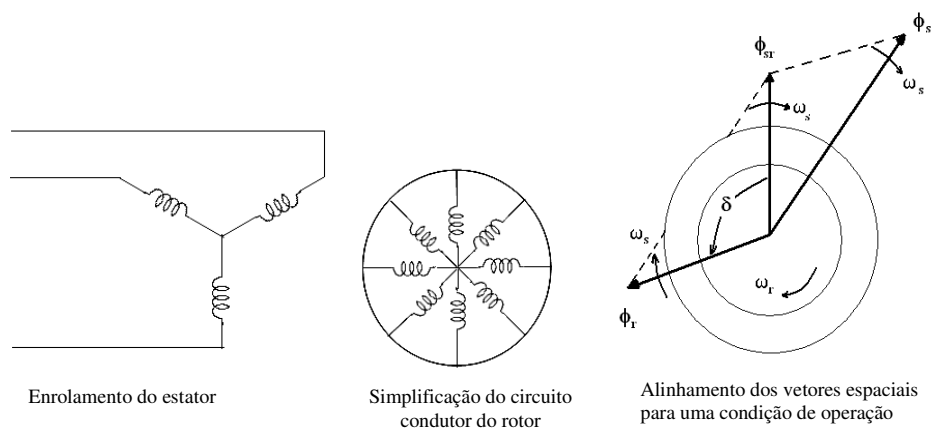


Figura 2.2 – Operação da máquina de indução [7].

A operação da máquina de indução é bastante simples, quando opera como motor, sua aplicação mais comum, a interação eletro-magnética-mecânica é feita da seguinte forma: os enrolamentos do estator, ao serem alimentados por uma tensão trifásica, geram um campo magnético girante (representado pelo vetor Φ_s na Figura 2.2), que interage com os enrolamentos do rotor, formando um outro campo magnético girante (Φ_r) que tende a acompanhar o campo gerado pelo estator fazendo com o rotor gire a uma velocidade ω_r e produzindo um torque mecânico proporcional ao produto da magnitude de Φ_{sr} e Φ_r e ao seno do ângulo entre eles:

$$T \propto \Phi_{sr} \Phi_r \sin \delta \quad (2.1)$$

O vetor Φ_{sr} representa o fluxo magnético resultante da soma de Φ_s e Φ_r . Outras definições importantes para caracterizar o funcionamento da máquina de indução são a velocidade síncrona (w_s) e o escorregamento (s), que definem a velocidade de rotação da máquina (w_r). w_s é a velocidade do fluxo magnético girante Φ_s e depende da frequência da fonte de tensão trifásica (f) e do número de pares de pólos em que os enrolamentos do estator foram distribuídos (p),

$$w_s = \frac{2\pi f}{p/2} \quad (2.2)$$

O escorregamento representa a velocidade em que o fluxo magnético do rotor gira em percentagem da velocidade síncrona.

$$s = \frac{w_s - w_r}{w_s} \quad (2.3)$$

A Figura 2.3, que representa uma curva típica de torque versus velocidade (e escorregamento) de um motor de indução, mostra que o torque nominal é obtido a um baixo valor de escorregamento. Em operação normal, o escorregamento de um motor de indução varia em uma pequena porcentagem nas proximidades do escorregamento nominal. Nesta pequena faixa de variação do escorregamento, o motor opera da situação a vazio até plena carga com uma também pequena variação de velocidade. Daí a máquina de indução ser caracterizada como um dispositivo de velocidade constante. Também é importante observar que a operação com um alto valor de escorregamento leva a um aumento de perdas no rotor.

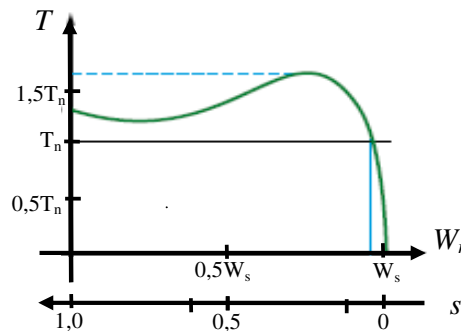


Figura 2.3 – Curva típica de torque versus velocidade de uma máquina de indução

Na Figura 2.3 também pode ser visualizada outra importante característica da máquina de indução, que é o seu alto torque de partida, o que permite a sua utilização em uma grande variedade de tipos de cargas.

Complementando a descrição das características básicas de uma máquina de indução, a sua representação em termos de um circuito elétrico é apresentada. A Figura 2.4 mostra o circuito equivalente de uma máquina de indução operando em regime permanente e com alimentação balanceada ($V_a=V_b=V_c=V_f$), o que permite a representação por apenas uma das fases. O circuito é similar ao circuito equivalente de um transformador com todos os elementos referenciados para uma das partes (rotor ou estator). V_f e I_f representam as tensões e as correntes de fase do estator. As componentes do circuito r_s e x_s representam, respectivamente, a resistência e a reatância de dispersão do enrolamento do estator, r_r e x_r , a resistência e a reatância de dispersão do circuito do rotor, e x_m , a reatância de magnetização do circuito magnético da máquina.

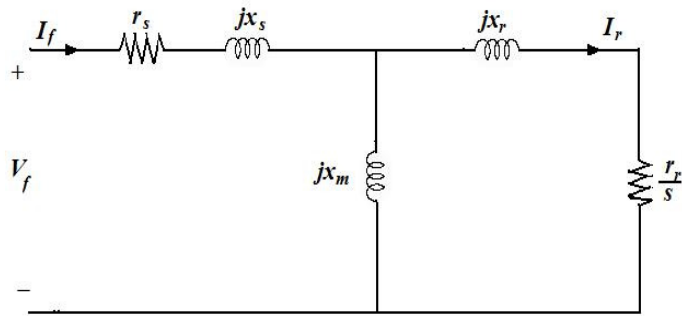


Figura 2.4 – Circuito equivalente de uma máquina de indução em operação

O elemento mais à direita na figura Figura 2.4 (r_r/s) representa as perdas resistivas no rotor e potência entregue à carga, o que permite concluir que a potência ativa total que é entregue ao rotor da máquina é dada pela seguinte expressão:

$$P_g = 3I_r^2 \frac{r_r}{s} \quad (2.4)$$

Excluindo as perdas em r_r da expressão acima, temos a potência mecânica convertida:

$$P_m = (1-s)P_g \quad (2.5)$$

O Torque é dado por:

$$T = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{P_g}{\omega_s} \quad (2.6)$$

As Perdas resistivas no rotor são:

$$P_{Jr} = sP_g \quad (2.7)$$

E as perdas resistivas no estator são:

$$P_{Js} = 3I_f^2 r_s \quad (2.8)$$

Estas expressões comprovam o que já foi dito sobre o fato de que quanto menor o escorregamento, menores serão as perdas rotóricas e, conseqüentemente, maior será o rendimento da máquina.

Esta explicação simplificada do funcionamento da máquina de indução atende aos propósitos desta abordagem. No próximo item serão analisadas as características construtivas da máquina de indução, que também acrescentam perdas ao processo.

2.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

A construção de uma máquina de indução segue a simplicidade descrita em seu princípio de funcionamento, em especial quando se trata do motor de indução com rotor em gaiola. E a simplicidade desta máquina é sua principal vantagem, que faz com que seja conhecida como o cavalo-de-força da indústria, pois se trata da escolha mais econômica quando se necessita um dispositivo elétrico com velocidade constante.

Os componentes da máquina de indução são divididos em duas partes: aqueles pertencentes à parte estacionária, denominado estator, e aqueles pertencentes à parte rotativa, o rotor. Também podem ser divididos em componentes **ativos**, aqueles responsáveis pelo desempenho eletromagnético da máquina (condutores e núcleo ferromagnético) e componentes **inativos**, aqueles que abrigam os componentes ativos e fazem conexão do motor com a carga (carcaça, rolamentos, ventilador, eixo, etc.) [8].

A figura 2.5 ilustra os principais componentes de um motor de indução trifásico com rotor em gaiola.

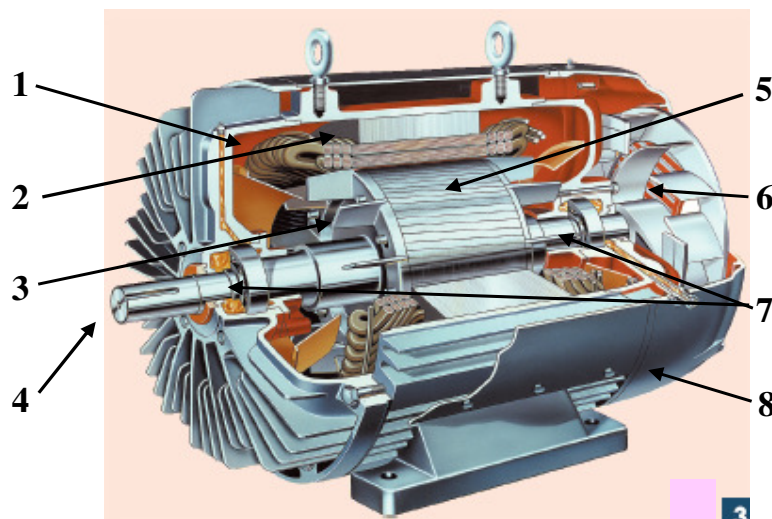


Figura 2.5 – Motor de Indução com rotor em gaiola [9].

Os componentes indicados na figura são descritos de forma resumida a seguir.

a) Componentes ativos

- Enrolamento do Estator (1): É composto por três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, inserido em ranhuras distribuídas na superfície interna do núcleo ferromagnético do estator, e são ligados á rede trifásica de alimentação. As bobinas são, geralmente, compostas por fios de cobre ou alumínio de seção circular e isolados com camadas de esmalte;
- Barras Condutoras do Rotor e anéis de curto-circuito (3): Composto de barras de alumínio fundidas injetadas por pressão no núcleo do rotor, formando uma peça única, que é soldadas nas duas extremidades a anéis de curto-circuito, também do mesmo material. Também podem ser utilizadas barras de cobre, mas por serem mais caras e exigirem um processo de fabricação mais complexo, são mais utilizadas em motores de grande potência;
- Núcleo Magnético (2 e 5): É usualmente constituído por um pacote de chapas de aço silício, isoladas por camadas de verniz. Para reduzir as perdas magnéticas, as chapas são tratadas termicamente e apresentam espessura reduzida. As características do material são as mesmas no estator como no rotor, a diferença, no caso do rotor em gaiola, está na forma como o material condutor é inserido no núcleo;

b) Componentes inativos

- Carcaça (8): É a estrutura suporte do conjunto, apresenta construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado. Outra característica importante é a presença de aletas na sua superfície externa, cujo objetivo é proporcionar uma maior área para a troca de calor entre o motor e o meio ambiente;
- Eixo (4): Transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor para a carga. É tratado termicamente para evitar problemas como empenamento e fadiga;
- Ventilador (6): Está acoplado ao eixo e é responsável pela circulação de ar na parte interna do motor, retirando uma pequena parte da potência mecânica para este fim;
- Rolamentos (7): fazem a conexão entre as partes fixas e móveis do motor. Possuem lubrificação interna para diminuir as perdas por atrito.

As dimensões da carcaça e do eixo do motor são padronizadas pela Norma NBR 5432 da Associação Brasileira das Normas Técnicas. A dimensão básica para a padronização das dimensões de montagem de máquinas elétricas é a altura do plano da base ao centro da ponta do eixo, denominado de H da Figura 2.6.

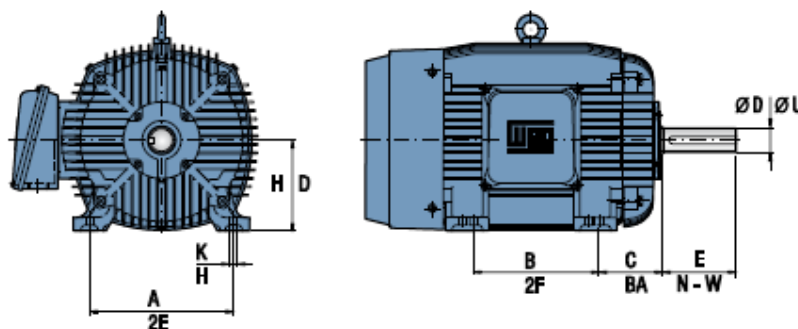


Figura 2.6 – Esquema de padrão de medidas de carcaça de motores [10].

A cada altura de ponta de eixo H é associada uma dimensão C , distância do centro do furo dos pés do lado da ponta do eixo ao plano do encosto da ponta de eixo. A cada dimensão H , contudo, podem ser associadas várias dimensões B (dimensão axial da distância entre centros dos furos dos pés), de forma que é possível ter-se motores mais “longos” ou mais “curtos”.

Cada dimensão padronizada de carcaça pode comportar os componentes ativos de uma faixa de potências de motores, cabe ao fabricante fazer a associação entre a potência e a carcaça padrão a ser utilizada.

2.3. EFICIÊNCIA: PADRONIZAÇÃO DE ÍNDICES

A descrição do funcionamento da máquina de indução feita até este ponto enfatizou a simplicidade de seus princípios de operação, simplicidade esta que também se reflete em sua construção. No entanto, também ficou claro que no processo de conversão eletromecânica de energia existem perdas associadas a cada fase do processo. Assim, apenas uma percentagem da potência elétrica entregue ao motor é convertida em potência mecânica entregue à carga. A definição de eficiência é dada pela relação entre estas potências, conforme a seguinte expressão:

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (2.9)$$

A Máquina de indução é um dos dispositivos de conversão eletromecânica de energias mais eficientes já desenvolvidos, no entanto, como será abordado no desenvolver deste trabalho, existem vários fatores que influenciam na eficiência da máquina, e um deles está representado na Figura 2.7, que mostra a relação da eficiência com a carga para três motores de indução com diferentes potências nominais.

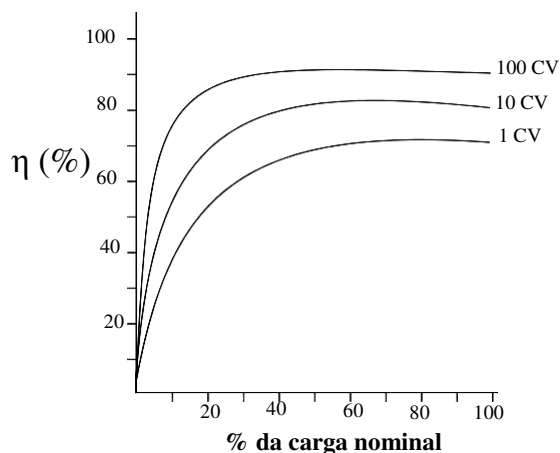


Figura 2.7 – Curva de eficiência da máquina de indução [7].

Como a Figura 2.7 ilustra, em geral, o motor de indução opera de forma mais eficiente com o carregamento em torno de 75% da carga nominal; apresentando uma diminuição entre 25% e 50% da carga nominal e abaixo disso, caindo drasticamente. Também pode ser percebido que, quanto maior a potência do motor, além de um aumento na eficiência, a curva característica tende a permanecer em seu máximo em uma faixa mais larga da carga.

A causa mais óbvia para esta diferença de performance da eficiência entre diferentes potência da máquina de indução está no custo que elas representam. Uma máquina de pequena potência é mais barata na sua aquisição e consome menos energia durante sua vida útil, daí não justifica um maior investimento na qualidade de sua fabricação e do material que a compõe. Quanto maior a potência da máquina, melhores os materiais utilizados, e mais cuidadoso o processo de fabricação da mesma. Já foi mencionado que atualmente somente as máquina de grande potência são dotadas de rotores com barras de cobre, que são mais caros, porém reduzem as perdas resistivas do rotor.

As curvas apresentadas na Figura 2.7 representam valores médios de produtos existentes no mercado e, até a década de setenta, os fabricante de motores estavam livres de normatização de índices de eficiência mínimos para motores, principalmente por que até então o custo da energia não era um fator preponderante na escolha dos equipamentos. A crise do petróleo ainda na década de setenta fez o custo da energia crescer consideravelmente e aumentou a percepção de que os recursos energéticos eram limitados, e, conseqüentemente, a preocupação em utilizar racionalmente estes recursos. Assim, a eficiência dos dispositivos que consumiam energia passou a ter importância política e teve início um processo de normatização destes valores que atualmente abrange todas as regiões do mundo.

No início da década de oitenta, o Congresso dos Estados Unidos aprovou o Ato de Política Energética [11], que, entre várias medidas com o objetivo de aumentar a eficiência do uso de energia no país, estabeleceu padrões de eficiência mínimos para os motores de indução trifásicos a serem fabricados no país. Depois disso, vários outros países adotaram medidas semelhantes, entre eles o Brasil, através de atos legislativos semelhantes [12], diferindo apenas na obrigatoriedade dos mesmos [13].

Os valores padrões mínimos de eficiência se referem à situação de carga nominal. O padrão brasileiro atualmente em vigor (Decreto No. 4508/2002) estabelece estes valores para motores trifásicos de indução com rotor em gaiola de esquilo com as seguintes características:

- Com frequência nominal de 60 Hz ou 50 Hz para operação em rede de distribuição de corrente alternada trifásica de 60 Hz, e tensão nominal até 600V;
- Nas potências nominais de 1 a 250cv, nas polaridades de 2, 4, 6 (até 200cv) e 8 pólos (até 150cv);
- Do tipo totalmente fechado com ventilação externa, acoplada ou solidária ao próprio eixo de acionamento do motor elétrico;

- Para operação contínua e em uma única velocidade nominal.

O Decreto também especifica o método de ensaio para determinação do índice de eficiência dos motores, que é aquele estabelecido na Norma NBR 5383 -1 /2001 da ABNT - Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1 - Motores de Indução Trifásicos - Ensaio. E [14], por fim, define os níveis mínimos de eficiência nominal a serem atendidos para as linhas de motores padrão e alto rendimento. A Tabela 2.1 apresenta uma comparação entre estes índices para os motores de 4 pólos.

Tabela 2.1 – Índices de Eficiência Nominal Mínimos

Potência (cv)	Eficiência Nominal Mínima (%)	
	Padrão	Alto Rendimento
1	78	80,5
1,5	79	81,5
5	85	87,5
7,5	87	89,5
10	87,5	89,5
20	89,5	91
50	92,4	93
60	93	93,6
100	93,2	94,5
150	93,5	95
200	94,5	95
250	94,5	95

Estes índices tornaram-se obrigatórios para motores fabricados no país ou importados a partir do ano de 2003. Atualmente, após cinco anos de sua implantação, cerca de 10% dos motores produzidos no país são de alto rendimento. A Portaria Interministerial No. 553 foi publicada no final de 2004 com o objetivo de alterar este cenário a partir de 2009. De acordo com esta portaria, todos os motores fabricados no país ou importados para comercialização ou uso no Brasil deverão obedecer aos índices mínimos de eficiência nominal estabelecidos para os motores de alto rendimento. Ou seja, a partir da metade no ano de 2009, a produção nacional de motores de indução trifásicos deverá ser elevada dos atuais 10% para 100%.

Os meios de adaptação da indústria nacional a estas metas impostas pelo governo ainda trazem preocupações no momento, principalmente porque vai aumentar significativamente a demanda por alguns materiais, em especial chapas de aço-silício. Além disso, a demanda e o preço do ferro têm aumentado muito no mundo, sendo preciso garantir seu suprimento, para que não haja impactos no preço final. Estes e outros problemas virão a tona a partir de 2009 [15].

Apesar desta iniciativa do governo brasileiro em melhorar a eficiência dos motores de indução em uso no país, os índices adotados ainda estão aquém dos praticados em outras regiões do mundo, mesmo os índices do motor de alto rendimento. Nos Estados Unidos, o padrão NEMA já estabeleceu os limites mínimos para uma classe de motores denominados **Premium**, que, apesar de terem adesão voluntária, já representam mais de 20% do mercado de motores [16]. A União Européia também está atenta a esta evolução da qualidade dos motores e a IEC está finalizando um novo padrão de motores que inclui uma classificação de índices de eficiência similar ao padrão Premium.

A Figura 2.8 mostra uma comparação entre os valores mínimos de eficiência de motores elétricos de indução fechados de 4 pólos, estabelecidos pelos padrões norte-americanos (NEMA Premium), europeu (IEC eff 3) e brasileiro (Motor Alto Rendimento). Nela, pode ser observada a igualdade entre os padrões NEMA e IEC, enquanto o padrão nacional, que só será obrigatório a partir de 2009, ainda está abaixo dos demais. Convém ressaltar que o padrão IEC possui classificações de motores com menores valores de índices de eficiência, denominados, eff1 e eff 2, sendo que o primeiro possui valores similares ao motor Padrão nacional, enquanto o segundo se aproxima dos índices definidos para o motor de Alto Rendimento.

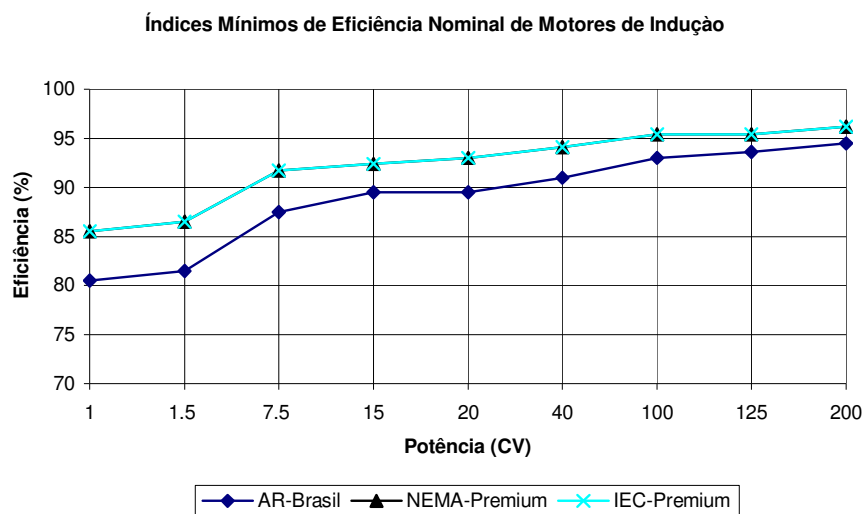


Figura 2.8 – Comparação entre índices mínimos de eficiência para motores

Comparando em termos de valores médios de eficiência nominal mínima, o motor de alto rendimento apresenta uma eficiência média ($\eta_{\text{médio}}$) de 89,5%, enquanto o motor Premium apresenta uma eficiência média de 92,6%. Apesar de pequena a diferença numérica entre os

índices (3,1%), quando se analisa o percentual de redução de perdas entre os dois tipos de motores se tem uma visão mais realista do desafio que se apresenta para a indústria nacional de motores. A Tabela 2.2 sumariza esta visão por faixa de potência de motores e nela pode observado que, para que os motores considerados de alto rendimento pela legislação brasileira consigam atingir a eficiência dos motores Premium, será necessário uma redução das perdas na ordem de 20%.

Tabela 2.2 –Redução de Perdas dos Motores Premium em relação aos Motores de Alto Rendimento

Faixa de Potência (cv)	Redução de Perdas (Premium X Alto Rendimento)
1 – 10	22,31%
12,5 - 50	17,75%
60 - 100	20,09%
125 - 250	20,09%

Para atingir este objetivo, todos os componentes do motor de indução terão que ser reavaliados com vistas a redução de perdas, assim como os processos de fabricação, o projeto e algumas normatizações, como aquelas que padronizam as carcaças.

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou uma introdução aos princípios de funcionamento e construtivos de um motor de indução e ao mesmo tempo deu início à análise de um problema que tem envolvido iniciativas de todas as regiões do mundo: como melhorar a eficiência de um motor de indução.

As iniciativas apresentadas se referem à padronização de índices mínimos para a eficiência nominal de motores de indução, cuja estratégia de implantação passa pela adoção obrigatória ou voluntária a estes índices por parte dos fabricantes. No entanto, aplicação prática desta estratégia passa por melhorias nos componentes ativos e inativos da máquina otimizando o material utilizado, o design da máquina e aperfeiçoando os processos de fabricação. E este objetivo se inicia com um conhecimento detalhado deste problema.

Capítulo III

PERDAS DE POTÊNCIA

Este capítulo trata com detalhes as perdas de potência que ocorrem na operação de um motor de indução trifásico e ainda inicia a apresentação de como determinar estas perdas. A Figura 3.1 mostra um Diagrama de Sankey de um motor de indução, representando a evolução da potência entregue nos terminais do enrolamento do estator (P_{entrada}) até a potência mecânica entregue a carga ($P_{\text{saída}}$), destacando as perdas existentes durante o processo.

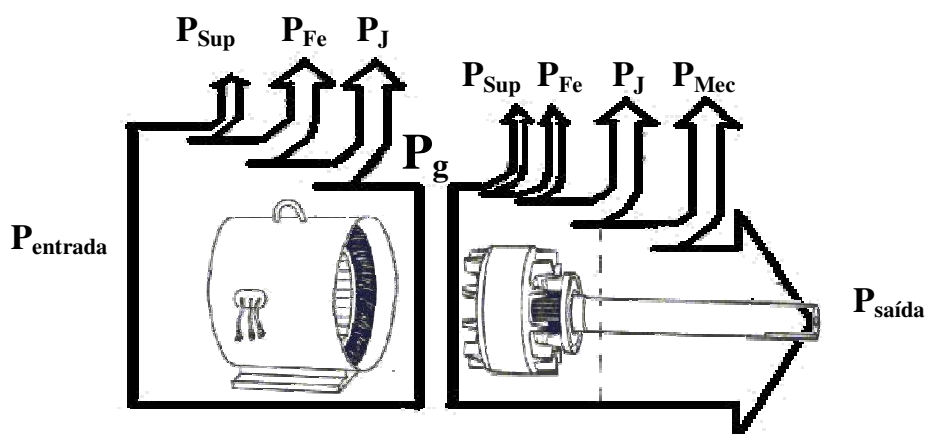


Figura 3.1 – Diagrama de Sankey de um motor de indução [17].

A Potência existente entre o rotor e o estator da máquina é denominada Potência do entreferro (P_g). No diagrama, as áreas das setas são um indicativo das quantidades de cada uma das perdas da máquina. Nele podemos visualizar que existem quatro tipos de perdas na máquina, a saber:

- ✓ Perdas Resistivas (P_J): Associadas aos elementos condutores da máquina, estas perdas estão presentes tanto no rotor como no estator. Também são denominadas perdas joulícas;
- ✓ Perdas Magnéticas (P_{Fe}): associadas ao núcleo ferromagnético da máquina, também estão presentes tanto no rotor como no estator. São as perdas por histerese e por correntes parasitas;

- ✓ Perdas Mecânicas (P_{Mec}): presentes apenas na parte móvel da máquina (rotor) são as perdas causadas pelo atrito existentes entre as partes fixas e móveis da máquina e pela potência utilizada na ventilação;
- ✓ Perdas Suplementares (P_{SUP}): Associadas às imperfeições construtivas da máquina, são as mais complexas e as mais difíceis de determinar. Possuem componentes de alta frequência e de frequência fundamental e, por estarem distribuídas pela máquina, são definidas, por exclusão, como aquelas que não estão contempladas nas definições anteriores.

No caso dos motores de indução com rotor bobinado, ainda devem ser consideradas as perdas pelo contato das escovas, que poderiam ser incluídas nas Perdas Mecânicas.

Nos itens a seguir serão detalhados os tipos de perdas citados acima e apresentado uma das formas de como elas são determinadas. Será apresentado o primeiro método para a determinação das perdas de forma pouco intrusiva: o Método E1 do Padrão da IEEE 112-1996 para testes em motores e geradores de indução polifásicos [5]. O Padrão IEEE foi escolhido por ser uma referência internacional em normas do setor elétrico e, dentre os métodos para determinação de eficiência de máquinas de indução constantes no Padrão IEEE 112-1996, o Método E1 foi selecionado por ser de alta precisão e por calcular as perdas individualmente.

3.1. PERDAS RESISTIVAS

As expressões (2.7) e (2.8) do capítulo anterior, reproduzidas abaixo, especificam uma forma de cálculo das perdas resistivas. A partir delas verificamos que as perdas resistivas do estator são calculadas diretamente a partir da resistência dos condutores (r_s) e da corrente da corrente que passa por eles. As perdas resistivas do rotor, devido à dificuldade prática de determinação de sua resistência, são calculadas a partir da potência ativa que passa pelo entreferro (P_g) da máquina.

$$P_{Jr} = sP_g \quad (3.1)$$

$$P_{Js} = 3I_f^2 r_s \quad (3.2)$$

Para um melhor entendimento do comportamento destas perdas da máquina de indução, faz-se necessário descrever os fatores que afetam o valor da resistência; os elementos condutores da máquina de indução; e, finalizando, um método para o cálculo destas perdas.

3.1.1 – Fatores que afetam a Resistência de um Material Condutor

A resistência de um material condutor, que é definida como a avaliação quantitativa da maior ou menor oposição que uma peça de material condutor opõe ao fluxo de elétrons e varia de material para material, sendo que no mesmo material depende de sua geometria segundo a expressão:

$$R = \rho_c \frac{\ell}{S} \quad (3.3)$$

Onde:

R - resistência do corpo, em Ω ;

ρ_c - resistividade do material, em $\Omega.m$;

ℓ - comprimento do corpo, em m ;

S - área da seção reta do corpo perpendicular à direção da corrente, em m^2

A resistividade do cobre e do alumínio são, respectivamente, $1,72 \times 10^{-8} \Omega.m$ e $2,8 \times 10^{-8} \Omega.m$. A resistência destes materiais é afetada pelos seguintes fatores:

3.1.1.1 Temperatura

Uma das propriedades físicas dos metais é a sua suscetibilidade a deformação quando submetido a aumento de temperatura. A deformação linear a que os metais estão sujeitos é caracterizada pelo coeficiente de dilatação linear (α), que representa o alongamento por unidade linear do material ($\Delta \ell / \ell_0$) por variação de temperatura a que o material for submetido (ΔT).

$$\alpha = \frac{\Delta \ell}{\ell_0 \Delta T}, \text{ em } (^{\circ}C^{-1}) \quad (3.4)$$

A variação do comprimento do material condutor afeta a sua resistência elétrica na mesma proporção e podemos, inclusive, utilizar o coeficiente de dilatação linear para definir a variação da resistência com a temperatura.

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_1(\Delta T)} = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \quad (3.5)$$

Onde:

R_1 – Valor da Resistência na temperatura T_1 , em Ω ;

R_2 – Valor da Resistência na temperatura T_2 , em Ω ;

ΔT – Variação de Temperatura ($T_2 - T_1$) ($^{\circ}\text{C}$)

O Coeficiente α do Cobre e do Alumínio são iguais a $3,9 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Aplicando este coeficiente na fórmula acima, verificamos que a cada variação de 10°C a que o enrolamento de cobre ou alumínio é submetido sua resistência é acrescida em 3,9% do valor na temperatura inicial. O gráfico abaixo mostra a variação da resistência para dois condutores (um de cobre e outro de alumínio) com dimensões idênticas ($\ell=100\text{m}$, $S=1,5\text{mm}^2$) submetidos a uma variação de temperatura de 180°C .

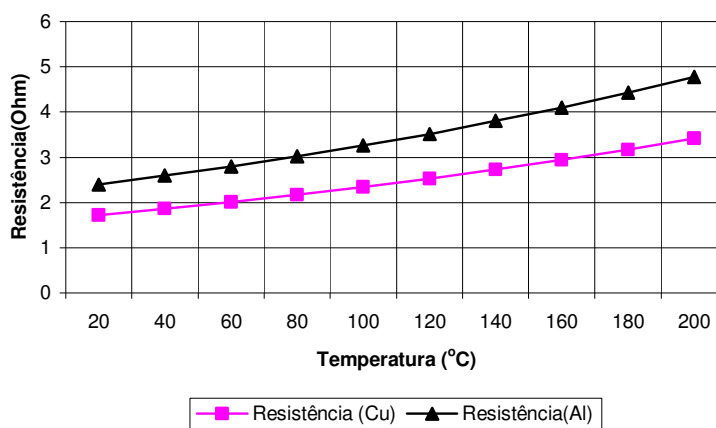


Figura 3.2 – Influência da Temperatura sobre a resistência de condutores

A Resistência de um condutor pode aumentar em 39% quando submetida a uma variação de temperatura de cerca de 100°C . No entanto, esta faixa de variação de temperatura provocaria danos no isolamento dos condutores do estator que, segundo as classes de isolamento normatizadas, suportam temperaturas finais máximas na ordem de 130°C (Classe B – Materiais à base de poliéster e poli-imídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com estes).

Convém salientar ser esta a variação considerada pelo Padrão IEEE 112-1996 para corrigir o valor da resistência quando submetida a variações de temperatura.

3.1.1.2 Efeito Pelicular

Ocorre porque o centro do condutor é enlaçado por mais linhas de fluxo magnético que as extremidades, aumentando a indutância e reduzindo a corrente nesta região. Esta distribuição não uniforme da corrente faz com a resistência em corrente alternada se torne maior. A Figura 3.3 mostra de forma simplificada a influência deste comportamento sobre a densidade de corrente no condutor. Quanto maior for a frequência da corrente do condutor e quanto maior a sua seção transversal, maior o efeito pelicular.

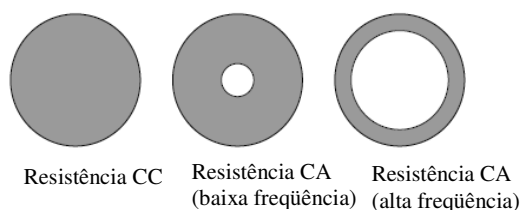


Figura 3.3 – Representação simplificada do Efeito Pelicular

O efeito pelicular em sua forma mais simples, ou seja, considerando um condutor puramente resistivo, é influenciado exclusivamente pela frequência da corrente de acordo com a expressão:

$$R_{AC} = R_{CC} k \sqrt{f} \quad (3.6)$$

Onde,

R_{AC} = Resistência de corrente alternada, em Ω ;

R_{CC} = Resistência de corrente contínua, em Ω ;

k = fator do condutor (depende da seção);

f = frequência, em MHz

Esta expressão está representada graficamente na Figura 3.4 para diferentes seções de cabos de cobre.

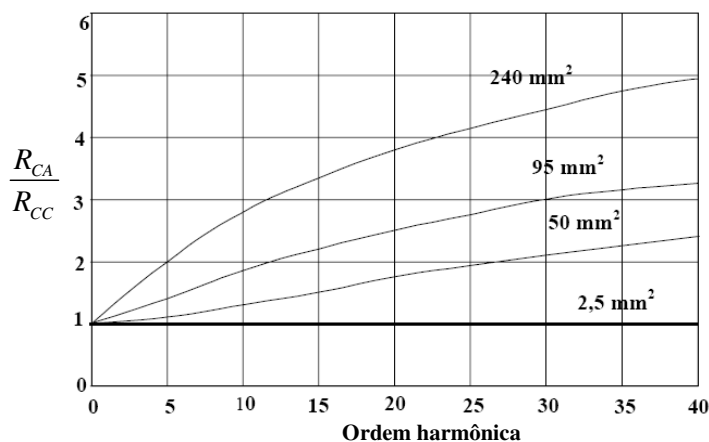


Figura 3.4 – Relação entre a Resistência CA e CC em função da ordem harmônica para cabos de seção 2,5-50-95 e 240 mm² [19].

Do gráfico, pode-se perceber a influência da frequência e da seção do condutor sobre o fenômeno do efeito pelicular. No caso dos enrolamentos do motor de indução, a maior influência deste efeito recai sobre os enrolamentos do estator de motores de potência elevada, bem como sobre as barras do rotor, que possuem seções transversais significativas mesmo nos motores de baixa potência.

3.1.1.3 Efeito Proximidade

Ocorre devido a distorção nos campos magnéticos provocados pela proximidade entre condutores, também causando distorções nas densidades de corrente. O efeito proximidade é menos significativo, principalmente no barramento do rotor.

3.1.2. – Elementos condutores da máquina de indução

Os condutores de uma máquina de indução estão localizados no estator e no rotor. No estator, os condutores são fios de cobre ou alumínio de seção circular e isolados com camada de esmalte. São distribuídos em três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, e são inseridas nas ranhuras do núcleo magnético, devidamente amarrados com cadarços de fibra de vidro e, no final do processo, são submetidos a uma impregnação com resina epóxi ou poliéster para permitir maior rigidez mecânica e dielétrica. Os enrolamentos do estator da máquina são distribuídos de forma não-uniforme, com o objetivo de gerar uma força magnetomotriz na região do entreferro com a forma o mais próxima possível de uma senóide. A Figura 3.5 abaixo mostra o arranjo dos enrolamentos nas ranhuras do núcleo magnético do

estator para uma das fases. As bobinas são distribuídas espacialmente no interior do núcleo de forma a obter um espaçamento de 120° entre as fases. Para motores de média tensão, os condutores são de cobre com seção retangular.

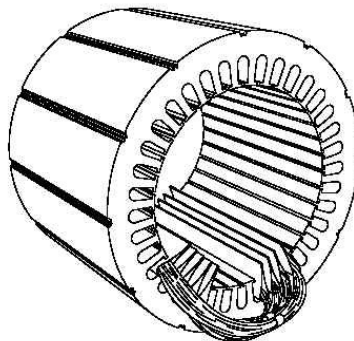


Figura 3.5 – Enrolamento do estator

Os condutores do rotor de uma máquina de indução, na maioria dos casos, não são feitos de forma equivalente aos do estator, com bobinas de fios de cobre ou alumínio distribuídos por ranhuras na superfície do núcleo magnético (rotor bobinado), mas sim com barras de cobre ou alumínio inseridas diretamente dentro do núcleo e com as extremidades curto-circuitadas na parte final do rotor (gaiola de esquilo). A Figura 3.6 mostra uma representação do rotor do tipo gaiola de esquilo.

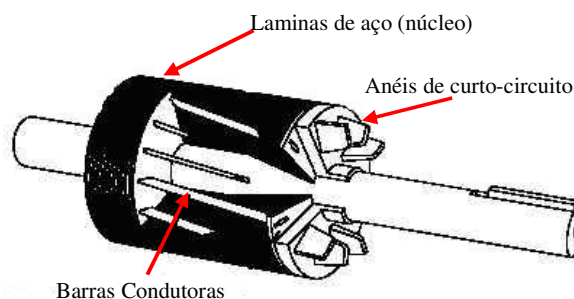


Figura 3.6 – Condutores do rotor.

Nos motores de pequena potência, atualmente a gaiola é constituída de barras de alumínio fundido, entretanto, já existem novos motores sendo desenvolvidos com barras de cobre, cujo alto investimento necessário devido ao custo do material e à complexidade do processo de fabricação, já está sendo compensados pelo alto valor da energia e pelos ganhos obtidos com a redução de perdas [8].

3.1.3 Cálculo das Perdas Resistivas

Entendido os fatores que afetam a resistência dos materiais condutores pertencentes à máquina de indução e a disposição destes componentes na máquina de indução, vamos ao cálculo da potência dissipada pelo efeito resistivo.

A expressão (3.7) mostra o cálculo das perdas resistivas do estator (P_{Js}), no entanto, a medição de r_s com o motor em operação é de difícil implementação, parte-se de um valor de resistência medido com o motor desligado a partir dos terminais de alimentação da máquina (R_{CC}). A partir deste valor de resistência, o cálculo das perdas resistivas do estator, de acordo com o padrão IEEE, é feito da seguinte forma:

$$P_{Js} = \frac{3}{2} I^2 R_{CC} \quad (3.7)$$

Onde,

I = Corrente rms medida na entrada da máquina para uma determinada situação de carga, em A;

R_{CC} = resistência CC entre qualquer um dos terminais do estator corrigida para uma temperatura especificada, em Ω

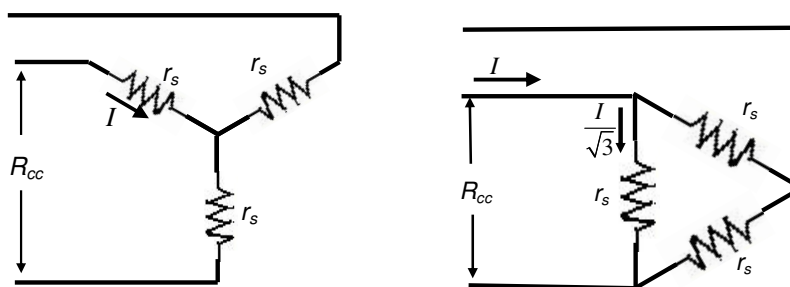


Figura 3.7 - Representação da resistência dos enrolamentos do estator em ligações delta e estrela

A Figura 3.7 mostra que a expressão (3.7) é válida tanto para a situação em que os enrolamentos do estator estão ligados em delta ($R_{CC}=2r_s/3$), como para a ligação em estrela ($R_{CC}=r_s/2$). Existe um padrão IEEE específico para medições de resistências [20], porém, este assunto será abordado quando da apresentação das medições realizadas em laboratório (Capítulo V).

A medição da resistência R_{CC} é feita com o motor desligado e com os enrolamentos em temperatura ambiente, Como foi relatado anteriormente neste capítulo, o valor da resistência é afetado pela temperatura do material condutor. Assim, faz-se necessário a correção do valor medido de R_{CC} para a temperatura de operação do motor. O IEEE estabelece a seguinte expressão para a correção do valor resistivo para a temperatura de operação.

$$R_s = \frac{R_t(t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (3.8)$$

Onde,

R_s = resistência do enrolamento, corrigida para um determinada temperatura t_s , em Ω ;

R_t = resistência do enrolamento medido a uma temperatura t_t , em Ω ;

t_s = temperatura especificada para correção da resistência medida, em $^{\circ}\text{C}$;

t_t = temperatura do enrolamento quando a resistência foi medida, em $^{\circ}\text{C}$;

$k = 234,5$ para enrolamentos de cobre, e 225 para enrolamentos de alumínio, baseado em um volume condutivo de 62%.

Nos casos em que não é possível fazer a medição da temperatura do enrolamento da máquina, o que é o caso dos motores em operação, a resistência medida pode ser corrigida para as temperaturas da tabela abaixo, que dependem da classe de isolamento da máquina.

Tabela 3.1 - Temperatura de operação por classe de isolamento

Classe de Isolamento	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
A	75
B	95
F	115
H	130

As Perdas resistivas do rotor (P_{Jr}) são um pouco mais difíceis de determinar já que não existe acesso para as medidas de corrente e de resistência necessárias para o cálculo direto da potência dissipada. Assim, como já ficou especificado, estas perdas são obtidas a partir da potência do entreferro (P_g) e do escorregamento (s) da máquina, de acordo com a seguinte expressão.

$$P_{jr} = sP_g, \text{ em W} \quad (3.9)$$

O valor da potência de entreferro (P_g) é obtido a partir de valores de perdas já calculados a partir da seguinte expressão,

$$P_g = P_{entrada} - P_{Js} - P_{Fe} \quad (3.10)$$

A Potência de entrada ($P_{entrada}$) é calculada diretamente a partir de medições de corrente e tensão e fator de potência nos terminais de entrada da máquina; as perdas resistivas do estator (P_{Js}) foram objeto de análise no início deste item e as perdas magnéticas (P_{Fe}) serão tratadas no item a seguir.

3.2 PERDAS MAGNÉTICAS

As perdas de potência em um material magnético submetido a uma variação de densidade de fluxo magnético são de dois tipos: perdas por histerese e perdas por correntes parasitas, sendo que esta última foi dividida em duas componentes denominadas perdas clássicas e perdas por excesso. As perdas magnéticas totais resultam da soma destas três componentes:

$$P_{Fe} = P_{hist} + P_{class} + P_{exc} \quad (3.11)$$

- Perdas por histerese (P_{hist}): Quando os enrolamentos do rotor e do estator da máquina de indução são percorridos por uma corrente alternada, a intensidade do campo magnético (H) do núcleo varia de máximos positivos a máximos negativos, o que produz uma variação proporcional na densidade do fluxo magnético (B) induzido, que no material ferromagnético se caracteriza por uma mudança contínua na direção de seus domínios magnéticos. A energia necessária para fazer este deslocamento é dissipada em forma de calor.
- Perdas clássicas (P_{class}): Causada pela natureza condutora dos materiais ferromagnéticos, que, quando submetidos a campos variantes no tempo, provocam, segundo Faraday, o aparecimento de uma tensão induzida, o que provoca o aparecimento de correntes “parasitas” circulando pelo núcleo; estas, por sua vez, induzem campos magnéticos na direção contrária daqueles que a geraram, requerendo uma energia adicional para a variação do fluxo magnético na direção desejada. Até recentemente, estas perdas tinham a denominação de perdas por correntes parasitas ou correntes de Foucault, entretanto, ficou

comprovado que a expressão utilizada para o cálculo destas perdas não caracterizava a totalidade das mesmas e foi definida uma expressão para estas perdas excedentes;

- Perdas por excesso (P_{exc}): Estas perdas representam a parcela de perdas produzidas por correntes parasitas e que não eram calculadas pelo método clássico.

3.2.1 Perdas por Histerese

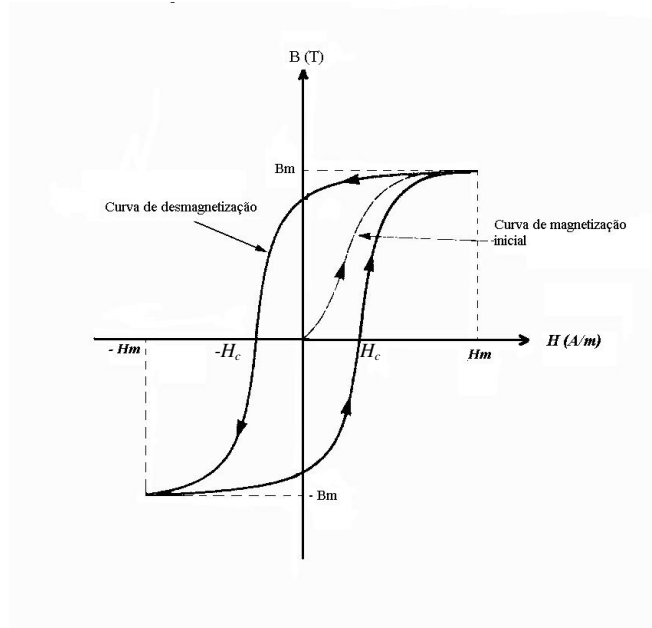


Figura 3.8- Curva de histerese de um material ferromagnético [21].

Estas perdas são representadas pela área do interior da curva de histerese mostrada na Figura 3.8. Para entender este conceito perda faz-se necessário analisar a variação da energia armazenada no circuito magnético (W_f) durante o todo o ciclo de histerese. Esta energia é representada pela expressão:

$$W_f = \int_{B_2}^{B_1} H dB \quad (3.12)$$

Utilizando-se esta expressão no ciclo completo de histerese, verifica-se uma diferença entre a variação da energia armazenada durante o deslocamento da intensidade de campo de seu máximo positivo para o seu máximo negativo e durante o deslocamento inverso. Esta diferença está representada graficamente na área no interior do ciclo de histerese e é a energia utilizada para orientar os domínios magnéticos na direção do campo aplicado e no movimento das paredes destes domínios.

Para uma aplicação de um campo oscilando a uma frequência f ciclos de magnetização por segundo em um material ferromagnético de volume v , têm-se a seguinte expressão para as perdas por histerese:

$$P_{hist} = f v w_h \quad (3.13)$$

Onde,

w_h = área interna do ciclo de histerese, em J/m^3

Steinmetz desenvolveu a seguinte expressão empírica das perdas em função da indução máxima (B_{max}) [22].

$$P_{hist} = f v k_h B_{max}^n$$

Onde,

k_h – parâmetro que depende do material e da geometria do núcleo;

n - parâmetro que depende do material e do valor de B_{max} , oscilando entre 1,6 e 2,2

3.2.2 Perdas Clássicas

Os materiais ferromagnéticos também possuem uma característica de condutividade, que, apesar de fraca, quando submetido a um campo magnético variante, tem em seu interior o aparecimento de correntes induzidas, que por sua vez induzem um campo magnético em direção oposta à do campo aplicado. Esta ação das correntes induzidas no material (correntes parasitas) impõem uma dificuldade na magnetização do mesmo na direção desejada, provocando um alargamento na curva de magnetização. Antes desta denominação de perdas clássicas, já foram conhecidas como **perdas por corrente de Foucault**. A Figura 3.9 mostra a ação destas correntes parasitas no ciclo de histerese.

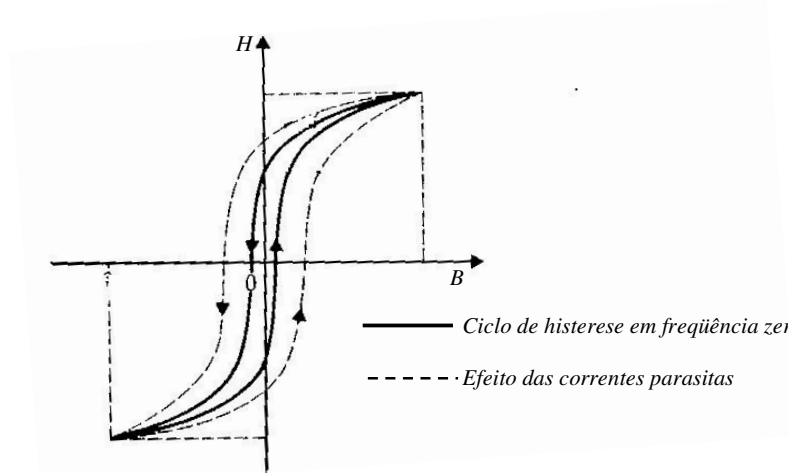


Figura 3.9 – Efeito das correntes parasitas na curva de magnetização [21]

As perdas clássicas podem ser calculadas a partir da seguinte expressão [23]:

$$P_{class} = \frac{\sigma d^2}{12 f m_v} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt \quad (3.14)$$

Onde,

d – espessura da lâmina do material, em m;

σ – condutividade elétrica, em $\Omega.m$;

m_v – densidade específica.

Nesta expressão podemos observar o valor das perdas é diretamente proporcional ao quadrado da espessura do material, daí a necessidade de se dividir o núcleo magnético em lâminas isoladas de espessuras que chegam a 25 mm.

A influência da espessura do material e de sua condutividade pode ser observada no Figura 3.10, onde pode ser visto que as perdas são reduzidas com o aumento da resistência elétrica do material ferromagnético (diminuição de sua condutividade) e com a redução da espessura das lâminas do mesmo.

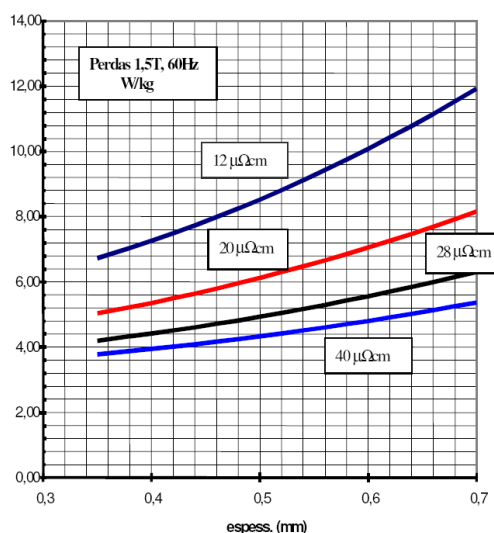


Figura 3.10 - Efeito da espessura das chapas e da resistência elétrica do material nas perdas [24].

A evolução dos estudos das perdas dos materiais ferromagnéticos levou a conclusão que as perdas apresentadas até aqui não compreendiam todo o universo das perdas detectadas. Apareceram valores medidos superiores ao esperado, o que levou a denominação de um novo tipo de perdas: perdas por excesso.

3.2.3 Perdas por excesso [25] [26]

O modelo clássico das perdas provocadas pelas correntes parasitas leva em consideração apenas aquelas geradas a partir da variação do campo magnético aplicado no material ferromagnético. No entanto, observou-se que o deslocamento das paredes dos domínios magnéticos também provoca uma variação de fluxo magnético que induzem correntes parasitas em nível microscópico.

Para determinação destas perdas foi necessário definir uma nova entidade física, denominada **objeto magnético (OM)**. Este OM pode incluir vários domínios magnéticos ou, no caso de materiais micro cristalinos, toda a estrutura de domínio contida em um simples grão faz o papel de um OM. Sua definição se fez necessária porque o deslocamento de uma parede de domínio não ocorre de forma isolada e pode provocar o deslocamento de outros segmentos da mesma parede ou de várias. Assim, os diferentes segmentos de uma mesma parede ou um conjunto delas estão correlacionadas e constituem um OM.

Analisando a magnetização do material a partir deste conceito e considerando inicialmente que apenas um OM esteja ativo (magnetizado na direção do campo aplicado), tem-se que um aumento da densidade de fluxo (dB/dt) irá requerer um campo em excesso $H_e(t)$ para contrabalançar o efeito das correntes parasitas em excesso. Quando este campo é suficientemente grande ele irá exercer uma pressão sobre os outros OM para que se tornem ativos e assim por diante até que se tenha uma magnetização homogênea.

Definindo o parâmetro V_o para representar a oposição dos OMs de se tornarem ativos e G uma constante que representa o coeficiente de atrito de um OM, obteve-se a seguinte expressão para as perdas por excesso.

$$P_{exc} = \frac{\sqrt{\sigma G V_o S}}{f m_v} \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^{1.5} dt \quad (3.15)$$

Onde,

S – seção magnética efetiva

Os valores de G e de V_o são de difícil determinação e exigem alta tecnologia. Normalmente são evitados tanto no meio acadêmico como no industrial, no entanto, existem outras formas mais simples para determinação das perdas magnéticas.

3.2.4 Circuito magnético da máquina de indução

O circuito magnético da máquina de indução é composto do núcleo do estator, do entreferro e do núcleo do rotor. A Figura 3.11 mostra um corte transversal deste circuito em uma máquina com rotor em gaiola de esquilo, onde podem ser visualizadas as ranhuras do estator para a colocação dos enrolamentos e também as do rotor onde são inseridas as barras de cobre ou alumínio. A Figura 3.11 mostra também o formato das lâminas do material ferromagnético que compõe o núcleo da máquina; estas lâminas são feitas de aço silício, agrupadas e isoladas entre si com camadas de verniz para redução das perdas por correntes parasitas.

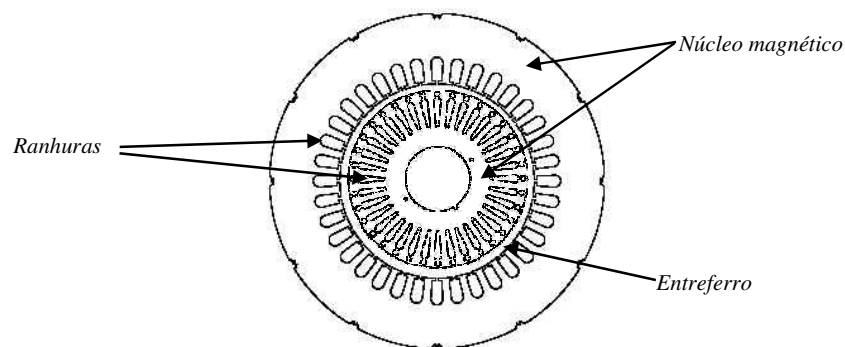


Figura 3.11 - Vista transversal do circuito magnético de uma máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo

Os aços para aplicação em circuitos magnéticos utilizados em equipamentos elétricos são do tipo Grão Orientado (GO) e Grão Não-orientado (GNO) [23].

- Aço de grão orientado (GO): O processo de corte e laminação do material é feito de forma a manter a lâmina na direção das arestas do cubo da célula unitária do material, o que, conforme foi demonstrado no item anterior, facilita a magnetização do material. É utilizado principalmente em transformadores de alta e média potência, onde a montagem por partes permite o alinhamento das linhas do fluxo magnético com a direção de laminação das chapas.
- Aço de grão não-orientado (GNO): Utilizado nos núcleos de máquinas de indução onde as linhas de fluxo magnético, apesar de paralelas à superfície da lâmina, não seguem uma única direção, o que requer processos de fabricação distintos do aço de grão orientado. A figura 3.12 mostra as diferentes direções que o fluxo magnético da máquina de indução segue durante sua operação.

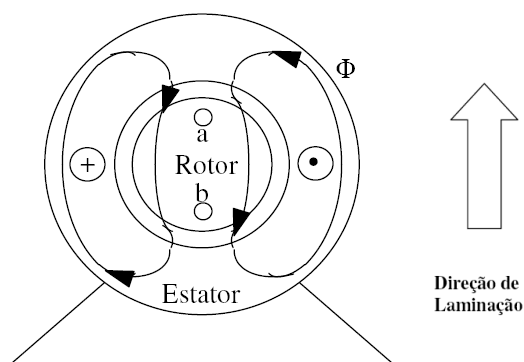


Figura 3.12 - Direção do fluxo magnético em uma máquina de indução

Os aços do tipo GNO podem ser classificados quanto às suas perdas magnéticas em três tipos, a saber:

- aço de *alto rendimento*, com perdas magnéticas em torno de 1,0 W/kg,
- aço de *médio rendimento*, com perdas magnéticas por volta de 2,0 W/kg,
- aço de *baixo rendimento*, com perdas magnéticas ao redor de 4,0 W/kg.

As lâminas de aço GNO fabricados no Brasil apresentam perdas magnéticas que variam de 3,1 a 4,5 W/kg e espessuras de 0,27 a 0,50 mm. São, portanto, aços de baixo rendimento [23].

3.2.5 Cálculo das perdas magnéticas

Os tipos de perdas aqui apresentados são de difícil determinação a partir das expressões de cada uma delas. Daí que a determinação de cada uma destas perdas separadamente é um esforço a ser empreendido por laboratórios especializados e com objetivos específicos no desenvolvimento de novos materiais ou no aprimoramento nos processos de fabricação dos já existentes. Para o objetivo deste trabalho não há a necessidade de separação dos diferentes tipos de perdas magnéticas, pois estamos interessados na determinação da eficiência da máquina a partir de métodos pouco intrusivos.

O Método proposto pelo padrão IEEE 112-1996 não separa estas perdas e parte de um teste a vazio da máquina de indução para determinar as perdas magnéticas e mecânicas em conjunto para posterior separação. Recordando o circuito equivalente do motor de indução apresentado no capítulo II e reproduzido na Figura 3.13, temos que em um teste a vazio o

escorregamento da máquina é praticamente nulo, o que elimina as perdas resistivas do rotor e reduz as perdas da máquina às magnéticas, mecânicas e resistivas do estator. Como a corrente a vazio da máquina é pequena, as perdas suplementares, que são proporcionais ao quadrado da corrente, também são desprezadas.

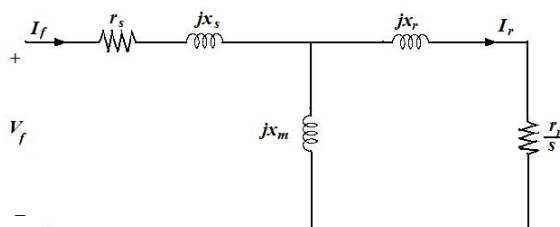


Figura 3.13 - Circuito equivalente de um motor de indução

Com o motor a vazio, realiza-se um teste reduzindo a tensão de alimentação do valor de 125% da tensão nominal até um ponto onde uma maior redução provoque um aumento da corrente de linha. A partir dos valores medidos de potência, corrente e tensão de entrada, plota-se um gráfico relacionando potência de entrada menos perdas no estator versus tensão, obtendo-se um resultado similar ao mostrado na figura 3.14.

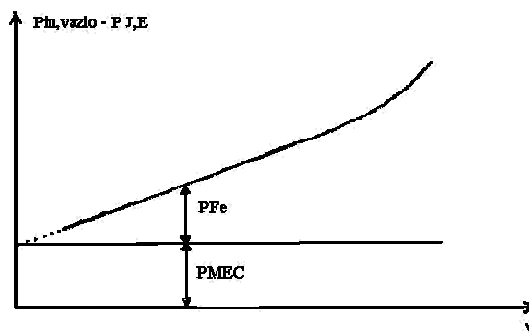


Figura 3.14 – Perdas Mecânicas e Magnéticas a partir do teste a vazio [17]

A extensão dos dados obtidos até o valor de tensão zero é feito por interpolação e, neste ponto as perdas magnéticas são nulas, restando apenas a perdas mecânicas. Após a obtenção do valor das perdas mecânicas (P_{Mec}), que, conforme veremos no próximo item, é constante para toda a faixa de carregamento do motor, obtemos o valor das perdas magnéticas a partir da seguinte expressão:

$$P_{Fe} = P_{vazio, V_n} - P_{J, V_n} - P_{Mec} \quad (3.16)$$

Onde,

P_{vazio, V_n} – Potência medida do motor a vazio em tensão nominal, em W;

P_{J, V_n} – Perdas no estator a tensão nominal, em W;

As Perdas magnéticas também têm valor praticamente constante em toda a faixa de carregamento do motor de indução, já que, como foi visto nas expressões das perdas que a compõem, sua variação depende exclusivamente da frequência e do nível da densidade de fluxo. No estator, estes valores não se alteram considerando uma alimentação com frequência e tensão constantes, e no rotor as frequências das correntes induzidas são muito pequenas (frequência de escorregamento) tornando a sua influência nas perdas magnéticas totais muito pequenas.

3.3. PERDAS MECÂNICAS [27] [28]

As Perdas mecânicas em uma máquina rotativa ocorrem por efeito do atrito e da ventilação para dissipação de calor. As potências dissipada com a ventilação tem um efeito redutor principalmente sobre as perdas resistivas, já que auxilia na redução da temperatura da máquina. As perdas por atrito são inerentes das partes rotativas, seja pelo contato com o ar seja pelo contato com os rolamentos que fazem a conexão com a parte fixa da máquina. Para o motor de indução estas perdas são divididas em cinco tipos.

- Perdas por atrito nos rolamentos;
- Perdas por atrito nos anéis V'Ring;
- Perdas por atrito do rotor com o ar;
- Perdas na ventilação externa;
- Perdas na ventilação interna provocada pelos anéis de curto-circuito do rotor.

Neste item serão analisados estes tipos de perdas mecânicas da máquina de indução. A forma de cálculo destas perdas segundo o padrão IEEE será revisto rapidamente, já que a explicação detalhada do teste foi feita no item anterior.

3.3.1 – Descrição das Perdas Mecânicas

A Figura 3.15 mostra algumas partes de um motor de indução com rotor de gaiola de esquilo com destaque para os componentes que provocam perdas mecânicas na máquina.

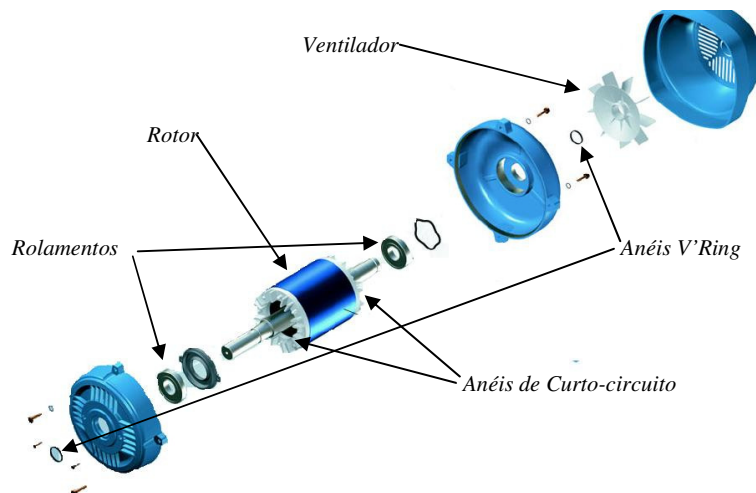


Figura 3.15 - Detalhe do motor de indução [10]

Dentre estes componentes, os rolamentos requerem uma atenção especial tanto do fabricante como do usuário, nem tanto pelas perdas que provocam, mas por serem o calcanhar de aquiles da máquina de indução, responsáveis por cerca de 69% das falhas existentes durante a sua vida útil [9].

3.3.1.1 Perdas por atrito nos rolamentos

Dependem da pressão dos rolamentos, da velocidade periférica do eixo e do coeficiente de atrito dos rolamentos; estes, por sua vez, dependem, no caso dos rolamentos de esferas utilizados nas máquinas de indução, do diâmetro das esferas. Existe também a influência de outros fatores como lubrificação e temperatura, mas, para condições normais de operação, a seguinte expressão pode ser utilizada para o cálculo destas perdas:

$$P_{Mec,rol} = 1,5F \frac{v}{d_{esf}} 10^{-5} \quad (3.17)$$

Onde,

F – Força radial no rolamento, em N;

v – velocidade periférica na superfície interna do rolamento, em m/s;

d_{esf} – diâmetro médio das esferas, em m.

Quase toda perda por atrito em um rolamento é transformada em calor dentro do próprio rolamento, o que acarreta em aumento de sua temperatura. O aumento excessivo desta temperatura pode ser causado por desalinhamento do eixo do rotor, por folga interna insuficiente, insuficiência ou excesso de lubrificante ou, lubrificante de má qualidade. Daí a necessidade de constante manutenção nos rolamentos da máquina, para que problemas deste tipo não acarretem em aumento das perdas e muito menos na saída de operação da mesma.

3.3.1.2 Perdas por atrito nos anéis V'Ring

Estes anéis de vedação são característicos de motores de indução com grau de proteção definido pela Norma NBR 9884 como IP54. Esta codificação representa os motores fechados com proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor e contra respingos em todas as direções, Trata-se de um tipo de motor muito utilizado na indústria, mesmo porque qualquer grau de proteção atende plenamente os requisitos dos Algarismos inferiores (exemplo: IP 44 atende os requisitos do IP 22), e o maior grau de proteção entre os motores de indução comerciais fabricados no Brasil é o IP 55.

As perdas com esta vedação (P_{ved}) ocorrem com o contato das duas borrachas dos anéis com o eixo do rotor, e podem ser calculadas a partir da seguinte expressão:

$$P_{ved} = 52,33 \mu F n d_s 10^{-3} \quad (3.18)$$

Onde,

μ – coeficiente de atrito (com valores entre 0,2 e 0,3), sem unidade;

F – força entre os anéis V'Ring de selagem no início e no final do eixo do rotor (valores típicos de 1N – 10N)

n – velocidade de rotação do motor, em rpm;

d_s – diâmetro médio dos anéis de vedação, em m.

3.3.1.3 Perdas na ventilação externa

Podem ser consideradas perdas necessárias ao bom funcionamento da máquina, pois a ventilação é responsável pela dissipação do calor gerado por todas as demais perdas. O dimensionamento do ventilador a ser acoplado no eixo do motor tem que levar em consideração todas as demais fontes geradoras de calor. A Figura 3.16 mostra estas fontes e sua direção de dissipação no interior da máquina, assim como a ação da ventilação externa.

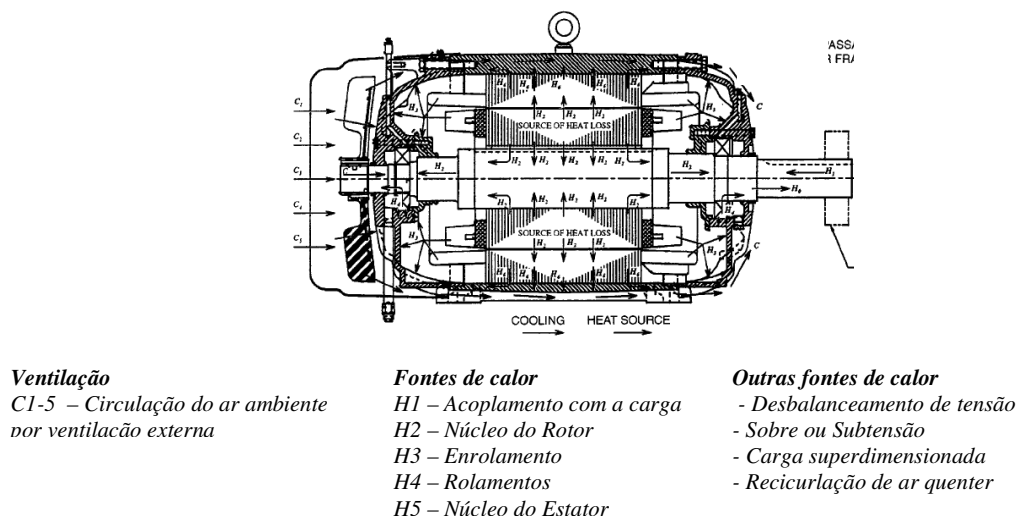


Figura 3.16 - Detalhes da Circulação de calor em um motor de indução[29]

A expressão para o cálculo das perdas mecânicas por ventilação (P_{vent}) externa é a seguinte:

$$P_{vent} = \frac{Z_m Q^3}{\eta_e} \quad (3.18)$$

Onde,

Z_m – resistência aerodinâmica (externa) do circuito de ventilação. Depende das características do ventilador (diâmetros, formato e quantidade de pás), da velocidade de rotação e da eficiência aerodinâmica do ventilador. Unidade em Pa.s/m^6 ;

Q – Vazão de saída com o motor em operação, em m^3/s ;

η_e – eficiência energética do ventilador, sem unidade.

A operação da máquina em velocidades abaixo da nominal reduz a capacidade do ventilador em retirar calor da máquina, levando a mesma a um sobreaquecimento. Esta variável deve ser levada em consideração no estudo térmico deste dispositivo.

3.3.1.4 Perdas por atrito na rotação do rotor e pela ventilação nos ventiladores internos (anéis de curto-circuito)

Estes dois ventiladores internos operam próximo ao máximo da vazão de saída de refrigeração, o que significa que sua resistência aerodinâmica (externa) Z_m é próxima de zero, assim como a eficiência energética do ventilador η_e . Assim uma fórmula aproximada para o cálculo destas perdas para cada um dos ventiladores foi obtida de forma empírica [27]:

$$P_{vent,int} = 2pP_{vent} \quad (3.19)$$

Onde,

p – número de pares de pólos;

P_{vent} – Perdas calculadas de acordo com a expressão das perdas por ventilação externa, considerando as características descritas acima.

3.3.2 Cálculo das Perdas Mecânicas

O Cálculo destas perdas a partir das expressões apresentadas no item anterior são realizados principalmente pelos fabricantes das máquinas e, portanto fora do objetivo do presente trabalho. O Método para o cálculo para o cálculo destas perdas descrito no Padrão IEEE 112-1996 já foi detalhado quando foi abordado o cálculo das perdas magnéticas, já que as perdas são calculadas em conjunto a partir de um teste a vazio e separadas posteriormente com um teste com redução de tensão.

Uma observação importante a ser levada em consideração é o percentual destas perdas em relação a potência de entrada da máquina e a sua relação com o número de pólos. A maior influência das perdas mecânicas sobre a potência ocorre em motores de 2 pólos, cujo valor médio é 1,6% [27]. Para motores de 4 pólos, obteve-se um valor médio de 0,8%, enquanto para motores de 6 pólos os valores médios foram de 0,6%. Assim, a maior possibilidade de se obter melhoras no rendimento atuando nas perdas mecânicas encontra-se nos motores de 2

pólos de menor potência, já que o citado trabalho verificou uma redução percentual destas perdas com o aumento da potência do motor.

3.4. PERDAS SUPLEMENTARES

Assim denominadas por englobarem todas as perdas da máquina que não foram incluídas nos itens anteriores. A sua denominação internacional (Stray Load Losses) faz a associação com a máquina sob carga, no entanto existem trabalhos que comprovam que estas perdas também estão presentes na máquina a vazio. Contradições desta espécie são características destas perdas que, mesmo após quase um século de pesquisas sobre suas origens, métodos para determinação e redução, ainda são consideradas um “desafio para a academia” [30].

Estas perdas estão associadas às necessidades práticas encontradas ao se implementar o modelo teórico da máquina de indução. No design da máquina, faz-se necessário local enrolamentos e barramentos no estator e do rotor em ranhuras nas laminações do núcleo magnético de cada um, o que provoca pulsações na forma de onda do fluxo magnético (figura 3.17); estes enrolamentos são distribuídos fisicamente de modo a produzir uma força magnetomotriz com características senoidais, entretanto o espaçamento entre as ranhuras produz uma deformação nesta onda, provocando o aparecimento de harmônicas (figura 3.18); esta disposição física dos condutores também provoca o aparecimento de fluxos de dispersão nas ranhuras e na região do entreferro (figura 3.19), e ainda nas curvas dos enrolamentos nas partes finais da máquina.

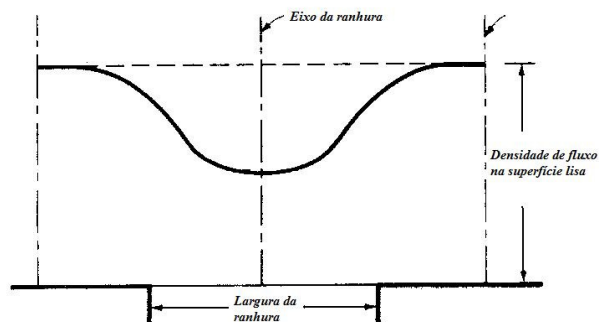


Figura 3.17 - Efeito de uma ranhura sobre a densidade de fluxo no entreferro

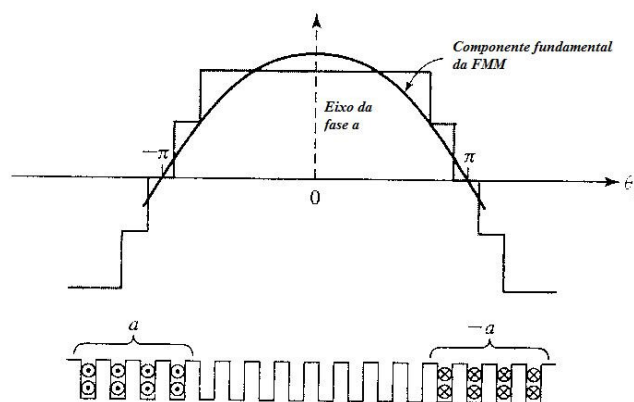


Figura 3.18 - Efeito da distribuição de um enrolamento distribuído de dois pólos sobre a forma de onda da força magnetomotriz [31]

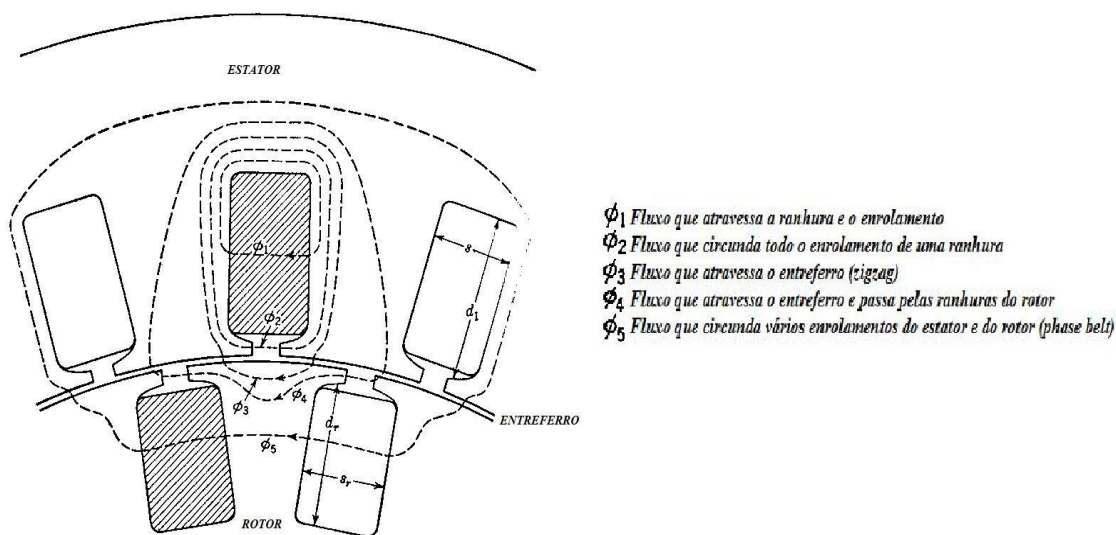


Figura 3.19 - Caminhos de fluxos de dispersão em um motor de indução [32]

Estas imperfeições práticas provocam descontinuidades nos componentes do campo magnético, que por sua vez induzem perdas extras na máquina com o aparecimento de novas correntes parasitas no núcleo magnético e com o aumento das perdas resistivas dos condutores.

A determinação destas perdas tem sido objeto de uma grande quantidade de trabalhos, mas ainda não se chegou a um método com a simplicidade daqueles já tratados para as demais perdas. Esta informação é comprovada pelo fato de que os principais organismos de padronização do mundo (IEEE, ANSI e IEC), ao definirem uma forma de cálculo das perdas suplementares, se utilizam de valores percentuais da potência de entrada dos motores.

Existem várias maneiras de se classificar a origem destas perdas, por sua origem e localização das perdas suplementares; pelos componentes de frequência fundamental e de alta frequência; Nailen [33] separou pela localização da pulsação gerada no campo magnético; e Jimoh [34] [35] utilizou uma classificação similar a Nailen, porém agrupando as origens de forma mais simplificada e este é o modelo que será seguido neste trabalho. As origens das perdas suplementares de potência são as seguintes:

- As limitações das propriedades do núcleo ferromagnético, que chegam à saturação quando em condições de carga;
- A estrutura geométrica da máquina, que, com suas ranhuras, enrolamentos, entreferro, geram componentes harmônicos e fluxos de dispersão;
- Imperfeições construtivas, como as falhas no isolamento dos barramentos do rotor, que permitem o aparecimento de correntes cruzando os barramentos.

Como consequência destas limitações físicas da máquina, temos o aparecimento das seguintes perdas:

- Perdas nos condutores do estator devido a correntes parasitas geradas pelo fluxo de dispersão na ranhura;
- Perdas nas partes finais da estrutura da máquina, devido ao fluxo de dispersão nas curvaturas dos condutores do estator e do rotor (quando bobinados) e nos anéis de curto circuito do rotor (quando do tipo gaiola de esquilo);
- Perdas nas superfícies do rotor e do estator devido a componentes de alta frequência das harmônicas geradas pelo fluxo de dispersão de zigzag e pela imperfeição da onda da força magnetomotriz;
- Perdas resistivas e de pulsação devido a componentes de alta frequência também geradas pelo fluxo de dispersão em zigzag e pela imperfeição da onda da força magnetomotriz;
- Perdas resistivas no rotor devido às componentes de baixa frequência do fluxo de dispersão phase belt;
- Perdas extras no núcleo em motores com barramentos skewed, devido ao fluxo de dispersão gerado pelos mesmos.

A descrição destas perdas, assim como os métodos empíricos utilizados para o seu cálculo se baseia principalmente no trabalho desenvolvido por [36], que, apesar de ser antigo (19579), como o tema ainda permanece em estudo sem conclusões definitivas, este trabalho ainda aparece como referência; e tem como vantagem o fato de ter sido comprovado com medições realizadas em motores de diferentes potências e número de pólos. A figura 3.20 mostra um dos resultados obtidos neste trabalho, a divisão percentual entre os diferentes tipos de perdas que compõem as perdas suplementares.

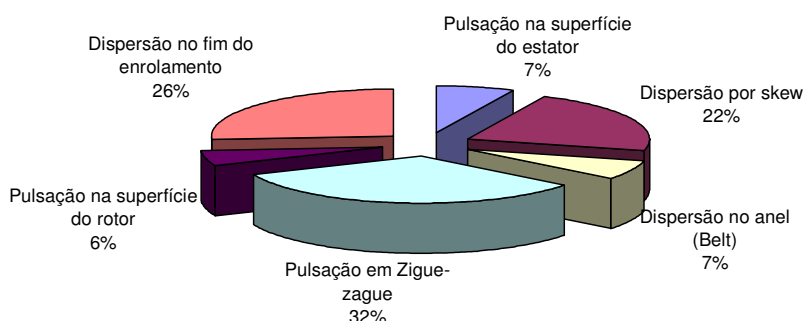


Figura 3.20 - Distribuição das Perdas suplementares para um motor de 75 CV de 4 pólos

Neste item as diferentes formas de perdas de potência classificadas como perdas suplementares serão detalhadas e também serão apresentados os métodos de cálculos para estas perdas descritos no padrão IEEE 112-1996.

3.4.1 Descrição das Perdas Suplementares [37] [38] [39]

Estas perdas são causadas pelas forças magnetomotrizas das correntes de carga da máquina que alteram as direções do fluxo magnético criando fluxos de dispersão, que por sua vez geram pulsações de fluxo e correntes parasitas nas laminações do núcleo, nos condutores e nas demais partes metálicas. Os principais componentes destas perdas são descritos a seguir:

3.4.1.1 Perdas nos condutores do estator devido ao fluxo de dispersão nas ranhuras

São produzidas pelo fluxo que cruza a ranhura transversalmente, de lado a lado, através do corpo do condutor (vide Figura 3.19), que provoca um aumento na resistência do condutor do estator devido ao efeito pelicular, já descrito no item 3.1.3. Estas perdas variam com a quarta potência da profundidade de cada fio do enrolamento do estator e com o quadrado da frequência. Para as máquinas de pequena potência estas perdas são desprezíveis e para as de maior potência, existem regras de transposição dos enrolamentos que a minimizam. Este fluxo de dispersão também provoca a circulação de correntes entre os fios de cada enrolamento e ainda uma pequena quantidade de aumento nas perdas do núcleo, no entanto estas últimas são compensadas pela diminuição nas perdas magnéticas causadas por esta quantidade de fluxo disperso na ranhura. A seguinte expressão permite o cálculo destas perdas:

$$P_{SUP,1} = \left[K_1 + K_2 \left(\frac{\ell_c t_i}{\ell_t t} \right)^2 \right] \frac{(\pi f B_m t)^2}{6\rho}, \text{ em } W/m^3 \quad (3.20)$$

Onde,

K_1 – Fator das perdas causadas pelo efeito pelicular. Usualmente é de 0,333;

K_2 – fator das perdas causadas pela circulação de correntes entre os fios do enrolamento. Varia com a quantidade de fios por enrolamento (0,18 a 0,5);

ℓ_c - Comprimento transversal do núcleo, em m ;

ℓ_t - Comprimento total de um fio do enrolamento, em m ;

t_i - Diâmetro de um fio do enrolamento com isolamento, em m ;

t - Diâmetro de um fio do enrolamento sem isolamento, em m ;

f - Frequência de alimentação, em Hz ;

B_m - Densidade do fluxo de dispersão no topo da ranhura, em $Weber/m^2$

ρ - Resistividade do material, em $\Omega.m$.

O valor obtido deve ser multiplicado pelo volume total dos condutores para a obtenção das perdas totais.

3.4.1.2 Perdas nas partes finais da estrutura da máquina

Causada por correntes parasitas induzidas na estrutura da máquina devido aos fluxos de dispersão gerados nas curvaturas dos enrolamentos do estator (e do rotor, quando bobinado) e nos anéis de curto-circuito do rotor. Estes fluxos entram nas laminações na direção axial, e também penetram nas partes metálicas do final da máquina, como a proteção do ventilador e outros. Estas perdas são proporcionais à largura das dobras dos enrolamentos do estator na parte final do núcleo, à distância entre as correntes periféricas da parte final dos enrolamentos do estator e do rotor, e à proximidade entre as partes metálicas e estas dobras dos enrolamentos.

Alger [37] apresentou uma fórmula empírica para o cálculo destas perdas, considerando que a sua principal causa são os componentes periféricos das correntes na parte final dos condutores do rotor e do estator. A figura 3.21 apresenta uma visão desta parte final desta parte final da máquina e a representação gráfica das distâncias utilizadas na expressão para o cálculo destas perdas, apresentada a seguir.

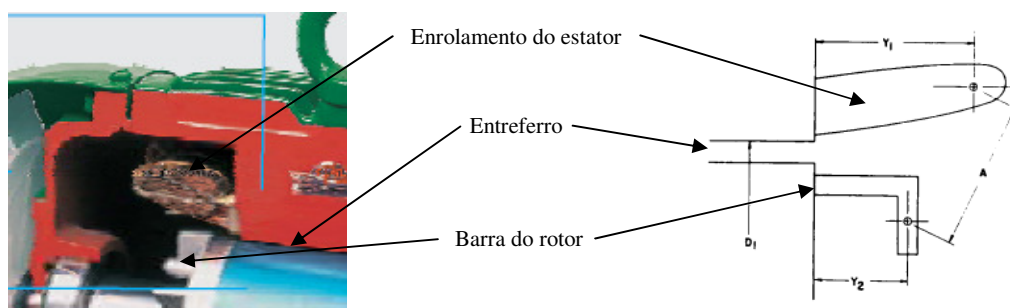


Figura 3.21 - Partes finais dos condutores do rotor e do estator

$$P_{\text{sup}, B} = 0.3m(I^2) \left[\frac{1.6fmN^2D_i}{P^2 10^7} \log \left(1 + \frac{A^2}{4Y_1Y_2} \right) \right], \text{ em W} \quad (3.21)$$

Onde,

I – corrente rms por fase, em A;

f – frequência de alimentação, em Hz;

m – número de fases;

N – número efetivo de voltas no enrolamento por fase;

D_i – diâmetro do entreferro, em m;

P – número de pólos;

A – distância entre o centro do estator e as correntes periféricas do rotor, em m;

Y_1, Y_2 – Distância axial entre o centro das correntes periféricas do estator e do rotor e o núcleo, em m.

3.4.1.3 Perdas nas superfícies do estator e do rotor

Na região do entreferro da máquina, a distribuição do fluxo magnético não é perfeitamente senoidal devido à influência das ranhuras, que provocam pequenos afundamentos na forma de onda do fluxo. A distribuição da fmm (força magnetomotriz) também apresenta degraus devido à concentração de corrente nas ranhuras. A combinação destes efeitos provoca **pulsações** na densidade de fluxo na região do entreferro, e como apenas a componente fundamental produz trabalho útil, as componentes harmônicas podem ser consideradas como componentes de dispersão e geram perdas por correntes parasitas na superfície do núcleo do estator e do rotor. A figura 3.22 representa a influência das ranhuras no formato da onda de densidade de fluxo magnético.

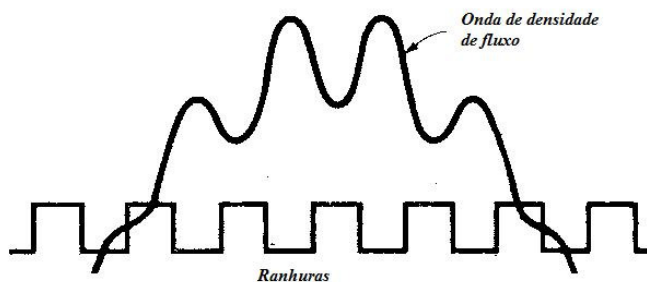


Figura 3.22 - Pulsações na densidade de fluxo magnético na região do entreferro (os efeitos das ranhuras estão exagerados) [31].

As pulsações geradas na forma de onda da densidade de fluxo na região do entreferro são causadas em parte pela variação de permeância causada pela abertura das ranhuras e em parte pelos degraus na forma de onda da fmm em cada um dos dentes. Cada uma destas partes possui a mesma frequência e o mesmo número de pólos, daí as perdas geradas serem proporcionais ao quadrado de sua soma vetorial. A análise matemática do efeito destas

pulsações na densidade de fluxo passa pela separação em séries de harmônicas, cujas principais componentes, além da fundamental, são aquelas proporcionais ao número de ranhuras por pólos do rotor ($2r\pm1$) e do estator ($2s\pm1$), o que mostra a relação destas perdas como o número de ranhuras por pólo do estator e do rotor (s e r). As perdas também dependem da largura do entreferro e do comprimento do núcleo.

As expressões empíricas obtidas para as perdas causadas por estas pulsações em alta frequência na superfície do rotor ($P_{\text{sup},C,r}$) e do estator ($P_{\text{sup},C,s}$) são as seguintes:

$$P_{\text{sup},C,r} = 2D_1L \left(\frac{I}{sI_0} \right)^2 \left(\frac{B_g}{100} \right)^2 C_{s2} \lambda_1, \text{ em W} \quad (3.22)$$

$$P_{\text{sup},C,s} = 2D_1L \left(\frac{I}{rI_0} \right)^2 \left(\frac{B_g}{100} \right)^2 C_{s1} \lambda_2, \text{ em W} \quad (3.23)$$

Onde,

D_i – diâmetro do entreferro, em m;

L – Comprimento do longitudinal do núcleo, em m;

I – Corrente rms de carga do estator, em A;

s – Número de ranhuras por pólo no estator;

I_0 – Corrente rms a vazio do estator, em A;

B_g – Densidade média do fluxo magnético na área do entreferro, em Klinha/m²;

C_{s1} – Coeficiente de perdas magnéticas no estator, obtido a partir de testes em núcleos laminados submetidos em diferentes frequências [], em W/m²;

λ_1 - pitch das ranhuras do estator, em m.

3.4.1.4 Perdas resistivas e de pulsação no rotor

Assim como as perdas descritas no tópico anterior, estas perdas estão associadas às distorções na forma de onda da densidade de fluxo na região do entreferro, porém, apenas ao chamado efeito zig-zag deste fluxo, ou seja, os componentes do fluxo do estator que cruzam a região do entreferro e induzem correntes que circulam entre os barramentos do rotor. A figura 3.23 retrata este efeito zig-zag da densidade de fluxo.

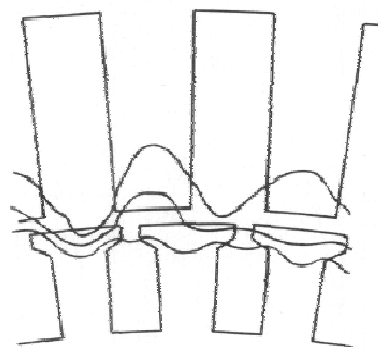


Figura 3.23 - Efeito zig-zag da densidade de fluxo na região do entreferro [33]

As componentes harmônicas de alta-frequência da densidade de fluxo do estator que atravessam o entreferro induzem uma tensão entre os barramentos adjacentes do rotor, fazendo circular uma corrente entre eles atravessando a região do núcleo laminado, causando perdas resistivas nos barramentos e no núcleo e ainda perdas por pulsação, como as descritas do tópico anterior. A influência destes componentes harmônicos de fluxo sobre o rotor depende da relação entre as quantidades de ranhuras do rotor e as do estator. Estas perdas são proporcionais a um fator de perda (C) que representa as perdas provocadas pelas harmônicas de densidade de fluxo em função da relação entre o número de ranhuras do rotor e as do estator. A figura 3.24 mostra o comportamento deste fator de perda e nela podemos observar que ele se torna considerável para os casos em que o número de ranhuras do rotor é maior que o número de ranhuras do estator.

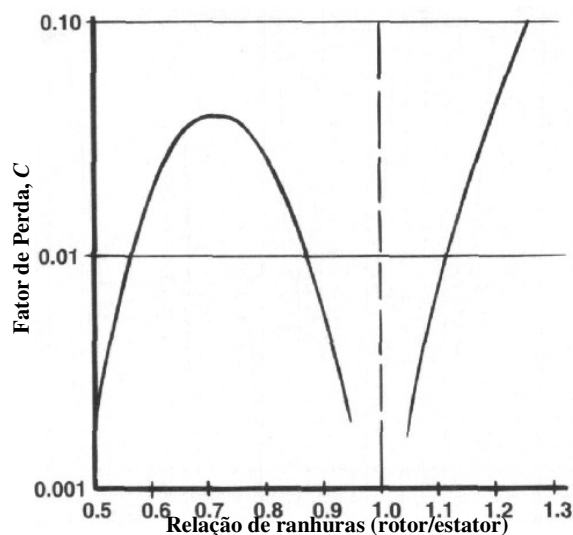


Figura 3.24 - Influência da relação entre o número de ranhuras e as perdas zig-zag [33]

A expressão para o cálculo das perdas resistivas no rotor devido às harmônicas de densidade de fluxo que cruzam o entreferro da máquina é dada por:

$$P_{\text{sup},C,r} = CmI^2(k_s R_{2b}), \text{ em W} \quad (3.24)$$

Onde,

C – Fator de perda;

m – Número de fases;

I – Corrente rms de carga do estator, em A;

k_s – Relação do efeito pelicular para as barras do rotor na frequência da ranhura do estator (em velocidade síncrona, é $2sf$);

R_{2b} – Resistência do barramento do rotor referido ao estator, em Ω por fase.

As perdas no estator causadas pelas componentes de densidade de fluxo do rotor que atravessam o entreferro são consideradas desprezíveis.

3.4.1.5 Perdas resistivas no rotor devido ao fluxo de dispersão phase belt [40] [41]

As perdas provocadas pelas componentes harmônicas de alta frequência de fluxo magnético foram apresentados nos tópicos anteriores. Os componentes de baixa frequência (quinta e sétima harmônica) que compõem a força magnetomotriz na região do entreferro induzem correntes nos barramentos do rotor (para os rotores bobinados, estas perdas são desprezadas). Estas correntes, apesar de gerarem fluxos que se contrapõem e praticamente anulam os efeitos dos fluxos gerados no estator, aumentam as perdas resistivas nos barramentos do rotor. Esta dispersão harmônica também depende do número de ranhuras por pólo e por fase e também do pitch da distribuição dos enrolamentos. A expressão para o cálculo destas perdas é a seguinte:

$$P_{\text{SUP},4} = mI^2 k_m R_{2b} \left[\frac{K_{2m-1}^2 + K_{2m+1}^2}{K_1^2} \right], \text{ em W} \quad (3.25)$$

Onde,

k_m – relação do efeito pelicular para o barramento do rotor na frequência da dispersão, que é $2mf$ em velocidade síncrona, numérico;

K_{2m-1} – fator de distribuição do pitch do enrolamento do estator para a $(2m \pm 1)$ harmônica, numérico;

K_1 – fator de distribuição do pitch do enrolamento do estator para a frequência fundamental, numérico.

3.4.1.6 Perdas extras no núcleo em motores com barramentos skewed [42]

A angulação transversal dos barramentos do rotor (skew) é um artifício utilizado para minimizar os efeitos causados pelas componentes harmônicas da força magnetomotriz. Estas harmônicas provocam, além das perdas já tratadas neste item, torques parasitas que atuam na direção oposta à do campo principal. Esta ação benéfica é contrabalançada por um aumento na indutância de dispersão da máquina, reduzindo o torque de partida e aumentando as perdas de potência. A Figura 3.25 exemplifica um rotor skewed.

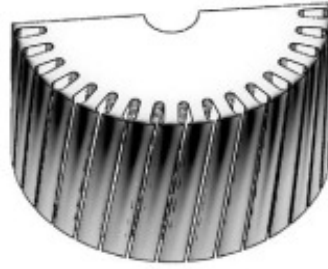


Figura 3.25 - Detalhe de um rotor com barramento skewed

Alger [36] desenvolveu uma expressão para o cálculo destas perdas partindo do fato de que a corrente é constante em todo o corpo de cada barramento skewed do rotor e considerando que a componente de carga da fmm do estator é exatamente oposta àquela gerada no rotor no ponto central da superfície do núcleo magnético, ou seja, neste ponto o fluxo no entreferro é equivalente ao fluxo a vazio. Assim, à medida que se afasta do centro do núcleo, a diferença angular entre as fmm's do estator e do rotor aumenta linearmente devido à angulação do barramento, assim como aumenta linearmente a componente radial da densidade de fluxo. A partir desta constatação conclui que este aumento no fluxo devido ao skew é proporcional à relação entre a corrente de carga e corrente a vazio e a uma angulação dos barramentos equivalente a um pitch dos enrolamentos do estator. A expressão obtida é a que segue:

$$P_{SUP,5} = \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{\sigma I'}{s I_0} \right), \text{ em } W \quad (3.26)$$

Onde,

I' - Diferença vetorial entre a corrente de carga, I , e a sua componente de magnetização I_0 ;

σ - relação do skew do rotor para aquele de um pitch das ranhuras do estator (normalmente 1), numérico;

s - número de ranhuras por pólo, numérico.

3.4.1.7 Outras perdas suplementares

Além das já descritas, as perdas suplementares são influenciadas pela saturação do material ferromagnético e por imperfeições no isolamento entre os barramentos do rotor e o núcleo. A primeira altera as formas de onda de densidade de fluxo e da força magnetomotriz e, conseqüentemente, as perdas suplementares, sua influência é calculada normalmente pela utilização de um fator aumentando a largura do entreferro e reduzindo a permeabilidade do núcleo do rotor. A segunda é mais complexa e leva a circulação de correntes entre os barramentos adjacentes, resultando em perdas e redução de torque. Existem vários trabalhos determinando expressões para este tipo de perda, mas devido à sua grande dependência de técnicas de fabricação do rotor, não foi objeto de detalhamento neste trabalho.

3.4.2. Cálculo das Perdas Suplementares [5] [43]

Os diversos tipos de perdas suplementares existentes na máquina de indução, individualmente, são de difícil determinação, o que pode ser constatado facilmente pela complexidade de suas expressões. No entanto, [36] realizou testes em 58 motores de indução de diferentes potências, número de pólos e tipos de ranhuras, e comparou os valores obtidos com aqueles calculados a partir das expressões descritas no item anterior. O resultado, que pode ser visto no Anexo 1, comprovaram as expressões, apesar de alertarem para a suscetibilidade destes tipos de perdas aos processos de fabricação da máquina; já que qualquer processo de tratamento das superfícies do rotor e do estator ou uma alteração dos contatos do barramento do rotor com o núcleo, pode alterar consideravelmente o valor destas perdas.

Como o objetivo deste trabalho é a determinação da eficiência da máquina, não se faz necessário a separação dos diferentes tipos de perdas suplementares, apenas o valor total das mesmas é suficiente. Os métodos para o cálculo das perdas suplementares propostos no

Padrão IEEE 112-1996 não prevêem a separação destas perdas e são, em sua maioria, de difícil prática. Os Métodos para a medição das perdas suplementares são divididos pelo tipo de medição **direta** e **indireta**.

3.4.2.1 Medição Indireta

Nestes métodos, as perdas suplementares são calculadas a partir da medição das perdas totais e da subtração deste valor das perdas resistivas, magnéticas e mecânicas, calculadas conforme descrição anterior neste Capítulo. A medição indireta é utilizada nos Métodos B (Entrada-saída com perdas segregadas), C (Máquinas duplicadas) e C/F (Circuito equivalente com um ponto de carga).

- **Método B:** A máquina é acoplada a dinamômetro e submetida a quatro pontos de carga igualmente espaçados e mais dois escolhidos entre 100% e 150% da carga nominal. Os dados de potência de entrada e de saída são lidos e a diferença é posteriormente subtraída dos valores das demais perdas calculadas pelos métodos descritos anteriores. A diferença corresponde às perdas suplementares. Este método prevê a utilização de uma regressão linear utilizando os dados das perdas suplementares versus o quadrado do torque para a exclusão de dados insatisfatórios.
- **Método C:** Utiliza duas máquinas idênticas acopladas mecanicamente e conectadas eletricamente a duas fontes de potência, uma delas com frequência ajustável. Uma das máquinas funciona como motor e a outra como gerador, as duas são alimentadas com tensão nominal, sendo que a última a uma frequência reduzida para produzir a carga desejada. As perdas suplementares totais das duas máquinas são obtidas a partir da diferença entre as potências das duas máquinas subtraídas das demais perdas. Também está previsto um método de regressão linear para suavizar a curva das perdas suplementares versus o quadrado da corrente.
- **Método C/F:** Utiliza o Método C para a obtenção das perdas suplementares em um ponto de carga e os dados deste ponto para obter a corrente do rotor a partir de um circuito equivalente da máquina. Com estes dados obtém o valor das perdas para qualquer valor da carga, assumindo que a mesma varia com o quadrado da corrente de carga.

3.4.2.2 Medição Direta

Utilizado nos Métodos E (Medição de potência elétrica com perdas segregadas), F (Circuito equivalente) e E/F (Circuito equivalente com um ponto de carga), faz o cálculo das perdas suplementares diretamente a partir de um dos procedimentos:

- **Remoção do rotor:** Utilizado para determinar as perdas suplementares no estator. O rotor deve ser extraído da máquina e deve ser aplicada uma tensão balanceada aos terminais do estator. A Potência de entrada subtraída das perdas júllicas do estator é igual à perda suplementar no estator.
- **Rotação reversa:** Para o cálculo das perdas suplementares de alta frequência. Faz-se necessário um teste com rotação reversa síncrona com leituras das potências mecânicas necessárias para girar reversamente o rotor com (P_r) e sem (P_f) uma tensão aplicada nos terminais do estator. As Perdas suplementares em alta frequência são obtidas pela expressão:

$$P_{SUP} = P_r - P_f - P_{in} - P_{SUP,E} - P_{J,E} \text{ , em W} \quad (3.27)$$

As perdas Suplementares são obtidas pela soma dos valores obtidos nestes dois testes, e os resultados também são submetidos a uma regressão para suavização dos resultados.

- **Valores assumidos:** Na impossibilidade de implementação dos testes previstos neste item, o Padrão IEEE adota a seguinte tabela com valores assumidos para as perdas suplementares a partir de valores percentuais da carga instalada.

Tabela 3.2 – Valores assumidos para perdas suplementares

Potência Nominal		Perdas Suplementares (% da carga nominal)
1 – 125 hp	1 – 90 kW	1,8 %
126 – 500 hp	91 – 375 kW	1,5 %
501 – 2499 hp	376 – 1850 kW	1,2 %
A partir de 2500 hp	A partir de 1851 kW	0,9 %

Dos Métodos de cálculo de perdas suplementares apresentados no padrão IEEE 112-1996, apenas a tabela acima se enquadra no objetivo deste trabalho, já que os demais são

exageradamente invasivos. Está claro que uma simplificação desta espécie provoca erros nos cálculos das perdas e a larga faixa de potência para cada percentual de perdas também é um indicativo de que o erro será maior em algumas potências.

Testes realizados comparando os valores padronizados pela IEEE, pela ANSI e pela IEC, os principais órgãos internacionais, para as perdas suplementares apresentam erros, mas, dependendo do objetivo do cálculo, podem ser considerados erros aceitáveis. A Figura 3.26 mostra a comparação entre testes realizados em laboratório e os valores padronizados por estes Órgãos para as perdas suplementares.

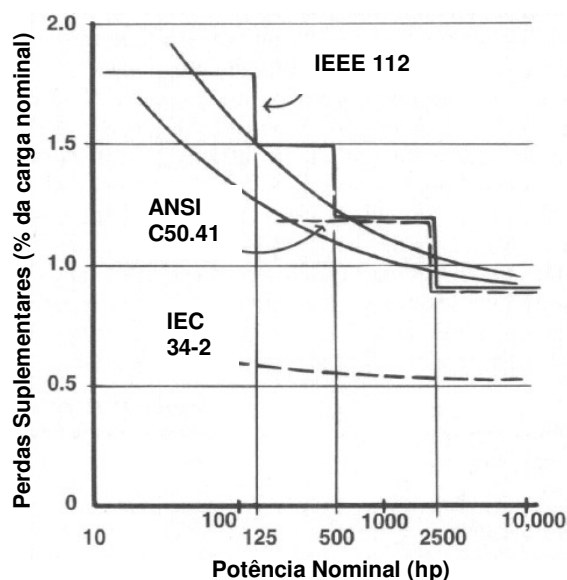


Figura 3.26 - Comparação entre valores medidos de Perdas Suplementares (curvas) e os valores dos Padrões internacionais [33]

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo detalhou todas as perdas de potência existentes em uma máquina de indução e ainda apresentou os métodos padronizados pela IEEE para a determinação destas perdas. A primeira observação a ser feita se refere à dificuldade em se determinar as perdas de um motor de indução sem interferir no processo a que ele está conectado, ou seja, um dos objetivos deste trabalho, que é o de obter um método não intrusivo para determinação das perdas, aparenta ter um alto grau de dificuldade. Os métodos padronizados pelo IEEE prevêm testes a vazio, variações de tensão, de carga e até a remoção do rotor, como no caso da determinação das perdas suplementares. Um dos procedimentos mais simples e que pode

ser implementado em um ambiente de fábrica, que é o da leitura da resistência do estator, necessita do desligamento da máquina e o acesso aos terminais de entrada da máquina.

Esta dificuldade de determinação das perdas advém da complexidade das mesmas, como pôde ser observado quando da descrição das perdas. As Perdas Resistivas, as que podem ser consideradas as de compreensão mais simples, possuem uma grande dependência da temperatura dos condutores da máquina. As Perdas Magnéticas são tão mais complexas que a sua determinação ainda é objeto de atualizações conceituais, como a definição de Objeto Magnético; e ainda são influenciadas pela forma e pelas técnicas de fabricação do núcleo. As Perdas Mecânicas, cuja abordagem mais comumente utilizada se detém na simplificação de perdas por atrito nos rolamentos e na ventilação, também se mostraram presentes nos anéis V'ring da máquina e também no efeito de ventilação dos anéis de curto-circuito do rotor a gaiola de esquilo.

Por fim, as Perdas Suplementares aparecem como a de mais difícil descrição e determinação. Ainda considerada um desafio à academia, suas expressões empíricas mostram uma dependência da relação entre o número de ranhuras do rotor e do estator, da largura do entreferro, da corrente de carga, além das propriedades dos materiais ativos da máquina, isso sem citar a sua dependência das características construtivas da máquina e até dos processos de fabricação. A sua determinação acompanha esta complexidade os métodos apresentados pelo IEEE necessitam de remoção do rotor, fonte de frequência variável e rotação reversa do rotor a velocidade síncrona. Por fim, como que prevendo a quase impossibilidade de implementação destes procedimentos, o IEEE apresenta uma tabela com valores padronizados das Perdas Suplementares com percentagens da potência de operação da máquina.

No próximo Capítulo serão apresentadas alternativas para a determinação das perdas da máquina de indução com mais facilidades de implementação e sem perder um importante pré-requisito, a precisão do cálculo.

Capítulo IV

MÉTODOS PARA O CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DE MOTORES DE INDUÇÃO

A expressão para o cálculo da eficiência é bastante simples e relaciona as potências de entrada e de saída de uma máquina. No caso do motor de indução trifásico, a eficiência é dada pela relação entre a potência mecânica entregue à carga ($P_{SAÍDA}$) e a potência elétrica solicitada da rede de alimentação ($P_{ENTRADA}$).

$$\eta = \frac{P_{SAÍDA}}{P_{ENTRADA}} \quad (4.1)$$

Apesar da simplicidade da expressão, o cálculo desta eficiência é complexo devido a dificuldades de medição destas grandezas. Nem tanto para o cálculo da potência elétrica de entrada da máquina, já que normalmente existe a disponibilidade de acesso aos terminais, mas para o cálculo da potência de saída, cujo grau de dificuldade é bem maior pela necessidade de se desacoplar a carga para a instalação do equipamento de medição e pelo alto custo do mesmo. Esta dificuldade fica ainda maior quando se considera a necessidade de obtenção a eficiência de máquinas em operação.

Este objetivo tem desafiado a comunidade científica desde o início do século vinte [44] [45], quando esta máquina passou a ser utilizada em larga escala e a determinação e aprimoramento de seu desempenho se tornou uma necessidade mundial. Neste capítulo serão analisados os principais resultados destes esforços que se transformaram em métodos para a determinação da eficiência da máquina de indução trifásica. A ótica desta análise já foi citada anteriormente, e se baseia em uma combinação entre precisão e intrusão, ou seja, os métodos existentes são analisados considerando a precisão do cálculo da eficiência e a facilidade de implementação sem interferir no processo produtivo do qual a máquina faz parte.

Diante desta perspectiva e da grande quantidade de métodos existentes no mercado e no meio acadêmico, eles foram divididos de acordo com a forma do cálculo da eficiência, seguindo um padrão já adotado pelos padrões internacionais, a saber:

- ✓ Métodos das Perdas Segregadas: Calculam a eficiência a partir do somatório de cada um dos tipos de perdas existentes na máquina. são considerados os métodos mais precisos, porém, para o cálculo de todos os tipos de perdas necessariamente são invasivos e necessitam de testes com a máquina fora de operação;
- ✓ Métodos do Circuito Equivalente: A partir de um circuito equivalente da máquina e da medição de alguns parâmetros, calculam-se os valores dos demais elementos de circuito representativos das perdas e, a partir deles, a eficiência da máquina. Apresentam maior dificuldade no cálculo das perdas suplementares pela sua difícil representação em elementos de circuito elétrico, porém o avanço dos métodos numéricos de determinação de sistemas não lineares tem melhorado a precisão destes métodos, além de ser o que apresenta a maior quantidade de trabalhos acadêmicos;
- ✓ Métodos do Escorregamento: Menos invasivo e mais simples que os demais, estes métodos relacionam o escorregamento da máquina com a potência de saída para a obtenção da eficiência. Dependem de valores de placa da máquina e aí reside uma de suas fontes de erro.
- ✓ Métodos da Corrente/Outros: Neste item são agrupados os métodos que utilizam apenas a corrente de entrada para o cálculo da eficiência e outros métodos menos convencionais para este cálculo. Também apresentam pouca precisão e invasão ao processo e, como o anterior, utilizam os dados de placa da máquina.

O Capítulo anterior apresentou com detalhes o método E1 do Padrão da IEEE 112-1996 para testes em motores e geradores de indução polifásicos, que é do tipo perdas segregadas. Neste capítulo será apresentado este e vários outros métodos disponíveis na literatura acadêmica.

4.1 MÉTODOS DAS PERDAS SEGREGADAS [5] [46]

São considerados os mais precisos métodos de cálculo de eficiência de motores de indução, já que são capazes de apresentar uma precisão dentro da faixa de $\pm 2\%$ de erro. No

entanto, apresentam a desvantagem de invasividade ao processo, pois requerem que a máquina seja separada de sua carga para as medições a vazio e sob diferentes percentuais de carga. Alguns métodos apresentam soluções para diminuir esta invasão perdendo um pouco na precisão.

Aqui as perdas são calculadas individualmente e somadas para o cálculo das Perdas Totais ($\sum PERDAS$) e da eficiência (η) da máquina de acordo com a seguinte expressão:

$$\eta = \frac{P_{SAÍDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{P_{ENTRADA} - \sum PERDAS}{P_{ENTRADA}} = 1 - \frac{\sum PERDAS}{P_{ENTRADA}} \quad (4.2)$$

Da descrição do Método E1 do Padrão IEEE/112-1996 pôde ser constada a dificuldade da determinação de cada um dos tipos de perdas, sendo que as perdas resistivas são aquelas que apresentam menor grau de dificuldade, enquanto a determinação das perdas suplementares apresenta uma excessiva invasão ao processo e à máquina em si, sendo que uma das alternativas para este cálculo é a utilização de tabelas padronizadas. As perdas mecânicas e magnéticas são determinadas em conjunto e posteriormente separadas por um método gráfico.

A apresentação dos métodos será iniciada por este método e, no capítulo posterior, quando serão implementados alguns dos métodos aqui descritos, este servirá como base para a avaliação dos demais.

O Padrão IEEE 112-1996 apresenta outros dois métodos que também calculam as perdas de forma segregada: Método B e Método E. O primeiro é um método que se utiliza de medições da potência de saída através da instalação de um dinamômetro no eixo da máquina, antes da carga; métodos deste tipo (classificados como de entrada-saída/input-output) não foram considerados neste trabalho pelo fato do dinamômetro ser um equipamento extremamente caro e altamente invasivo ao processo industrial, fugindo completamente do propósito aqui considerado. O segundo método teve a sua forma de cálculo das perdas suplementares descrito no Capítulo III e, pela dificuldade prática de implementação, também não será analisado.

A Tabela 4.1 relaciona todos os métodos das perdas segregadas aqui tratados, com destaque para a precisão e a invasão ao processo.

Tabela 4.1 - Métodos das Perdas Segregadas

Métodos	Precisão	Invasão
---------	----------	---------

		Teste a Vazio (S/N)	Resistência do estator (S/N)	Velocidade (S/N)
Padrão IEEE 112 – Método E1	$\pm 1,0\%$	S	S	S
Método E1 Modificado de Hirzel	$\pm 2,0\%$	S	S	S
Método simplificado da Ontário Hydro	$\pm 3,0\%$	N	S	S
Analizador de Desempenho de Motores da Nielsen Engenharia	$\pm 2,0\%$	S	S	S
Método E1 modificado de Becnel, Kilgore e Merril	$\pm 2,0\%$	S	N	S
Vogelsang & Benning	$\pm 1,0\%/\pm 3,0\%$	S/N	S	S
ECNZ	$\pm 1,0\%$	S	S	S
ANGUS	$\pm 3,0\%$	S	S	S

4.1.1 Método E1 do Padrão IEEE 112-1996

Os detalhes deste método já foram apresentados no capítulo anterior. Sua principal característica é sua precisão, que chega à faixa de $\pm 1\%$, apesar da forma de cálculo das perdas suplementares, que utiliza uma tabela com valores estimados, e neste ponto reside sua limitação. A tabela de perdas suplementares é bastante questionada por incluir uma larga faixa de potência de motores com as mesmas características de perdas.

Na descrição das Perdas Suplementares, ficou clara a dependência das características construtivas da máquina e a mesma pode influenciar de forma diferente as perdas até de motores de uma mesma potência, enquanto a tabela do IEEE estabelece o mesmo percentuais de perdas suplementares (Tabela 3.2) para uma faixa de potência que varia de 1 a 125 hp.

Além disso, para a obtenção dos valores das perdas mecânicas e magnéticas, este método requer a implementação de teste a vazio em carga nominal e ainda com a variação da tensão aplicada em faixas de cerca de 10% até 125% do valor nominal. Para tanto faz-se necessário uma fonte de tensão variável. Implementa ainda um teste com carga variável (25-100% da nominal), o que permite o levantamento da característica de eficiência da máquina para toda a sua faixa de operação, porém, torna o método ainda mais invasivo e dependente de um equipamento que simule diferentes valores de carga.

4.1.2 Método de Hirzel (E1 modificado)

O Método proposto por J. C. Hirzel é uma simplificação do método anterior. Como o autor tinha um objetivo mais específico que o do órgão padronizador, qual seja, o de determinar a eficiência de motores em operação, o seu método se utiliza de simplificações que comprometem um pouco a precisão mas que o tornam menos invasivo e mais fácil de ser implementado.

Este método dispensa a necessidade de uma fonte de tensão variável para o teste a vazio e de uma carga variável para os testes com carga. Desta forma, o mesmo não permite a separação das perdas obtidas a partir do teste a vazio (perdas magnéticas e mecânicas) e ainda mostra a eficiência do motor apenas no ponto de operação de sua carga. Como foi dito, quando se quer avaliar um motor em operação, o mais importante é observar sua eficiência no ponto de operação da máquina, no entanto, se existe o objetivo de se utilizar este motor em outra aplicação, a curva de eficiência completa teria sua utilidade.

Quanto á separação das perdas mecânicas e magnéticas, esta limitação vai influenciar no cálculo das perdas do rotor, já que a estimativa da potência do entreferro terá um erro em decorrência deste fato. Daí a diminuição da precisão deste método em relação ao anterior, que passa a ter um erro de $\pm 2\%$. Os ganhos em invasão do processo são consideráveis, mas ainda há a necessidade de desacoplar a máquina da carga para a realização do teste a vazio.

As perdas suplementares são estimadas em 1,2% da potência nominal de saída, obedecendo ao critério estabelecido pelo padrão americano ANSI (American National Standart Institute). Estas alterações tornam o método mais econômico e fácil de implementar, entretanto não consegue separar as perdas mecânicas das magnéticas e mostra a eficiência do motor apenas para o ponto de operação. Perde um pouco em precisão ao anterior e ainda exige um teste a vazio, o que exige o desacoplamento da carga.

4.1.3 Método da Ontario Hidro de Perdas Segregadas.

A Companhia Canadense Ontario Hidro desenvolveu vários métodos para o cálculo de eficiência de motores e no caso de perdas segregadas seu método é similar ao anterior, com uma simplificação ainda maior que compromete um pouco mais a precisão, mas torna o método não invasivo ao processo da máquina.

O Teste a vazio é eliminado e as perdas magnéticas e mecânicas são estimadas em 3.5% da potência de entrada. Esta simplificação se baseou em um estudo feito pela própria Ontário Hydro que concluiu por este percentual. Os resultados da aplicação deste método foram comparados com medições realizadas em dezessete motores com a utilização de dinamômetro e mostrou que o erro do método ficou em $\pm 3,0\%$. Convém ressaltar que estes testes foram feitos com motores novos, ou seja, não foram considerados os desgastes do tempo de uso, as condições de operação e outras intervenções comuns em motores em operação e que podem alterar as perdas. As perdas suplementares são padronizadas em 1,2% da potência de entrada.

De qualquer forma, a única invasão ao processo é a necessidade de desacoplamento dos terminais de entrada para a medição da resistência do estator, o que torna este método um dos menos invasivos dentre os aqui analisados sem perder muito em precisão.

4.1.4 Analisador de Performance de Motores da Nielsen Engineering

Usa um dispositivo proprietário que realiza as medições e o cálculo da eficiência do motor a partir de um método similar ao de Hirzel. Difere nos seguintes pontos: mede a resistência do estator na temperatura de operação da máquina e usa este valor na estimativa de perdas do estator para os testes com carga e a vazio, o que reduz a estimativa das perdas mecânicas; usa valores proprietários na estimativa das perdas suplementares, que foram calculados a partir de testes com dinamômetros realizados em centenas de motores em vários laboratórios dos Estados Unidos; e utiliza um dispositivo proprietário para realização de todas as medições, inclusive a resistência do estator com o motor em operação.

Apresenta uma precisão similar ao do método de Hirzel (erro de $\pm 2\%$) e também é invasivo ao processo, já que o dispositivo tem que ser acoplado ao motor.

4.1.5 Método E1 modificado de Becnel, Kilgore e Merrill

Criado com o objetivo de calcular a eficiência de motores de grande potência, também é uma simplificação do Método E1 e muito parecido com o Método de Hirzel, com algumas modificações: para o cálculo das perdas no rotor, a potência do entreferro é obtida com a subtração adicional das perdas suplementares, o que subestima ainda mais esta potência e

aumenta a eficiência; a medição das resistências é feito com sensores inseridos nos condutores; e as perdas suplementares são estimadas em 0,9% da potência nominal de saída da máquina.

Estas alterações poderiam levar a uma estimativa elevada da eficiência, porém, devido às características dos motores de alta potência, que apresentam um menor percentual de perdas suplementares e um aumento percentual nas perdas mecânicas, este método mantém uma alta precisão (erro de $\pm 2,0\%$). A invasão ao processo é grande, principalmente na medição da temperatura dos enrolamentos, mas nas dimensões destes motores estas medições são facilitadas. O que dificulta ainda é a necessidade do teste a vazio.

4.1.6 Analisador de Motores da Vogelsang & Benning

Trata-se de um dispositivo desenvolvido na Alemanha e que está disponível comercialmente. É acoplado à máquina e faz leituras de corrente, tensão, fator de potência, resistência, velocidade e temperatura do motor em operação. Estes dados são utilizados por um programa proprietário que calcula informações de eficiência, torque, potência de saída, consumo e custo da energia. Os dados são impressos imediatamente pelo próprio dispositivo. Além destes dados, o dispositivo ainda utiliza as informações dos dados de placa de fabricante.

Este dispositivo apresenta duas opções para o cálculo da eficiência do motor: com a realização de um teste a vazio, o que aumenta a precisão (erro de $\pm 1,0\%$) mas torna o método invasivo; e sem o teste a vazio, o que compromete a precisão (erro de $\pm 3,0\%$), já que aumenta a dependência dos dados de placa do motor.

4.1.7 Método ECNZ

Método desenvolvido pela Electricity Corporation of New Zeland Limited (ECNZ) que se baseia nos padrões da IEC (International Electrotechnical Commission), cuja principal diferença para o padrão IEEE está na estimativa das perdas suplementares, já que utiliza um valor estimado de 0.5% da potência nominal para toda faixa de potência dos motores.

Utilizado para o cálculo de eficiência de motores na faixa de potência de 5,5 kW a 750 kW, este método se diferencia do anterior na medição de resistência do estator, que é realizada através da injeção de tensões CC nos terminais de entrada da máquina e da leitura

das correntes geradas, e ainda pela medição do escorregamento, que é feito através da leitura das frequências dos harmônicos na entrada. A medição de temperatura do enrolamento do estator é opcional e é calculada a partir de medições da resistência da máquina a frio (temperatura conhecida) e a quente (em operação).

Pode dispensar o desacoplamento do motor da carga para o teste a vazio se for possível simular uma condição de carga reduzida, mas isto pode comprometer a precisão devido ao aumento do erro do cálculo das perdas mecânicas e magnéticas. Apresenta alta precisão (erro de $\pm 1,0\%$) e invasão similar aos anteriores.

4.1.8 Método Eletrônico da ANGUS

Trata-se de um software denominado MET (Motor Efficiency Test) que calcula a eficiência de motores com base no padrão IEEE (Métodos E e F). Possui a capacidade de fazer comparações econômicas entre diferentes opções de motores, calculando o retorno do investimento.

Realiza os cálculos a partir de dados coletados em testes com carga e a vazio, que podem ser feitos através de um dispositivo próprio ou por outros aparelhos disponíveis para as medições. É invasivo e pouco amigável, já que requer o domínio do software e apresenta precisão inferior ao padrão IEEE.

4.2 MÉTODOS DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Estes métodos partem da representação do motor de indução pelo seu circuito equivalente e calculam o torque de saída da máquina e, conseqüentemente, sua eficiência, a partir da determinação de seus parâmetros. O circuito equivalente, já apresentado no Capítulo 2, é mostrado na Figura 4.1, nele estão representados os elementos responsáveis pelas perdas resistivas (r_s e r_r) e magnéticas (r_c) da máquina. A princípio, não existem elementos para representar as perdas mecânicas e as perdas suplementares, no entanto alguns métodos utilizam resistências auxiliares para a representação destas perdas. Uma limitação adicional destes métodos é que, como o circuito representa apenas uma fase da máquina, a influência dos desbalanceamentos de tensão não pode ser considerada.

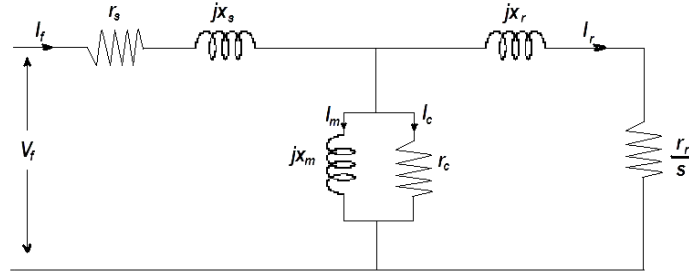


Figura 4.1 - Circuito equivalente de uma fase do motor de indução trifásico

Analisando esta figura, obtêm-se as seguintes expressões:

$$I_r = I_f - I_c - I_m \quad (4.3)$$

$$I_r = \frac{V_r}{\frac{r_r}{s} + jx_r} \quad (4.4)$$

$$I_c = \frac{V_r}{r_c} \quad (4.5)$$

$$I_m = \frac{V_r}{jx_m} \quad (4.6)$$

$$V_r = V_f - I_s (r_s + jx_s) \quad (4.7)$$

A dificuldade destes métodos reside neste ponto, como resolver as equações acima partindo de medições de corrente, tensão, velocidade e resistência do estator (r_s). A solução destas equações na maioria dos casos passa pela utilização de métodos de soluções de equações não lineares.

Resolvendo-se estas equações, o cálculo da potência de eixo (P_{EIXO}) da máquina e da potência de saída são obtidos pelas seguintes expressões.

$$P_{EIXO} = \frac{3I_r^2 r_r}{s} \quad (4.8)$$

$$P_{SAÍDA} = P_{EIXO} - P_{MEC} - P_{SUP} \quad (4.9)$$

Como a potência de entrada do motor é obtida de uma maneira mais fácil e não intrusiva, a eficiência é calculada com o dado da potência de saída. As perdas suplementares podem ser obtidas a partir de valores estimados, assim como as perdas mecânicas. Outra

vantagem deste método é que, uma vez determinados todos os parâmetros do motor, a eficiência pode ser obtida para qualquer valor de carga.

Alguns métodos acrescentam resistências para representar as perdas suplementares e as perdas mecânicas e, com isso, se tornam mais completos e precisos. A Tabela 4.2 resume os métodos do circuito equivalente aqui tratados.

Tabela 4.2 - Métodos do Circuito Equivalente

Métodos	Precisão	Invasão		
		Teste a Vazio (S/N)	Resistência do estator (S/N)	Velocidade (S/N)
Padrão IEEE 112 – Método F1	$\pm 1,0\%$	S	S	S
Método F1 simplificado da Ontário Hydro	$\pm 2,0\%$	S	S	S
Método do Rotor Bloqueado	$\pm 1,0\%$	S	S	S
ORMEL 96	$\pm 3,0\%$	N	N	S
Método de Pillay, Levin, Otaduy e Kueck	$\pm 3,0\%$	N	S	S
Método de Bin Lu, Habetler e Harley	$\pm 3,0\%$	N	N	N
Método de El-Ibiary	$\pm 1,0\%$	S	S	S

4.2.1 Método F1 do Padrão IEEE 112-1996

Este método possui praticamente as mesmas dificuldades práticas que o Método E1 e algumas a mais. Inicialmente, faz-se necessário realizar os mesmos testes a vazio, o que requer o desacoplamento da máquina e a utilização de uma fonte de tensão variável. Para calcular as impedâncias da máquina, este método apresenta quatro testes, e como três deles se utilizam de medições com o rotor bloqueado, que traz complicações de invasão e até de segurança, resta a análise do teste 3.

Neste teste, realiza-se uma medição com o motor vazio ou com carga pequena alimentado com uma tensão reduzida que produz um escorregamento similar ao obtido a uma baixa frequência. Nesta situação, a resistência e a impedância do rotor (r_r e x_r) são calculados utilizando um método iterativo, que se utiliza de uma relação x_s/x_r padroniza por classe de motor. Com estes dados, calcula-se a potência de saída da máquina. Os dados das perdas

mecânicas são obtidos do teste a vazio e as perdas suplementares são estimadas conforme o Método E1.

É importante destacar que o teste com carga é desnecessário, o que torna o método completamente invasivo, e também que a eficiência pode ser determinada para qualquer valor de carga. Trata-se de um dos métodos mais precisos para o cálculo, porém requer uma medição de velocidade com alta precisão.

4.2.2 Método Ontário Hidro simplificado

A principal simplificação deste método está na alteração do circuito equivalente do motor, já que representa a indutância de magnetização (x_m) em série com a resistência das perdas no núcleo (r_c). Isto simplifica o circuito do ensaio a vazio. Elimina também a necessidade de utilização de uma fonte de tensão variável, já que faz apenas medições com tensão nominal nas condições a vazio e a plena carga. Desta forma não tem como separar as perdas mecânicas das magnéticas.

Utiliza um método iterativo para o cálculo dos parâmetros do circuito diferente daquele do método F1 e ignora as perdas mecânicas e suplementares. Isto deveria reduzir a precisão do método, mas um teste realizado em um motor de 100 cv provou o contrário. Mesmo sem a necessidade da fonte de tensão variável, também necessita desacoplar o motor da carga.

4.2.3 Método de Dell'Aquila do Rotor Bloqueado [47]

Este método também faz alterações no circuito equivalente do motor, movendo a resistência das perdas no núcleo (r_c) para a entrada da reatância do estator (x_s) e adicionando um segundo laço no circuito do rotor.

Para a obtenção dos parâmetros deste circuito, são necessários testes a vazio com tensão nominal e com tensão reduzida e um teste com rotor bloqueado com tensão reduzida e corrente nominal. Apesar de muito invasivo, apresenta uma computação mais simples que o método F1 e, segundo os autores, o circuito com dois laços no rotor representam melhor os rotores com barramento em gaiola de esquilo e quando o motor está submetido a tensões não-senoidais.

Sua principal desvantagem reside na necessidade do teste com rotor bloqueado, o que torna o método muito invasivo e perigoso de execução. Apresenta alta precisão (erro $\pm 1,0\%$).

4.2.4 Método ORMEL96

Menos invasivo de todos, utiliza um circuito equivalente com uma resistência adicional no rotor representando as perdas suplementares. As perdas mecânicas também são adicionadas de tal forma que a potência de saída nominal se iguale com os valores calculados para este ponto. Utiliza apenas a medição de velocidade do motor, obtendo os demais dados a partir dos dados de placa ou padronizados (perdas suplementares, relação x_s/x_r , corrente de rotor bloqueado). O Programa para o cálculo da eficiência e demais dados é proprietário.

Perde em precisão em relação aos demais (erro $\pm 3,0\%$), mas ganha em segurança, e quase nenhuma invasão ao processo, sendo necessário apenas ao eixo da máquina para a medição de velocidade.

4.2.5 Método de Pillay, Levin, Otaduy e Kueck

Utiliza o mesmo circuito equivalente do método ORMEL (desenvolvido por Otaduy), porém utiliza o método numérico do algoritmo genético para determinar os parâmetros do circuito equivalente. Parte de medições de entrada de tensão, corrente, fator de potência e velocidade em diferentes pontos de carga, e de uma medição da resistência do estator em temperatura de operação (medição de resistência CC feito logo após o desligamento da máquina).

Possui a mesma precisão do método anterior e também a baixa invasão ao processo, possui a vantagem de não ser um método proprietário e, portanto, pode ser implementado a partir da descrição do método obtida em artigos científicos.

4.2.6 Método de Bin Lu, Habetler e Harley [48] [49]

Outro método que utiliza uma resistência parasita (R_{LL}) para representar as perdas suplementares, como mostrado na Figura 4.2. Menos invasivo que os anteriores, parte de dados de leitura de tensão, corrente e velocidade em dois pontos de operação da máquina, além da resistência do estator. Durante o seu desenvolvimento, utilizou três diferentes métodos numéricos não-lineares para estimar os demais parâmetros do circuito, mais especificamente os métodos de Newton-raphson, Otimização de Partículas Swarm (PSO) e Simulated Annealing, concluindo que o primeiro converge mais rapidamente, porém necessita de uma estimativa inicial do valor dos parâmetros, enquanto os demais necessitam de maior tempo computacional, mas convergem sem a necessidade de uma estimativa inicial.

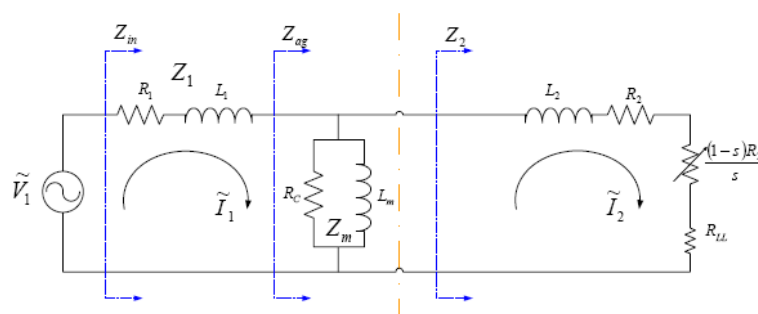


Figura 4.2 - Circuito equivalente de uma fase do motor de indução trifásico com representação de perdas suplementares

A principal inovação deste método está na medição não intrusiva da resistência do estator e da velocidade do eixo da máquina. A resistência é medida através da injeção de um sinal CC nos terminais de entrada da máquina; o circuito que faz esta medição é simples e pode ser inserido no quadro de controle do motor ou ainda, no caso de motores com velocidade controlada, esta injeção de sinal pode ser implementada via software e enviada junto com os sinais de controle PWM. A Figura 4.3 mostra o circuito físico de injeção de sinal CC.

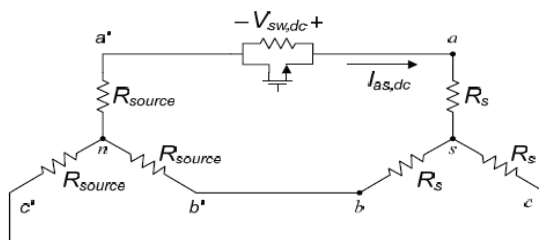


Figura 4.3 - Circuito equivalente CC da fonte, do injetor de sinal e das resistências estatóricas do motor de indução

A medição da velocidade tem um procedimento um pouco mais complexo, já que parte do princípio de que a interação entre os campos magnéticos gerados no rotor e os do estator produzem componentes harmônicas na corrente de entrada na mesma frequência da velocidade de rotação da máquina. Assim, a partir da leitura de corrente de entrada e aplicando-se sucessivas filtrações na mesma, pode-se isolar esta componente harmônica e obter com grande precisão o valor da velocidade de rotação do motor. A Figura 4.4 mostra os resultados obtidos com a aplicação deste método de detecção de velocidade (speed detector) comparados com medições feitas com tacômetro, comprovando a sua precisão.

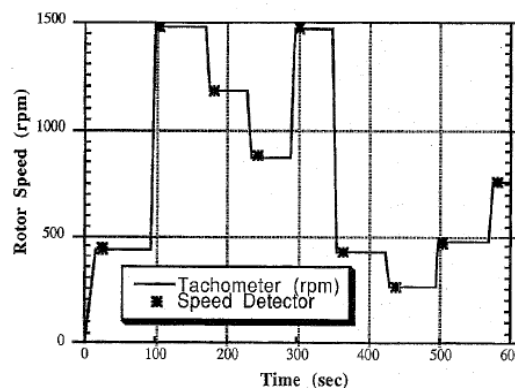


Figura 4.4 - Resultados da aplicação do método de detecção de velocidade [50]

Este método não faz o cálculo das perdas mecânicas, o que diminui a sua precisão (erro $\pm 3,0\%$). A sua principal característica está na pouca invasão ao processo, mas este esforço requer a implementação de um complexo método para a determinação da velocidade.

4.2.7 Método de El-Ibiary [51]

Este método utiliza o circuito equivalente apresentado na descrição inicial deste item, ou seja, sem a presença de resistência parasita para representar as perdas suplementares nem laços adicionais do circuito do rotor. As perdas suplementares são obtidas a partir de valores estimados (tabela da IEEE) e as perdas mecânicas são estimadas com base em dados conhecidos de motores e suas características de potência, velocidade e tamanho do ventilador.

Parte de medições de corrente, tensão e potência entrada, além de velocidade e temperatura do estator em dois pontos de operação do motor, com carga normal e com carga leve. Com estes dados, determina os parâmetros do circuito equivalente utilizando um método numérico não divulgado, e calcula a eficiência da máquina. Adicionalmente faz uma análise

econômica para verificação do retorno do investimento com a troca por um motor mais eficiente.

De acordo com os resultados divulgados, este método possui uma alta precisão (erro $\pm 1,0\%$). Sua limitação está na invasão na medição da temperatura do estator, que deve ser muito precisa e por isso é feita com inserção de sensores de temperatura na máquina,

Como foi dito anteriormente, esta metodologia de cálculo de eficiência de motores de indução tem sido uma das mais estudadas nos últimos tempos [52] [53] [54] por apresentar uma alta precisão, pela possibilidade de pouca intrusão ao processo, e ainda pelas possibilidades de métodos numéricos que existem para solução das equações não lineares do circuito.

4.3 MÉTODOS DO ESCORREGAMENTO

O Torque desenvolvido pelo motor de indução é dado pela expressão (2.6), anteriormente tratada no Capítulo II. Analisando esta expressão verifica-se que o torque desenvolvido pelo eixo da máquina depende da corrente do rotor (I_r) e do escorregamento (s), sendo que a variação do escorregamento também influencia no valor de I_r .

$$T = \frac{P_g}{w_s} = 3I_r^2 \frac{r_r}{sw_s} \quad (4.10)$$

Durante a partida, o rotor está parado ($s = 1$) e começa a se mover, provocando uma redução no escorregamento, neste momento temos um aumento na resistência hipotética do rotor (r_r/s), no entanto, como os demais componentes do circuito não se alteram, a impedância total do circuito ainda é pequena o que resulta em pequena redução em I_r . Neste momento o torque da máquina cresce com a redução de s até o ponto em que r_r/s passa a ter uma grande influência sobre I_r . A partir deste ponto, r_r/s passa a ser muitas vezes superior aos demais parâmetros do motor, e a corrente I_r passa ser inversamente proporcional a esta resistência, que passa a ser o fator dominante no torque desenvolvido pela máquina. A partir deste ponto o torque desenvolvido é inversamente proporcional à resistência r_r/s ou, melhor dizendo, diretamente proporcional ao escorregamento. A Figura 4.5 ilustra este comportamento do motor de indução trifásico.

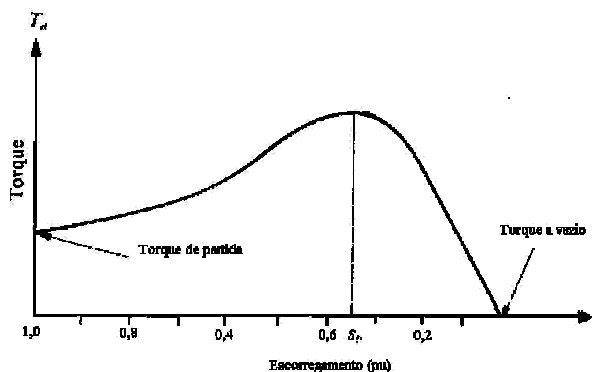


Figura 4.5 – Característica de Torque x Escorregamento de um motor de indução

Os métodos aqui tratados se utilizam desta relação linear entre escorregamento e torque desenvolvido pela máquina. Ressalte-se que a eficiência da máquina é dada pela relação entre as potências de saída e de entrada da máquina, ou seja, para se obter a potência de saída devem-se subtrair as perdas mecânicas da potência desenvolvida no eixo.

$$P_{SAÍDA} = P_{EIXO} - P_{MEC} = T\omega_m - P_{MEC} \quad (4.11)$$

A Tabela 4.3 apresenta os métodos do escorregamento tratados neste item, com destaque para as características de invasão e precisão.

Tabela 4.3 - Métodos do Escorregamento

Métodos				Precisão	Invasão		
					Teste a Vazio (S/N)	Resistência do estator (S/N)	Velocidade (S/N)
Método	Padrão	de	±40,0%	N	N	S	
escorregamento							
Método	do	escorregamento	±14,0%	N	N	S	
compensado da Ontário Hydro							
Método	do limite superior de		±40,0%	N	N	S	
escorregamento							
Motor Master+							
Escorregamento			±10,0%	N	N	S	
Corrente			±10,0%	N	N	N	
Potência de Entrada			±3,0%	N	N	N	

4.3.1 Método Padrão de Escorregamento

Necessita de apenas quatro dados para o cálculo da eficiência do motor: potência (P_{nom}) e escorregamento (s_{nom}) nominais, e potência de entrada ($P_{ENTRADA}$) e escorregamento (s) da máquina em operação. Os dois primeiros são obtidos dos dados de placa do motor e os demais são medidos. Com estes dados, a eficiência da máquina é obtida com a expressão:

$$\eta = \frac{746 \times P_{nom} \times s}{P_{ENTRADA} \times s_{nom}} \quad (4.12)$$

O maior atrativo deste método é sua simplicidade e pouca invasão, no entanto, a sua dependência dos dados de placa do motor, em particular do escorregamento, o tornam pouco preciso. Os dados de placa de velocidade nominal de um motor podem, por norma, variar em intervalos de 5 rpm [55] e isto pode acarretar erros no valor do escorregamento na ordem de 20%. Testes de avaliação deste método apresentaram erros de até 40%.

4.3.2 Método Ontário Hidro do escorregamento compensado

A Potência de saída de um motor é proporcional ao quadrado da tensão de entrada a um dado valor de escorregamento. O método anterior, que utiliza dados de placa de potência e escorregamento, não leva em consideração esta característica. Diante disto, a empresa canadense Ontário Hidro aperfeiçoou este método incluindo no cálculo da eficiência os efeitos da tensão de entrada.

$$\eta = \frac{746 \times P_{nom} \times s \times V^2}{P_{ENTRADA} \times s_{nom} \times V_{nom}^2} \quad (4.13)$$

Assim, este método incorporou mais dois dados na expressão da eficiência, a tensão nominal (V_{nom}) e a tensão medida na entrada da máquina em operação (V). No entanto, a dependência dos dados de placa continua e a precisão deste método também é baixa, apresentando erros de 14% em testes comparativos realizados com dinamômetros.

4.3.3 Método do limite superior de escorregamento

Este método pretende estabelecer um limite máximo para a eficiência de um motor partindo apenas do dado de escorregamento. Desenvolvido por Guru e Hirizóglu [56],

simplifica o circuito equivalente da máquina ao ponto de desconsiderar as perdas resistivas do estator, estabelecendo que a potência de entrada ($P_{ENTRADA}$) é igual a potência entregue ao entreferro do motor (P_g). Também desconsidera as perdas mecânicas, para obter as seguintes expressões:

$$P_{ENTRADA} = P_g = 3I_r^2 \frac{r_r}{s} \quad (4.14)$$

$$P_{SAÍDA} = T W_m = 3I_r^2 \frac{r_r}{s} (1-s) = (1-s) P_g \quad (4.15)$$

$$\eta = \frac{P_{SAÍDA}}{P_{ENTRADA}} = 1-s \quad (4.16)$$

Resumindo, este método estabelece que, se um motor está operando a 80% de sua velocidade síncrona ($s=20\%$), esta será a máxima eficiência que o mesmo poderá obter. Diante das simplificações feitas para se obter esta expressão, este método não pode ser utilizado para a definição de eficiências. Entretanto, o princípio utilizado não está incorreto e o mesmo pode ser utilizado para comparações entre dois motores sob a mesma condição de operação ou dois motores novos; aquele que tiver um menor escorregamento apresentará um maior rendimento.

A Companhia Ontário Hidro implementou uma expressão de limite de eficiência que levava em consideração as perdas resistivas no estator e obteve uma expressão mais complicada, concluindo que esta teoria deve ser melhor investigada.

4.3.4 Motor Master+

Este analisador de eficiência permite a utilização de três diferentes métodos em seus cálculos: escorregamento, corrente e potência de entrada. A escolha por qual deles o cálculo da eficiência será feito depende da disponibilidade de medições. Caso seja possível a medição da potência de entrada, o método faz uma estimativa inicial da carga do motor utilizando a eficiência a 100% da carga (η_{nom}) fornecida pelo fabricante, como segue:

$$Carregamento = \frac{P_{ENTRADA}}{P_{nom} / \eta_{nom}} \quad (4.17)$$

A partir deste valor, inicia um processo iterativo em que utiliza curvas de eficiência versus carregamento padronizados (motor padrão, intermediário e eficiente) para obter a

eficiência para este carregamento; utiliza a potência de entrada com esta eficiência para obter a potência de saída e uma nova estimativa de eficiência; repete o processo até a convergência.

Para motores sem os dados de placa, utiliza o gráfico de eficiência padrão e, no caso de motores rebobinados, reduz em 2% a eficiência para potências inferiores a 40 Cv e 1% para potências maiores [57].

Quando a leitura de potência ativa de entrada não é conhecida, o método apresenta a opção de cálculo do corrente via escorregamento ou corrente. O Cálculo pelo escorregamento utiliza a forma descrita no Método Padrão de Escorregamento e o cálculo pela corrente será detalhado no próximo item. Apresenta boa precisão apenas para o cálculo por potência (erro $\pm 3\%$), enquanto os demais apresentam baixa precisão (erro $\pm 10\%$).

4.4 MÉTODOS DA CORRENTE/OUTROS

Os métodos que não se enquadram nos itens anteriores são aqui tratados, com destaque para o método da corrente, por sua maior utilização, mas também são abordados os métodos classificados como Torque no Entreferro e Torque no Eixo e ainda outros métodos em análise pela comunidade científica.

Como o cálculo das perdas suplementares tem sido um elemento gerador de erros nos métodos aqui apresentamos, também será abordado um método que se propõe a realizar este cálculo com menos invasão que os já descritos, que é o Método Eh-star. A Tabela 4.4 resume os métodos apresentados neste item.

Tabela 4.4 - Métodos da Corrente/Outros

Métodos	Precisão	Invasão		
		Teste a Vazio (S/N)	Resistência do estator (S/N)	Velocidade (S/N)
Método da Corrente	$\pm 10,0\%$	N	N	N
BD Motor/Corrente	$\pm 10,0\%$	N	N	N
Método do Torque no entreferro	$\pm 1,0\%$	S	N	S
Silex	$\pm 3,0\%$	N	N	S
Sentech	$\pm 1,0\%$	S	N	S
Método de Ho e Chen	$\pm 6,0\%$	S	N	S
Método eh-star	$\pm 1,0\%$	S	N	S

4.4.1 Método da Corrente

Método fácil de implementar, já que requer medições de corrente e potência ativa de entrada apenas. Os demais dados são obtidos da placa do motor. Parte do princípio de que a potência de saída é proporcional à corrente de entrada da máquina. O cálculo de eficiência é dado pela seguinte expressão.

$$\eta = \frac{I \times 746 \times P_{nom}}{I_{nom} \times P_{ENTRADA}} \quad (4.18)$$

Possui a vantagem sobre o método do escorregamento de que os dados de placa de corrente (I_{nom}) são mais precisos que os de escorregamento (a tolerância ao erro é a metade daquela exigida nos dados de escorregamento), além de que a corrente não é influenciada pela temperatura e varia linearmente com a variação de tensão. Entretanto, também apresenta baixa precisão, já que superestima a carga entre 10-20% ao não levar em consideração a corrente de magnetização. Não é intrusivo.

4.4.2 BD Motor [3]

Desenvolvido pela Eletrobrás, tem uma concepção parecida com o Motor Master+ , já que apresenta a possibilidade de cálculo pelos métodos da corrente, potência e escorregamento. Como diferencial, utiliza uma base de dados de características de motores fabricados no Brasil para obter os dados de placa e interpolar as curvas de eficiência.

Em seu Método da Corrente, utiliza os dados de corrente de entrada para calcular a carga do motor e faz uma interpolação dos dados de eficiência do fabricante para o ponto de operação calculado. Neste método, apresenta baixa precisão, que pode ser aprimorada com a aquisição de dados de potência ativa de entrada. Tem como vantagem o fato de estar disponível gratuitamente e de sua fácil implementação.

4.4.3 Método de Hsu, Scoggins e Sorenson do torque no entreferro [58] [59]

O Torque do entreferro representa o efeito combinado de todos os fluxos e correntes do rotor e do estator da máquina, ele difere do torque de eixo da máquina pelas componentes das perdas mecânicas e suplementares do rotor. A expressão para o cálculo do Torque do entreferro é:

$$T_{entref} = \frac{P}{2\sqrt{3}} \left\{ (i_A - i_B) \int [v_{CA} - R(i_C - i_A)] dt - (i_C - i_A) \int [v_{AB} - R(i_A - i_B)] dt \right\} \quad (4.19)$$

Onde,

p – número de pólos do motor;

i_A, i_B, i_C – leituras instantâneas de correntes de linha, em A;

R – metade da resistência fase-fase do estator, em Ω ;

Além das leituras instantâneas de corrente e tensão, e da resistência do estator, este método requer a realização de um teste a vazio, para a determinação das perdas mecânicas. As perdas suplementares são obtidas da tabela padronizada do IEEE. A eficiência do motor é determinada pela seguinte expressão.

$$\eta = \frac{T_{entref} \times w_m - P_{MEC} - P_{SUP,R}}{P_{ENTRADA}} \quad (4.20)$$

Este método apresenta alta precisão (erro $\pm 1,0\%$) e, à exceção da necessidade de teste a vazio, é pouco invasivo. Possui a vantagem adicional de poder ser usado mesmo nos casos de desbalanceamento de tensão. Trata-se uma área que vem sendo muito estudada.

4.4.4 Método SILEX de Torque no Entreferro

Método desenvolvido por uma empresa húngara difere do anterior por não necessitar de um teste a vazio, e, conseqüentemente, por não considerar as perdas mecânicas e magnéticas. Usa um equipamento proprietário que faz a leitura das formas de onda de corrente e tensão para calcular o torque no entreferro.

Apresenta uma menor precisão que o anterior com a vantagem de ser menos invasivo. Requer um treinamento para o uso do equipamento.

4.4.5 Método SENTECH de medição de torque de eixo

Conhecido o torque e a velocidade de eixo, e a potência ativa de entrada da máquina, a eficiência é calculada rapidamente pela expressão:

$$\eta = \frac{T_{eixo} w_m}{P_{ENTRADA}} \quad (4.21)$$

Este método apresenta um equipamento munido de um sistema de sensores que determina o torque, a velocidade e a potência da máquina. Utiliza o princípio de que a distorção torsional do eixo é diretamente proporcional ao torque. Este equipamento necessita de calibração e, para tanto, o motor deve ser desacoplado da carga sem a influência do atrito da carga.

Este método apresenta alta precisão (erro $\pm 1\%$), mas seu uso no campo ainda está em estágio de desenvolvimento.

4.4.6 Método de Ho e Chen

Este método utiliza a métodos de estimação de sistemas da teoria do controle para desenvolver equações diferenciais que descrevam o comportamento do motor. O Torque de saída do eixo é um dos parâmetros destas equações, que são calculadas a partir condições normais de operação e a vazio.

Os autores utilizaram o método dos mínimos quadrados recursivo para estimar os parâmetros do modelo. Os testes iniciais mostraram que o método apresenta uma precisão média (erro $\pm 6\%$) e é muito invasivo, necessitando de amostras de potência de entrada, corrente de linha e velocidade do motor com carga e a vazio.

4.4.7 Método eh-star [60] [61]

Em todos os métodos aqui descritos, o cálculo das perdas suplementares apareceu como um problema, cuja solução passava pela utilização de tabelas com valores estimados para estas perdas. O Padrão IEEE e outros similares apresentam formas de calcular estas perdas de maneira extremamente intrusiva (métodos da rotação reversa e do rotor removido vistos no Capítulo 3) e dispendiosa, impossibilitando sua aplicação para motores em operação.

O Método eh-star foi desenvolvido para tentar solucionar este problema e utiliza os mesmos princípios do teste da rotação reversa sem a necessidade de um dinamômetro acoplado ao motor para fazê-lo rotacionar reversamente a velocidade síncrona. Isto é feito alimentando um motor a vazio de forma desbalanceada. O motor, com os terminais conectados em estrela, é acionado normalmente por uma fonte trifásica e então uma chave

transfere a conexão para uma fonte monofásica com uma das fases conectada por uma resistência. A Figura 4.6 representa a conexão via fonte monofásica.

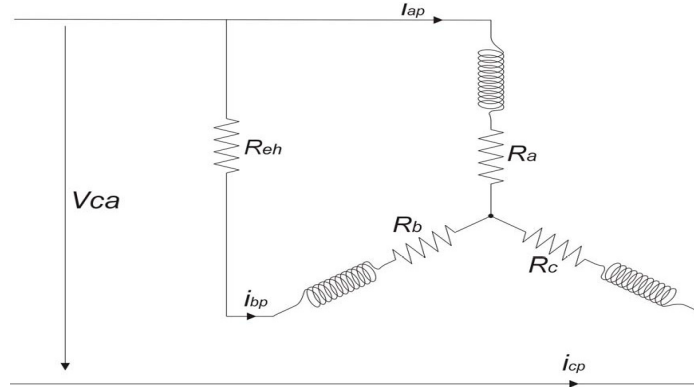


Figura 4.6 - Circuito de testes do Método eh-star

O valor da resistência (R_{eh}) deve ser igual à impedância por fase do teste com rotor bloqueado. Esta máquina alimentada assimetricamente pode ser considerada, de acordo com as regras de componentes simétricas, como dois circuitos equivalentes de máquinas de indução, sendo um deles de sequência positiva e outro de sequência negativa; a componente de sequência zero é eliminada, já que a estrela não está conectada à terra.

Neste circuito são realizadas medições de tensão, corrente e potência de cada uma das fases e o valor das perdas suplementares é calculado pela seguinte expressão:

$$P_{SUP} = (1-s)[(P_{entref,p} - P_{entref,n}) - P_{MEC}] \quad (4.22)$$

Onde,

$P_{entref,p}$ – Componente de sequência positiva da potência do entreferro;

$P_{entref,n}$ – Componente de sequência negativa da potência do entreferro;

O valor das perdas mecânicas é obtido da realização de um teste a vazio. Trata-se de um método de alta precisão (erro $\pm 1,0\%$), porém com alguma intrusão, já que a máquina deve ser desacoplada da carga, mas em nada comparável os demais métodos que calculam perdas suplementares.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A primeira consideração a ser feita sobre os métodos para cálculo de eficiência é sobre a quantidade. Dela podemos concluir a importância que este tema possui na comunidade acadêmica e não acadêmica em todas as partes do planeta. Isto já era esperado considerando a importância do motor de indução trifásico na matriz de consumo de energia elétrica.

Outro fator importante é que o horizonte de pesquisa e desenvolvimento sobre o tema, apesar de já ter sido exaustivamente analisado, ainda apresenta áreas a serem exploradas. A modelagem matemática e a estimação de parâmetros estão entre os itens que apresentam mais inovações sobre o tema, mas o desenvolvimento de equipamentos para medições de características dos motores com pouca invasão sobre o processo também se mostram importantes.

Apresentado o estado da arte dos métodos de determinação de eficiência de motores, no próximo capítulo serão implementados alguns deles na análise da evolução dos motores do tipo padrão para o tipo alto rendimento. Também será discutida a influência da escolha do método sobre a análise econômica a que será submetido o motor para a definição de seu destino na linha de produção.

Capítulo V

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados no Laboratório de Eficiência Energética e Força Motriz (LAMOTRIZ) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, em cuja planta para simulações de atividades industriais existe uma bancada com dois motores de 10 cv conectados a um freio eletromagnético. Os motores são dos tipos Padrão e Alto Rendimento, e o freio eletromagnético funciona como carga variável para os dois motores. Além dos instrumentos de medição pertencentes ao LAMOTRIZ, foi utilizada uma fonte variável de tensão de alta potência pertencente ao Laboratório do Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC/DEE-UFC).

Inicialmente convém recordar que até este ponto foram apresentados os princípios de funcionamento da máquina de indução, uma detalhada análise das perdas existentes na mesma, e uma visão dos métodos existentes para o cálculo de sua eficiência. Este Capítulo finaliza a dissertação apresentando os resultados de testes realizados em dois motores de indução para determinação de suas perdas e eficiência; uma comparação entre métodos para cálculo da eficiência; e ainda uma análise da influência da precisão da eficiência sobre a análise econômica do retorno de investimento na troca de motores. Estes resultados e análises são apresentados na seguinte sequência:

1. *Descrição da bancada de testes:* São apresentados os equipamentos utilizados para a realização dos testes, com detalhes sobre os motores, a carga e a fonte de tensão variáveis e os equipamentos de medição. Também são analisados as adequações dos equipamentos de medição às recomendações do padrão IEEE;
2. *Resultados dos testes seguindo o Método E1/IEEE-112-1996:* São apresentados os resultados dos testes realizados nos dois motores da bancada do LAMOTRIZ utilizando os critérios do Método E1 para determinar cada uma das perdas existentes nos mesmos. Também são apresentadas as curvas de eficiência dos motores e uma análise da evolução tecnológica do motor Padrão para o motor de Alto Rendimento;

3. *Comparação de Métodos para o cálculo da eficiência:* Foram selecionados dez dos métodos apresentados no Capítulo IV, e, a partir dos resultados das medições realizadas nos motores, foram implementadas as curvas de eficiência com base em cada um destes métodos. Os resultados são apresentados utilizando a divisão por tipo de método (Perdas segregadas, Circuito Equivalente, Escorregamento e Corrente/Outros) e todos eles são comparados com a curva de eficiência obtida com a aplicação do Método E1;
4. *Influência da precisão da eficiência na análise econômica:* Neste item são apresentadas as duas análises mais comuns utilizadas para o cálculo do retorno do investimento na substituição de motores (Retorno simples e Valor Atual da Economia), e, para estas análises, são utilizados valores de eficiência de motores obtidos a partir de diferentes Métodos (E1, Hirzel e Ontário Hidro). Os resultados são comparados com o objetivo de comprovar a importância da precisão do valor da eficiência do motor sobre a análise econômica.

Os valores das medições realizadas nos dois motores e os resultados dos cálculos das perdas e da eficiência de todos os métodos estão apresentados no Apêndice A.

5.1. DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS TESTES

Para a realização dos ensaios foram utilizadas as facilidades dos laboratórios LAMOTRIZ e GPEC do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará. Neste item apresentamos os componentes da bancada de ensaios de motores de indução do LAMOTRIZ, a fonte de tensão variável pertencente ao GPEC e os demais instrumentos de medição utilizados nos testes realizados para a determinação das perdas dos motores.

5.1.1 Bancada de ensaios

A bancada de ensaios pertencente ao LAMOTRIZ é composta de equipamentos de acionamento, medição e controle, de dois motores de indução trifásicos, e de um freio eletromagnético que funciona com carga variável dos dois motores, conforme mostrado no diagrama da Figura 5.1.

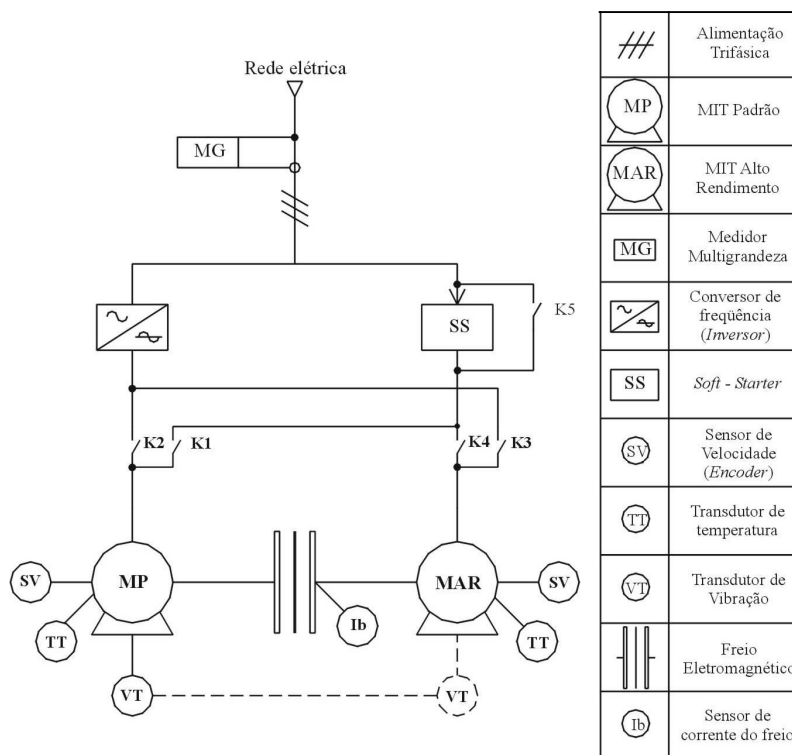


Figura 5.1 - Diagrama da bancada de ensaio de motores

Os equipamentos de medição e controle estão conectados a um sistema de supervisão que permite a coleta de dados e o acionamento da bancada através de um computador (estação de trabalho), de onde também é possível parametrizar todo o sistema.

Além dos equipamentos da figura acima, foram utilizados equipamentos de medição auxiliares e a fonte de tensão variável de alta potência do GPEC.

5.1.2 Equipamentos de Potência

Os detalhes dos motores, do freio eletromagnético e da fonte de tensão variável são apresentados a seguir.

5.1.2.1 Motores

Os motores de indução trifásicos da bancada possuem características de fabricação diferentes, já que um deles obedece aos índices de eficiência mínimos do motor Padrão e outro obedece aos índices do motor de Alto Rendimento, definidos no Capítulo II. Ambos são

fabricados pela WEG Indústrias SA, empresa responsável por 80% do mercado de motores do país. Ambos são do tipo gaiola de esquilo e possuem as especificações listadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Dados dos Motores da Bancada

Especificações	Motor Padrão	Motor Alto Rendimento
Potência Nominal (hp/kW)	10/7,5	10/7,5
Rotação nominal (rpm) em 60Hz	1760	1760
Número de pólos	4	4
Tensão de linha nominal (V)	380/660	380/660
Corrente nominal em 380/660V (A)	15,40/8,87	15,30/8,80
Corrente com rotor bloqueado I_p/I_n	8,0	7,8
Corrente a vazio (A)	8,11/4,67	7,24/4,17
Conjugado nominal C_N (N.m)	41	41
Conjugado rotor bloqueado (% C_N)	220	260
Conjugado máximo (% C_N)	300	310
Rendimento em % da potência nominal (NBR 5383-128, IEEE 112).	50	86,0
	75	88,0
	100	89,0
Fator de Potência em % da potência nominal.	50	0,66
	75	0,77
	100	0,83
Fator de Serviço (FS)	1,15	1,15
Tempo com rotor bloqueado (s)	7	12
Peso aproximado (kg)	61	64
Grau de Proteção (NBR-6146)	IP55	IP55
Categoria (NBR-7094)	N	N
Regime de Serviço	S1	S1
Classe de Isolação (NBR-7094)	F	F
Carcça (NBR 5432 e IEC 72)	132S	132S

5.1.2.2 Freio Eletromagnético

O Freio eletromagnético por ação de correntes induzidas (FEACI) foi desenvolvido no LAMOTRIZ para atender as condições de carga mecânica para ensaio de um MIT de 10 cv, com possibilidade de variação do conjugado de carga e potência entre 0% e 100% do nominal do motor. Está acoplado aos dois motores de 10 cv e possui as características físicas descritas na Figura 5.2.

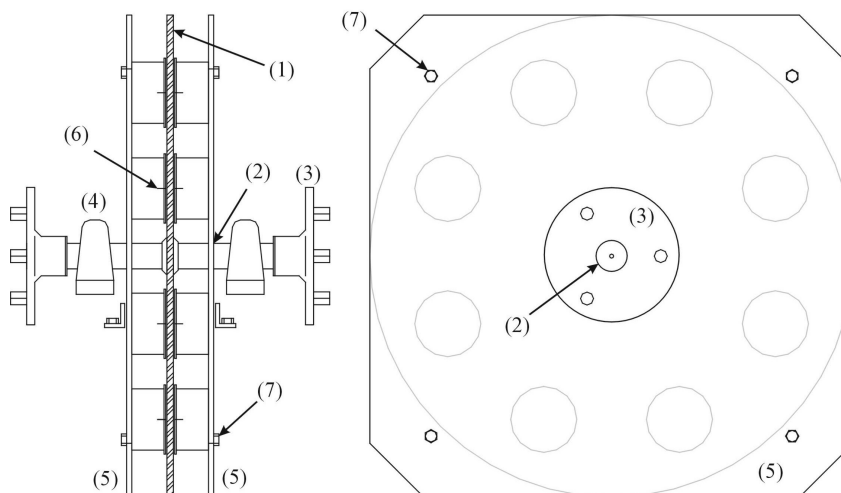


Figura 5.2 - Característica física do FEACI

O Rotor do FEACI é constituído de disco condutor (1), eixo (2), acopladores (3), unidades de rolamento (4); enquanto o estator apresenta duas laterais planas (5), oito pares de núcleos ferromagnéticos (6) e parafusos de ajuste do entreferro (7).

O Controle do conjugado do FEACI é feito por um circuito de alimentação do circuito de campo mostrado na Figura 5.2.

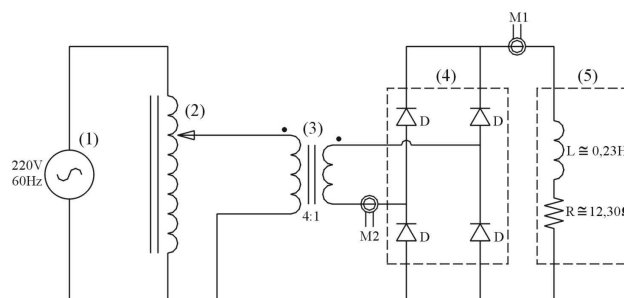


Figura 5.3 – Circuito de alimentação das bobinas de campo: (1) rede elétrica, (2) autotransformador variável, (3) transformador abaixador, (4) retificador ponte completa e (5) impedância equivalente das bobinas de campo.

Ao variar a tensão no variável, varia a corrente aplicada nas bobinas de campo do FEACI e, conseqüentemente, o conjugado aplicado aos motores. A Figura 5.4 representa a relação entre a variação de corrente e o conjugado do freio, calculados por [62], e os valores deste gráfico, que foram utilizados na simulação para o cálculo das perdas estão tabelados no Apêndice A1.

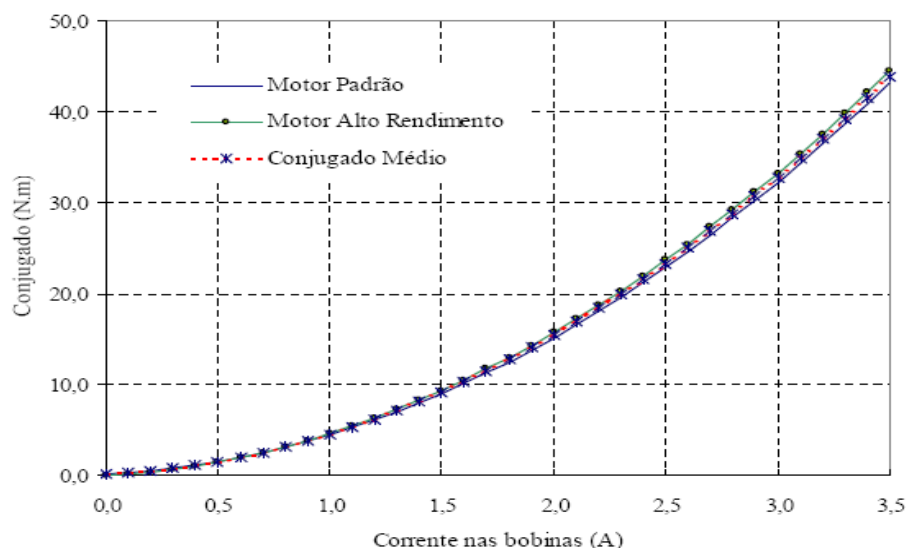


Figura 5.4 - Curva do conjugado em função da corrente aplicada ao FEACI

Para a realização dos testes, Padrão IEEE 112-1996 recomenda que deve ser observado o alinhamento do eixo da máquina com a carga e que as leituras devem ser realizadas em uma temperatura entre 50% e 100% do valor obtido no teste de temperatura com carga nominal (vide Figura 5.7).

5.1.2.3 Fonte de Tensão Variável

A Utilização da Fonte de Tensão variável pertencente ao Laboratório GPEC foi possível graças a uma interligação feita com o laboratórios via um cabo tripolar trifásico de 4 mm² de 30 m de comprimento. Como as correntes nominais dos motores estavam na ordem de 15 A, apenas o GPEC possuía uma fonte de tensão variável com estas características. São as seguintes as características da fonte:

Fabricante: AUJE – Indústria Eletrônica Ltda;

Potência: 35 KVA/33 kW;

Corrente Nominal: 50 A;

Frequência: 50/60 Hz;

Tensão de Entrada: 380 V;

Tensão de saída: 0 – 420 V

O Padrão IEEE estabelece que, quando da realização das medições, o desbalanceamento da tensão aplicada não deve exceder 5%, calculado como desvio da média das tensões nas três fases, o que está de acordo com as características da fonte.

5.1.3 Equipamentos de Medição

As medições de velocidade, temperatura do enrolamento do estator foram efetuadas com equipamentos disponíveis na bancada, enquanto para as medições de corrente, tensão, potência e resistência foram utilizados equipamentos auxiliares disponíveis no laboratório.

5.1.3.1 Velocidade do eixo

As medidas de velocidade de rotação do eixo do motor foram feitas por meio de um transdutor de velocidade (encoder) de rotor incremental, com as seguintes características:

Fabricante: IFM Electronic;

Modelo: RB6044/Linha Efecter 400 de eixo sólido,

Alimentação CC: 10V até 30V;

Resolução: 50 pulsos/volta ($7,2^\circ$ /volta)

O encoder é acoplado ao eixo do motor e protegido contra sobrecargas mecânicas graças ao tipo de acoplamento, que é tolerante a pequenos desvios axiais entre o eixo do motor e do encoder. A Figura 5.5 mostra o encoder e o diagrama de pulsos.

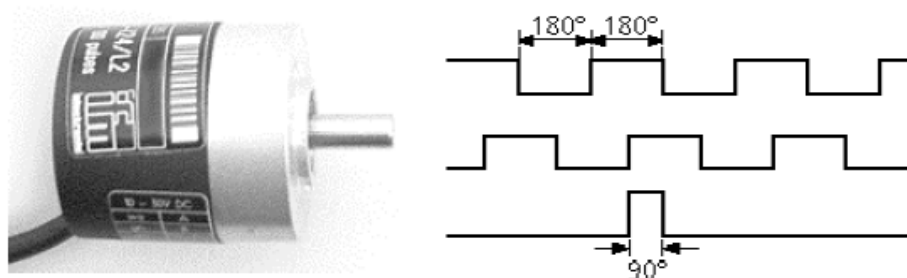


Figura 5.5 - Detalhe do encoder e da forma de diagrama de pulsos gerados

O diagrama de pulsos é lido por Controlador Lógico Programável do quadro de controle da bancada e a medição da velocidade de rotação é calculada pela contagem de uma quantidade de pulsos/ intervalo de tempo definidos na programação do CLP.

Neste item, o padrão IEEE recomenda que sejam utilizados tacômetros digitais ou estroboscópios, esclarecendo que tacômetros analógicos não são suficientemente precisos

para medição de escorregamento. O encoder, apesar de não ser recomendado para uma medição em campo, obedece aos padrões de precisão recomendados.

5.1.3.2 Temperatura de enrolamento

A temperatura do enrolamento do estator do motor é medida a partir de um termistor com o bulbo em contato com as lâminas do estator. Apresenta as seguintes características.

Marca: Termistor PT-100;

Transmissor de Temperatura: MTT-101 MARKARE

Característica do Sinal: 4-20 mA;

Faixa de Temperatura: 0°C-600°C;

Desvio: 0,5%

Alimentação CC: 12V-36V.

O sinal do sensor é convertido pelo transmissor de temperatura localizado no interior do quadro de automação em um sinal de corrente, e em seguida enviado para o CLP através de uma porta de entrada analógica. A Figura 5.6 mostra o transdutor de temperatura e o transmissor.

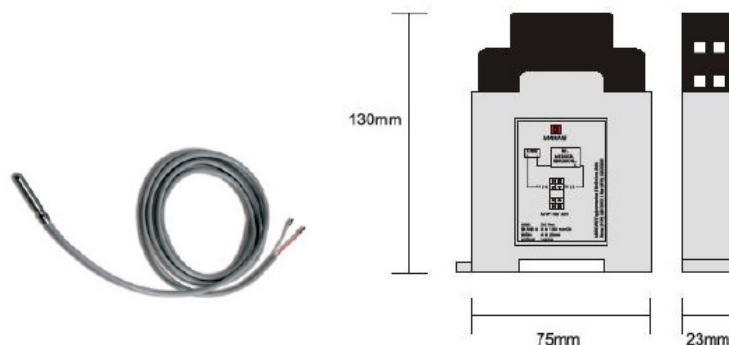


Figura 5.6 - Transdutor de Temperatura e Transmissor MTT 101

Existe um padrão específico da IEEE com orientações sobre medições de temperatura [63]. As principais recomendações são que o motor deve ser isolado de correntes de ar provenientes de correias ou outras máquinas, e ainda de rápidas variações na temperatura ambiente.

5.1.3.3 Resistência

Para a medição do valor da resistência do estator foi utilizado um multímetro digital de bancada, modelo MDM-8146 Minipa, com precisão de medidas de corrente contínua de $\pm 0,5\%$.

O Padrão IEEE 118-1978 [20] estabelece os métodos de medição de resistência e todos eles utilizam pontes de medição com alta precisão. Neste ponto um erro será introduzido em nossos cálculos, entretanto este erro deve ser considerado já que será um erro presente em todas as medições feitas em campo.

5.1.3.4 Corrente, Tensão e Potência

Para a medição dos valores de corrente, tensão e potência ativa dos motores em operação foi utilizado um medidor digital trifásico de potência com as seguintes características:

Fabricante: Yokogawa;

Modelo: WT 130;

Precisão: Corrente/Tensão - 0,25%

Potência – 0,35%

Corrente Máxima: 26 A.

Neste item o Padrão IEEE recomenda que os instrumentos tenham um histórico de calibração a cada doze meses, indicando limites de erro inferiores a $\pm 0,5\%$. Ressalta que, nos casos em que for necessária a utilização de transformadores, correções devem ser feitas para as medições de corrente, tensão e ângulo de fase, e ainda que o erro destes transformadores não deve exceder $\pm 0,5\%$.

5.2 RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO MÉTODO E1(IEEE 112-1996)

Neste item serão apresentados os cálculos de cada um dos tipos de perdas existentes nos dois motores de 10 cv da bancada de ensaio calculados com base no Método E1 do Padrão IEEE 112-1998, assim como a curva de eficiência dos motores e uma análise das melhorias tecnológicas aplicadas no motor de Alto Rendimento. Todos os valores medidos estão relacionados no Apêndice A.

5.2.1 Perdas Resistivas no Estator e no Rotor

O Cálculo das perdas resistivas se inicia pelas perdas no estator e estas pelo cálculo da resistência CC dos enrolamentos do estator. Foram realizadas medições da resistência CC entre os terminais de linha dos dois motores e, neste instante, coletadas as temperaturas do enrolamento. Os resultados estão na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Medidas de Resistência CC e Temperatura do Enrolamento

Motor	Resistência $R_{CC} (\Omega)$	Temperatura t_t (°C)
Padrão	1,07	22
Alto Rendimento	0,92	25,8

A expressão para o cálculo das perdas resistivas do estator (3.7) requer a correção desta resistência para uma temperatura especificada. Esta temperatura tanto pode ser baseada na Classe de Isolamento do Motor, conforme Tabela 3.1, como também pode ser calculada utilizando o aumento da temperatura dos enrolamentos do estator quando operando a plena carga em relação à temperatura ambiente, acrescido de 25°C (t_s). Este cálculo do aumento de temperatura foi realizado com base nos dados da Figura 5.7, que mostra a evolução da temperatura até a estabilização, quando os motores foram submetidos a um conjugado nominal.

O Gráfico da figura 5.7 foi levantado por Adriano Pereira [62] quando da realização de ensaios no Freio Eletromagnético.

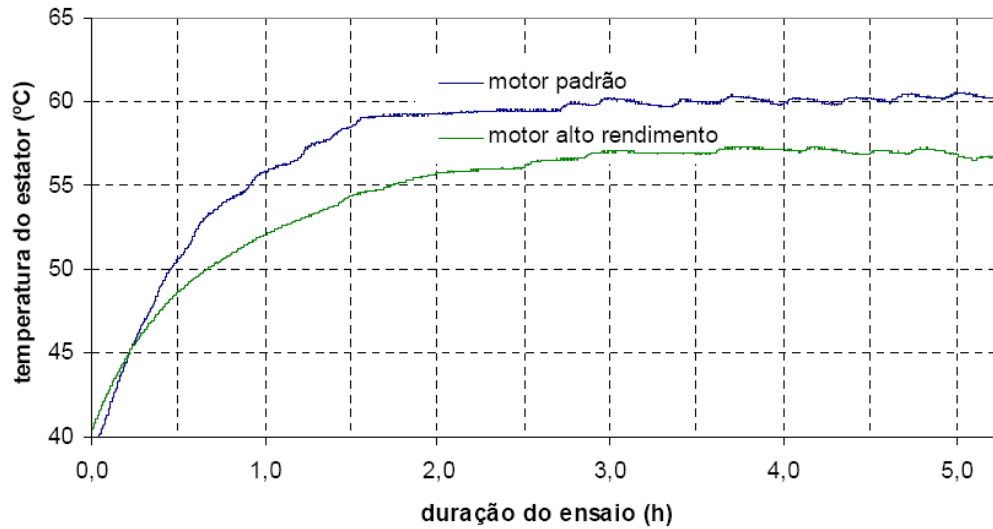


Figura 5.7 - Evolução da temperatura dos enrolamentos do estator com o motor em carga nominal ($T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$) [62]

O Motor de Alto Rendimento tem a temperatura de enrolamento do estator estabilizada na temperatura de 57°C , enquanto o motor padrão estabiliza esta temperatura em 60°C para as condições de operação no laboratório. Estes foram os valores utilizados para t_s , já que a temperatura ambiente quando o teste com carga foi realizado era de 25°C . Com estes dados o cálculo da resistência CC corrigida (R_s) é feito utilizando a expressão (3.8) e o cálculo das perdas resistivas do estator pela expressão (3.7), repetidas nas equações (5.1) e (5.2).

$$R_s = \frac{R_t(t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (5.1)$$

$$P_{Js} = \frac{3}{2} I^2 R_{CC} \quad (5.2)$$

O valor de k utilizado foi 234,5, já que o enrolamento do estator dos motores é de cobre. A partir dos dados medidos nos dois motores da bancada, apresentados no Apêndice A.2, a Figura 5.8 foi obtida, relacionando a carga aplicada nos motores, em percentagem da carga nominal (41 N.m), e as perdas resistivas no estator.

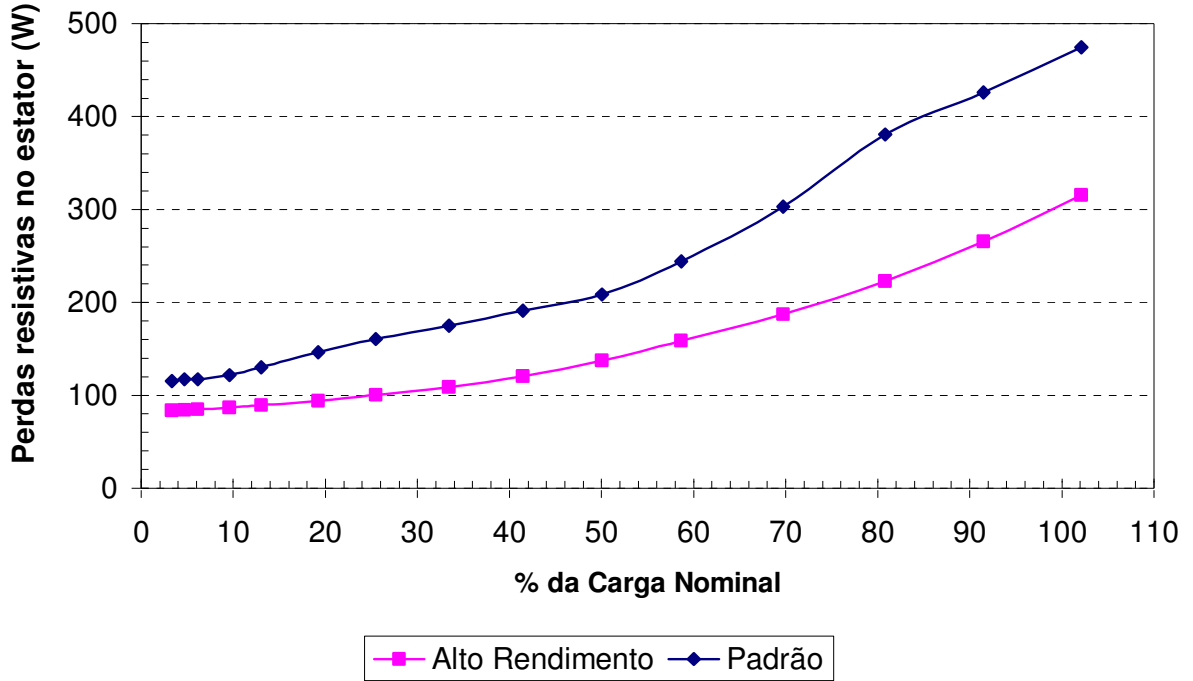


Figura 5.8 - Perdas Resistivas no estator dos motores em função da carga

O Cálculo das perdas resistivas do rotor obedece às expressões (3.9) e (3.10) condensadas na expressão (5.3), onde pode-se perceber a dependência do cálculo das Perdas Magnéticas (P_{Fe}), que trataremos no próximo item.

$$P_{Jr} = (P_{entrada} - P_{Js} - P_{Fe})s \quad (5.3)$$

Também existe a dependência do cálculo do escorregamento, que é obtido a partir a partir da medição da velocidade de rotação da máquina de acordo com a expressão (2.3), repetida na equação (5.4).

$$s = \frac{w_s - w_r}{w_s} \quad (5.4)$$

No entanto, antes de ser utilizado na expressão (5.4), este valor de escorregamento deve ser corrigido para uma temperatura no enrolamento do estator, de forma similar à resistência CC dos enrolamentos. Como a temperatura da máquina influencia nas perdas, também irá influenciar na potência de saída máquina e, assim, no escorregamento. A expressão (5.5) estabelece a forma de correção do valor do escorregamento.

$$s_s = \frac{s_t(t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (5.5)$$

Onde,

s_s = escorregamento corrigido para uma temperatura do estator t_s

s_t = escorregamento medido a uma temperatura t_t ;

t_s = temperatura especificada para correção da resistência medida, em °C;

t_t = temperatura do enrolamento quando o escorregamento foi medido, em °C;

$k = 234,5$ para enrolamentos de cobre.

A Aplicação destas expressões nos valores medidos nos dois motores da bancada está expresso na Figura 5.9.

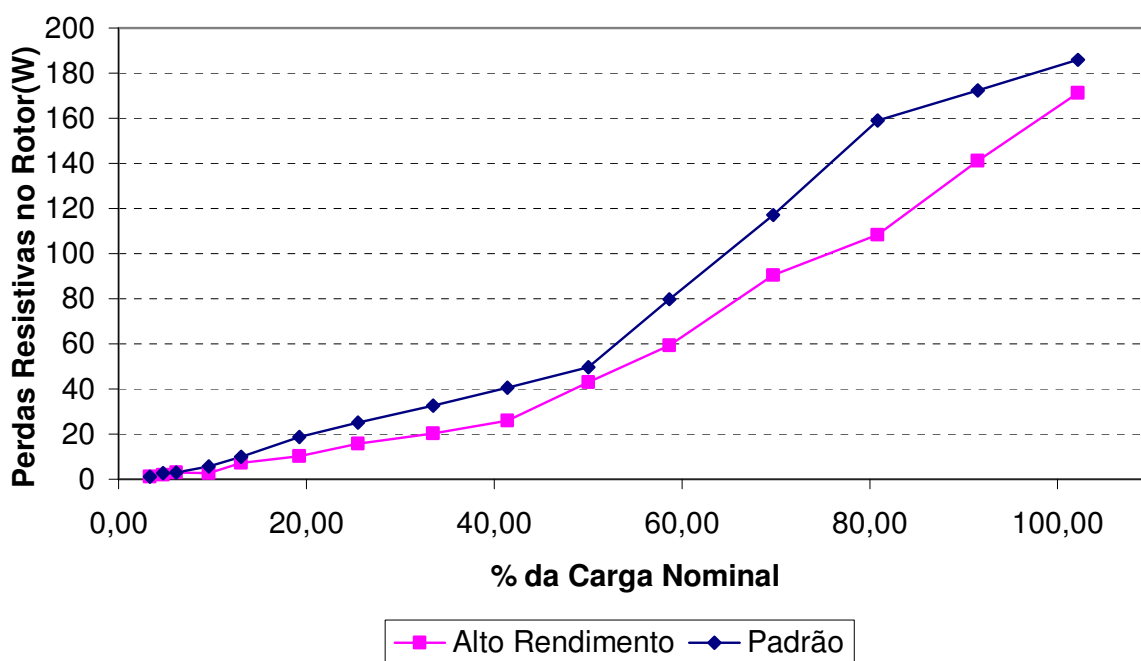


Figura 5.9 - Perdas Resistivas no rotor dos motores em função da carga

5.2.2 Perdas Magnéticas e Mecânicas

Estas perdas são tratadas em conjunto porque o seu cálculo também é feito em conjunto. O primeiro passo para a determinação destas perdas é a realização de um teste a vazio com a máquina, aplicando-se tensão e frequência nominal. A Potência lida neste teste representa a soma das perdas mecânicas, magnéticas e resistivas no estator; como as últimas são conhecidas, o somatório das perdas mecânicas e magnéticas é obtido. A Tabela 5.3 resume os resultados do teste a vazio.

Tabela 5.3 - Resultados do teste a vazio

Motor	Potência a vazio (W)	$P_{Fe}+P_{Mec}$ (W)
Padrão	415	312,5
Alto Rendimento	270	199,1

Para a separação destas perdas é realizado o teste com o motor a vazio e com sua tensão em frequência nominal sendo reduzida de 125% da tensão nominal até um valor em que a corrente de linha começa a subir. Com estes dados gera-se um gráfico relacionando potência de entrada com tensão, e o cruzamento da curva obtida com o eixo da potência indica o valor das Perdas Mecânicas, já que as perdas magnéticas são proporcionais à tensão aplicada. Este cruzamento da curva de tensão com o eixo da potência é obtido por interpolação. A Figura 5.10 mostra o resultado deste teste com os motores e os valores medidos estão relacionados no Apêndice A1.

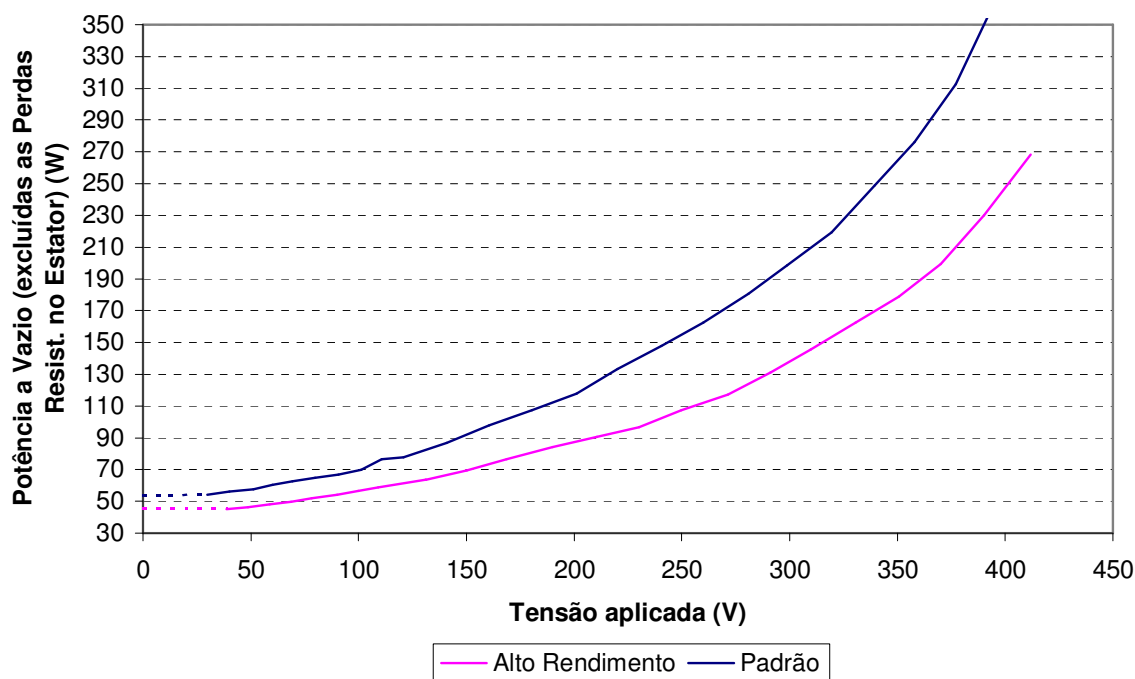


Figura 5.10 - Resultados do teste a vazio com redução de tensão

Determinadas as perdas mecânicas dos motores, as perdas mecânicas são obtidas facilmente. Estas perdas possuem a característica comum de não apresentarem variação com a carga. A Tabela 5.4 apresenta os valores das perdas mecânicas e magnéticas dos dois motores.

Tabela 5.4 - Valores das perdas mecânicas e magnéticas

Motor	P_{Fe} (W)	P_{Mec} (W)
Padrão	258,5	54
Alto Rendimento	154,1	45

5.2.3 Perdas Suplementares

A medição das perdas suplementares segundo o padrão IEEE 112-1998 é um processo complexo e depende de equipamentos dispendiosos e de difícil disponibilidade. Diante disto, o Método E1 propõe a utilização de uma tabela com valores presumidos de perdas suplementares (Tabela 3.3). Esta tabela apresenta valores padronizados para as perdas suplementares quando a máquina está submetida à carga nominal. Para o cálculo em diferentes pontos de carga deve ser assumido que estas perdas são proporcionais ao quadrado da corrente do rotor (I_r), utilizando as expressões (5.6) e (5.7).

$$I_r = \sqrt{(I^2 - I_o^2)} \quad (5.6)$$

$$P_{SUP} = P_{SUP,N} \left(\frac{I_r}{I_{r,N}} \right)^2 \quad (5.7)$$

Onde,

I – Corrente de linha do estator, medida nos terminais do motor em operação, em A;

I_o – Valor da corrente de linha do motor operando a vazio, em A;

$P_{SUP,N}$ – Valor estimado das perdas suplementares em carga nominal, em W;

$I_{r,N}$ – Valor da corrente do rotor em carga nominal, em A

Aplicando os valores medidos na bancada de ensaio com os dois motores para diferentes valores de carga nestas expressões obtêm-se o gráfico da Figura 5.11, que mostra a evolução das perdas suplementares com a variação de carga no eixo dos motores.

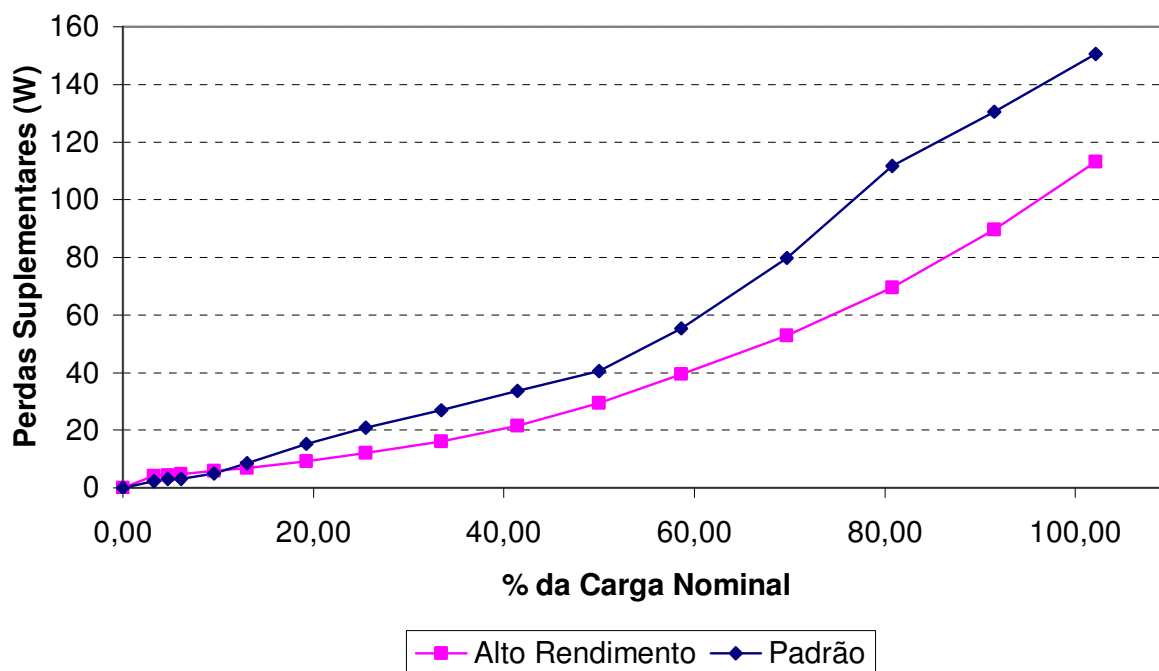


Figura 5.11 - Perdas Suplementares dos motores em função da carga

5.2.4 Curva de Eficiência dos Motores

A partir dos dados apresentados no item anterior pode-se calcular a curva de eficiência dos dois motores. Em todos os tipos de perdas o motor de Alto Rendimento, como já era esperado, comportou-se de forma superior ao motor Padrão. Para a obtenção da curva de eficiência, utiliza-se a expressão (5.8) para determinação nos diferentes pontos de carga medidos na bancada.

$$\eta = \frac{P_{ENTRADA} - \sum PERDAS}{P_{ENTRADA}} \quad (5.8)$$

Curva de eficiência dos motores está representada na Figura 5.12.

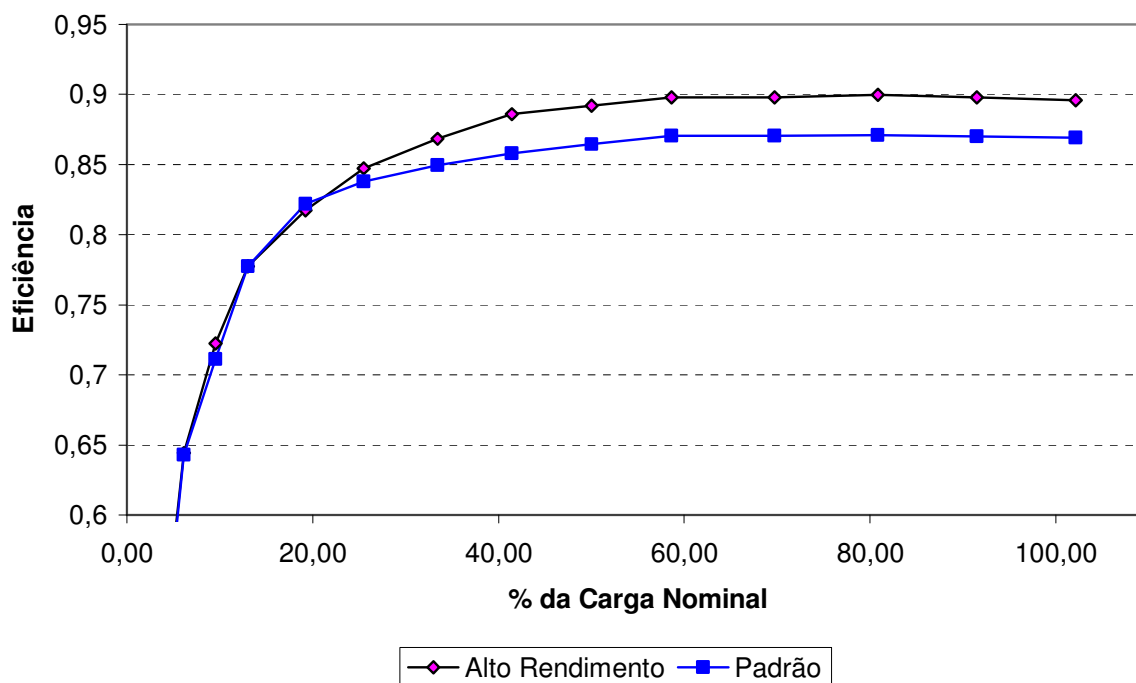


Figura 5.12 – Curva de Eficiência dos Motores de 10 CV/4 Pólos.

Para carregamento dos motores abaixo de 20%, a eficiência é praticamente a mesma, porém a partir deste ponto o motor de alto rendimento se destaca. Os dados aqui apresentados diferem um pouco dos valores estimados pelo fabricante (Tabela 5.1), entretanto não era esperada uma combinação perfeita, já que muitos fatores afetam a performance do motor, entre eles, tempo de operação, qualidade da manutenção, temperatura ambiente; e ainda que os dados do fabricante são baseados em valores médios, ou seja, os dados de motores do mesmo modelo e potência podem variar.

5.2.5 Análise da Eficiência dos Motores Padrão e Alto Rendimento

O Motor de Alto Rendimento, como esperado, apresenta uma melhor eficiência do que o Motor Padrão em toda a sua faixa de operação e este fato pode ser ainda melhor observado quando se observam as perdas individualmente. Os dados apresentados na Figura 5.13 foram obtidos a partir dos testes realizados nos motores, considerando apenas a condição de carga nominal, e a mesma confirma visualmente a redução em todos os tipos de perdas na máquina de Alto Rendimento.

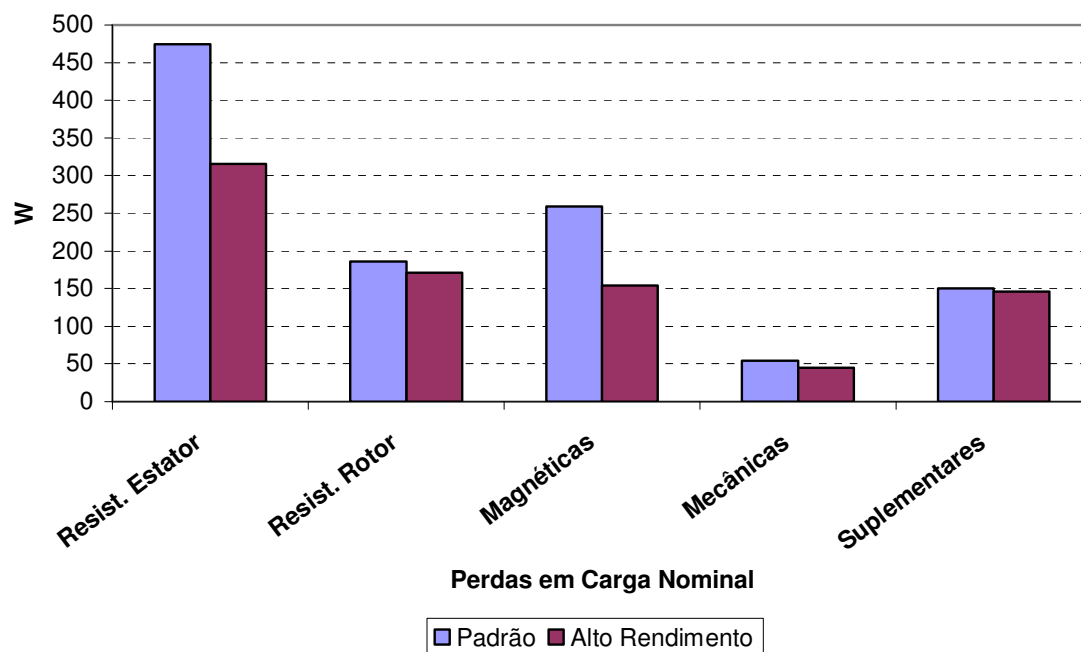


Figura 5.13 - Comparação das perdas entre motores Padrão e Alto Rendimento de 10 cv/4 pólos

A distribuição percentuais das perdas para cada tipo de motor é mostrado na Figura 5.14 . Nela podemos verificar uma redução percentual nas perdas resistivas do estator e nas perdas magnéticas, indicando que as melhorias nestes itens são as mais significativas para o aumento da eficiência do motor de Alto Rendimento.

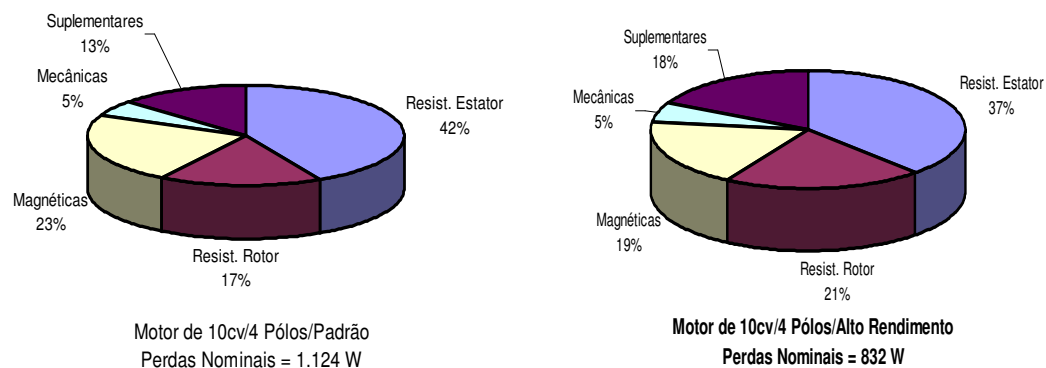


Figura 5.14 - Distribuição Percentual das perdas nos motores Padrão e de Alto Rendimento

Estes dados confirmam as melhorias no projeto do motor de Alto Rendimento em relação ao motor Padrão informadas pelo fabricante [10], que são:

- Redução das Perdas Resistivas:
 - Maior qualidade no cobre (aumento no diâmetro do fio de 0,80mm para 0,85mm);
 - Anel de curto-circuito e barras do rotor superdimensionadas.
- Redução de Perdas Mecânicas:
 - Melhoria no design do ventilador.
- Redução de Perdas Magnéticas:
 - Utilização de chapa magnética de baixas perdas (de Aço 1006 para USICORE).
- Redução de Perdas Suplementares:
 - Melhor dimensionamento nas ranhuras;
 - Rotor tratado termicamente;
 - Menor diâmetro do entreferro;
 - Enrolamento de dupla camada.

5.3 COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA O CÁLCULO DE EFICIÊNCIA

Conhecidos os dados de eficiência dos motores através da aplicação de um método de alta precisão (Método E1), neste item são utilizados os dados medidos para calcular a eficiência através de outros Métodos e fazer uma comparação.

Para esta comparação, os métodos são divididos de acordo com a classificação abordada no capítulo anterior. Os seguintes Métodos foram implementados:

- Métodos das Perdas Segregadas:
 - Método Hirzel;
 - Método Ontário Hidro.
- Métodos do Circuito Equivalente:
 - Método F1 Adaptado,
- Métodos do Escorregamento:
 - Método Padrão do escorregamento;

- Método Ontário Hidro;
- Método do Limite Superior do Escorregamento (Guru);
- Método do Escorregamento do Software BDMotor;
- Métodos da Corrente/Outros:
 - Método da Corrente;
 - Método da Corrente do Software BDMotor;
 - Método da Potência do Software BDMotor;

A Comparação entre os Métodos de uma mesma categoria será feita graficamente e por meio de uma tabela, que apresenta os resultados da aplicação da expressão (5.9), que representa o erro no cálculo da eficiência em relação ao Método E1:

$$erro = \frac{\eta_{E1} - \eta_{Método}}{\eta_{E1}} 100 \quad (5.9)$$

Onde,

$\eta_{Método}$ – Eficiência calculada a partir da aplicação do Método em análise;

η_{E1} – Eficiência calculada a partir da aplicação do Método E1.

Na análise, será apresentado o valor do erro médio para toda a faixa de operação do motor e o valor do erro para a carga nominal.

5.3.1 Análise dos Métodos das Perdas Segregadas

Os Métodos selecionados (Hirzel e Ontário Hidro) são simplificações do Método E1. Ambos calculam as perdas da máquina apenas para um ponto, o de operação da mesma, no entanto, como os dados de vários pontos estavam disponíveis, a comparação foi feita em toda a faixa de operação da máquina. A Figura 5.15 mostra os resultados destes métodos para o motor de Alto Rendimento.

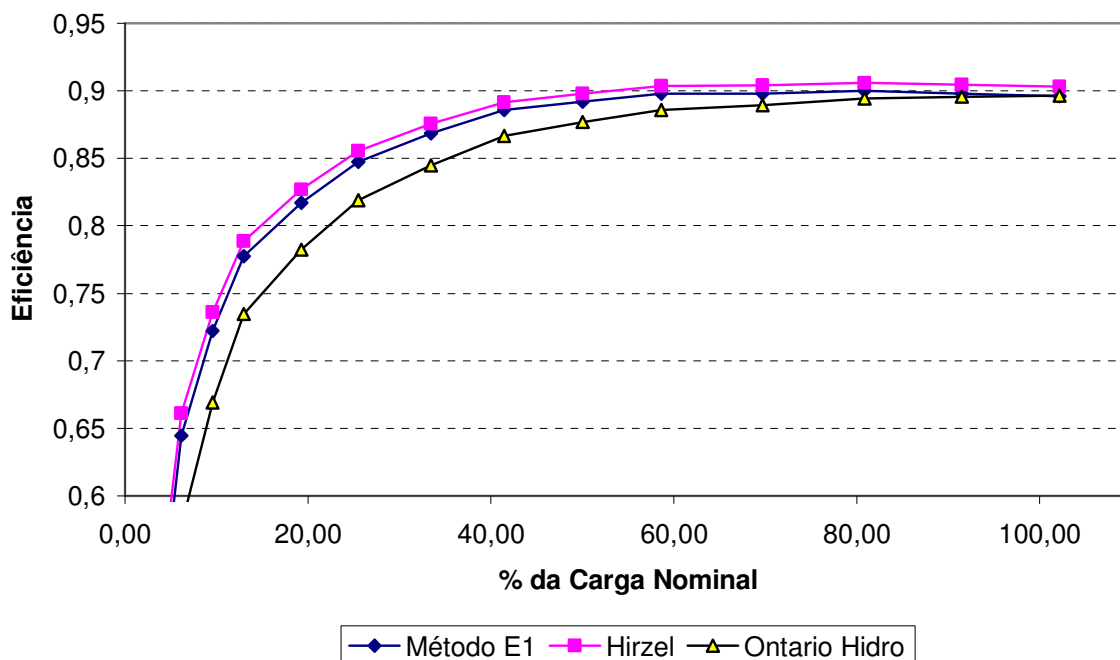


Figura 5.15 - Métodos das Perdas Segregadas aplicados em um motor de Alto Rendimento de 10cv/4 pólos

Os resultados mostram o Método da Ontário Hidro sobredimensiona as perdas ao simplificar o cálculo das perdas magnéticas e mecânicas, e o Método Hirzel faz o oposto ao reduzir a estimativa das perdas resistivas no rotor. A Tabela 5.5 resume os erros destes métodos em relação ao Método E1, com destaque para o erro zero do Método Ontário Hidro em carga nominal.

Tabela 5.5 - Comparação dos Métodos de Perdas Segregadas com o Método E1

Método	erro médio	erro em carga nominal
Hirzel	+1,5%	+0,8%
Ontário Hidro	-4,98%	-0,04%

5.3.2 Análise do Método do Circuito Equivalente

Os Métodos que utilizam o circuito equivalente do motor de indução para o cálculo da eficiência são os de mais difícil implementação pela necessidade de medição de parâmetros como as impedâncias de dispersão e de magnetização, e ainda porque o cálculo para a

determinação dos demais parâmetros passa pela implementação de um método numérico para sistemas não-lineares. Neste item optou-se por utilizar uma modificação do Método F1 do Padrão IEEE, que utiliza o mesmo método iterativo de cálculo, porém não realiza a medição da reatância de magnetização, utilizando os dados de projeto do motor fornecido pelo fabricante. Os dados aqui apresentados foram obtidos de [62] que implementou este método em um trabalho que utilizou a mesma bancada de ensaios.

A Figura 5.16 mostra a comparação entre este Método F1 modificado e o Método E1.

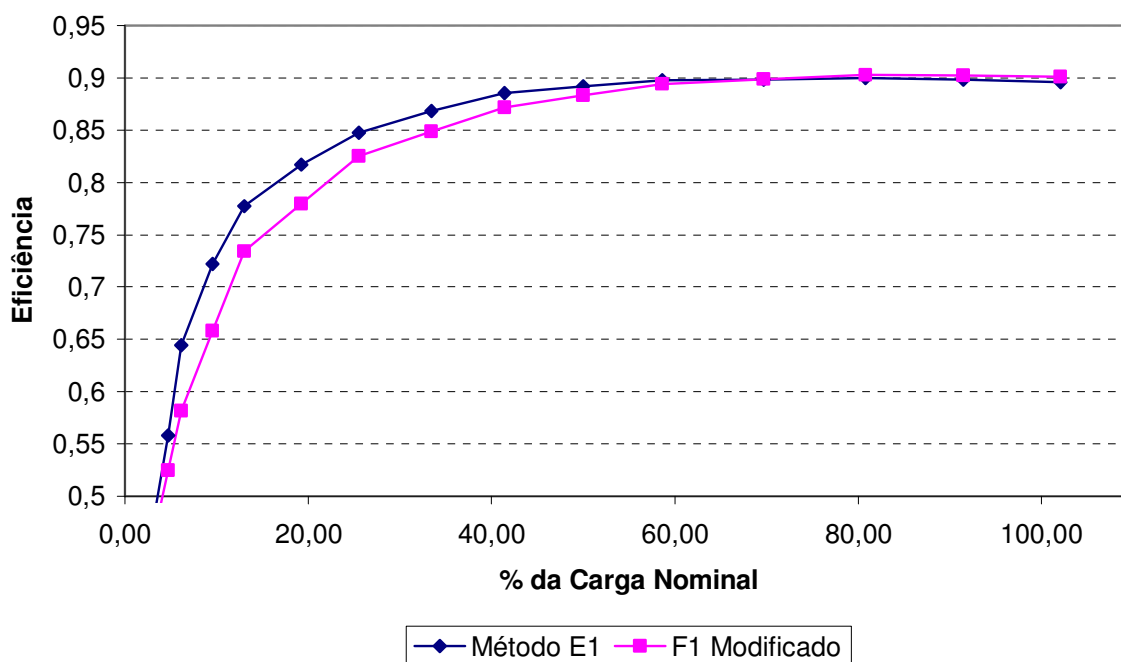


Figura 5.16 - Método do Circuito Equivalente aplicado em um motor de Alto Rendimento de 10cv/4 pólos

A Comparação entre os dois métodos mostrada na Figura 5.16 e na Tabela 5.6 mostra que o Método F1 modificado apresenta boa precisão, principalmente em carga nominal, porém há que se considerar que os dados de entrada foram obtidos direto do fabricante.

Tabela 5.6 - Comparação do Método do Circuito Equivalente com o Método E1

Método	erro médio	erro em carga nominal
F1 Modificado	-3,0%	+0,6%

5.3.3 Análise dos Métodos do Escorregamento

A Descrição destes métodos feita no capítulo anterior já antecipava uma baixa precisão dos mesmos, causada principalmente pela simplicidade de seu cálculo, que dependia excessivamente de dados de placa da máquina, que por sua vez podem apresentar erros na faixa de 20%.

Por serem de fácil implementação, a quantidade de simulações realizadas foi superior às anteriores, mas a superioridade foi apenas neste ponto, como pode ser visualizado na Figura 5.17 .

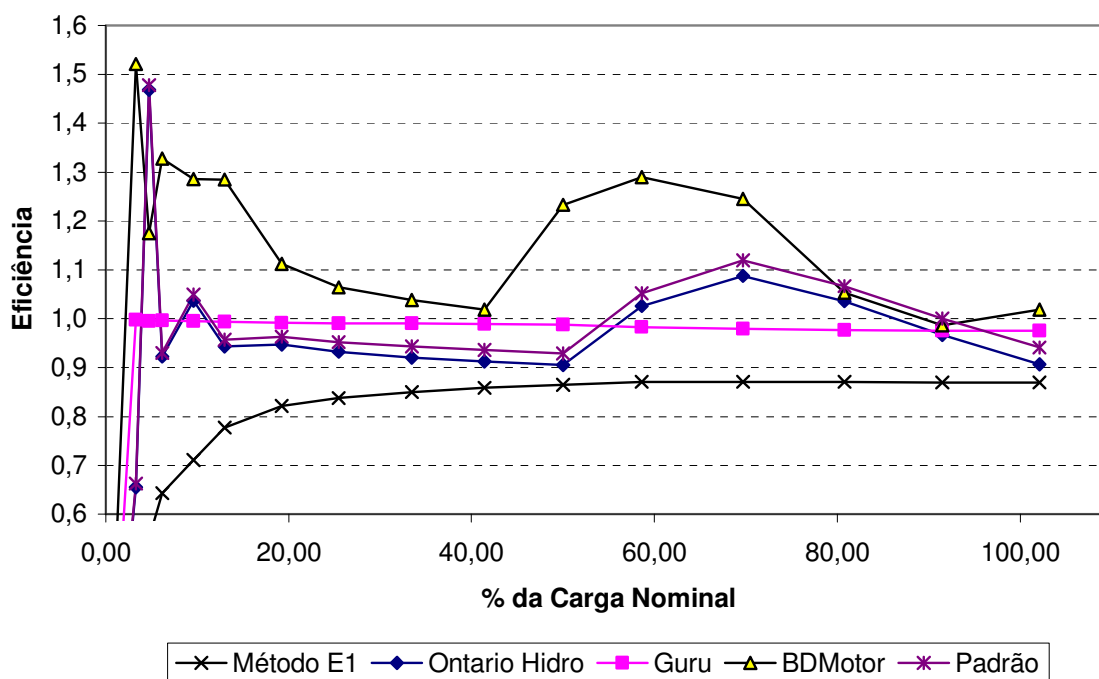


Figura 5.17 - Métodos do Escorregamento aplicados em um motor Padrão de 10cv/4 pólos

Para este item foram utilizados os dados de medição do motor Padrão, já que a simulação com os dados do Motor de Alto Rendimento apresentaram erros médios na faixa de 80%, indicando que o dado de placa deste motor não possui precisão suficiente para a aplicação adequada destes métodos. Já com a aplicação dos métodos com os dados do motor Padrão, estes erros diminuíram para valores médios em torno de 20%. Este fato comprova a dependência destes métodos da precisão dos dados de placa da máquina. A Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Comparação dos Métodos do Escorregamento com o Método E1

Método	erro médio	erro em carga nominal
Padrão	+30,7%	+8,3%
Ontário Hidro	+28,1	+4,3
Guru	+29,0	+12,9
BDMotor	+55,7	+17,7

Com relação ao software BDMotor, convém ressaltar que os valores de eficiência foram obtidos a partir do dado de potência de saída disponibilizado em sua planilha de cálculo para cada velocidade de rotação da máquina, dividido pela potência de entrada lida. Ou seja, o software, em seu cálculo utilizando dados de escorregamento, não disponibiliza dados de eficiência, apenas dados de potência de saída e carregamento em função da potência nominal.

5.4.4 Análise dos Métodos de Corrente/Outros

Deste bloco, apenas os métodos de corrente são de fácil implementação, os demais métodos (torque no entreferro, modelagem) possuem a mesma dificuldade relatadas nos métodos do circuito equivalente. A Figura 5.18 mostra a comparação dos métodos da corrente e da potência com o método E1.

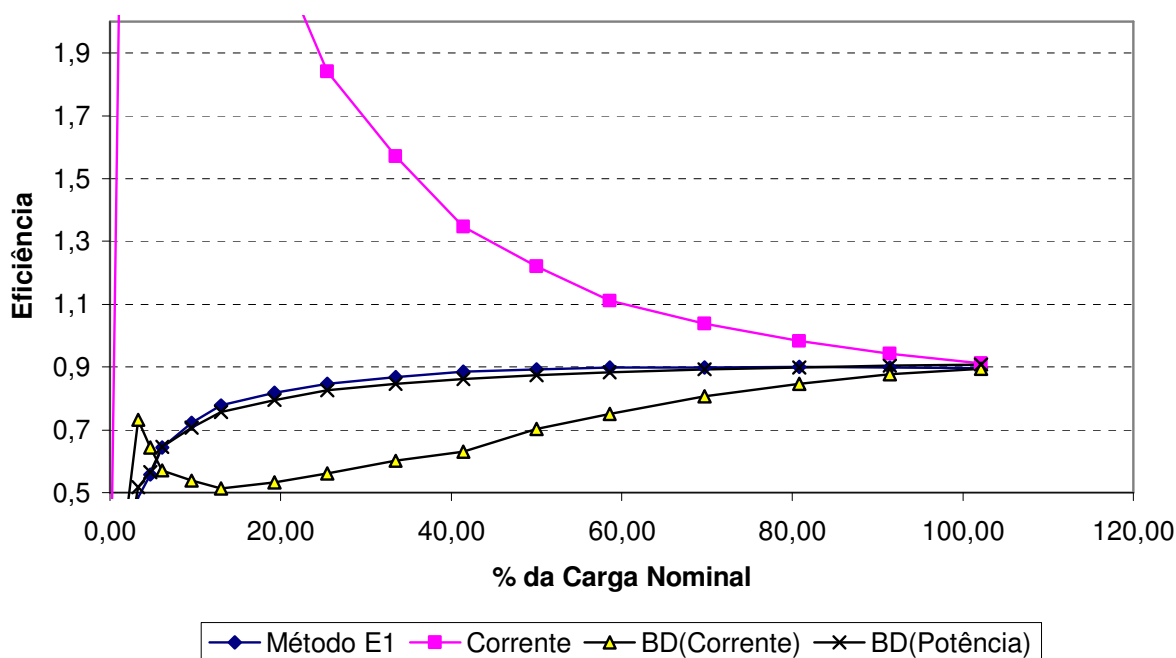


Figura 5.18 - Métodos da Corrente e da Potência aplicados em um motor de Alto Rendimento de 10cv/4 pólos

As Observações feitas sobre o software BDMotor no item anterior também são aplicadas no cálculo utilizando método da Corrente. Por serem dependentes dos dados de placa, estes métodos também apresentam grandes erros, como pode ser constatado na Tabela 5.8, porém é bom ressaltar que os erros diminuem quando os motores operam em valores próximos à carga nominal. Cabe destacar o desempenho do Método da Potência para este motor, o que indica que o mesmo deve ser melhor estudado e analisado em outras potências de motores.

Tabela 5.8 - Comparação dos Métodos de Corrente e Potência com o Método E1

Método	erro médio	erro em carga nominal
Corrente	+95,7%	+1,8%
BDMotor(Corrente)	-12,6	-0,25
BDMotor(Potência)	-0,62	+1,4
BDMotor	+55,7%	+17,7%

5.4 ANÁLISE ECONÔMICA E A PRECISÃO DO CÁLCULO DA EFICIÊNCIA

A determinação da eficiência do motor de indução tem como objetivo final definir se há ou não possibilidade de melhoria deste índice. Esta melhoria passa pela substituição do motor e é neste ponto que a análise econômica se faz necessária, já que esta decisão implica em investimentos a serem feitos e todo investimento necessita de verificação de sua viabilidade. Esta decisão é quase sempre tomada por pessoas que não tem o conhecimento sobre as condições de operação da máquina e os resultados da análise econômica equalizam o entendimento sobre o assunto.

Neste item serão apresentadas as duas formas de cálculo mais utilizadas para verificar a viabilidade econômica da substituição de um motor por outro mais eficiente. Estas duas formas de cálculo se utilizam dos valores da eficiência do motor em operação e do motor que irá substituí-lo, a primeira é obtida a partir dos métodos já tratados neste trabalho, e a segunda se baseia em dados fornecidos pelo fabricante do motor.

Na parte final serão apresentadas simulações destas formas de análise econômica utilizando valores de eficiência obtidos de Métodos com diferentes precisões, com o objetivo de verificar a importância desta característica do método no resultado da análise econômica.

5.4.1 Cálculo do Retorno do Investimento [64] [65] [66]

O Retorno do investimento é calculado com base na economia que irá se obter com a substituição do motor. Existem duas formas de se calcular esta economia: a primeira é mais simples e popular por calcular diretamente a economia anual obtida com a substituição e calculando o retorno pela divisão do valor a ser investido por esta economia anual; a segunda forma é mais complexa e trabalha com o valor atual da economia obtida levando em consideração a expectativa do custo da energia, a taxa interna de retorno do investimento e o tempo de vida da máquina adquirida.

5.4.1.1 Retorno de investimento simplificado

Este cálculo se baseia na Economia Anual, que é calculada pela aplicação da expressão (5.10).

$$EconomiaAnual = P_{nom} LCH \left(\frac{100}{\eta_B} - \frac{100}{\eta_A} \right) \quad (5.10)$$

Onde,

P_{nom} – Potência nominal do motor, em kW;

L – Carregamento do motor, em pu;

C – Custo anual da energia, em R\$/kWh;

H – Número de horas de funcionamento anual;

η_B – Eficiência do motor a ser substituído;

η_A – Eficiência do motor com maior rendimento;

A Viabilidade do investimento a ser feito é calculada pela expressão (5.11):

$$RetornadoInvestimento = \frac{ValordoInvestimento}{EconomiaAnual} \leq VidaÚtil do Motor \quad (5.11)$$

Exemplificando a aplicação destas expressões, considere um motor de 10 CV operando 2400 horas/ano (8 horas/dia útil) com carregamento de 70% e cuja eficiência foi calculada em 87%; substituindo este motor por um de alto rendimento esta eficiência, segundo dados do fabricante, sobe para 89,8%. Considerando um custo da energia de R\$ 0,26/kWh, têm-se uma economia anual de R\$ 114,00.

Considerando o custo de um motor de Alto Rendimento de 10 CV como sendo de R\$ 1.395,00, teremos um retorno do investimento em 12,2 anos. A primeira vista este é um retorno longo, mas considerando a vida útil de um motor de 20 anos, temos um retorno do investimento ainda dentro da vida útil do mesmo.

5.4.1.2 Valor Atual do Investimento

Análise de maior precisão que calcula o valor atual da economia com a troca do motor levando em consideração o período de vida útil do mesmo, a taxa de inflação do custo da energia, e a taxa interna de retorno do investimento a ser realizado. A primeira etapa deste cálculo é a determinação da taxa efetiva de interesse (i), obtida pela aplicação da expressão (5.12):

$$i = \frac{100 + r_1}{100 + r_2} - 1 \quad (5.12)$$

Onde,

r_1 – Taxa interna de retorno do investimento requerida;

r_2 – Taxa de inflação do custo da energia.

Com este valor, calcula-se o valor atual da economia a partir da aplicação da expressão (5.13).

$$ValorAtualdeEconomia = EconomiaAnual \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (5.13)$$

Onde,

n – Vida útil de operação do motor, em anos.

Como o valor da Economia Anual é utilizada como base para o cálculo da Economia Atual, os valores da eficiência da máquina mantém a sua influência nesta análise na mesma proporção da análise anterior.

A Viabilidade do investimento é feita comparando-se o Valor Atual da Economia com o Valor do Investimento, de acordo coma expressão (5.14):

$$ValordoInvestimento \leq ValorAtualdaEconomia \quad (5.14)$$

Utilizando os mesmos dados do item anterior para o Cálculo do Valor Atual de Economia da substituição de um motor de 10 CV Padrão por um de Alto Rendimento, e ainda um a taxa anual de inflação do custo de energia de 5,5% (taxa conservadora, metade da taxa dos últimos cinco anos para o consumo industrial considerando os dados apresentados no Capítulo I), e uma taxa interna de retorno do investimento de 12%, O Valor Atual de Economia para um motor com vida útil de 20 anos e com carregamento de 70% é de R\$ 1.289,82. Ou seja, o Valor Atual da economia é um pouco menor que o Valor do Investimento, comprovando a viabilidade da substituição do motor.

Este método é mais preciso e adequado a presente situação de aumento crescente de custos de energia e de uma redução em taxas de juros para investimentos. O Cálculo anterior é mais simples, mas não leva em consideração estes fatores e pode mascarar um retorno de investimento favorável.

5.4.2 Influência da Precisão da Eficiência no Retorno do Investimento

Como pôde ser constatado nas expressões utilizadas na análise econômica do retorno de investimento apresentadas, o valor da eficiência do motor está presente em ambas e, conseqüentemente, a sua precisão irá afetar os resultados obtidos. A questão a ser levantada é o quanto esta precisão influencia nesta análise.

Esta demonstração torna-se bastante simples considerando os dados até aqui levantados. Nos testes realizados foram levantadas as curvas de eficiência de dois motores utilizando-se de Métodos com diferentes precisões no cálculo; os motores testados são de mesma potência; e um deles (motor Padrão) possui característica de eficiência inferior ao outro (motor de Alto Rendimento). Outro dado importante é o levantamento da curva de eficiência dos motores por um método de alta precisão (Método E1), que pode ser utilizado como base de comparações e também pode ter os dados de eficiência do motor de Alto Rendimento utilizados como sendo os dados do fabricante.

Com estes dados, a possibilidade de simulações de análises econômicas é grande, porém, como o objetivo é comprovar a importância da precisão do cálculo da eficiência do motor nesta análise, as simulações podem ser limitadas. Neste caso escolheram-se os três métodos das Perdas Segregadas aqui testados (Método E1, Método Hirzel e Método da Ontário Hidro) e, obviamente, as curvas de eficiências levantadas para o motor padrão como sendo o motor a ser substituído. Como foi dito anteriormente, para o valor da eficiência do motor de Alto Rendimento, utilizou-se como base os resultados do método E1, que é o mais preciso e que apresenta resultados similares aos dados do fabricante.

Para as simulações foram utilizados os seguintes critérios:

- Motor operando 2.400 horas/ano; Custo de Energia de R\$ 0,26/kWh; taxa de inflação do custo da energia de 5,5%/ano; taxa de retorno do investimento de 12%/ano; e vida útil do motor de 20 anos;
- Quanto ao carregamento da máquina, foi utilizada a faixa de operação de 30-100% de carregamento e, para cada um destes valores foi calculado os valores da Economia Anual (Figura 5.19) e do Valor Atual da Economia (Figura 5.20) para a substituição do motor Padrão por um motor de mesma potência de Alto Rendimento.

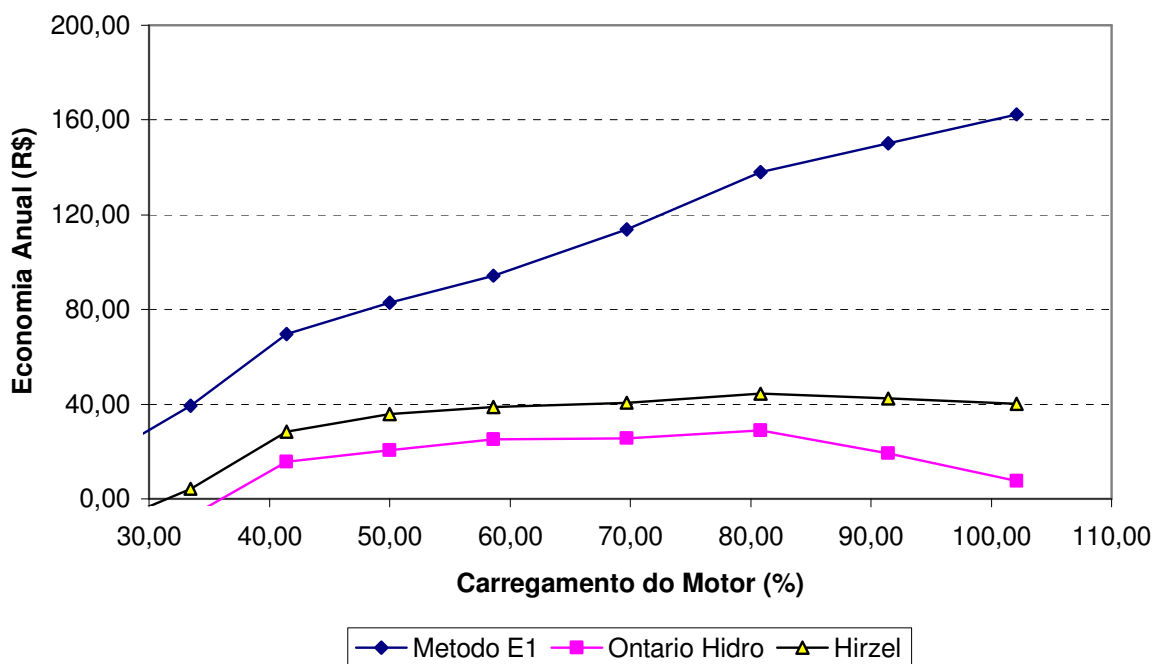


Figura 5.19 - Economia Anual com a substituição de um motor de 10 cv/4 pólos do tipo Padrão por um de Alto Rendimento.

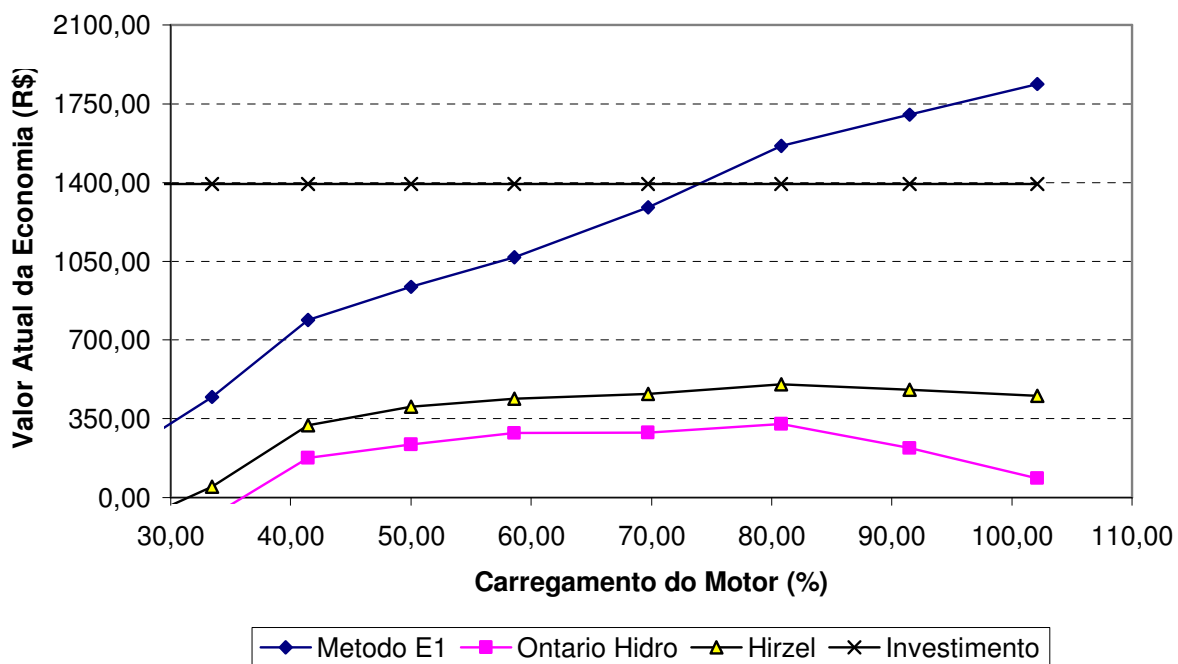


Figura 5.20 - Valor Atual da Economia com a substituição de um motor de 10 cv/4 pólos do tipo Padrão por um de Alto Rendimento.

As simulações para carregamentos inferiores a 30 % são desnecessárias, já que a substituição do motor, neste caso, deveria considerar a utilização de uma potência inferior.

A Análise das figuras já mostra a discrepância de resultados obtidos com a mudança do Método de cálculo da eficiência. É importante recordar que os métodos utilizados apresentam erros médios pequenos em relação ao de maior precisão (vide Tabela 5.5) e mesmo assim apresentaram grandes diferenças na análise econômica. Como era esperado, a forma dos gráficos é similar, já que a influência do valor da eficiência é a mesma nos dois cálculos.

A Figura 5.20 também apresenta uma reta com o valor do investimento, o que mostra a viabilidade para a troca do motor apenas com os dados obtidos com o Método E1 e somente para faixas de carregamento a partir de 70%. Com a utilização dos valores de eficiência dos demais Métodos, a troca dos motores é inviável para qualquer faixa de carregamento.

A Tabela 5.9 apresenta os resultados desta simulação considerando apenas o carregamento do motor de 70%. Fica mais evidente a importância da precisão do cálculo da eficiência quando se observa as grandes diferenças no Retorno do Investimento para os diferentes Métodos utilizados. O Valor do motor de Alto Rendimento utilizado na simulação é de R\$ 1.395,00 (2008).

Tabela 5.9 - Retorno do Investimento na troca de um motor de 10 CV utilizando diferentes métodos para calcular a eficiência.

Método Utilizado (Perdas Segregadas)	Retorno do Investimento (Anos)	
	<i>Economia Anual</i>	<i>Valor Atual de Economia</i>
E1	12,2	1,0
Ontario Hidro	54,6	4,8
Hirzel	34,2	3,0

Os dados apresentados na tabela são bastante esclarecedores sobre a importância da precisão do cálculo da eficiência sobre o cálculo do retorno de investimento. Métodos com pouca precisão podem gerar valores de retorno do investimento que podem inviabilizar a troca de um motor por um mais eficiente e assim impedir as melhorias advindas desta substituição.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo apresentou os resultados práticos do que foi descrito nos Capítulos anteriores. Iniciou descrevendo a disponibilidade de equipamentos para a realização dos testes, devidamente equiparados às recomendações do Padrão IEEE 112-1998, cujo Método E1 foi escolhido para determinação das perdas dos motores e posteriormente como base para a comparação com os demais Métodos testados. Esta escolha foi feita considerando a disponibilidade para consulta dos detalhes do método para consulta, a possibilidade de implantação prática, e a precisão já comprovada do mesmo, apresentando a menor taxa de erro entre todos os analisados no Capítulo IV.

As diferenças de precisão nos equipamentos disponíveis em laboratório com as recomendações do Padrão IEEE se mostraram mínimas e justificadas pela necessidade de simulação das medidas em condições o mais próxima possível da realidade encontrada no ambiente fabril.

Os resultados encontrados com a implantação do Método E1 se mostraram bem próximos àqueles especificados pelo fabricante, o que comprova a sua precisão, e a comparação com os demais métodos implementados confirmou o que já tinha sido objeto de análise no Capítulo 4. Como destaque positivo dentre os métodos analisados, o Método da Potência do software BDMotor apresentou resultados com alta precisão, e com destaque negativo, os métodos da Corrente e do escorregamento também ofertados pelo citado software. É bom salientar que os testes foram realizados apenas com dois motores e este universo de dados não permite nenhuma conclusão definitiva sobre a precisão dos métodos analisados, no entanto, os resultados podem ser usados como um indicativo para estudos futuros.

Finalizando o Capítulo foi abordado a análise econômica, tema base para as tomadas de decisão sobre os investimentos a serem feitos com o objetivo melhorar a eficiência das instalações elétricas, em particular dos motores. Neste item ficou comprovada a importância da precisão do cálculo da eficiência da máquina nos resultados obtidos para o cálculo do retorno do investimento, o que justifica o objetivo inicial deste trabalho e ainda abre possibilidades de futuros desdobramentos para o assunto aqui tratado.

CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a analisar o estado da arte de métodos de determinação de eficiência de motores de indução sob a ótica da precisão do cálculo e da intrusão ao processo em que o motor está inserido. Para atingir este objetivo inicialmente foram descritos os princípios de operação do motor de indução com ênfase nas perdas existentes durante o processo de conversão eletromecânica de energia; foram apresentados os métodos existentes para a determinação da eficiência desta máquina; e, finalizando com a apresentação dos resultados de testes realizados em dois motores de indução, quando foram determinadas todas as perdas existentes nos mesmos através da aplicação dos testes descritos no Método E1 do Padrão IEEE 112-1996, implementados e comparados vários métodos para determinação da eficiência, e ainda apresentados os resultados da aplicação da análise econômica na substituição de motores de baixa eficiência comprovando a importância da precisão do valor da eficiência método escolhido.

Os objetivos propostos na dissertação foram atingidos de forma satisfatória: foram apresentados e testados vários métodos para a determinação de eficiência de motores de indução, ficando comprovada a importância da precisão do método a ser escolhido. O outro aspecto analisado, a intrusão ao processo, apesar de sua importância, não teve sua relevância destacada no trabalho; de fato, esta característica se contrapôs à precisão quando ficou constatado que os métodos mais precisos requerem o desacoplamento da máquina de seu processo. No entanto, quando os resultados da eficiência dos métodos testados foram utilizados na análise econômica, ficou comprovada que a precisão deste valor é essencial para os resultados desta análise e, diante disto, a característica de precisão se sobrepôs à invasão ao processo.

Como esperado, os métodos das perdas segregadas apresentaram uma alta precisão, com destaque para o Método Hirzel que, apesar de simplificar o Método E1 descartando a necessidade de uma fonte de tensão e de uma carga variável, apresentou erros na faixa de $\pm 1,5\%$ em relação a este. O Método E1 apresentou resultados compatíveis com os dados do fabricante, ratificando a sua escolha como base para a comparação dos demais. O Método do Circuito Equivalente implementado também apresentou bons resultados (erro de $\pm 1,5\%$). O destaque negativo fica para os métodos do Escorregamento e da Corrente que, por

dependem de dados de placa e simplificarem em demasia a coleta de dados, apresentaram erros médios superiores aos demais. Há que se considerar a simplicidade de implementação e o fato de que, para valores próximos do carregamento nominal, estes erros diminuem consideravelmente (1,8% para Método da Corrente e 4,3% para Ontário Hidro/Escoamento). Como destaque positivo destes Métodos, o software BDMotor em seu cálculo por potência de entrada apresentou erro médio de 0,62% e erro em carga nominal de 1,4%.

A Análise da influência da precisão do método nos cálculos do retorno do investimento apresentou resultados importantes. A precisão de um método influencia diretamente na precisão do cálculo econômico. Foram simulados retornos de investimento utilizando-se de duas formas de análises econômicas utilizadas atualmente (Economia Anual e Valor Atual da Economia) e em todos os casos simulados a precisão do valor da eficiência da máquina utilizado se mostrou de suma importância. Nas simulações para um motor Padrão de 10 CV operando com 70% de carregamento, apenas o Método E1 (erro $\pm 1,0\%$) apresentou retornos de investimento viáveis para a substituição do motor por um de alto rendimento. Mesmo o Método de Hirzel, que havia apresentado um erro no valor da eficiência pequeno em relação ao Método E1 nos testes (erro médio de 1,5%), quando aplicado às expressões de retorno do investimento, apresentou resultados que inviabilizavam a troca (retorno do investimento em 34 anos para a análise simplificada e de 3 vezes o valor investido para a análise por Valor Atual da Economia)

Diante destes resultados, o presente trabalho cumpriu com o que foi proposto ao apresentar os métodos existentes para o cálculo de eficiência de motores de indução, analisando-os sob o ponto de vista da precisão e invasão ao processo, e ainda testando alguns deles em laboratório para comprovar a análise feita. Finalizando com a comprovação da importância da precisão do valor da eficiência do motor na análise econômica.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo abriu a perspectiva do desenvolvimento de um método para cálculo da eficiência de motores que atenda às necessidades de precisão e facilidade de coleta de dados. Também alertou para as possibilidades de aplicação de métodos numéricos de determinação de sistemas não-lineares nos métodos que utilizam o circuito equivalente da máquina.

Alguns estudos podem servir como base para estes trabalhos, tais como as técnicas para determinação de velocidade de eixo da máquina a partir da leitura da forma de onda da tensão de entrada [50] [67], e ainda a medição da resistência de estator a partir de sinais CC injetados na entrada da máquina [48].

Outra área que requer estudos é a que trata da simplificação na determinação das perdas suplementares, já que ficou comprovado a dificuldade de implantação dos métodos existentes. Um início para estes estudos seria a implementação de alguns métodos aqui tratados [38] [39] e de outros em fase de implantação [67].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. J. McDonald, H. N. Hickok, , “Energy Losses in Electrical Power Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. Ia-21, No. 4, may/june 1985;
- [2] A. B. Field, “Eddy Currents in Large Slot-Wound Conductors”, Procedures A.I.E.E., Vol. 24, p. 761-88, 1905;
- [3] BDMotor, , “Software para Viabilizar Economia de Energia em Motores de Indução Trifásicos”, versão 4. 21, Eletrobrás/PROCEL, 2008;
- [4] D. Basso, C. Nyberg, C. Yung “The Repair/Replace Decision from a Total Motor Management Perspective”, IEEE Proceedings of the Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2007;
- [5] Institute of Electrical And Electronic Engineering, “Standarts Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators”, ANSI/IEEE Standarts 112-1996;
- [6] P. C. Krause,, “Analysis of Electric Machinery”, Mcgraw-Hill Book Company, 1986;
- [7] L. C. White, P. S. Schmidt, D. R. Brown, “Industrial Energy Management and Utilization”, Hemisphere Publishing Corporation, 1988;
- [8] J. F . Fuchsloch, W. R . Finley, R. W. Walter, “The Next Generation Motor”, IEEE Industry Applications Magazine, Jan/Feb 2008;
- [9] A. H. Bonnett, C. Yung, “Increased Efficiency Versus Increased Reliability”, IEEE Industry Applications Magazine, Jan/Feb 2008;
- [10] Weg Equipamentos Elétricos S.A., “Catálogo Geral de Motores Elétricos: Características, Especificação, Instalação e Manutenção”, Jaraguá do Sul, SC, 2004;
- [11] 102th Congress of The United States Of America, “Energy Policy Act”, The Library of Congress, 1992;
- [12] Ministério das Minas E Energia, “Lei de Eficiência Energética (Lei 10.295/2001, Decretos 4059/2001 e 4508/2002, Portaria Interministerial MME-MCT-MDIC 553/2005”, Disponível em www.mme.gov.br, Acesso em 10/09/2008;

- [13] International Electrotechnical Commission, “Rotating Electric Machines – Part 30: Efficiency Classes of Single-speed, Three-phase, Cage Induction Motors”, Final Draft International Standard, United Kingdom, 2008;
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 5383 - Máquinas Elétricas Girantes- Máquina de Indução-Determinação de Características- Métodos de Ensaio.” Novembro/1982;
- [15] C. T. C. Andrade, R. S. T. Pontes “- Three-phase Induction Motors Energy Efficiency Standards-A Study of Case”, 11^a. Conferencia Hispano-Lusa de Ingeniería Eléctrica (11CHLIE), 2009;
- [16] C. U. Brunner, A. A. Niederberger, A. T. Almeida, H. Keulenaer, “Normas de Eficiência Energética: Construindo uma Comunidade Internacional”, Revista Eletricidade Moderna, pp. 280-300, Brasil, Julho de 2008;
- [17] B. Renier, K. Hameyer, R. Belmans, “Comparison of standards for determining efficiency of three phase induction motors”, IEEE Transactions on Energy Conversion, July, 1998;
- [18] D. B. Saraiva, “Materiais Elétricos”, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro-RJ, 1983;
- [19] O. C. N. Souto, “Modelagem e Análise Do Desempenho Térmico de Motores de Indução Sob Condições Não Ideais de Alimentação”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2001;
- [20] Institute of Electrical And Electronic Engineering, “Standard Test Code for Resistance Measurement”, ANSI/IEEE Standards 118-1978;
- [21] G. R. Slemon, A. Straughem, “Electric Machinery”, World Student Series Edition, Toronto-CA, 1980;
- [22] N. J. Batistela, R. Carlson, N. Sadowski, J. V. Leite, “Caracterização Magnética de Lâminas de Aço Silício e Avaliação das Perdas no Ferro sob Vários Regimes de Indução”, Revista Controle & Automação, Vol.13, No.2, Maio, Jun., Jul. e Agosto de 2002;
- [23] F. J. P. Aguiar, “Influência da Não-Conformidade senoidal da Tensão de Alimentação nas Perdas de Magnetização em Transformadores de Potência”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2005;

- [24] J. P. Santos, “Influências do Ângulo de Corte e da Anisotropia nas Propriedades Magnéticas dos Aços Elétricos – O Efeito Textura”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2005;
- [25] G. Bertotti, “General Properties of Power Losses in Soft ferromagnetic Materials”, IEEE Transactions on Magnetic, Vol. 24, No. 1, Janeiro de 1988;
- [26] G. Bertotti, A. Boglietti, M. Chiampi, D. Chiarabaglim, F. Fiorillm, M. Lazzari, “An Improved Estimation Of Iron Losses In Rotating Electrical Machines”, IEEE Transactions on Magnetic, Vol. 27, No. 6, Novembro de 1991;
- [27] K. Dabala, “Analysis of mechanical Losses in Three-Phase Squirrel cage Induction Motors”, IEEE Proceedings of the Fifth international Conference on Electrical machines and Systems, 2001;
- [28] NTN do Brasil Ltda., “Atrito e Aumento da Temperatura”, Disponível em <http://www.ntn.com.br/servicos.htm>, Acesso em 11 de dezembro de 2008;
- [29] A. H. Bonnet, “ Operating temperature considerations and performance characteristics for IEEE 841 motors”, IEEE Transactions on Industrial Applications, May, 2001;
- [30] C. N. Glew, “Stray load losses in induction motors: a challenge to academia”, Power Engineering Journal, February 1998;
- [31] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr., A. Kusko, “Máquinas Elétricas”, Editora Bookman, 2006;
- [32] A. Still, C. S. Siskind, “Elements of Electrical Machine Design”, International Student Edition, 1954;
- [33] R. L. Nailen, “Stray load loss: What’s it all about?”, Electrical Apparatus Magazine, August, 1997;
- [34] A. A. Jimoh, S. R. D. Findlay, M. Poloujadoff, “Stray Losses in Induction Machines: Part I, Definition, Origin and Measurement”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.6, June 1985, pp. 1500-1505;
- [35] A. A. Jimoh, S. R. D. Findlay, M. Poloujadoff, “Stray Losses in Induction Machines: Part II, Calculation and Reduction”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.6, June 1985, pp. 1506-1512;

- [36] P. L. Alger, G. Angst, E. J. Davies, "Stray Load Losses in Polyphase Induction Machines", Transactions on AIEE, 1957, 78, p. 349-357;
- [37] P. L. Alger, "Induced High-Frequency Currents in Squirrel-Cage Windings", Transactions on AIEE Power Apparatus and Systems, Vol. 76, Issue 3, 1957;
- [38] M. Aoulkadi, A. Binder "Evaluation of Different Measurement Methods to Determine Stray Load Losses in Induction Machines", IEEE Proceedings Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006;
- [39] M. Aoulkadi, A. Binder "Comparison of different evaluation methods to determine stray load losses in induction machines with eh-star method", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 44, Issue 6, dezembro de 2008;
- [40] P. L. Cochran, "Polyphase Induction Motors – Analysis, Design and Application", CRC Press, 1989;
- [41] T. A. Lipo, "Introduction to AC Machine Design – Vol. 1", University of Wisconsin, 1996;
- [42] B. Heller, A. L. Jokl, "Losses in Squirrel-Cage Motors Due to Rotor Skew", IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, 1971;
- [43] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, M. Pastorelli " International standarts for the induction motor efficiency evaluation: a critical analysis of the stray-load loss determination", IEEE Transactions on Industry Applications, June 2004;
- [44] R. L. Nailen, "Can field tests prove motor efficiency?", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 25, N° 3, May/June 1989;
- [45] R. L. Nailen, "Energy efficiency motors – Myths vs. reality", Electrical Apparatus Magazine, barks Publication, 1992;
- [46] J. D. Kueck, J. R. Gray, R. C. Driver, J. S. Hsu, " Assessment of available methods for evaluating in-service motor efficiency", REPORT OF Oak Ridge National Laboratory ORNL-TM_13237, Lockheed Martin Energy Research Corporation, 1996;
- [47] A. Dell'aquila, L. Salvatore, M. Savino, "A New Test Method For Determination Of Induction Motor Efficiency", Disponível em <http://www.ntn.com.br/servicos.htm>, Acesso em 11 de dezembro de 2008;

- [48] B. Lu, W. Qiao, T. G. Habetler, R. G. Harley, “ Solving induction motor equivalent circuit using numerical methods for an in-service and nonintrusive motor efficiency estimation method”, in Proceedings 2006 5^a International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC’06), August, 2006;
- [49] B. Lu, T. G. Habetler, R. G. Harley, “ A Nonintrusive efficiency estimation method for in-service motor testing using a modified induction motor equivalent circuit”, in Proceedings of the 37^a IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC’06), June 2006;
- [50] K. D. Hurst, T. G. Habetler “Sensorless Speed Measurement using Current Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives”, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 11, No. 1, janeiro de 1996;
- [51] Y. El-Ibiary, “ An accurate low-cost method for determining electric motors’ efficiency for the purpose of plant energy management”, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 39, N° 4, july/August 2003, pp. 1205-1210;
- [52] T. Phumiphak, C. Chat-Uthai, “Estimation of Induction Motor Parameters Based on Field Test Coupled with Genetic Algorithm”, Power System Technology 2002, IEEE Proceedings, Volume 2, Issue , Page(s): 1199 - 1203 vol.2, 2002;
- [53] P. Pillay, V. Levin, P. Otaduy, J. Kueck, “ In-situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm”, IEEE Transactions on Energy Conversion, June 1997;
- [54] C. I. Mcclay, G. T. Van Der Toorn, “A Comparison of Time-Stepped Finite-Element Techniques for the Calculation of Losses in Cage Induction Motors”, IEEE Proceedings of the 9th International Conference on Electrical Machines and Drives, 1999;
- [55] J. Barks, “Can Motor Nameplates Be Trusted?”, Electrical Apparatus Magazine, August, 1997;
- [56] B. S. Guru, H. R. Hirizóglu, “Electric Machinery and Transformers”, Harcourt Brace Jovanovich Inc, 1988;
- [57] J. C. Hirzel, “Impact of rewinding on motor efficiency”, IEEE ,1994;
- [58] J. S. Hsu, P. L. Sorenson, “Field Assessment of Induction Motor Efficiency through Air-Gap Torque”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, September 1996;

- [59] J. S. Hsu, B. P. Scoggins, "Field Test of Motor Efficiency and Load Rotor intake power Changes through Air-Gap Torque", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, September 1995;
- [60] M. Aoukadi, A. Binder, "An Investigation into the Suitability of Unbalanced Motor Operation, the Eh-Star-Circuit for Stray Load Loss Measurement", IEEE Industrial Electronics Magazine, March 2008;
- [61] C. Gerada, K. Bradley, J. Arellano-Padilla "When Loads Stray", IEEE Industrial Electronics, 2005;
- [62] A. H. Pereira, "Freio Eletromagnético para Ensaio de Motores Elétricos de Indução", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2006;
- [63] Institute Of Electrical And Electronic Engineering, "Recommended Practice for General Principles of Temperature Measurement as Applied to Electrical Apparatus", ANSI/IEEE Standards 119-1974;
- [64] E. B. Agamloh, N. Kaufman, K. Butler, "The Economics of Pre-Epack Motors Operating in Industry", IEEE Proceedings of the Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2007;
- [65] National Electrical Manufacturers Association, "Energy Management Guide For Selection and Use of Fixed Frequency Medium AC Squirrel-Cage Polyphase Induction Motors", NEMA, 2007;
- [66] B. H. Campbell, "Failed Motors. Rewind or Replace?", IEEE Industry Applications Magazine January/February, 1997;
- [67] S. Lee, T. G. Habetler, "An On-line Stator Winding Resistance Estimation Technique for Temperature Monitoring of Line-connected Induction Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 39, Issue 3, May-June 2003;
- [68] G. S. Rao, S. H. Thilagar "A Novel Method for the Determination of Stray Load Losses of Induction Motor Using Genetic Algorithm", IEEE Proceedings Electrical and Computer Engineering, 2003.

Apêndice A

A.1 Dados Coletados

a) Testes a Vazio

MIT Padrão					MIT de Alto rendimento				
V(V)	I(A)	P(W)	T _{estator} (°C)	T _{ambiente} (°C)	V(V)	I(A)	P(W)	T _{estator} (°C)	T _{ambiente} (°C)
29,8	1,52	58,0	31,80	26,96	38,6	1,11	47,0	28,79	22,31
40,1	1,29	59,0	32,30	26,96	48,7	1,11	48,0	28,98	22,33
51,1	1,28	60,5	32,80	26,96	58,7	1,19	50,0	29,36	22,38
60,0	1,35	63,5	33,30	26,96	68,8	1,31	52,0	29,69	22,38
69,3	1,45	66,0	33,80	26,96	78,3	1,44	55,0	29,90	22,41
79,8	1,60	69,0	34,30	26,96	90,2	1,62	58,0	30,36	22,49
90,8	1,75	72,0	34,80	26,96	100,0	1,77	61,0	30,70	22,50
101,3	1,92	76,0	35,30	26,96	109,2	1,92	64,0	31,31	22,44
110,7	2,08	84,0	35,80	26,96	131,1	2,28	71,0	32,59	22,61
120,8	2,23	86,0	36,30	26,96	131,4	2,29	71,0	31,53	22,50
140,9	2,57	98,0	36,80	26,96	150,4	2,61	79,0	33,30	22,63
160,6	2,91	112,0	37,30	26,96	168,6	2,93	89,0	33,90	22,67
180,4	3,25	125,0	37,80	26,96	190,1	3,30	100,0	34,43	22,68
201,2	3,62	140,0	38,30	26,96	210,7	3,66	110,0	34,85	22,70
220,0	3,95	160,0	38,80	26,96	230,1	4,01	120,0	36,05	22,78
240,4	4,34	180,0	39,30	26,96	249,7	4,38	135,0	36,75	22,83
259,8	4,69	200,0	39,80	26,96	271,2	4,77	150,0	37,44	22,86
280,9	5,10	225,0	40,30	26,96	291,1	5,16	170,0	38,12	22,87
299,0	5,48	250,0	40,80	26,96	309,8	5,53	190,0	38,90	22,95
319,6	5,95	280,0	41,30	26,96	330,6	5,98	215,0	39,48	22,92
339,5	6,44	320,0	41,80	26,96	350,6	6,45	240,0	39,99	22,98
357,9	6,98	360,0	42,30	26,96	370,2	6,95	270,0	40,37	23,07
377,1	7,72	415,0	42,26	27,02	390,3	7,61	315,0	40,28	23,09
398,1	8,75	505,0	42,07	27,02	412,0	8,53	375,0	40,07	23,15
422,0	10,31	665,0	39,47	27,11	-	-	-	-	-

Onde:

V – Tensão de Linha;

I – Corrente de Linha;

P – Potência Ativa de Entrada;

T_{estator} – temperatura do enrolamento do estator;

T_{ambiente} – Temperatura ambiente,

b) Testes com Carga

MIT Padrão							
$I_{FEACI}(A)$	$C_{FEACI}(Nm)$	$V(V)$	$I(A)$	$P(W)$	$V_{eixo}(RPM)$	$T_{estator}(^{\circ}C)$	$T_{ambiente}(^{\circ}C)$
0,00	1,35	377,9	7,92	415	1796,7	55,4	33,1
0,25	1,93	378,8	7,98	940	1792,4	56,3	33,0
0,50	2,52	378,5	7,98	970	1793,9	57,3	33,0
0,75	3,93	377,8	8,13	1220	1791,4	58,4	32,9
1,00	5,33	377,3	8,41	1540	1789,4	59,9	32,8
1,25	7,89	376,7	8,92	2070	1785,8	61,0	32,8
1,50	10,45	376,0	9,34	2770	1783,7	61,5	32,7
1,75	13,72	375,3	9,75	3205	1781,7	62,1	32,7
2,00	16,98	375,2	10,19	3640	1779,7	62,7	32,6
2,25	20,51	375,1	10,63	4075	1777,7	63,4	32,5
2,50	24,03	375,3	11,51	4510	1770,0	64,2	32,4
2,75	28,58	374,5	12,83	5350	1762,6	64,6	32,3
3,00	33,13	374,4	14,37	6270	1757,5	64,5	32,1
3,25	37,50	373,7	15,21	7470	1757,2	64,2	32,0
3,50	41,87	373,0	16,05	8030	1756,9	63,9	31,9

MIT Alto Rendimento							
$I_{FEACI}(A)$	$C_{FEACI}(Nm)$	$V(V)$	$I(A)$	$P(W)$	$V_{eixo}(RPM)$	$T_{estator}(^{\circ}C)$	$T_{ambiente}(^{\circ}C)$
0,00	1,35	384,8	7,36	560	1793,5	50,7	22,3
0,25	1,93	384,1	7,37	655	1791,8	50,9	22,3
0,50	2,52	383,5	7,41	820	1791,1	51,5	22,3
0,75	3,93	383,7	7,50	1060	1794,5	52,1	22,4
1,00	5,33	382,7	7,61	1360	1788,8	52,4	22,3
1,25	7,89	382,3	7,80	1710	1787,6	52,8	22,3
1,50	10,45	382,6	8,06	2145	1785,3	53,4	22,4
1,75	13,72	382,8	8,40	2620	1784,6	53,9	22,4
2,00	16,98	381,8	8,82	3210	1784,3	54,1	22,4
2,25	20,51	381,5	9,43	3790	1778,2	54,4	22,4
2,50	24,03	380,7	10,13	4470	1774,6	54,3	22,4
2,75	28,58	380,0	11,00	5190	1766,8	54,0	22,4
3,00	33,13	380,0	12,00	5990	1765,7	53,7	22,4
3,25	37,50	379,2	13,10	6815	1760,9	52,7	22,3
3,50	41,87	377,8	14,29	7680	1758,1	51,2	22,3

Onde:

I_{FEACI} – Corrente aplicada do Freio Eletromecânico;

C_{FEACI} – Conjugado Produzido no Freio Eletromagnético;

V_{eixo} – Velocidade no eixo do motor.

A.2 Resultados

a) Método E1(IEEE 112-1998)

MIT Padrão						
Carga(%)	P _{Js} (W)	P _{Jr} (W)	P _{Mec} (W)	P _{Fe} (W)	P _{Sup} (W)	η
0,00	109,84	0,22	54	258,5	0,00	0,000
3,29	115,60	1,06	54	258,5	2,38	0,541
4,72	117,36	2,56	54	258,5	3,10	0,551
6,14	117,36	2,87	54	258,5	3,10	0,643
9,57	121,81	5,59	54	258,5	4,94	0,711
13,01	130,35	9,87	54	258,5	8,46	0,777
19,25	146,63	18,64	54	258,5	15,18	0,822
25,49	160,60	25,07	54	258,5	20,94	0,838
33,46	175,19	32,41	54	258,5	26,96	0,850
41,42	191,36	40,58	54	258,5	33,63	0,858
50,02	208,24	49,62	54	258,5	40,60	0,865
58,62	244,15	79,71	54	258,5	55,41	0,871
69,72	303,36	116,94	54	258,5	79,84	0,870
80,81	380,56	158,91	54	258,5	111,69	0,871
91,46	426,35	172,28	54	258,5	130,58	0,870
102,11	474,74	185,78	54	258,5	150,54	0,869

MIT Alto Rendimento						
Carga(%)	P _{Js} (W)	P _{Jr} (W)	P _{Mec} (W)	P _{Fe} (W)	P _{Sup} (W)	η
0,00	74,66	0,19	45	154	0,00	0,000
3,29	83,73	1,20	45	154	4,26	0,485
4,72	83,95	1,95	45	154	4,37	0,558
6,14	84,87	2,95	45	154	4,80	0,644
9,57	86,94	2,56	45	154	5,77	0,722
13,01	89,51	7,07	45	154	6,98	0,778
19,25	94,04	10,22	45	154	9,11	0,817
25,49	100,41	15,64	45	154	12,11	0,847
33,46	109,06	20,38	45	154	16,17	0,868
41,42	120,24	25,91	45	154	21,43	0,886
50,02	137,45	42,86	45	154	29,52	0,892
58,62	158,61	59,32	45	154	39,47	0,898
69,72	187,02	90,51	45	154	52,82	0,898
80,81	222,57	108,33	45	154	69,54	0,900
91,46	265,25	141,06	45	154	89,60	0,898
102,11	315,63	171,08	45	154	113,28	0,896

b) Métodos das Perdas Segregadas e Circuito Equivalente

Carga(%)	MIT Padrão (η)			MIT Alto Rendimento (η)		
	Hirzel	Ontário Hidro	Circ. Equiv	Hirzel	Ontário	Circ. Equiv
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3,29	0,574	0,620	0,373	0,509	0,392	0,467
4,72	0,585	0,628	0,435	0,579	0,477	0,525
6,14	0,669	0,702	0,497	0,661	0,578	0,582
9,57	0,734	0,757	0,582	0,736	0,669	0,658
13,01	0,796	0,811	0,667	0,789	0,735	0,734
19,25	0,840	0,848	0,729	0,827	0,782	0,780
25,49	0,855	0,862	0,791	0,856	0,819	0,825
33,46	0,866	0,872	0,819	0,875	0,845	0,849
41,42	0,874	0,879	0,847	0,892	0,866	0,872
50,02	0,880	0,885	0,8575	0,898	0,877	0,883
58,62	0,886	0,890	0,868	0,904	0,886	0,894
69,72	0,888	0,892	0,8725	0,904	0,889	0,899
80,81	0,890	0,894	0,877	0,906	0,894	0,903
91,46	0,890	0,894	0,877	0,905	0,895	0,902
102,11	0,889	0,895	0,877	0,903	0,896	0,901

c) Métodos do Escorregamento

Carga(%)	MIT Padrão (η)				MIT Alto Rendimento (η)			
	Padrão	Ontário	Guru	BDMotor	Padrão	Ontário	Guru	BDMotor
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3,29	0,663	0,656	0,998	1,521	2,193	2,249	0,996	2,196
4,72	1,478	1,469	0,996	1,175	2,353	2,404	0,995	2,351
6,14	0,930	0,923	0,997	1,328	2,046	2,084	0,995	2,049
9,57	1,050	1,037	0,995	1,286	0,980	0,999	0,997	0,981
13,01	0,957	0,944	0,994	1,285	1,547	1,569	0,994	2,279
19,25	0,964	0,947	0,992	1,112	1,360	1,376	0,993	1,357
25,49	0,952	0,932	0,991	1,064	1,285	1,303	0,992	1,277
33,46	0,944	0,921	0,990	1,038	1,102	1,118	0,991	1,095
41,42	0,936	0,912	0,989	1,018	0,919	0,928	0,991	0,913
50,02	0,929	0,905	0,988	1,233	1,081	1,090	0,988	1,071
58,62	1,052	1,026	0,983	1,290	1,068	1,071	0,986	1,056
69,72	1,120	1,088	0,979	1,246	1,201	1,201	0,982	1,183
80,81	1,067	1,036	0,976	1,054	1,075	1,075	0,981	1,058
91,46	1,000	0,967	0,976	0,986	1,076	1,072	0,978	1,056
102,11	0,941	0,907	0,976	1,019	1,022	1,010	0,977	1,001

d) Métodos da Corrente/Outros

Carga(%)	MIT Padrão (η)			MIT Alto Rendimento (η)		
	Corrente	BD(Corrente)	BD(Potência)	Corrente	BD(Corrente)	BD(Potência)
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3,29	4,130	1,619	0,617	6,443	0,732	0,518
4,72	4,033	1,639	0,629	5,516	0,644	0,565
6,14	3,206	1,303	0,689	4,430	0,571	0,646
9,57	2,588	1,142	0,740	3,468	0,539	0,708
13,01	1,992	0,999	0,787	2,743	0,513	0,757
19,25	1,579	0,943	0,823	2,236	0,533	0,795
25,49	1,428	0,946	0,836	1,842	0,560	0,825
33,46	1,313	0,945	0,849	1,572	0,601	0,847
41,42	1,226	0,935	0,856	1,347	0,631	0,863
50,02	1,155	0,954	0,863	1,220	0,702	0,873
58,62	1,055	0,927	0,873	1,111	0,752	0,884
69,72	1,003	0,896	0,880	1,039	0,806	0,892
80,81	0,943	0,850	0,886	0,982	0,847	0,898
91,46	0,929	0,779	0,889	0,942	0,877	0,904
102,11	0,916	0,000	0,891	0,912	0,894	0,909