



SERGIO ROBERTO JARDIM

**CONTRIBUIÇÕES PARA A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA
UTILIZAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO DE ALTO RENDIMENTO**

***CONTRIBUTIONS TO THE ENERGY CONSERVATION THROUGH THE
USE OF HIGH EFFICIENCY INDUCTION MOTORS***

**CAMPINAS
2012**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

SERGIO ROBERTO JARDIM

CONTRIBUIÇÕES PARA A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS
DA UTILIZAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO DE ALTO RENDIMENTO

*CONTRIBUTIONS TO THE ENERGY CONSERVATION THROUGH
THE USE OF HIGH EFFICIENCY INDUCTION MOTORS*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Automação.

Master dissertation presented to the Electrical Engineering Postgraduation Program of the School of Engineering Electrical of the University of Campinas to obtain the M.Sc. grade in Engineering Electrical, in field of Automation.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Barreto

Tutor: Associate Professor Gilmar Barreto

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO SERGIO ROBERTO JARDIM
E ORIENTADO PELO PROF. DR. GILMAR BARRETO

Assinatura do Orientador

CAMPINAS
2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

J284c	<p>Jardim, Sergio Roberto</p> <p>Contribuições para a conservação de energia através da utilização de motores de indução de alto rendimento / Sergio Roberto Jardim. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.</p> <p>Orientador: Gilmar Barreto.</p> <p>Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Conservação de energia. 2. Eficiência energética. 3. Motores elétricos. I. Barreto, Gilmar, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês: Contributions to the energy conservation through the use of high efficiency induction motors

Palavras-chave em Inglês: Conservation energy, Efficiency energy, Electric motors

Área de concentração: Automação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Jose Luiz Silvino, Cesar José Bonjuani Pagan

Data da defesa: 27-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Sergio Roberto Jardim

Data da Defesa: 27 de julho de 2012

Título da Tese: "Contribuições para a Conservação de Energia Através da Utilização de Motores de Indução de Alto Rendimento."

Prof. Dr. Gilmar Barreto (Presidente):

Gilmar Barreto

Prof. Dr. Jose Luiz Silvino:

Jose Luiz Silvino

Prof. Dr. Cesar José Bonjuani Fagan:

Cesar José Bonjuani Fagan

“Morre o homem, fica a fama.”

(Dedico este trabalho a memória do meu Pai, Carmo Ramiro Jardim)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade da vida e da família, por ter me dado forças e iluminado meu caminho para que eu pudesse concluir mais essa etapa da vida.

Agradeço o meu pai pelo exemplo de caráter e honestidade, e a minha mãe pelo amor, pelo cuidado, pelo incentivo e por crer que eu seria capaz de mudar a história da nossa família.

Agradeço os meus irmãos Marcelo e Denise e o meu sobrinho Erick pelo carinho e atenção de sempre.

Ao meu irmão mais velho, Donizetti, o meu muito obrigado pela confiança, pela ajuda e por sua participação nessa dissertação. Sem você as figuras não teriam ficado tão boas.

Ao meu orientador, Professor Dr. Gilmar Barreto, por seu otimismo e compreensão, pelos ensinamentos e dedicação dispensados no auxílio à concretização dessa dissertação e aos professores Yaro Burian e Ana Cristina Lyra pelo apoio, os meus mais sinceros agradecimentos.

Agradeço a todos os amigos da WEG, em especial a Sidnei Amano, Anna Maria Branco Gayoso Neves e Paschoal Spina Neto pelo apoio com as informações que me prestaram para a elaboração deste trabalho.

A Mr. George Kaniampady Matew, pela ajuda na elaboração da apresentação quando do congresso internacional, o meu muito obrigado.

Aos amigos que fiz durante este curso, em particular ao “Mestre” Heverton Augusto Pereira pelo auxílio nesse meu retorno à academia e pelas aventuras mundo a fora, o meu muito obrigado.

A Kiko Johnson Jones e ao Serginho (do Jardim Miriam) meu eterno agradecimento. Sem vocês essa trajetória não teria sido a mesma. Vamos pra próxima!

A todos os demais amigos de jornada (tomei o cuidado de não nominá-los para que nenhuma injustiça fosse feita), gostaria de agradecê-los pelos bons (e também pelos não tão bons) momentos que passamos ao longo de todos esses anos.

Aos meus filhos Sérgio e Roberto que, cada um a sua maneira e de forma bastante especial, contribuíram para que eu pudesse concluir esse trabalho. Valeu pelo carinho, pelos dias de pausa e de videogame!

A Dona Celina, pelo cuidado, pela compreensão, pelo apoio e por estar presente nos momentos mais importantes da nossa família, meu eterno agradecimento. Tenho pela senhora o carinho de um filho.

A minha amada esposa Nádia por sua capacidade de acreditar e investir em mim. Sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa (e em nenhuma outra) caminhada. Obrigado pelo carinho, pela paciência e por sua capacidade de me trazer paz em todos os momentos.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma estiveram próximos de mim (mesmo que só em pensamento) fazendo esta vida valer cada vez mais a pena, os meus mais sinceros agradecimentos.

“Transportai um punhado de terra todos os dias e fareis uma montanha”.

Confúcio

RESUMO

A gestão e a conservação de energia são temas atuais e de grande importância. Aliar ao ambiente acadêmico o aspecto prático, buscar soluções para a economia de energia através do debate de soluções, proporcionar que os assuntos conservação de energia e eficiência energética sejam discutidos e tratados com relevância serão fundamentais para o desenvolvimento do país nos próximos anos.

Novas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento tanto no setor energético quanto no setor produtivo surgem e nos trazem a possibilidade que avanços tecnológicos ocorram.

O entendimento da legislação e dos problemas relacionados ao consumo inadequado da energia propicia a criação de parâmetros básicos bem como a formação de políticas industriais de conservação e eficiência energética que venham a promover o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis a menores custos.

O estudo desta dissertação baseia-se em verificar quais os impactos a Lei 10.295 trouxe sobre a Matriz Energética brasileira e se houveram ganhos efetivos após a obrigatoriedade do atendimento da referida Lei.

Cita os desafios para se aumentar ainda mais o rendimento dos motores elétricos sem aumentar seus tamanhos nem seus custos de fabricação e reafirma o esforço na busca por melhores materiais e por projetos que venham a melhorar a eficiência dos mesmos.

Apresenta a evolução tecnológica dos motores elétricos e as vantagens da utilização dos motores de indução, devido os baixos custos de fabricação, a facilidade de transporte, a robustez mecânica, além da grande versatilidade de adaptação às cargas e de melhores rendimentos.

Analisa o setor energético brasileiro, a geração e o consumo de energia no país, ressaltando a participação da indústria no consumo de energia elétrica no Brasil.

Avalia os dados colhidos no Balanço Energético Nacional – BEN de 2010 e segmenta o consumo de energia elétrica da Indústria brasileira somente para a utilização de motores elétricos.

Mostra-nos a evolução da legislação brasileira de eficiência em motores elétricos de indução trifásicos, o programa brasileiro de etiquetagem e o futuro da conservação de energia na indústria brasileira, com uma breve apresentação da norma ISO 50001.

Diante dos dados e resultados deste estudo, concluímos que o atendimento da Lei trará, em um curto espaço de tempo, índices significativos de redução do consumo de energia elétrica e de eficiência energética no Brasil.

Este trabalho procura enfatizar este tema com suas contribuições.

Palavras-chave: Conservação de energia. Eficiência energética. Motores elétricos.

ABSTRACT

The management and conservation of energy are current topics of great importance. To add practicality to the academic scenario, find energy saving solutions through discussion, provide that the issues of energy conservation and energy efficiency are discussed and treated with relevance are key aspects to the country's development in coming years.

New opportunities for research and development both in the energy and the productive sectors arise and offer the possibility of technological advances.

Understanding the legislation and the problems related to inadequate consumption of energy enables the creation of basic parameters as well as the formation of industrial policies of energy conservation and efficiency which may come to promote a better use of available resources at lower cost.

The study of this dissertation were a basis to check what the impacts that the Act has brought on the 10,295 Brazilian Energy Matrix and if there were effective gains after the obligation of attendance of the Act.

Mentions challenges to further increase the efficiency of electric motors without increasing its sizes or its costs manufacturing and reaffirms the effort in the search for better materials and projects that will improve its efficiency.

Presents the technological evolution of the electric motors and the advantages of the use of induction motors, because the low cost manufacturing, ease of transportation, mechanical robustness, and the versatility to adapt to loads and higher efficiency.

Analyzes the Brazilian energy sector, the generation and consumption of energy in this country, highlighting the industry participation in the electricity consumption in Brazil.

Evaluates the data collected in the National Energy Balance - BEN 2010 and segments the energy consumption of the Brazilian industry only for the use of electric motors.

Present the evolution of Brazilian legislation of efficiency three-phase induction motors, the Brazilian labeling program and the future of energy conservation in the Brazilian industry, with a brief introduction of the ISO 50001 standard.

In conclusion, given the data and results of this study, that the attendance of Law will, in a short time, significant reduction indices of energy consumption and energy efficiency in Brazil.

The purpose of this paper is to emphasize this theme and its contributions.

Keywords: Energy Conservation. Energy efficiency. Electric motors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Consumo Setorial de Energia.....	6
Figura 2.2 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.	7
Figura 2.3 – Consumo de Energia Elétrica por Região	8
Figura 2.4 – Consumo de Energia Elétrica por Mercado	9
Figura 2.5 – Consumo de Energia Elétrica na Indústria (10^3 tep).....	12
Figura 2.6 – Consumo de Energia Elétrica na Indústria (TWh).....	13
Figura 2.7 – Distribuição do Consumo de Energia Elétrica na Indústria brasileira	15
Figura 2.8 – Consumo de Energia Elétrica por Motores Elétricos na Indústria brasileira	16
Figura 3.1 – Modelo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE)	28
Figura 3.2 – Modelo de Etiqueta para lâmpadas	29
Figura 3.3 – Selo Procel	29
Figura 3.4 – Modelo de Etiqueta de Eficiência Energética do PBE	30
Figura 3.5 – ISO 50001 - Modelo do Sistema de Gestão da Energia.....	32
Figura 4.1 – Experiência de Hanz Cristian Oersted	33
Figura 4.2 – O Eletroímã de William Sturgeon.....	34
Figura 4.3 – Esquema do Comutador de W. Ritchie	35
Figura 4.4 – Exemplos do modelo de Michael Faraday para a descoberta da Indução Eletromagnética	36
Figura 4.5 – O Gerador descrito por Werner Von Siemens	37
Figura 4.6 – A primeira locomotiva da empresa Siemens & Halske	37
Figura 4.7 – O Motor elétrico de Galileu Ferraris.....	38
Figura 4.8 – Os Motores elétricos de Galileu Ferraris e de Nicolau Tesla.....	39
Figura 4.9 – O primeiro Motor elétrico de Michael Von Dolivo-Dobrowolsky	39
Figura 5.1 – A relação entre a carga elétrica e o Campo Magnético	40
Figura 5.2 – Representação do condutor entre os polos de um ímã	43
Figura 5.3 – Representação do condutor e o campo magnético	43
Figura 5.4 – Representação do vetor normal unitário n	45
Figura 5.5 – Representação de um condutor envolto por N espiras.....	46
Figura 5.6 – Representação de campo magnético - Agulhas e Condutor num plano normal	49
Figura 5.7 – Representação da regra do “saca-rolhas”	50
Figura 5.8 – Representação da regra da “mão direita”	50
Figura 5.9 – Representação do sentido do campo eletromagnético	51
Figura 5.10 – Representação do sentido do campo eletromagnético em torno de dois condutores paralelos onde a corrente flui no mesmo sentido	51
Figura 5.11 – Representação do sentido do campo eletromagnético em torno de dois condutores paralelos onde a corrente flui em sentidos opostos	52
Figura 5.12 – Representação do sentido do campo eletromagnético em torno de uma espira	52
Figura 5.13 – Representação do campo magnético produzido por um solenoide	53
Figura 5.14 – Representação do campo magnético produzido pela corrente em um solenoide	53
Figura 5.15 – Representação da Força (F), sobre um condutor que transporta corrente dentro de um campo magnético.....	54
Figura 5.16 – Representação da força e da Rotação, sobre uma espira que transporta corrente dentro de um campo magnético.....	55

Figura 5.17 – Representação da Rotação da espira com relação a Força Eletromotriz Induzida .	55
Figura 5.18 – Construção da Máquina CC	57
Figura 5.19 – Conexão do campo Série	58
Figura 5.20 – Conexão do campo Shunt	58
Figura 5.21 – Máquina de Indução Assíncrona e suas conexões elétricas.....	61
Figura 5.22 – Circuito equivalente, por fase, da Máquina Assíncrona com o rotor em sincronismo	65
Figura 5.23 – Circuito equivalente, por fase, de uma Máquina Assíncrona com o rotor bloqueado	66
Figura 5.24 – Circuito equivalente, por fase, de uma Máquina Assíncrona com escorregamento s	68
Figura 5.25 – Circuito equivalente, por fase, de uma Máquina Assíncrona com escorregamento s e potência secundária	70
Figura 5.26 – Circuito equivalente completo, por fase, referido ao primário de uma Máquina Assíncrona com escorregamento s	72
Figura 6.1 – O universo dos motores elétricos.....	74
Figura 6.2 – Relação entre o custo de aquisição e o custo de operação de motores em Reais	76
Figura 6.3 – Relação entre o custo de aquisição e o custo de operação de motores em Percentual	76
Figura 6.4 – Esquema básico: Conceitos de perdas e rendimento em Motores elétricos	78
Figura 6.5 – Característica dos Motores elétricos de Alto Rendimento	83
Figura 6.6 – Evolução tecnológica dos Motores elétricos de Indução trifásicos	87
Figura 7.1 – Consumo de Energia Elétrica por Motores Elétricos na Indústria brasileira.....	94
Figura 7.2 – Reexibição da Figura 2.8 – Destaque para os resultados obtidos.....	95
Figura 7.3 – Reexibição da Figura 2.4 – Destaque para os resultados obtidos.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Contas Nacionais.	4
Tabela 2.2 – Consumo de Energia na Indústria brasileira (10^3 tep).	11
Tabela 3.1 – Rendimentos Nominiais Mínimos - Motores Padrão.....	21
Tabela 3.2 – Rendimentos Nominiais Mínimos - Motores Alto Rendimento.	22
Tabela 3.3 – Rendimentos Nominiais Mínimos - Motores Elétricos.	24
Tabela 7.1 – Quantidade de Motores Elétricos Trifásicos de Indução de Baixa Tensão vendidos no Brasil.....	90
Tabela 7.2 – Quantidade de Motores Elétricos Trifásicos de Indução de Baixa Tensão vendidos no Brasil em percentual	90
Tabela 7.3 – Média do ganho de rendimento em percentual de Motores Elétricos Trifásicos de Indução de Baixa Tensão de acordo com a Lei 10.295	91
Tabela 7.4 – Média do incremento de rendimento em percentual de Motores Elétricos Trifásicos de Indução de Baixa Tensão de 2 e 4 polos de acordo com a Lei 10.295	91
Tabela 7.5 – Potências Normalizadas que compõem o grupo de motores estudado	92
Tabela 7.6 – Média da Potências Normalizadas que compõem o grupo de motores estudado	92
Tabela 7.7 – Média do consumo de energia elétrica necessária para acionar o volume de motores que compõem o grupo de motores estudado	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Q	Carga Elétrica
Q_p	Carga de Prova
E	Campo Elétrico ou Intensidade de Campo Elétrico
H	Campo Magnético ou Intensidade de Campo Magnético
π	Constante adimensional, equivalente a 3,1416
ϵ_0	Permissividade do vácuo ou do espaço livre, equivalente a $8,854 \times 10^{-12}$
R^2	Distância, ou raio elevado ao quadrado (2ª potência)
ℓ	Comprimento
I	Corrente Elétrica
F	Força
B	Densidade de Fluxo Magnético
ϕ	Fluxo Magnético
$\int_s ds$	Integral e área elementar ds de Superfície
n	Vetor Normal Unitário
A	Área
$\oint dl$	Integral fechada e comprimento elementar dl
\mathcal{F}	Força Magnetomotriz
N	Número de Vezes
p	Número de Polos
e	Tensão Induzida
z	Total de condutores
w	Velocidade Angular
w_m	Velocidade Angular Média
K_a	Constante Adimensional
i_f	Corrente de Campo
k_f	Constante de Proporcionalidade
T_e	Conjugado ou Torque
i_a	Corrente de Armadura
K	Constante Eletromecânica de Conservação de Energia

S	Escorregamento
w_r	Velocidade Angular do Rotor
w_s	Velocidade do Campo Girante do Estator
f	Frequência
T	Intervalo de Tempo
n_s	Frequência de Rotação Síncrona
n_r	Frequência de Rotação do Rotor
w_{cr}	Velocidade Angular do Campo Girante Rotórico
n_{cr}	Frequência de Rotação do Campo Girante Rotórico
$-\infty$	Menos Infinito
$+\infty$	Mais Infinito
V_1	Tensão do circuito primário
V_2	Tensão do circuito secundário
R_1	Resistência do circuito primário
X_{d1}	Reatância do circuito primário
X_{d2}	Reatância do circuito secundário
$I_{1\ mag}$	Corrente de Magnetização (da corrente i_{10}) do circuito primário
$X_{1\ mag}$	Reatância de Magnetização do circuito primário
R_{1p}	Resistência de dispersão do circuito primário
jX_{d1}	Componente imaginária da reatância do circuito primário
jX_{d2}	Componente imaginária da reatância do circuito secundário
E_1	Força eletromotriz primária
E_2	Força eletromotriz secundária
E'_2	Força eletromotriz secundária referida ao circuito primário
I'_2	Corrente do circuito secundário referida ao circuito primário
R'_2	Resistência do circuito secundário referida ao circuito primário
X'_{d2}	Reatância do circuito secundário referida ao circuito primário
V'_2	Tensão do circuito secundário referida ao circuito primário
a	Relação de transformação de um transformador ideal de tensão ou de potencial
N_1	Número de espiras do enrolamento primário
N_2	Número de espiras do enrolamento secundário
I_c	Corrente de carga
Z	Impedância

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IX
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XV
LISTA DE FIGURAS	XVII
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XXI
SUMÁRIO	XXIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	1
2 AVALIAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO	3
2.1 PRODUTO INTERNO BRUTO - PIB	3
2.2 PREVISÃO DO CRESCIMENTO DA PARTICIPAÇÃO DA INDÚSTRIA EM RELAÇÃO AO PIB	5
2.3 CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL	5
2.4 OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL POR FONTE	6
2.5 A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	7
2.6 O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	8
2.7 TONELADA EQUIVALENTE DE PETRÓLEO - TEP	9
2.8 O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA BRASILEIRA	10
2.9 A DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA BRASILEIRA	13
3 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA – EFICIÊNCIA EM MOTORES ELÉTRICOS	17
3.1 A CRISE ENERGÉTICA NO BRASIL NO ANO DE 2001	17
3.2 CRONOLOGIA DA LEGISLAÇÃO BRASILEIRA DE EFICIÊNCIA EM MOTORES	18
3.2.1 Lei Nº 10.295 – de 17 de Outubro de 2001 – D.O.U. de 18/10/2001	18
3.2.2 Decreto Nº 4.059 – de 19 de Dezembro de 2001 – D.O.U. de 20/12/2001	19
3.2.3 Decreto Nº 4.508 – de 11 de Dezembro de 2002 – D.O.U. de 12/12/2002	19
3.2.4 Portaria Interministerial Nº 553 – de 08 de Dezembro de 2005	23
3.2.5 Portaria Inmetro Nº 243 – de 04 de Setembro de 2009	24
3.3 REQUISITOS DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE (RAC) E A ETIQUETA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (ENCE)	25
3.4 FASES DO PROCESSO DE ETIQUETAGEM	26
3.5 ACOMPANHAMENTO DA PRODUÇÃO	26
3.6 CONTROLE NA FÁBRICA	27
3.7 NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS AOS MOTORES ELÉTRICOS	27
3.8 MODELO DA ETIQUETA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (ENCE)	28
3.9 OUTROS MODELOS DE ETIQUETAS ELABORADAS PELO INMETRO	29
3.10 CONTROLE NA FÁBRICA	31
4 A HISTÓRIA DO MOTOR ELÉTRICO	33
5 MÁQUINAS ELÉTRICAS	40
5.1 INTRODUÇÃO	40
5.2 CARGA ELÉTRICA	40

5.3 INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO.....	41
5.4 CIRCUITOS MAGNÉTICOS – EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS.....	42
5.5 EQUAÇÃO DA FORÇA ELETROMOTRIZ - FEM.....	46
5.6 EQUAÇÃO DO CONJUGADO	47
5.7 CIRCUITOS MAGNÉTICOS - CONTEXTUALIZAÇÃO.....	48
5.8 CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA	56
5.9 CONSTRUÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS	59
5.10 CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO ASSÍNCRONA	60
5.11 ESCORREGAMENTO DAS MÁQUINAS ASSÍNCRONAS.....	62
5.12 CIRCUITOS EQUIVALENTES DAS MÁQUINAS ASSÍNCRONAS.....	64
5.12.1 Regime Permanente Senoidal – Escorregamento $S = 0$ e $S = 1$	64
5.12.2 Regime Permanente Senoidal – Escorregamento S diferente de 0 e 1.....	68
5.12.3 Circuito Equivalente Completo - Regime Permanente Senoidal – Escorregamento S diferente de 0 e 1.....	72
6 MOTORES DE ALTO RENDIMENTO	73
6.1 INTRODUÇÃO	73
6.2 O UNIVERSO DOS MOTORES ELÉTRICOS	73
6.3 MOTORES DE ALTO RENDIMENTO.....	74
6.4 MOTORES DE ALTO RENDIMENTO.....	77
6.4.1 Perdas no Cobre ou Perdas Ôhmicas	79
6.4.2 Perdas no Ferro.....	79
6.4.3 Perdas Mecânicas	80
6.4.4 Perdas Suplementares	82
6.5 CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE INDUÇÃO DE ALTO RENDIMENTO	83
6.6 CONSIDERAÇÕES PARA A SELEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO	85
6.7 A EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.....	86
7 ANÁLISE DOS DADOS, RESULTADOS E TRABALHOS FUTUROS.....	89
7.1 INTRODUÇÃO	89
7.2 ANÁLISES QUANTITATIVAS.....	89
7.3 ANÁLISES QUANTITATIVAS.....	93
7.4 TRABALHOS FUTUROS.....	97
8 CONCLUSÕES	98
REFERÊNCIAS	100
APÊNDICES	105
APÊNDICE A – ARTIGOS PUBLICADOS A PARTIR DO TEMA ABORDADO NESTA DISSERTAÇÃO.....	107

1 INTRODUÇÃO

A gestão e a conservação de energia são temas de grande importância. Nesse sentido, estudiosos, empresários e o governo têm trabalhado para que a conservação de energia e a eficiência energética sejam elevadas nos mais diversos setores.

Aliar ao ambiente acadêmico o aspecto prático, buscar soluções para a economia de energia através do debate de soluções bem como avaliar o quanto se evoluiu no Brasil desde a criação da Lei de eficiência Energética (Lei 10.295, de 17 de outubro de 2001) é determinante para o desenvolvimento do setor elétrico brasileiro.

O entendimento da Legislação e dos problemas relacionados ao consumo inadequado da energia propicia a criação de parâmetros básicos bem como a formação de políticas industriais de conservação e eficiência energética que venham a promover um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis a menores custos.

Novas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento tanto no setor energético quanto no setor produtivo surgem e nos trazem a possibilidade de que avanços tecnológicos ocorram.

A motivação deste estudo baseia-se em verificar quais os impactos que a Lei 10.295 trouxe sobre a Matriz Energética brasileira e se houveram ganhos efetivos após a obrigatoriedade do atendimento da referida Lei.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 8 capítulos, onde os primeiros representam o embasamento teórico acerca do assunto estudado.

No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução do assunto.

No Capítulo 2 é feita uma avaliação sobre o setor energético brasileiro, a geração e o consumo de energia no país, ressaltando a participação da indústria no consumo de energia elétrica no Brasil. Destaca-se a avaliação dos dados colhidos no Balanço Energético Nacional – BEN e a elaboração de um gráfico que apresenta o consumo de energia elétrica da Indústria brasileira somente para a utilização de motores elétricos.

No Capítulo 3 é descrita a cronologia da evolução da legislação brasileira de eficiência em

motores elétricos de indução trifásicos, o programa brasileiro de etiquetagem e o futuro da conservação de energia na indústria brasileira, com uma breve apresentação da norma ISO 50001.

No Capítulo 4 está descrita a história dos motores elétricos, desde a descoberta do eletromagnetismo até a criação do modelo do motor de indução utilizado nos dias de hoje.

Os Capítulos 5 e 6 buscam descrever, de maneira sucinta, a teoria de magnetismo e de máquinas elétricas além de apresentar o universo dos motores elétricos, conceitos de rendimento e perdas e as características básicas para a comparação de motores de Alto Rendimento.

O Capítulo 7 busca avaliar os dados extraídos dos diversos documentos publicados pelo governo brasileiro e os desafios futuros para a conservação de energia no país. Apresenta os resultados alcançados neste trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

O Capítulo 8 apresenta as conclusões verificadas com esse trabalho.

2 AVALIAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO

A gestão e a conservação de energia são temas de grande importância. Nesse sentido, estudiosos, empresários e o governo têm trabalhado para que a conservação de energia e a eficiência energética sejam elevadas nos mais diversos setores.

Unir ao ambiente acadêmico o aspecto prático, buscar soluções para a economia de energia através do debate de soluções bem como avaliar o quanto se evoluiu no Brasil desde a criação da Lei de eficiência Energética (Lei 10.295, de 17 de outubro de 2001) é determinante para o desenvolvimento do setor elétrico brasileiro.

O entendimento da Legislação e dos problemas relacionados ao consumo inadequado da energia propicia a criação de parâmetros básicos bem como a formação de políticas industriais de conservação e eficiência energética que venham a promover um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis a menores custos.

Novas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento tanto no setor energético quanto no setor produtivo surgem e nos trazem a possibilidade de que avanços tecnológicos ocorram.

A motivação deste estudo baseia-se em verificar quais os impactos que a Lei 10.295 trouxe sobre a Matriz Energética brasileira e se houveram ganhos efetivos após a obrigatoriedade do atendimento da referida Lei.

2.1 PRODUTO INTERNO BRUTO - PIB

O Produto Interno Bruto é medido exclusivamente pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, órgão subordinado ao Ministério do planejamento, é o principal indicador do crescimento econômico de uma região, seja ela uma cidade, um estado ou, um país e é medido pela soma de todos os bens ou serviços produzidos em um determinado período.

São medidas e avaliadas a produção na indústria, no setor agrícola, no setor de serviços, o consumo das famílias, o investimento das empresas, os gastos do governo e a balança comercial.

A fórmula para o cálculo, de uma forma sucinta, é a somatória do consumo privado + os investimentos totais feitos na região + os gastos do governo + a diferença entre as exportações e as importações.

O PIB per capita é o resultado da divisão do PIB pelo número de habitantes de uma determinada região [4].

O resultado do Censo 2010 indica 190.732.694 pessoas para a população brasileira em 1º de agosto, data de referência. Em comparação com o Censo 2000, ocorreu um aumento de 20.933.524 pessoas. Esse número demonstra que o crescimento da população brasileira no período foi de 12,3%, inferior ao observado na década anterior (15,6% entre 1991 e 2000). O Censo 2010 mostra também que a população é mais urbanizada que há 10 anos: em 2000, 81% dos brasileiros viviam em áreas urbanas, agora são 84% [4].

De acordo com informações retiradas do sítio do IBGE e com base nos dados preliminares de contas nacionais trimestrais, o PIB brasileiro em 2010 foi da ordem de aproximadamente R\$ 3,7 Trilhões [4].

Tabela 2.1 – Contas Nacionais.

CONTAS NACIONAIS - IBGE							
Principais agregados macroeconômicos	2005	2006	2007	2008	2009	2010(1)	2011(1)
PIB valor (R\$ x10 ⁶)	2.147.239	2.369.484	2.661.344	3.032.203	3.239.404	3.770.085	4.143.013
PIB Per capita (R\$)	11.658	12.769	14.183	15.992	16.918	19.509	21.252
Renda nacional bruta (R\$ x10 ⁶)	2.085.653	2.310.899	2.606.535	2.960.429	3.175.327	3.702.057	4.064.885
Renda disponível bruta (R\$ x10 ⁶)	2.094.288	2.320.265	2.614.364	2.968.345	3.182.010	3.706.969	4.069.598
Poupança bruta (R\$ x10 ⁶)	372.505	416.586	481.236	569.400	515.258	661.013	713.462
Financiamento (R\$ x10 ⁶) Capacidade (+) ou necessidade (-)	(+) 26.159	(+) 21.450	(-) 5.045	(-) 56.129	(-) 56.129	(-) 100.033	(-) 101.150

Fonte: IBGE, Diretoria de pesquisa, Coordenação de Contas nacionais.

(1) Com base nos dados preliminares de Contas nacionais Trimestrais

2.2 PREVISÃO DO CRESCIMENTO DA PARTICIPAÇÃO DA INDÚSTRIA EM RELAÇÃO AO PIB

De acordo com as informações contidas no Plano Decenal de Energia (PDE) 2010-2019 publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), para o horizonte indicado, a evolução industrial apresentará participação no PIB brasileiro da ordem de 26,6% entre 2010-2014 e de 27,3% de 2015- 2019 [2].

2.3 CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL

De acordo com o apurado no Balanço Energético Nacional 2010 – BEN o consumo por energia no Brasil está representado por sete setores distintos. São eles: O industrial responsável por cerca de 37% do consumo total, o residencial por 11%, o comercial por 3%, o público por 2%, o agropecuário por 5%, o setor energético por 12% e o de transportes responsável por cerca de 30% de toda a energia demandada no país.

É importante salientar que os dois maiores consumidores estão subdivididos. O setor de Transportes é subdividido em Rodoviário, Ferroviário, Aéreo e Hidroviário.

O setor Industrial é subdividido em Cimento, Ferro-Gusa e Aço, Ferroligas, Mineração e Pelotização, Química, Não-Ferrosos e Outros da Metalurgia, Têxtil, Alimentos e Bebidas, Papel e Celulose, Cerâmica e por fim, Outras Indústrias.

A classificação do consumo setorial do Balanço Energético Nacional segue o código de atividades da Receita federal (Portarias nº 907, de 28 de Agosto de 1989, e nº 962, de Dezembro de 1987 – Diário Oficial da União de 31/12/1987 – Seção I).

A estrutura do geral consumo de energia no Brasil em 2009 é mostrada na Figura 2.1 [3].

Consumo Setorial de Energia

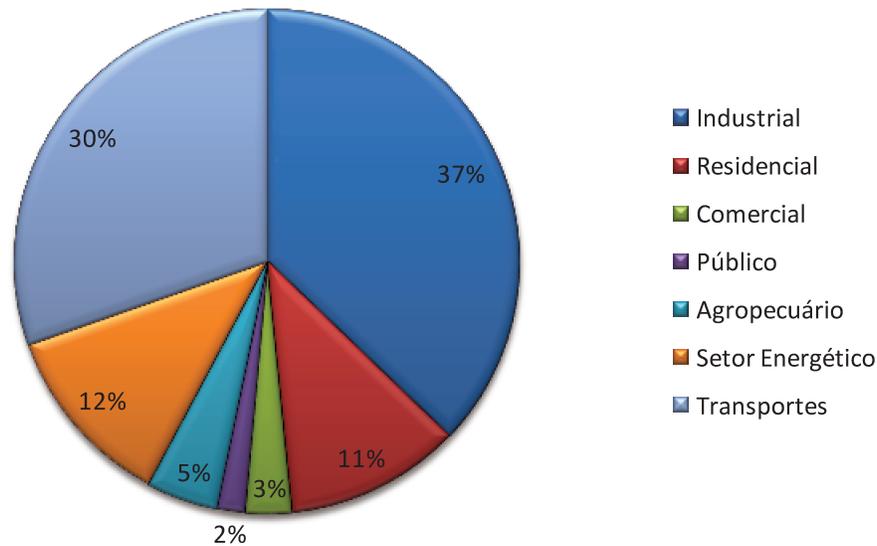


Figura 2.1 – Consumo Setorial de Energia.
Fonte: Balanço Energético Nacional 2010 – BEN

2.4 OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL POR FONTE

A oferta de Energia está vinculada a matriz energética do país. Estão inseridas nesse contexto todas as formas de energia disponíveis sejam elas produzidas no Brasil ou importadas, como no caso da energia elétrica de Itaipu, do Petróleo e do Gás Natural. As formas de energia apresentadas a seguir são utilizadas no Brasil para a composição da oferta de energia elétrica e estão dispostas da seguinte maneira:

- Hidráulica 76,9% do total disponível;
- Carvão e derivados com 1,3%, que inclui o gás de coqueria (gás proveniente do coque rico em hidrogênio e monóxido de carbono);
- Nuclear 2,5%;
- Derivados de petróleo 2,9%;
- Gás natural 2,6%;

- Eólica 0,2%;
- Biomassa 5,4%, que inclui lenha, bagaço de cana, lixo (que é o resíduo resultante da lavagem e do cozimento da celulose na indústria de papel) além de outras recuperações como casca de pinus e de arroz;
- Importação 8,2%.

A estrutura da oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2009 é apresentada na Figura 2.2 [3]

Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte

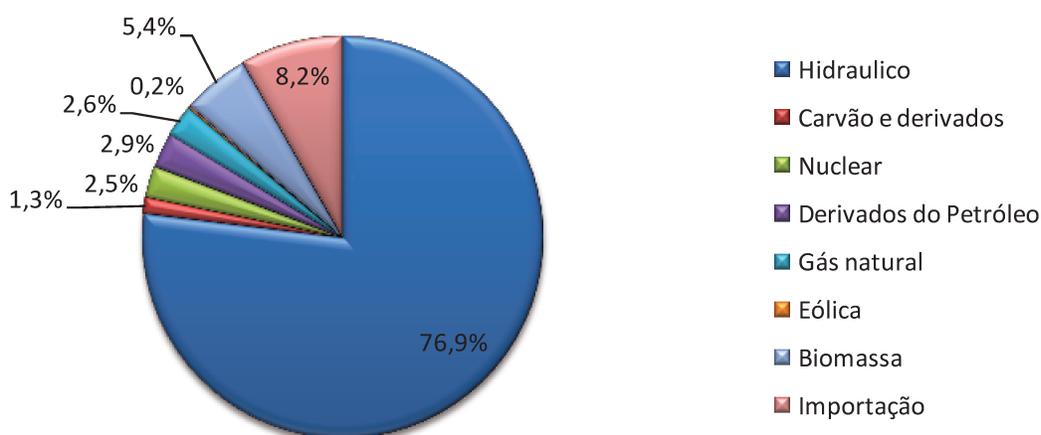


Figura 2.2 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.
Fonte: Balanço Energético Nacional 2010 – BEN

2.5 A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A geração de energia elétrica no Brasil atingiu 466,2 TWh (Terawatts hora) em 2009, enquanto que as importações líquidas foram de 40,0 TWh. Somadas, permitiram uma oferta interna de energia elétrica de 506,1 TWh, montante 0,2% superior a 2008.

Já o consumo final foi de 417,0 TWh em 2009 [3].

2.6 O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

O Brasil tem hoje cerca de 190 milhões de habitantes e, segundo a Resenha mensal do Mercado de Energia Elétrica de dezembro de 2010, o consumo de energia elétrica acumulado entre novembro de 2009 a novembro de 2010 totalizou mais de 417 TWh. O destaque foi o incremento no consumo de energia residencial do Nordeste do país. Segundo o documento, o crescimento no consumo está relacionado com o aumento do emprego e dos programas de transferência de renda. De acordo com o CAGED – Cadastro Geral de Empregados e Desempregados, órgão ligado ao Ministério do Trabalho e Emprego, de Janeiro à Outubro de 2010 foram criados 383 mil empregos formais na região, incrementando assim o consumo de energia elétrica [1].

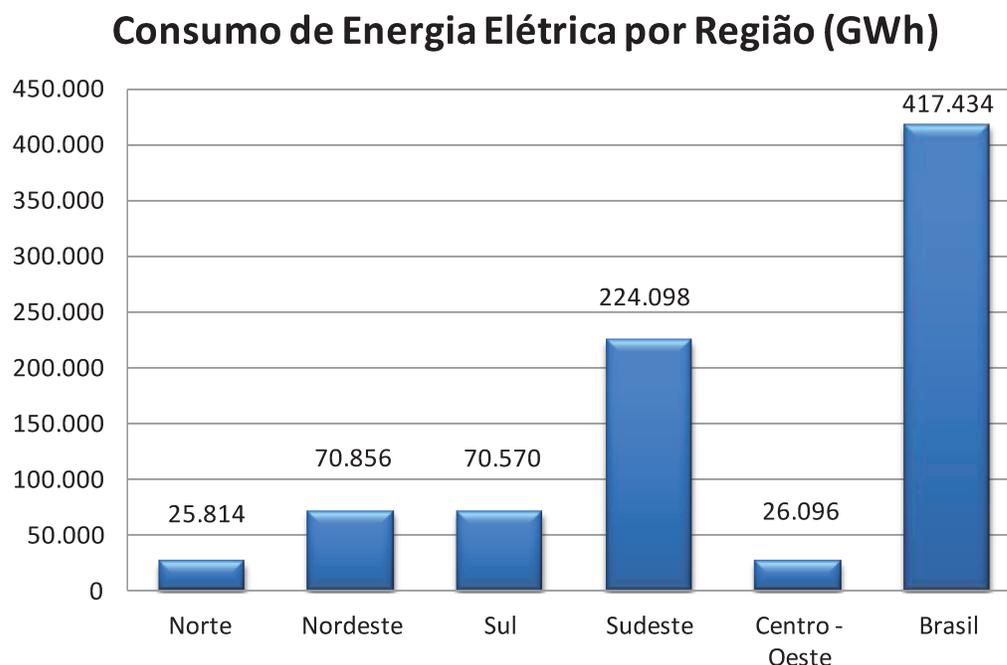


Figura 2.3 – Consumo de Energia Elétrica por Região
Fonte: Comissão Permanente de Análise e Acompanhamento do Mercado de Energia Elétrica.

Consumo de Energia Elétrica por Mercado (GWh)

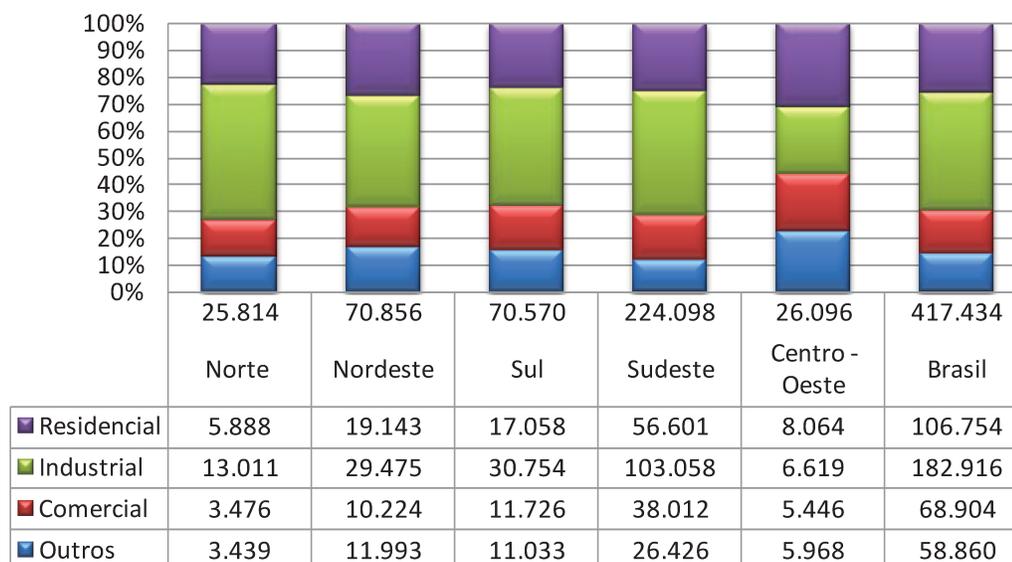


Figura 2.4 – Consumo de Energia Elétrica por Mercado

Fonte: Comissão Permanente de Análise e Acompanhamento do Mercado de Energia Elétrica.

2.7 TONELADA EQUIVALENTE DE PETRÓLEO - TEP

Os fluxos de energia que formam o Balanço Energético Nacional – BEN precisam ser expressos em uma única unidade a fim de agregar as diversas variáveis que as compõem.

Por estar relacionado com um importante energético e também por expressar um valor físico, o BEN, utiliza-se da “Tonelada Equivalente de Petróleo – tep”.

De acordo com o BEN, o petróleo de referência utilizado é equivalente a 10000 kcal/kg (Kilocalorias por Kilogramas) e todos os fatores de conversões são determinados com base nos poderes caloríficos inferiores das fontes de energia.

Para a energia hidráulica e eletricidade são considerados os coeficientes de equivalência teórica, onde 1kWh (Kilowatt hora) é igual a 860 kcal (Kilocalorias) conforme o primeiro princípio da termodinâmica.

Esse ajuste se fez necessário tendo em vista que nos modelos utilizados anteriormente (Edições do BEN anteriores a 2001) considerava os parâmetros da base térmica onde 1kWh era igual a 3132 kcal correspondente ao óleo combustível queimado numa térmica com rendimento de

27,5%. Assim, o fator de conversão de 0,29 tep/MWh (Tonelada Equivalente de Petróleo por Megawatts hora) elevava a energia hidráulica do Brasil a parâmetros comparáveis com países eminentemente de geração térmica.

Os atuais critérios são coerentes com os atuais critérios internacionais, principalmente os da Agência Internacional de Energia, do Conselho Mundial de Energia, Organização Latino-Americana de Energia e o Departamento de Energia dos estados Unidos [3].

Em resumo, os valores calculados em tep são:

$$1 \text{ tep} = 10000 \text{ Mcal (Megacalorias)} \text{ e } 1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal} = 0,000086 \text{ tep}$$

2.8 O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA BRASILEIRA

O consumo de energia elétrica no Brasil totalizou 417.434 gi gawats-hora (GWh) no ano de 2010 de acordo com a EPE – Empresa de Pesquisa Energética, empresa ligada ao Ministério de Minas e Energia, alta de 8,1% frente o mesmo período de 2009, sendo que a Indústria brasileira representou 43,82% do total consumido no país.

A tabela 2.2 apresenta os dados retirados do BEN para o consumo de energia na indústria brasileira em Tonelada Equivalente de petróleo (tep), por fonte, que compõem a matriz energética do setor, sejam elas renováveis ou não.

O valor total de energia elétrica consumido na indústria, de acordo com a segmentação disposta no Balanço Energético Nacional 2010 – BEN, são apresentados nos gráficos 2.5 e 2.6. [3].

Tabela 2.2 – Consumo de Energia na Indústria brasileira (10³ tep).

FONTES	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Gás natural	3.867	4.569	5.580	5.859	6.663	7.224	7.563	8.051	8.453	7.161
Carvão Mineral	2.841	2.759	3.016	3.294	3.594	19	3.496	3.727	3.840	2.949
Lenha	5.344	5.132	4.937	5.186	5.478	5.633	5.807	6.065	6.538	6.563
Bagaço de Cana	7.858	9.841	11.102	11.981	12.812	13.083	15.259	16.152	15.390	16.292
Outras Fontes Primárias renováveis	3.000	3.055	3.352	3.880	4.018	4.249	4.636	5.015	5.280	5.571
Óleo Diesel	524	491	572	644	706	666	667	725	750	707
Óleo Combustível	7.077	6.033	5.872	5.069	4.426	4.412	4.039	4.199	3.981	3.727
Gás Liquefeito de Petróleo	871	729	594	565	544	608	695	740	784	739
Nafta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Querosene	19	16	16	13	11	8	5	4	3	3
Gás de Coqueria	932	891	879	972	1.037	1.016	980	1.039	1.065	1.011
Gás Canalizado	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coque de Carvão Mineral	6.506	6.327	6.673	6.688	6.817	6.420	6.137	6.716	6.704	5.309
Eletricidade	12.614	11.984	13.123	13.822	14.797	15.082	15.774	16.565	16.961	16.020
Carvão Vegetal	4.337	3.925	4.117	4.871	5.778	5.657	5.508	5.649	5.593	3.301
Outras Secundárias de petróleo	5.337	5.693	5.462	5.485	5.487	5.883	6.144	7.152	6.949	7.288
Outras Secundárias - Alcatrão	77	75	78	38	50	37	48	56	39	44
TOTAL (10³ tep)	61.204	61.521	65.373	68.367	72.217	73.496	76.757	81.856	82.327	76.686

Fonte: Balanço Energético Nacional – BEN

O gráfico da figura 2.5 apresenta os dados de consumo de energia elétrica na indústria brasileira colhidos no Balanço Energético Nacional para o ano de 2009, porém, em Toneladas Equivalentes de Petróleo.

Consumo de Energia Elétrica na Indústria (10³ tep)

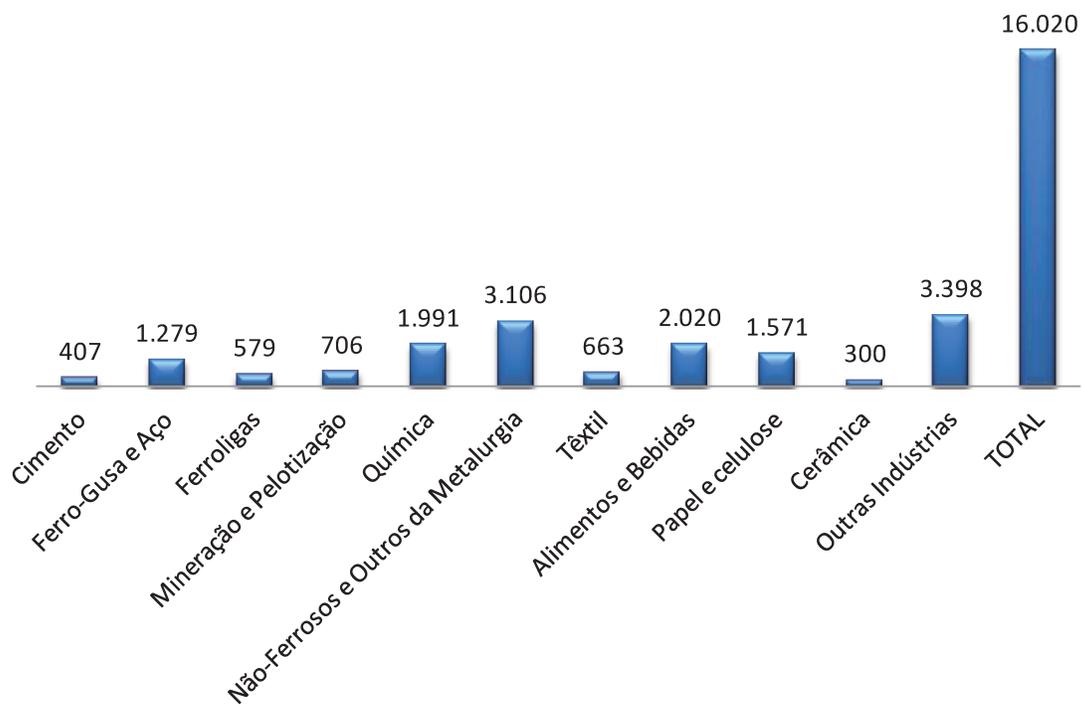


Figura 2.5 – Consumo de Energia Elétrica na Indústria (10³ tep).
Fonte: Balanço Energético Nacional 2010 – BEN.

À partir do coeficiente de equivalência apresentado no item anterior, que descreve como factível a relação de que 1 kWh = 0,000086 tep, foi elaborado o gráfico da Figura 2.6 que apresenta as mesmas informações colhidas no BEN, porém em Terawatts hora (TWh).

Consumo de Energia Elétrica na Indústria (TWh)

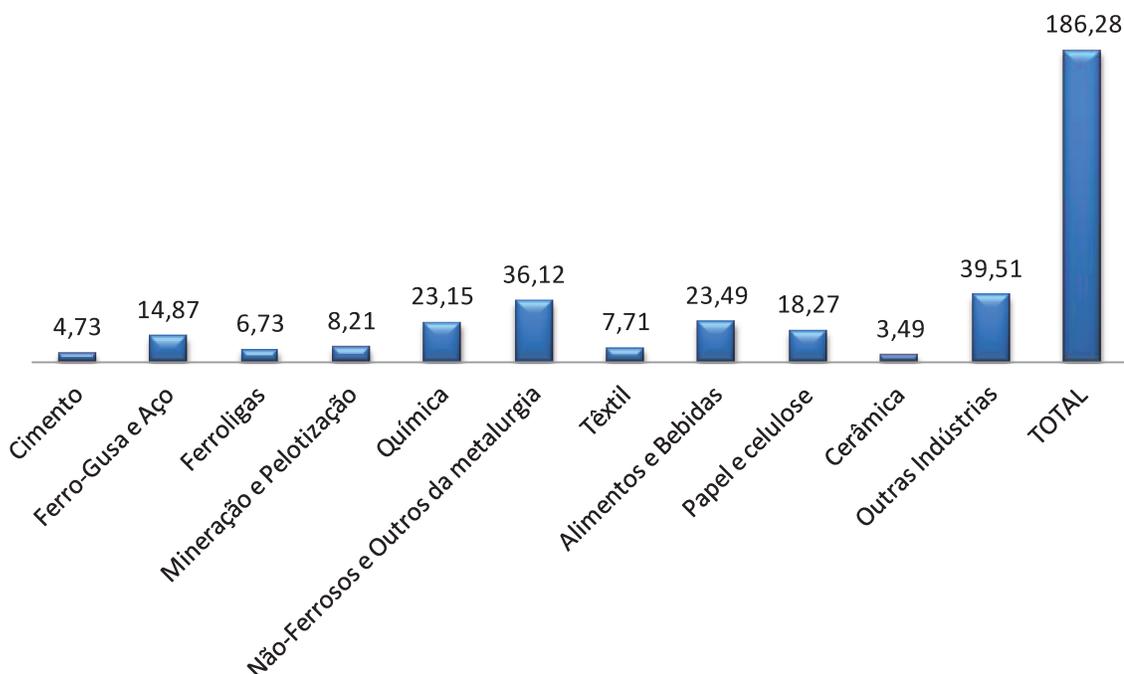


Figura 2.6 – Consumo de Energia Elétrica na Indústria (TWh).

2.9 A DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA BRASILEIRA

De acordo com o Relatório de Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo elaborado pelo PROCEL/ELETROBRAS, publicado no Brasil em 2008, podemos verificar que na indústria brasileira, dentre os principais sistemas motrizes, ou seja, que se utiliza de motores elétricos, os sistemas de ar comprimido e vácuo são o que estão mais presentes, com uma participação de 72% deste consumo. Nos sistemas de bombeamento a participação do consumo dos motores representa 59%, nos sistemas de movimentação, manuseio e tratamento 47% e nos sistemas de ventilação a participação do consumo dos motores representa 46%.

Dentro dos sistemas de Ar comprimido e vácuo, a grande maioria (71%) possui potência motriz instalada inferior a 100CV, cuja média ficou em 161CV.

Os sistemas de bombeamento, na sua grande maioria (74%), também possuem potência motriz instalada inferior a 100CV, porém a média ficou em quase 300CV.

É importante salientar que a distribuição das indústrias pesquisadas no Brasil para efeito da elaboração do Relatório de Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo foi subdividida em subgrupos de tensão e faixa de demanda.

A distribuição por grupo de tensão e faixa de demanda procurou abordar e preservar a estrutura setorial do mercado industrial brasileiro e teve como objetivo a facilitação avaliação dos resultados obtidos a partir das amostras geradas segundo essas classificações. Assim, verificou-se uma concentração de indústrias, cerca de 70%, no subgrupo de tensão A4 (2,3 a 25 kV) e faixa de demanda menor que 500kW.

O Relatório também esclarece que não há, dentro do universo considerado, uma política para o Gerenciamento Energético das instalações. A ausência de ações desse tipo enseja um potencial expressivo para a aplicação de melhorias da eficiência energética do setor.

Em termos de idade das instalações industriais brasileiras, o Relatório descreve que parte das indústrias (25%) encontra-se na faixa de 11 a 20 anos de operação e que, caso a instalação ou a planta tivesse sido reformada, a idade considerada seria a partir do ano da reforma. De maneira geral, os parques industriais mais antigos apresentam maiores potenciais de implantação de melhorias da eficiência energética, haja visto o nível tecnológico e de automação das instalações, dos processos e dos equipamentos existentes.

Os custos da energia elétrica, de maneira geral, representam em média cerca de 10% dos custos totais das empresas.

Por outro lado, setores como o de produtos de Madeira (45%), de Metalurgia básica (12,4%), produtos Minerais não-metálicos (11,4%), Artefatos de couro (14,7%), reciclagem (14,4%) participam com percentuais significativos dos seus custos de produção para a utilização de energia elétrica. Essa participação determina, em parte, a propensão dessas indústrias em investir em medidas de eficiência energética [5].

A distribuição do consumo da energia motriz, proveniente de motores elétricos, na indústria brasileira conforme avaliação do Relatório de Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo elaborado pelo PROCEL/ELETRONBRAS publicado em 2008 é apresentada na figura 2.7.

Distribuição do consumo de energia elétrica na Indústria brasileira

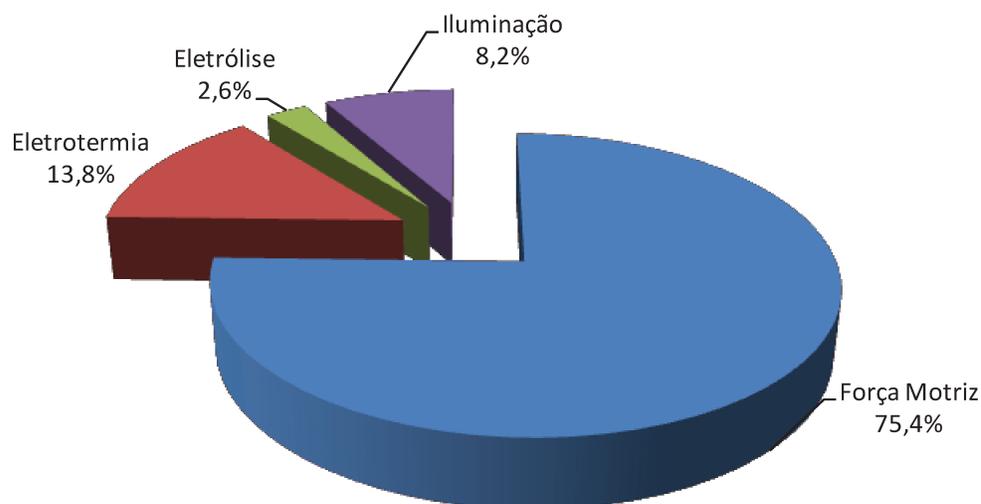


Figura 2.7 – Distribuição do Consumo de Energia Elétrica na Indústria brasileira
Fonte: Relatório de Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo

Sabemos da utilização de motores na indústria, cuja tecnologia não esse enquadra na atual legislação de eficiência energética, por exemplo, motores CC, de anéis, etc. Como este universo não pode ser determinado consideramos que os 75,4% do consumo de energia elétrica da indústria, apresentado na figura 2.7 advêm dos motores elétricos de indução trifásicos com rotor de gaiola de esquilo, por entender que estes são a maioria dos motores que operam na indústria.

Considerada as informações retiradas do Relatório de Pesquisa de Posse de equipamentos elétricos e Hábitos de Consumo, podemos transformar o gráfico obtido através do Balanço Energético Nacional (Figura 2.6), de maneira a obter o consumo de energia elétrica utilizado nas indústrias somente para a utilização de motores elétricos, figura 2.8.

Consumo de Energia Elétrica por Motores Elétricos na Indústria (TWh)

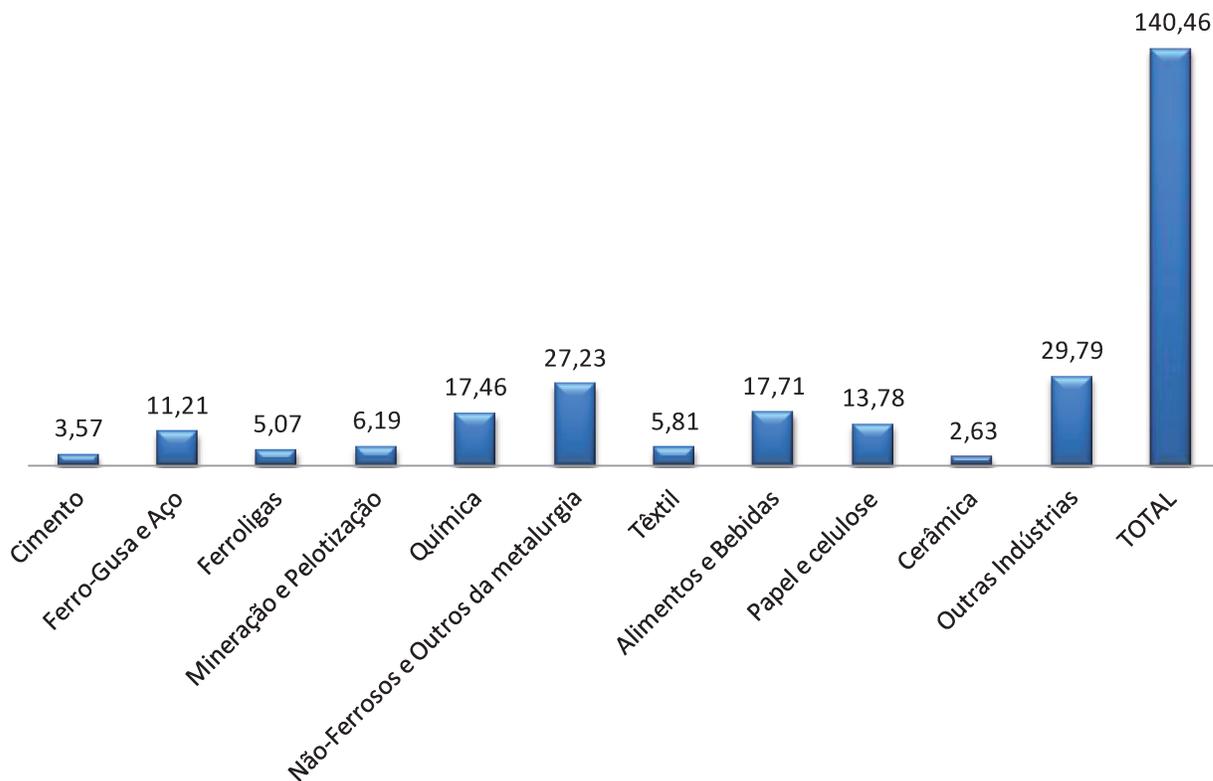


Figura 2.8 – Consumo de Energia Elétrica por Motores Elétricos na Indústria brasileira

Dessa forma, segmentamos o consumo de energia elétrica somente em motores elétricos na indústria brasileira, tomando-se como base o ano de 2009, ano em que foram colhidos os dados apresentados no Balanço Energético Nacional estudado e concluímos que o consumo total representa 140,46 (TWh), por ano, somente em motores elétricos.

3 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA – EFICIÊNCIA EM MOTORES ELÉTRICOS

3.1 A CRISE ENERGÉTICA NO BRASIL NO ANO DE 2001

A maior parte da energia elétrica produzida no Brasil é proveniente de usinas hidrelétricas que, por sua vez, dependem que os volumes de água dos seus reservatórios estejam sempre com níveis adequados para o perfeito funcionamento do sistema.

Períodos com menor intensidade de chuvas, a ausência de investimentos no setor, além da falta de planejamento por parte do Governo e dos órgãos regulamentadores contribuíram para a ocorrência de interrupções no fornecimento de energia, os também chamados “Apagões”.

Ao longo da história, a população brasileira atravessou algumas situações de falta de energia, porém o ano de 2001 foi determinante para o Brasil, tendo em vista a necessidade de racionamento, o incremento no preço da tarifa de energia, além da instituição de metas de redução de consumo de energia elétrica em todos os setores da sociedade brasileira.

Nesse ano, através da Medida provisória N° 2.147 de 15.05.2001 – D.O.U de 16.05.2001, o então governo do Presidente Fernando Henrique Cardoso, criou e instalou a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica que estabeleceu diretrizes para programas de enfrentamento da crise de energia elétrica.

Após isso, estabeleceram-se regimes especiais de tarifação, limites de uso e de fornecimento de energia elétrica além de medidas de redução de consumo.

O resultado mais significativo e de maior visibilidade para a população brasileira foi a obrigatoriedade da redução do consumo de energia elétrica no setor residencial, compulsoriamente em 20%, sob a penalidade de multas e do corte do fornecimento de energia.

A demissão de parte dos funcionários das indústrias, a busca por lâmpadas eletrônicas, por grupos geradores e por motores de maior rendimento também pôde ser verificada nessa ocasião.

Ações isoladas dos governos estaduais e municipais para o alcance das metas estabelecidas pelo governo federal como, por exemplo, o desligamento de parte da iluminação pública na cidade de São Paulo e a diminuição do período do atendimento nos setores públicos também puderam ser vistos.

3.2 CRONOLOGIA DA LEGISLAÇÃO BRASILEIRA DE EFICIÊNCIA EM MOTORES

3.2.1 Lei Nº 10.295 – de 17 de Outubro de 2001 – D.O.U. de 18/10/2001

O então presidente da república Fernando Henrique Cardoso sancionou em 17 de outubro de 2001 a lei 10.295 que dispunha sobre a Política Nacional de Conservação e o Uso Racional de Energia a qual visa à alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente. Esta lei passou a vigorar a partir da sua publicação.

Ficou determinado que o poder executivo da União estabelecesse os níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no Brasil, com base nos indicadores técnicos pertinentes.

Os níveis a que se refere a lei seriam estabelecidos com base em valores técnicos e economicamente viáveis e levariam em conta a vida útil das máquinas e aparelhos.

Ficou determinado também que, em até 01 ano da publicação desses níveis, seria estabelecido um programa de metas para a sua progressiva evolução.

Os fabricantes e importadores de máquinas e aparelhos consumidores de energia elétrica seriam obrigados a adotar medidas para o cumprimento dos níveis máximos de consumo e mínimos de eficiência energética, constantes da regulamentação específica para cada tipo de máquina.

Os importadores deveriam comprovar os níveis máximos de consumo e mínimos de eficiência energética por ocasião da importação dos produtos.

Uma vez estabelecido os níveis de eficiência e da vigência da regulamentação específica deveriam ser recolhidos, no prazo máximo de 30 dias, os equipamentos que não atendessem as especificações legais. O não cumprimento acarretaria em multa de até 100% do preço de venda por eles praticados por equipamento encontrado [9].

3.2.2 Decreto Nº 4.059 – de 19 de Dezembro de 2001 – D.O.U. de 20/12/2001

Através do Decreto Nº 4.059, em 20 de dezembro de 2001, o presidente da república do Brasil regulamentou a lei 10.295 que dispunha sobre a Política Nacional de Conservação e o Uso Racional de Energia a qual visa à alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente.

Ficou instituído o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGI-EE, sob a presidência e a coordenação do Ministério de Minas e Energia.

O CGIEE era composto por representantes do Ministério de Minas e Energia (MME), do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), da Agência nacional do Petróleo (ANP), de um representante de universidade brasileira e de um cidadão brasileiro, ambos especialistas na matéria de energia.

Ficaram estabelecidas as competências do CGIEE dentre as quais elaborar o plano de trabalho e o cronograma visando implementar a Lei 10.295, além de elaborar a regulamentação específica para cada máquina e aparelho consumidor de energia.

O INMETRO seria o responsável pela fiscalização e pelo acompanhamento dos programas de avaliação das máquinas e aparelhos a serem regulamentados e do credenciamento dos laboratórios responsáveis pelos ensaios que comprovariam o atendimento dos valores estabelecidos pela legislação [10].

3.2.3 Decreto Nº 4.508 – de 11 de Dezembro de 2002 – D.O.U. de 12/12/2002

A presidência da república, através do Decreto Nº 4.508, em 12 de dezembro de 2002 deliberou sobre a regulamentação específica que definiu os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor de gaiola de esquilo (Padrão e de Alto Rendimento), de fabricação nacional ou importada, para comercialização ou uso no Brasil.

Por tratar-se do decreto que estabeleceu os critérios para a regulamentação da Lei 10.295 a compreensão do texto a seguir é de extrema importância para o perfeito entendimento do assunto.

De maneira sucinta descrevo os pontos mais relevantes do decreto.

Os equipamentos correspondem a motores elétricos trifásicos, de indução, rotor de gaiola de esquilo, para comercialização ou uso no Brasil (de fabricação nacional ou importada) incluindo os motores comercializados isoladamente ou os que fazem parte de outros equipamentos.

Os motores deverão ser do tipo T.F.V.E. (Totalmente Fechados com Ventilação Externa), frequências de 50 ou 60 Hz, operação em rede de distribuição de corrente alternada trifásica e tensão nominal até 600 V, individualmente ou em quaisquer combinações de tensão.

Deverão também ter desempenho de partida de acordo com as categorias N e H da norma NBR 7094/2000, da ABNT ou equivalente da norma NEMA e fabricados para o Regime de Serviço S1 (Contínuo).

Ficou estabelecido que os motores que fariam parte da regulamentação teriam suas potências nominais e polaridades compreendidas entre:

- De 1 a 250 CV ou HP (0,75 a 185 KW) nas polaridades de 2 e 4 pólos (inclusive);
- De 1 a 200 CV ou HP (0,75 a 150 KW) na polaridade de 6 pólos (inclusive);
- De 1 a 150 CV ou HP (0,75 a 110 KW) na polaridade de 8 pólos (inclusive).

O indicador de eficiência energética a ser utilizado foi o rendimento nominal e o método de ensaio seria o descrito na norma NBR 5383 -1 /2001 da ABNT - Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1 - Motores de Indução Trifásicos – Ensaio.

Essa norma prevê o ensaio dinamométrico com medição indireta das perdas suplementares e a medição direta das perdas no estator (I^2R), no rotor (I^2R), no núcleo e por atrito e ventilação.

Os níveis mínimos de rendimento nominal a serem atendidos estão definidos nas tabelas 3.1 e 3.2, incluindo as linhas de motores padrão e de alto rendimento, cujos valores estão sujeitos a tolerância da norma NBR 7094/2000 da ABNT.

Tabela 3.1 – Rendimentos Nominais Mínimos - Motores Padrão.

PADRÃO					
Potência		Nº de Polos			
<i>CV ou HP</i>	<i>KW</i>	2	4	6	8
1	0,75	77,0	78,0	73,0	66,0
1,5	1,1	78,5	79,0	75,0	73,5
2	1,5	81,0	81,5	77,0	77,0
3	2,2	81,5	83,0	78,5	78,0
4	3	82,5	83,0	81,0	79,0
5	3,7	84,5	85,0	83,5	80,0
6	4,5	85,0	85,5	84,0	82,0
7,5	5,5	86,0	87,0	85,0	84,0
10	7,5	87,5	87,5	86,0	85,0
12,5	9,2	87,5	87,5	87,5	86,0
15	11	87,5	88,5	89,0	87,5
20	15	88,5	89,5	89,5	88,5
25	18,5	89,5	90,5	90,2	88,5
30	22	89,5	91,0	91,0	90,2
40	30	90,2	91,7	91,7	90,2
50	37	91,5	92,4	91,7	91,0
60	45	91,7	93,0	91,7	91,0
75	55	92,4	93,0	92,1	91,5
100	75	93,0	93,2	93,0	92,0
125	90	93,0	93,2	93,0	92,5
150	110	93,0	93,5	94,1	92,5
175	132	93,5	94,1	94,1	-
200	150	94,1	94,5	94,1	-
250	185	94,1	94,5	-	-

Tabela 3.2 – Rendimentos Nominiais Mínimos - Motores Alto Rendimento.

ALTO RENDIMENTO					
Potência		Nº de Polos			
<i>CV ou HP</i>	<i>KW</i>	2	4	6	8
1	0,75	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	82,5	81,5	77,0	77,0
2	1,5	83,5	84,0	83,0	82,5
3	2,2	85,0	85,0	83,0	84,0
4	3	85,0	86,0	85,0	84,5
5	3,7	87,5	87,5	87,5	85,5
6	4,5	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	88,5	89,5	88,0	85,5
10	7,5	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	9,2	89,5	90,0	88,5	88,5
15	11	90,2	91,0	90,2	88,5
20	15	90,2	91,0	90,2	89,5
25	18,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	22	91,0	92,4	91,7	91,0
40	30	91,7	93,0	93,0	91,0
50	37	92,4	93,0	93,0	91,7
60	45	93,0	93,6	93,6	91,7
75	55	93,0	94,1	93,6	93,0
100	75	93,6	94,5	94,1	93,0
125	90	94,5	94,5	94,1	93,6
150	110	94,5	95,0	95,0	93,6
175	132	94,7	95,0	95,0	-
200	150	95,0	95,0	95,0	-
250	185	95,4	95,0	-	-

O processo de avaliação da conformidade para a verificação dos níveis de rendimento seria o da etiquetagem a ser realizado pelo INMETRO, por meio do Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE.

Antes da comercialização dos motores, estes deveriam ser submetidos ao INMETRO para que o mesmo autorizasse a comercialização no Brasil. Esta autorização não isentava o fabricante ou importador de comercializar seus equipamentos dentro dos índices mínimos estabelecidos na regulamentação.

Seriam credenciados pelo INMETRO os laboratórios responsáveis pelos ensaios que

comprovariam os níveis de rendimento regulamentados.

O não cumprimento da regulamentação acarretaria aos infratores, a aplicação das penalidades previstas na Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, item 3.3.1, (multa de até 100% do preço de venda por eles praticados por equipamento encontrado).

A data limite para fabricação no país ou importação do exterior de motores que não atendam ao disposto na regulamentação foi a da entrada em vigor do Decreto, ou seja, no ato da sua publicação e a data limite para a comercialização foi de 28 de fevereiro de 2003 [11].

3.2.4 Portaria Interministerial Nº 553 – de 08 de Dezembro de 2005

De acordo com a portaria 553, os Ministros de Estado de Minas e Energia, da Ciência e Tecnologia e do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, aprovaram o programa de metas de motores elétricos de indução trifásicos conforme estabelecido na Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001.

Ficaram estabelecidos os valores mínimos de rendimento nominal a serem atendidos pelos motores elétricos de indução trifásicos, definidos de acordo com a tabela 3.3, sem a distinção dos níveis de rendimento nominal entre as linhas Padrão e de Alto Rendimento.

Importante salientar que, os valores constantes desta regulamentação estão sujeitos às tolerâncias descritas na norma NBR 7094/2000 da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

A data limite para fabricação de motores no país, sua importação do exterior, bem como a sua comercialização, foi alterada para 04 (QUATRO) anos após a entrada em vigor desta Portaria, ou seja, dezembro de 2009 [12].

Tabela 3.3 – Rendimentos Nominais Mínimos - Motores Elétricos.

Motores Elétricos					
Potência		Nº de Polos			
<i>CV ou HP</i>	<i>KW</i>	2	4	6	8
1	0,75	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	82,5	81,5	77,0	77,0
2	1,5	83,5	84,0	83,0	82,5
3	2,2	85,0	85,0	83,0	84,0
4	3	85,0	86,0	85,0	84,5
5	3,7	87,5	87,5	87,5	85,5
6	4,5	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	88,5	89,5	88,0	85,5
10	7,5	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	9,2	89,5	90,0	88,5	88,5
15	11	90,2	91,0	90,2	88,5
20	15	90,2	91,0	90,2	89,5
25	18,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	22	91,0	92,4	91,7	91,0
40	30	91,7	93,0	93,0	91,0
50	37	92,4	93,0	93,0	91,7
60	45	93,0	93,6	93,6	91,7
75	55	93,0	94,1	93,6	93,0
100	75	93,6	94,5	94,1	93,0
125	90	94,5	94,5	94,1	93,6
150	110	94,5	95,0	95,0	93,6
175	132	94,7	95,0	95,0	-
200	150	95,0	95,0	95,0	-
250	185	95,4	95,0	-	-

3.2.5 Portaria Inmetro Nº 243 – de 04 de Setembro de 2009

O Presidente do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade - INMETRO, aprovou o programa de metas de motores elétricos de indução trifásicos de acordo com o estabelecido na Lei 10.295 (Item 3.3.1.).

Nesse documento ficou aprovado os Requisitos de Avaliação da Conformidade – RAC para os motores descritos anteriormente e a etiquetagem compulsória para esses motores comer-

cializados individualmente ou acoplados em máquinas motrizes de uso final [13].

3.3 REQUISITOS DE AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE (RAC) E A ETIQUETA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (ENCE)

Os Requisitos de Avaliação da Conformidade – RAC específicos para o uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia visa estabelecer critérios e regular as relações entre o Instituto de metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro e/ou o Organismo de Certificação Credenciado – OCC e os fabricantes para a utilização da ETIQUETA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA – ENCE em suas linhas de produção, especificamente, Motores Elétricos de Indução Trifásicos rotor de gaiola de esquilo totalmente fechados com ventilação externa.

Os Requisitos Específicos são constituídos de parâmetros de orientação entre as partes.

Através de acordos específicos a identificação dos produtos a serem etiquetados é feita em conjunto com os fabricantes.

Etiquetas informativas são utilizadas para fornecer aos consumidores informações úteis relativas aos produtos que se pretendem adquirir. Essas informações são fornecidas pelos fabricantes e atestadas por um órgão certificador através de um sistema de aferição, medição e controle.

As medições seguem normas específicas e são controladas através de ensaios por laboratório credenciado pelo Inmetro e/ou OCC. O Inmetro e/ou o OCC também faz a aferição dos sistemas de medição dos fabricantes e do laboratório de ensaios credenciado.

No caso de motores elétricos de indução trifásicos, a medição referida na ENCE é o rendimento e o fator e potência dos equipamentos.

Vale lembrar que, o que está sendo certificado é a informação prestada pelo fabricante quanto a esses parâmetros medidos, de acordo com o estabelecido nas Normas Brasileiras pertinentes e controlados pelos laboratórios de ensaios credenciados.

O Objetivo da ENCE é o de informar o rendimento e o fator de potência dos motores elétricos de indução trifásicos segundo as normas brasileiras específicas e que as medições estão sendo feitas de maneira contínua, seguindo parâmetros de aferição e controle, de acordo com o

Regulamento Específico pelo fabricante dos equipamentos.

O uso da ENCE está subordinado à autorização pelo Inmetro e/ou OCC. A autorização para o seu uso não transfere a responsabilidade da empresa autorizada.

O fabricante deverá fazer referência a ENCE no manual de instruções e/ou catálogos técnicos do produto.

3.4 FASES DO PROCESSO DE ETIQUETAGEM

Os procedimentos a seguir levam em conta os processos que deverão ser seguidos pelos fabricantes de motores elétricos para a obtenção do Selo PROCEL e conseqüentemente a liberação para a comercialização dos seus produtos no mercado brasileiro.

O processo de etiquetagem engloba 03 fases, sendo a primeira a fase de aferição interlaboratorial.

Esta fase tem o objetivo de avaliar a aplicação do método de ensaio. Serão selecionadas 03 amostras representadas pela menor potência, potência intermediária e maior potência variando o número de polos para a realização dos ensaios.

A segunda fase é a fase de medição e controle na qual o fabricante efetua as medições em suas linhas de produtos de acordo com o método previsto no RAC, visando possibilitar a apuração dos valores de rendimento e de fator de potência. Os valores declarados pelo fabricante ao Inmetro estarão sujeitos a verificação por parte do laboratório de referência.

A terceira e última fase é a fase de aprovação para o uso da etiqueta. O Inmetro, de posse das informações e dos resultados das fases anteriores, constata a conformidade do produto e autoriza o uso da ENCE através da divulgação dos produtos aprovados nas tabelas de consumo/eficiência veiculadas.

3.5 ACOMPANHAMENTO DA PRODUÇÃO

A fase de acompanhamento da produção é realizada anualmente pelo Inmetro e tem a fi-

nalidade de verificar se as características que foram aprovadas por ocasião da autorização da ENCE estão sendo controladas e mantidas e são válidas para a manutenção da utilização da ENCE e, neste caso, se estão de acordo com a legislação atual.

O Inmetro, à sua escolha, pode coletar motores no estoque do fabricante/ importador, no mercado, ou receber amostra do próprio fabricante/importador.

3.6 CONTROLE NA FÁBRICA

O controle dos valores admitidos na ENCE é executado e de responsabilidade do fabricante/importador que deverá executar o conjunto de ensaios e verificações previstos no RAC sobre os produtos inteiramente acabados e retirados por amostragem do seu processo de fabricação. A frequência desses controles e ensaios fará parte de um plano de controle e deverá ser colocado à disposição do Inmetro que também deverá ser informado sobre quaisquer modificações que vierem a ocorrer.

3.7 NORMAS TÉCNICAS APLICÁVEIS AOS MOTORES ELÉTRICOS

Para fins de autorização para a utilização da ENCE são aplicáveis as normas e documentos de propriedade da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT:

- NBR 17094-1:2008 - Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução - Parte 1: Trifásicos;

- NBR 5383-1:2002 - Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1: Motores de Indução Trifásicos – Ensaios.

3.8 MODELO DA ETIQUETA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA (ENCE)

O modelo da etiqueta nacional de conservação de energia (ENCE) atualmente utilizada nos motores elétricos de indução trifásicos rotor de gaiola de esquilo totalmente fechados com ventilação externa, em atendimento a Lei 10.295 é mostrado na figura 3.1.



- 1) PAPEL AUTO COLANTE
- 2) FUNDO BRANCO, COM DIZERES EM PRETO
- 3) MEDIDAS EM MILÍMETROS
- 4) TODAS AS LETRAS SÃO ARIAL, EXCETO AS DA PALAVRA "Inmetro" QUE INTEGRA O LOGOTIPO
- 5) PODE SER INCLUÍDA NA PRÓPRIA PLACA DE IDENTIFICAÇÃO DO MOTOR

Figura 3.1 – Modelo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE)
 FONTE: Anexo da Portaria INMETRO Nº 243 / 2009

3.9 OUTROS MODELOS DE ETIQUETAS ELABORADAS PELO INMETRO

Etiqueta de Eficiência Energética
de Lâmpadas

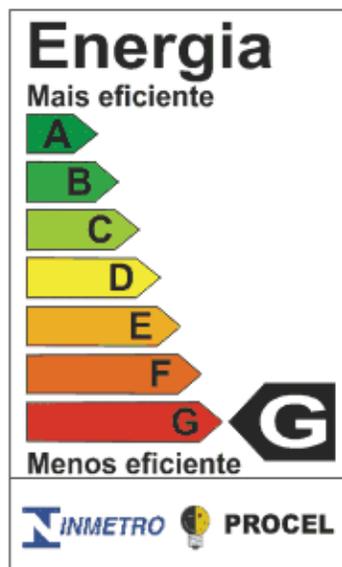


Figura 3.2 – Modelo de Etiqueta para lâmpadas

Fonte: INMETRO – Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/etiquetas.asp>. Acesso em: 13.03.2011.

Selo Procel - Instituído em
dezembro de 1993



Figura 3.3 – Selo Procel

Fonte: INMETRO – Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/etiquetas.asp>. Acesso em: 13.03.2011.

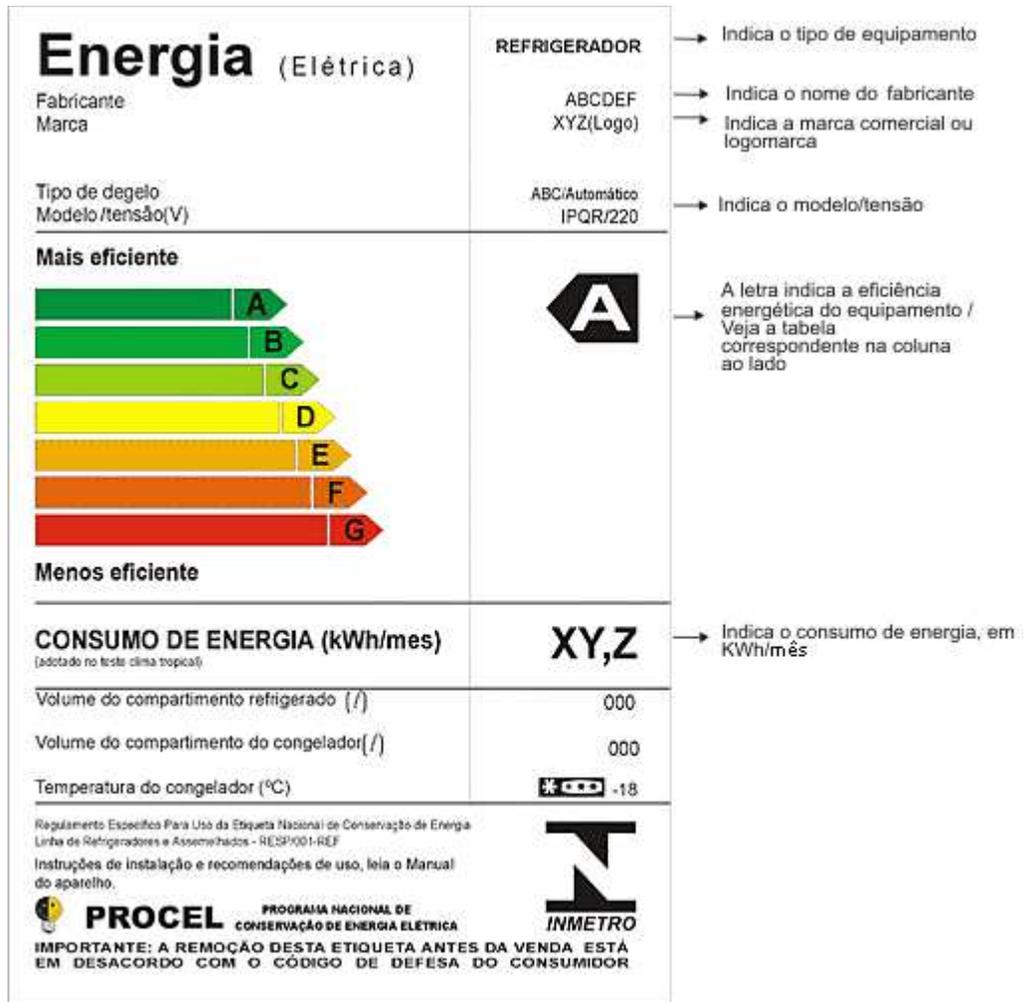


Figura 3.4 – Modelo de Etiqueta de Eficiência Energética do PBE

Fonte: INMETRO – Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/etiquetas.asp>. Acesso em: 13.03.2011.

3.10 CONTROLE NA FÁBRICA

Após a obrigatoriedade da fabricação e comercialização de motores que atendam o estabelecido na Lei 10.295 (Item 3.3.1) a partir de Dezembro de 2009, no Brasil, iniciou-se um novo processo para a continuidade na busca por eficiência nas instalações industriais como um todo, porém em caráter facultativo.

Através da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que é consignatária da ISO, o Brasil, juntamente com outros 33 países dentre eles o Canadá, a China, a Dinamarca, e França iniciou-se um processo para a discussão e elaboração de uma nova Norma que promove-se o aumento da eficiência energética e o uso consciente de energia nas instalações industriais.

O objetivo dessa nova Norma, a ISO 50001, é proporcionar que as próprias organizações venham a tomar medidas, independentes de ações governamentais, que tragam benefícios para a própria empresa e para a sociedade, bem como trazer às organizações estratégias e técnicas de eficiência energética, de redução de custos e de melhoria do desempenho ambiental.

A ISO 50001 será utilizada como ferramenta para integrar a medição de desempenho em um sistema de gestão, promover o aumento da eficiência energética e o uso consciente de energia.

Espera-se que a implantação dessa Norma leve a reduções nos custos de energia, emissões de GEE (Gás de Efeito Estufa) e outros impactos ambientais, através da gestão sistemática de energia nas indústrias.

No Brasil a Norma ISO 50001 teve sua primeira edição em 15.06.2011 e validação a partir de 15.07.2011.

No que tange a motores elétricos, níveis de rendimento mais elevados deverão ser exigidos por parte dos consumidores envolvidos com os processos de gestão de energia, acarretar a médio e longo prazo, a necessidade de reavaliação dos valores mínimos estabelecidos na Lei 10.295, bem como acirrar a disputa por pesquisa e desenvolvimento no setor de máquinas e equipamentos elétricos.

A seguir está apresentado o modelo do sistema de gestão da energia proposto pela ISO 50001 que deverá nortear os futuros empreendimentos de eficiência energética nas indústrias brasileiras.

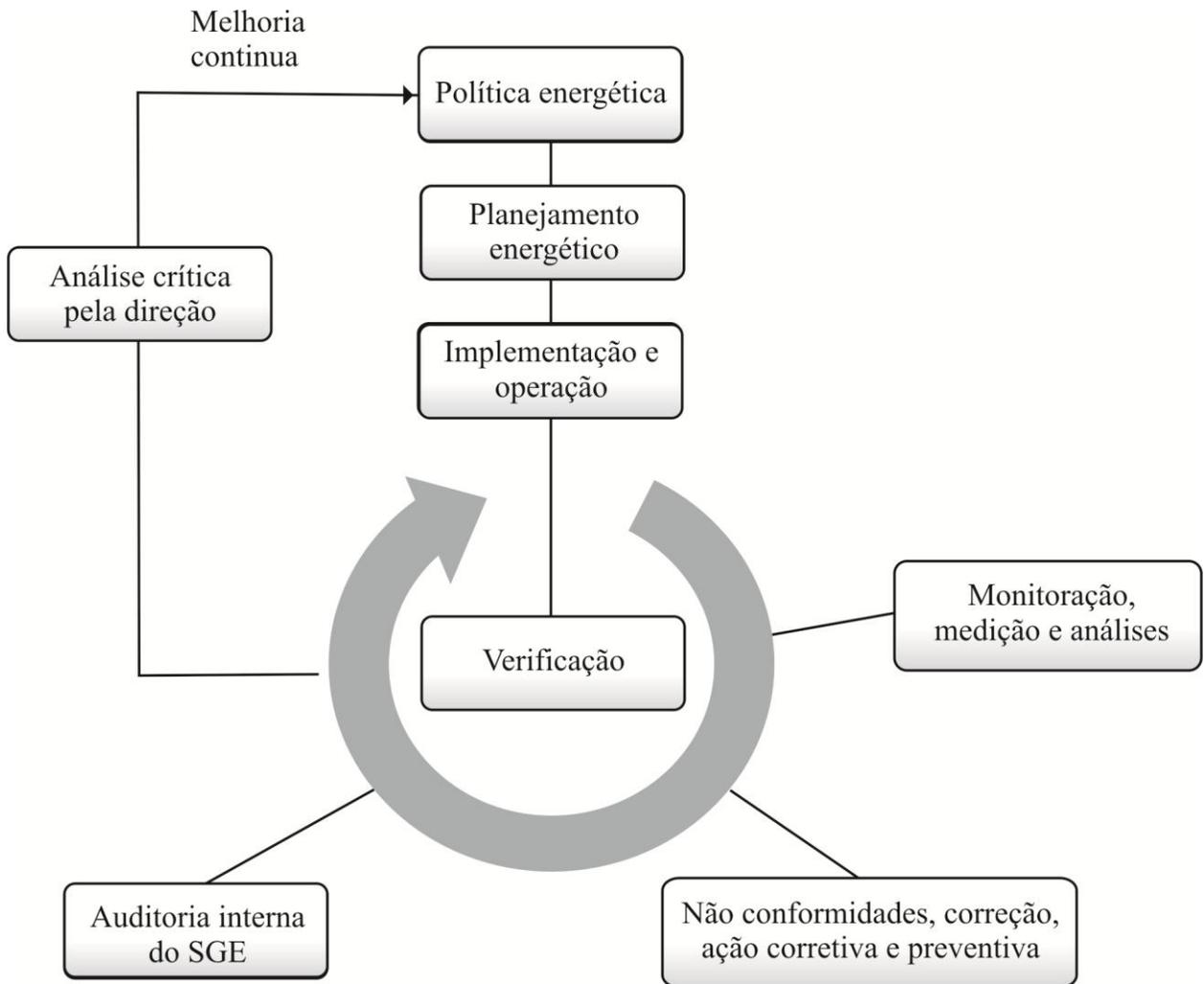


Figura 3.5 – ISO 50001 - Modelo do Sistema de Gestão da Energia
Fonte: ABNT NBR ISO 50001 – 1ª Ed. 15.06.2011

4 A HISTÓRIA DO MOTOR ELÉTRICO

A descoberta do Eletromagnetismo foi feita pelo físico dinamarquês Hanz Cristian Oersted que, de maneira casual verificou, em 1820, que a agulha magnética de uma bússola era desviada de sua posição norte-sul quando aproximada de um condutor por onde circulava uma corrente elétrica. E, tão logo o condutor era afastado ou desligado, a agulha magnética voltava à sua posição original.

Oersted reconheceu, a partir daí, a íntima relação entre o magnetismo e a eletricidade, mas não imaginava que estava dando o primeiro passo em direção à fabricação do motor elétrico.

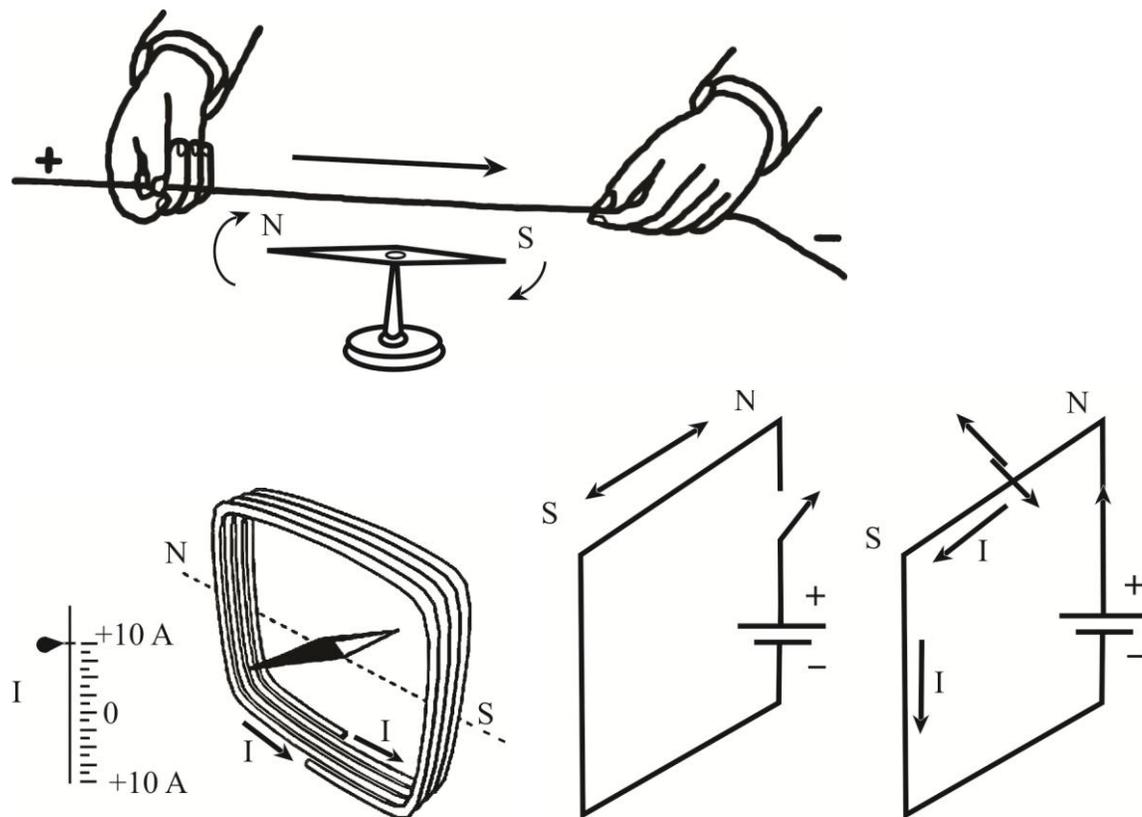


Figura 4.1 – Experiência de Hanz Cristian Oersted

Em seguida, houve a contribuição do físico francês André Marie Ampère, que em 1821 analisou e completou a experiência de Oersted e estabeleceu, entre outras, a “Regra da Mão direita”, em função da orientação de uma agulha imantada no sentido da corrente.

Porém, o maior salto em direção ao motor elétrico dependeria basicamente das experiências de outros dois ingleses, William Sturgeon e Michael Faraday.

A descoberta de Oersted de que um condutor elétrico com carga está envolto por um campo magnético logo chegaria aos ouvidos do sapateiro Sturgeon, que estudava os fenômenos elétricos nas horas vagas. Em 1825, constata que um núcleo de ferro, dentro de um condutor elétrico, se transformava num ímã ao ser aplicado uma corrente elétrica. Com isso, o sapateiro-cientista inventa o eletroímã, que alguns anos mais tarde seriam de fundamental importância na construção de máquinas elétricas gigantes.

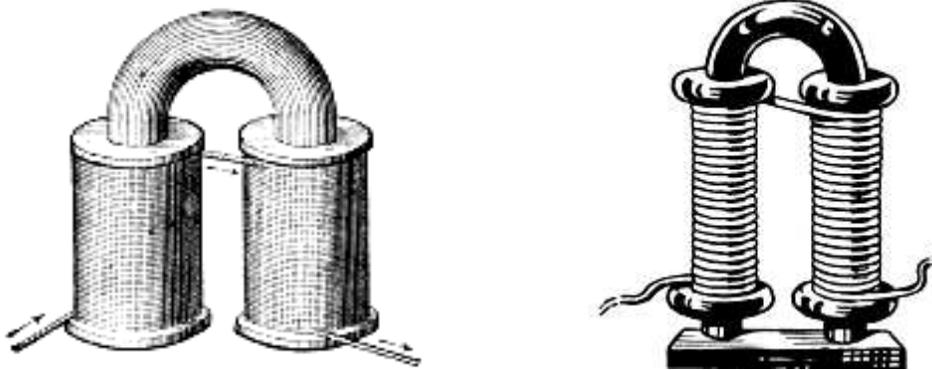


Figura 4.2 – O Eletroímã de William Sturgeon

Durante a década de 1830, as primeiras máquinas elétricas gigantes começaram a ser desenvolvidas. O inglês W. Ritchie foi o responsável pela invenção de uma peça chave, o comutador, elemento capaz de modificar a polaridade do eletroímã a cada meia volta para a rotação completa de um motor. Assim, através do comutador, a corrente de excitação passava a ser alternada. Como resultado, a tensão alternada das bobinas era transformada pelo comutador em uma tensão contínua pulsante.

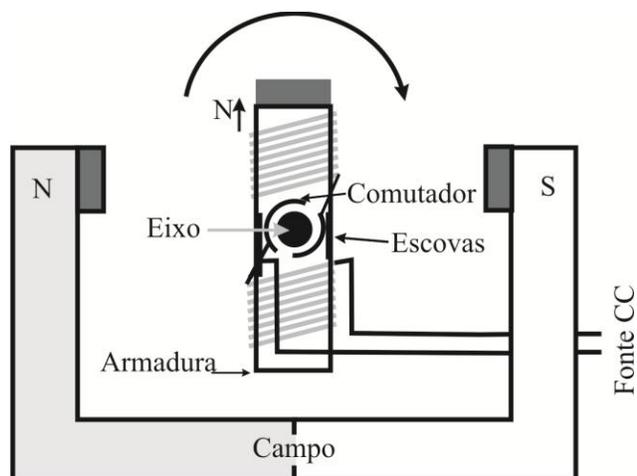
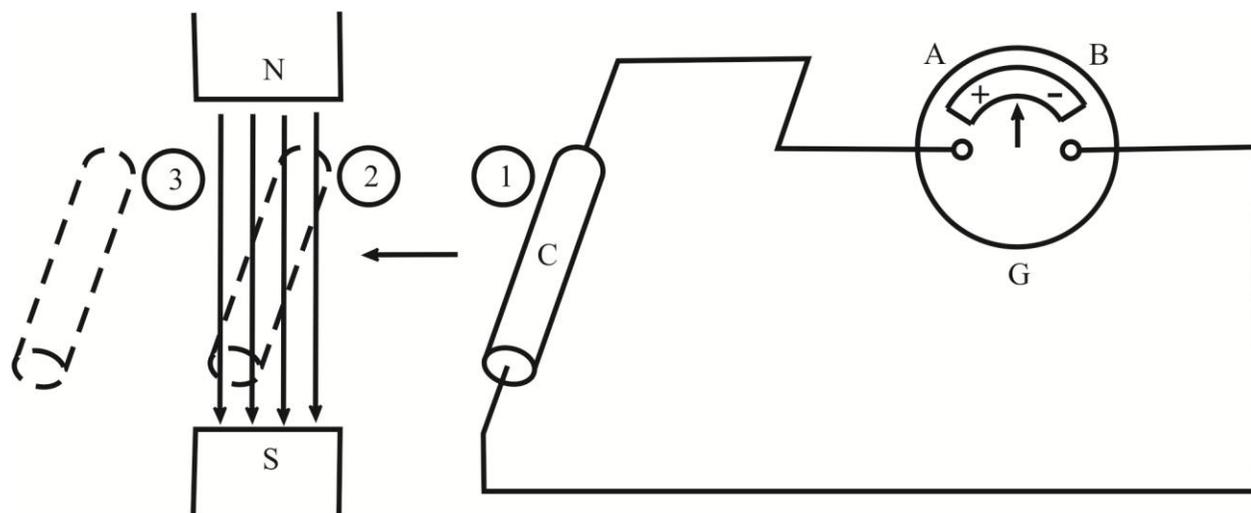


Figura 4.3 – Esquema do Comutador de W. Ritchie

A partir dos resultados das experiências de Oersted e Sturgeon, Michael Faraday em 28 de agosto de 1831 descobre, finalmente, a indução eletromagnética, constatando que, com o movimento de um condutor de cobre em um campo magnético, uma tensão elétrica é induzida em seus terminais e comprova, experimentalmente, a relação entre o magnetismo e a eletricidade, pressuposta há mais de uma década.



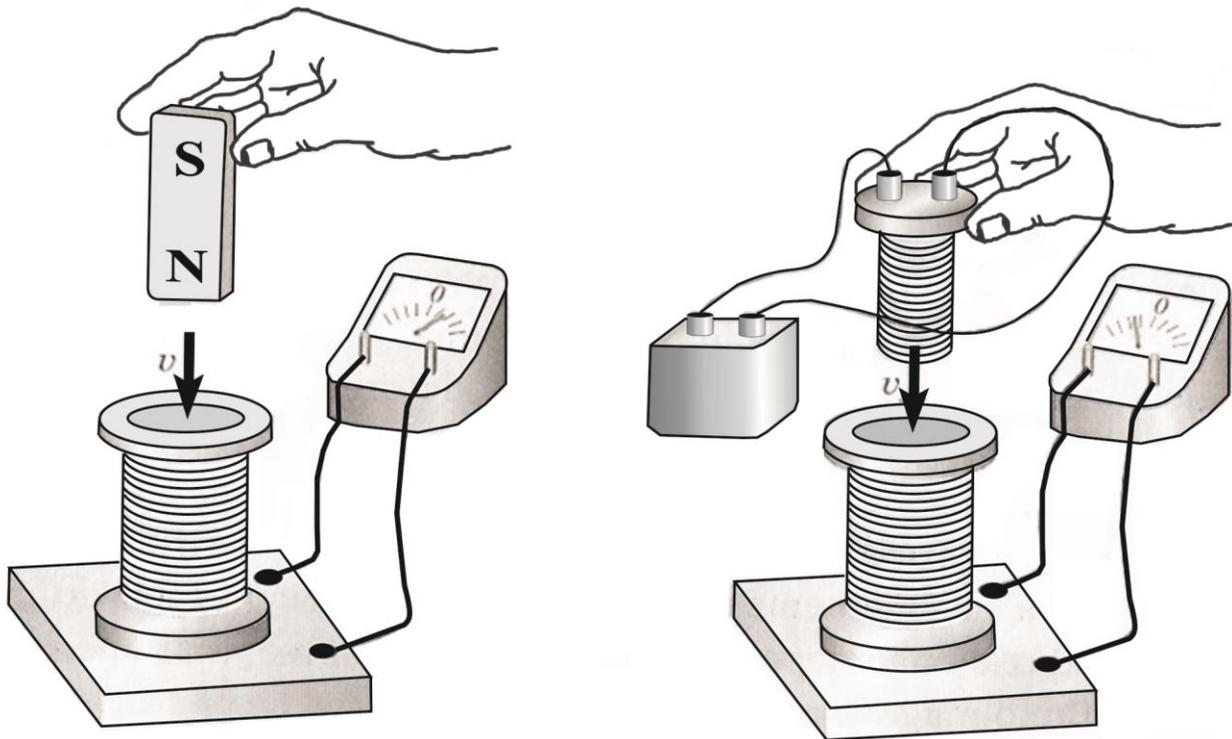


Figura 4.4 – Exemplos do modelo de Michael Faraday para a descoberta da Indução Eletromagnética

Com a descoberta da lei de indução, Faraday enuncia os princípios sobre os quais toda a eletrotécnica se basearia a partir de então. Apesar das diferenças entre o seu pequeno gerador em relação aos atuais, o modo de funcionamento através da indução eletromagnética permanece o mesmo.

Em maio de 1856, Werner Von Siemens descreve, em carta enviada a um irmão, o sucesso obtido com o primeiro gerador de tensão elétrica baseado no princípio de indução de Faraday. Uma década mais tarde, consegue construir um dínamo através do qual prova que a tensão necessária para o magnetismo poderia ser retirada do próprio enrolamento do rotor, ou seja, a máquina poderia auto excitar-se.

A partir do estabelecimento do princípio do gerador elétrico de Siemens em 1866 a humanidade passa então a contar com um dínamo de corrente elétrica de alta tensão a preços módicos. Este dínamo, porém, não funcionava apenas como gerador de eletricidade, podendo também ser operado como motor. Por exemplo, quando era acionado por uma roda d'água fornecia energia elétrica, quando era alimentado com energia elétrica, funcionava como motor. Não demorou muito para que os velhos cata-ventos fossem definitivamente substituídos e a força animal parecesse obsoleta.

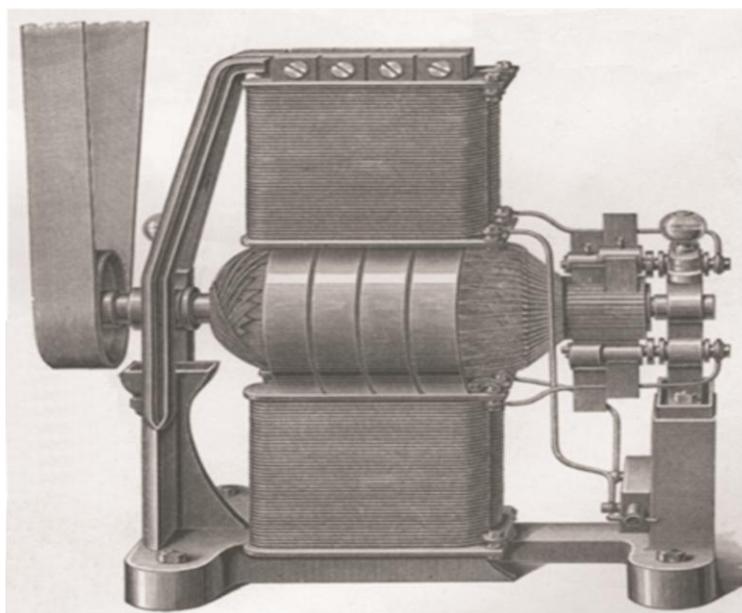


Figura 4.5 – O Gerador descrito por Werner Von Siemens

Em 1879, a empresa Siemens & Halske apresentou na feira industrial de Berlin a primeira locomotiva, acionada por um motor elétrico de 02 quilowatts. Dois anos depois começava a trafegar o primeiro bonde elétrico, transformando assim a vida da população.

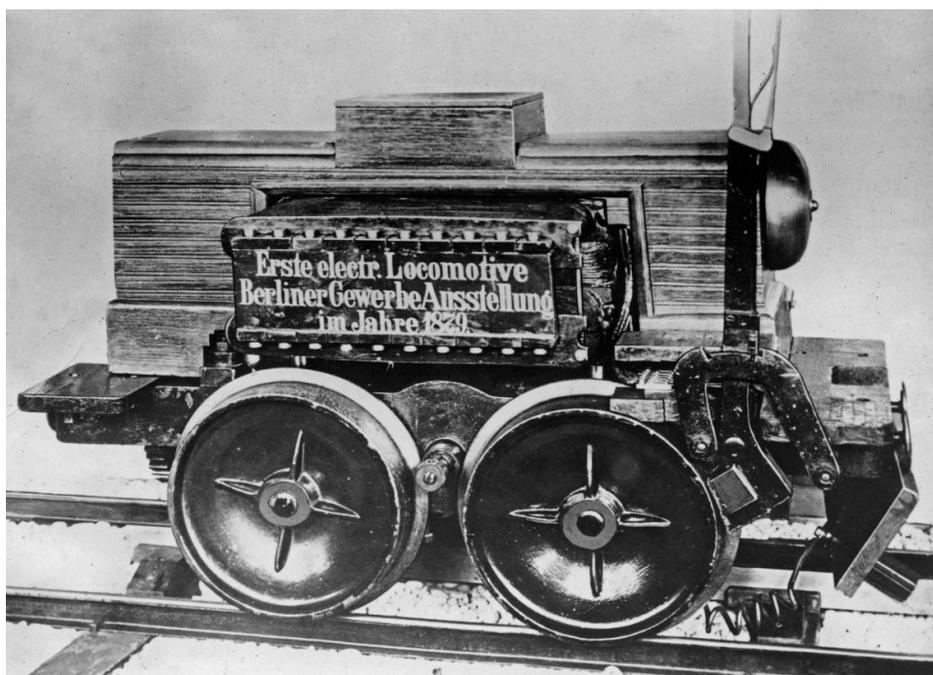


Figura 4.6 – A primeira locomotiva da empresa Siemens & Halske

Os primeiros motores de corrente contínua, naturalmente, tinham limitações. Seu alto custo de fabricação e sua escassa confiabilidade em serviço, devido o complicado dispositivo comutador, dirigiram atenções dos cientistas para o desenvolvimento de um equipamento mais barato, robusto e resistente. Sabe-se que quatro pesquisadores, trabalhando isoladamente, buscavam o mesmo objetivo: O italiano Galileu Ferraris, o iugoslavo Nicolau Tesla, o alemão Friedrich Haselwander e o russo radicado na Alemanha Michael Von Dolivo-Dobrowolsky.

Eles cogitavam não apenas o aperfeiçoamento da máquina de corrente contínua, mas, também o emprego do sistema de corrente alternada, cujas vantagens nas transmissões de energia a longa distâncias tornaram-se conhecidas em 1881.

Durante a década de 1880, as novidades começam a surgir, Ferraris constrói um motor de corrente alternada de duas fases com um cilindro de cobre como rotor, no entanto, apesar de ter inventado o motor de campo girante, o italiano equivocou-se ao concluir que as máquinas construídas segundo esse princípio poderiam fornecer uma potência mecânica máxima de 50% em relação à potência elétrica consumida. Tal defasagem tornaria inviável qualquer tipo de motor baseado nesse princípio.

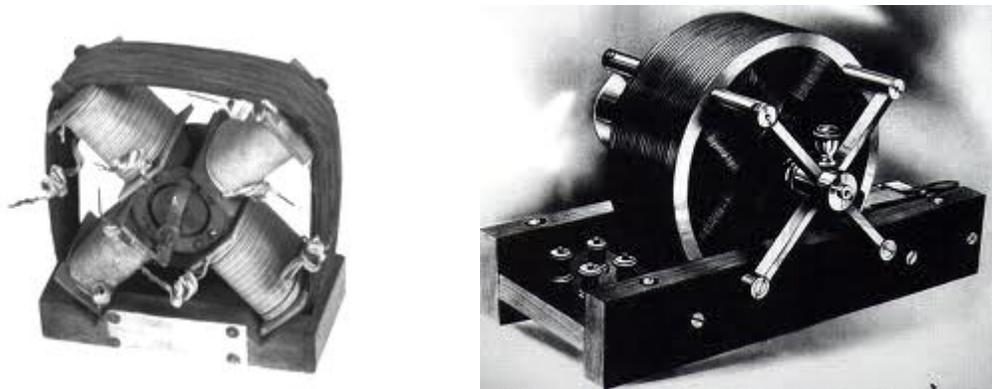


Figura 4.7 – O Motor elétrico de Galileu Ferraris

Tesla, por sua vez, estava ocupado desde 1882 com a pesquisa de sistemas de transmissão de energia elétrica sem o emprego de comutadores, que resultou cinco anos depois num pequeno protótipo de motor de indução de duas fases. Embora não apresentasse um rendimento satisfatório em relação à potência consumida, a empresa Westinghouse apostou nada menos que um milhão de dólares na invenção de Tesla, que concede o privilégio de patente aos americanos.

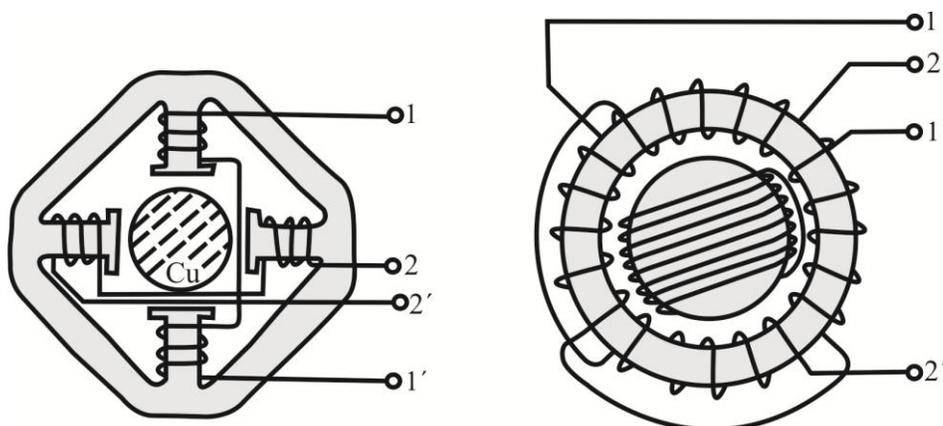


Figura 4.8 – Os Motores elétricos de Galileu Ferraris e de Nicolau Tesla

Sua viabilidade econômica não se verifica e, em 1890, todas as pesquisas em torno de seu sistema parecem estar suspensas, menos as de Dobrowolsky, construtor chefe na AEG (Allgemeine Elektrizi täts Gesellschaft) berlinense que abraçou a causa do motor alimentado por corrente alternada.

Graças a sua persistência, ainda em março de 1889, registra a patente de um motor trifásico cuja potência contínua se situa em torno de 80 watts e o rendimento em cerca de 80%. Além disso, apresentava uma ótima partida, era mais silencioso, mais simples, de alta resistência, exigia pouca manutenção e era bastante seguro em operação.

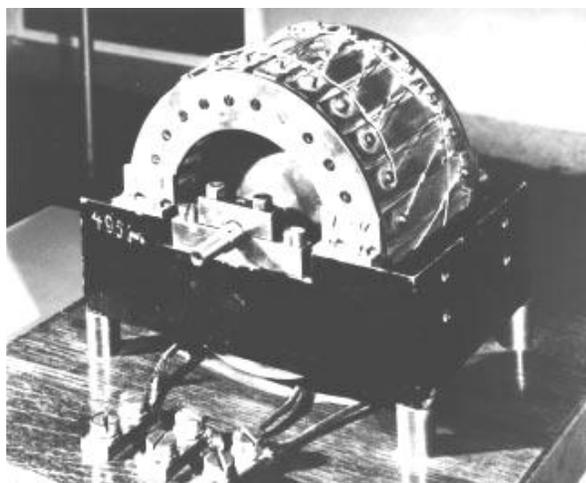


Figura 4.9 – O primeiro Motor elétrico de Michael Von Dolivo-Dobrowolsky

Em suma, Dobrowolsky acabara de criar a máquina ideal para o acionamento de indústrias e oficinas, cujo modelo de funcionamento original é utilizado até os dias de hoje. [17]

5 MÁQUINAS ELÉTRICAS

5.1 INTRODUÇÃO

Noções fundamentais de eletromagnetismo, aspectos construtivos das máquinas de indução, princípio de funcionamento e os circuitos equivalentes dos motores elétricos são de extrema importância para o entendimento do tema abordado nessa dissertação. Os itens a seguir nos mostra, de maneira bastante didática, alguns parâmetros básicos para o entendimento da disciplina de máquinas elétricas.

Este capítulo busca esclarecer esses pontos com suas contribuições.

5.2 CARGA ELÉTRICA

Sabemos que uma carga elétrica (Q) produz ao seu redor um campo elétrico (E). Se submetemos essa carga elétrica a um movimento e se considerarmos que uma carga elétrica em movimento seja uma corrente elétrica, podemos afirmar que a corrente elétrica produzida por esse movimento produzirá ao redor da carga um campo magnético (H).

Assim, podemos concluir que uma carga elétrica em movimento produz ao seu redor dois campos: o Campo elétrico (E), intrínseco a carga, e o campo Magnético ou intensidade de campo magnético (H), que é produzido pelo fato da carga estar em movimento.

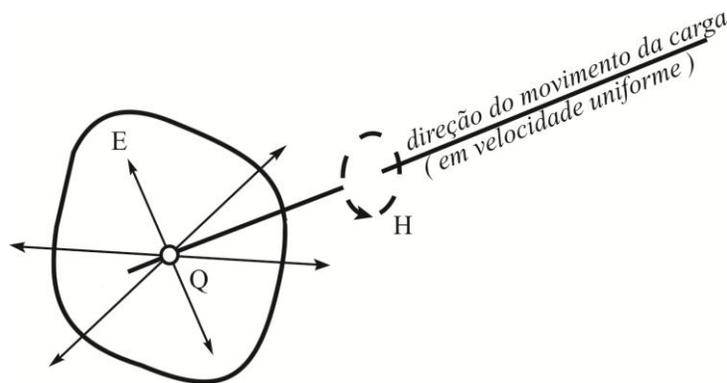


Figura 5.1 – A relação entre a carga elétrica e o Campo Magnético

5.3 INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO

Definimos intensidade de campo elétrico como um vetor força numa unidade de carga positiva. Se considerarmos uma carga em posição fixa, por exemplo, Q_1 e movermos uma segunda carga lentamente em torno da primeira, verificaremos a existência de uma força agindo sobre a segunda carga, evidenciando assim a existência de um campo de força.

Se chamarmos essa segunda força de carga de prova Q_p , a força que age sobre ela é dada pela Lei de Coulomb.

$$\mathbf{F}_p = \frac{Q_1 Q_p}{4\pi\epsilon_0 R_{1p}^2} \mathbf{a}_{1p}, \quad (1)$$

Escrevendo essa força como força por unidade de carga,

$$\frac{\mathbf{F}_p}{Q_p} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_{1p}^2} \mathbf{a}_{1p} \quad (2)$$

A quantidade à direita de (2) é uma função somente de Q_1 e está dirigida ao longo do segmento que vai de Q_1 até a posição da carga de teste. Isto descreve o campo vetorial e é chamado de *intensidade de campo elétrico*.

As grandezas mencionadas em (1) e (2) são definidas como:

- ϵ_0 representa uma constante elétrica (cujo valor aproximado é $8,854 \times 10^{-12}$);
- R representa a distância entre as duas cargas pontuais;
- \mathbf{a} representa o vetor que indica a direção em que aponta a força elétrica;

A unidade de medida da intensidade de campo elétrico, em unidades práticas, é Volt por Metro (V/m) e sua notação dada pela letra maiúscula \mathbf{E} .

Assim,

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_p}{Q_p} \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_{1p}^2} \mathbf{a}_{1p} \quad (4)$$

A equação (3) define a expressão para a intensidade de campo elétrico, ao passo que a equação (4) define a expressão para a intensidade de campo elétrico, em eletrostática, devido a uma só carga pontual Q_1 [18].

5.4 CIRCUITOS MAGNÉTICOS – EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS

As máquinas elétricas são constituídas por circuitos elétricos e magnéticos acoplados entre si. Por *circuito magnético* entendemos ser um caminho para o fluxo magnético, assim como um circuito elétrico estabelece um caminho para a corrente elétrica. Nas máquinas elétricas, os condutores percorridos por correntes interagem com os campos magnéticos, que podem ser originados por correntes elétricas em condutores ou provenientes de ímãs permanentes, resultando na conversão eletromecânica de energia.

Considere um condutor de comprimento ℓ colocado entre os polos de um ímã. Seja o condutor percorrido por uma corrente I , e fazendo um ângulo reto com as linhas de fluxo magnético, como mostrado nas figuras 5.2 e 5.3. Observa-se experimentalmente que o condutor sofre a ação de uma força F , cujo sentido é mostrado nas figuras 5.2 e 5.3.

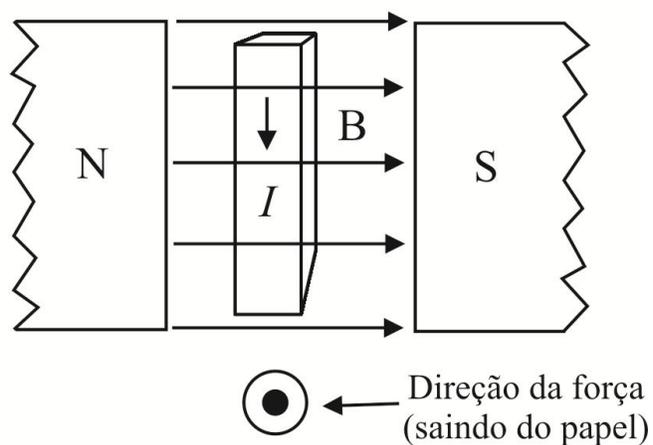


Figura 5.2 – Representação do condutor entre os polos de um ímã

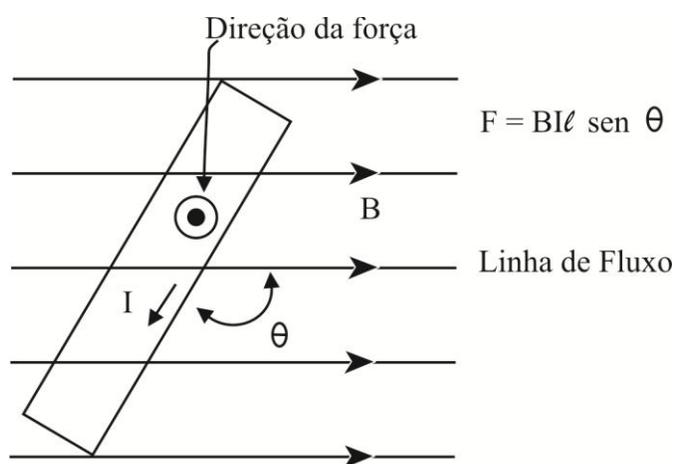


Figura 5.3 – Representação do condutor e o campo magnético

Sua magnitude dada a partir da Lei de Ampère

$$\mathbf{F} = \mathbf{BI}\ell \quad (5)$$

Nesta expressão, B é a magnitude da densidade de fluxo magnético B , cuja direção é a das linhas de fluxo. No Sistema Internacional, SI, a unidade de B é o *tesla* (T).

É importante destacar que a Lei de Ampère, estabelecendo o desenvolvimento de força, ou de conjugado, é a razão fundamental da operação dos motores elétricos.

O fluxo magnético, ϕ , através de certa superfície, que pode ser aberta ou fechada, é o fluxo de \mathbf{B} através dessa superfície, isto é,

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS \quad (6)$$

onde \mathbf{n} é o vetor normal unitário para fora da área elementar dS da superfície, como mostra a figura 5.4.

No caso de \mathbf{B} ser constante em magnitude e, em qualquer lugar, ser perpendicular à superfície de área A , a equação (6) acima se reduz para

$$\phi = \mathbf{B}A \quad (7)$$

da qual,

$$\mathbf{B} = \frac{\phi}{A} \quad (8)$$

A unidade no SI de fluxo magnético é o *weber* (Wb).

Podemos observar que, na equação (8), \mathbf{B} pode ser expresso em Wb/m², assim, 1T=1Wb/m²

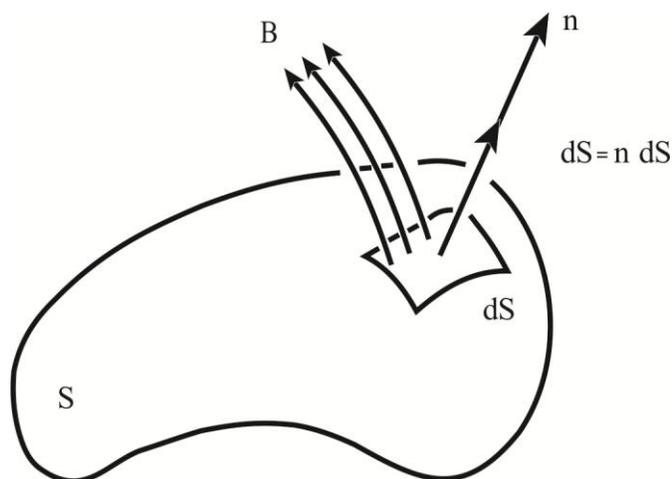


Figura 5.4 – Representação do vetor normal unitário n

A relação entre uma corrente elétrica e um campo magnético estático é dada pela *lei circuital de Ampère*, sendo umas das formas

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (9)$$

Supomos campos que não variam com o tempo, onde \mathbf{H} é definido como *intensidade de campo magnético estático* (em A/m) devido a corrente I . De acordo com a equação (9), a integral da componente tangencial de \mathbf{H} ao longo do caminho fechado é igual à corrente envolvida pelo caminho. Quando o caminho fechado é atravessado pela corrente N vezes, como mostrada na figura 5.4, a equação (9) torna-se

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = NI = \mathcal{F} \quad (10)$$

na qual \mathcal{F} (ou NI) é conhecida como *força magnetomotriz* (fmm).

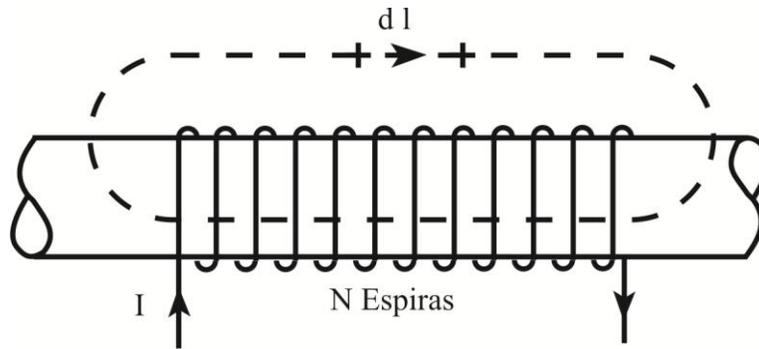


Figura 5.5 – Representação de um condutor envolto por N espiras

A *força magnetomotriz* (fmm) possui a mesma unidade que a corrente elétrica I (Ampères), porém é convencional que a unidade de \mathcal{F} seja dada em ampères espiras ($A \ell$), isto é, consideramos N possuindo uma unidade adimensional, a espira [19].

De maneira bem simplificada, podemos explicar o conceito dos fenômenos magnéticos pelas ações resultantes das forças entre cargas elétricas em movimento.

A seguir buscamos demonstrar de maneira simplificada os principais conceitos magnéticos.

5.5 EQUAÇÃO DA FORÇA ELETROMOTRIZ - FEM

Considere um condutor girando a n rpm, num campo de p polos, tendo um fluxo ϕ por polos. O fluxo total cortado pelo condutor em n revoluções é $p\phi n$. Conseqüentemente, o corte de fluxo magnético por segundo, dando a tensão induzida e , é:

$$e = \frac{p\phi n}{60} \text{ (V)} \quad (11)$$

Se há um total de z condutores na armadura, conectados a a caminhos paralelos, então o número efetivo de condutores em série é z/a , que produzem a tensão total E no enrolamento da armadura. Conseqüentemente, para o enrolamento inteiro, temos a seguinte equação da tensão:

$$E = \frac{p\phi n z}{60 a} = \frac{zp}{z\pi a} \phi \omega_m \text{ (V)} \quad (12)$$

onde $\omega_m = 2\pi n/60$ (rad/s). Que também pode ser escrito como

$$E = k_a \phi \omega_m \quad (13)$$

onde $k_a = zp/2\pi a$ (uma constante adimensional). Se o circuito magnético é linear, isto é, se não há saturação, então

$$\phi = k_f i_f \quad (14)$$

onde i_{fa} é a corrente de campo e k_f uma constante de proporcionalidade. Dessa forma, a equação (14) torna-se então

$$E = k_{i_f} \omega_m \quad (15)$$

onde $k \equiv k_f k_a$, é uma constante. Para um circuito magnético não linear, E versus I_f é uma curva não linear para cada velocidade [19].

5.6 EQUAÇÃO DO CONJUGADO

A potência mecânica desenvolvida pela armadura é $T_e \omega_m$, onde T_e é o conjugado ou torque (eletromagnético) e ω_m é a velocidade angular da armadura. Se este conjugado for desenvolvido enquanto a corrente da armadura for i_a , para uma tensão induzida na armadura E , então a potência da armadura será $E i_a$. Assim, desconsiderando-se quaisquer perdas na armadura, temos

$$T_e w_m = E i_a \quad (16)$$

que substituindo-se em (13), pode ser reescrita como

$$T_e = k_a \phi i_a \quad (17)$$

Esta equação é conhecida como equação do conjugado. Para um circuito magnético linear, (14) e (15) dão

$$T_e = k i_f i_a \quad (18)$$

onde $k \equiv k_f k_a$, como na equação (15). Então k pode ser chamada *constante eletromecânica de conservação de energia*.

Note que desde a equação (14) até a equação (18) letras minúsculas foram utilizadas para designar valores instantâneos, porém estas equações são igualmente válidas sob regime permanente [19].

5.7 CIRCUITOS MAGNÉTICOS - CONTEXTUALIZAÇÃO

Os conceitos e os princípios, apresentados neste capítulo até o momento, encontram-se aplicação nos estudos dos fenômenos eletromagnéticos, isto é, dos fenômenos derivados das mútuas relações entre campos magnéticos e campos elétricos sobrepostos na mesma região do espaço e, em particular, entre campos magnéticos no espaço e correntes elétricas que percorrem condutores neles imersos.

Sobre esses fenômenos é baseada a atual organização industrial da produção, transporte e utilização da energia elétrica.

A experiência experimental de Oersted mostra que, se uma bússola for colocada nas vizinhanças de um condutor por onde circula uma corrente elétrica, a agulha da bússola se alinhará

em ângulo reto ao condutor pelo qual essa corrente atravessa, ou tangente às linhas de força do campo, indicando assim a presença de uma força magnética (Figura 5.6).

Um método prático para observar o sentido do campo magnético em relação ao sentido da corrente elétrica que o produz consiste no dispositivo mostrado na Figura 5.6, a seguir.

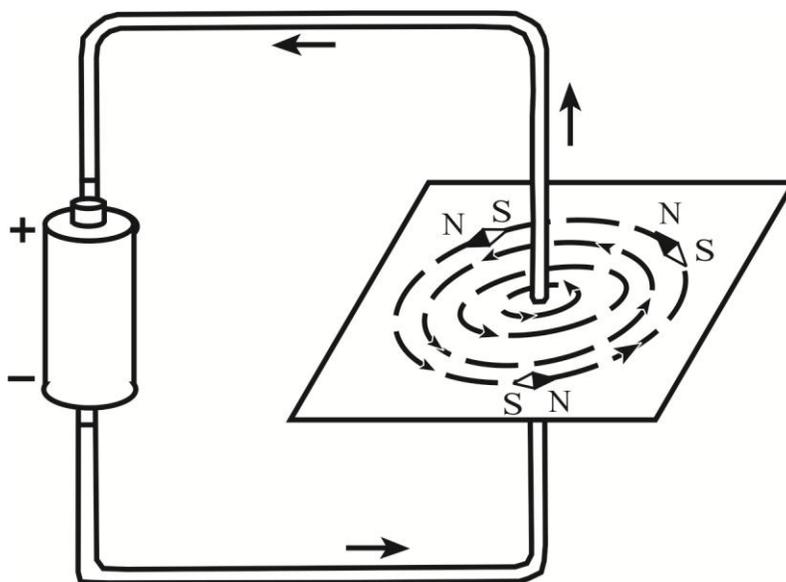


Figura 5.6 – Representação de campo magnético - Agulhas e Condutor num plano normal

Colocando sobre um plano normal (plano perpendicular, de 90°) ao condutor várias agulhas capazes de conduzir campos magnéticos, ou seja, feitas de materiais ferro-magnético, estas adquirem direção perpendicular às linhas de força “imaginárias” de ligação com o condutor. Este fato nos faz supor que as linhas de força do campo eletro-magnético, gerado pelo efeito da corrente elétrica que circula o condutor, sejam circulares. Esta mesma suposição pode ser confirmada se, ao invés de agulhas, dispusermos sobre o plano, limalhas de ferro.

O sentido do campo pode ser determinado pela regra do “saca-rolha”. Se o sentido da corrente elétrica coincidir com o sentido da penetração do saca-rolha, o sentido de rotação indica o sentido das linhas de força do campo.

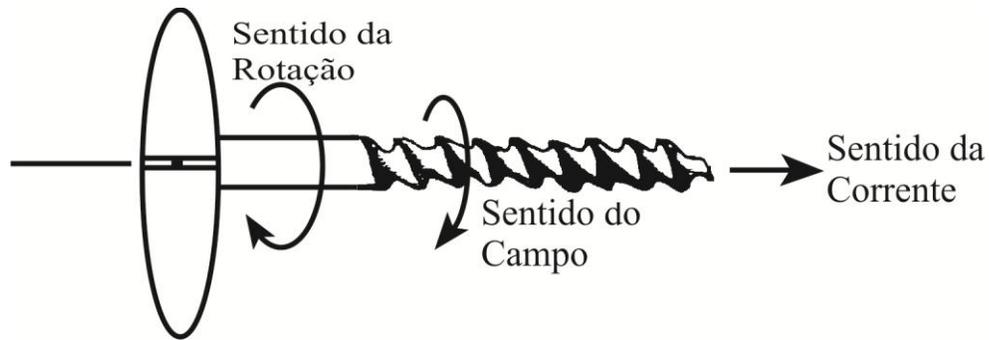


Figura 5.7 – Representação da regra do “saca-rolhas”

Outra maneira muito comum de se expressar o sentido do campo magnético é o conhecido como “regra da mão direita”. Se o dedo polegar indicar o sentido da corrente elétrica, os demais dedos indicam o sentido do campo.

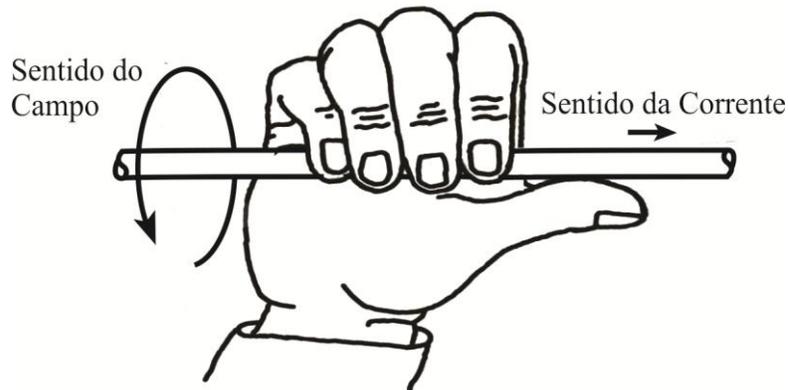


Figura 5.8 – Representação da regra da “mão direita”

A fim de melhor compreendermos o sentido do campo magnético, convencionou-se que se a corrente elétrica for representada por uma flecha e se a mesma estiver “entrando” perpendicularmente ao plano desta folha, a cauda da flecha será representada por um “X”, e se a corrente elétrica estiver “saindo” da folha, a ponta da flecha será representada por um ponto.

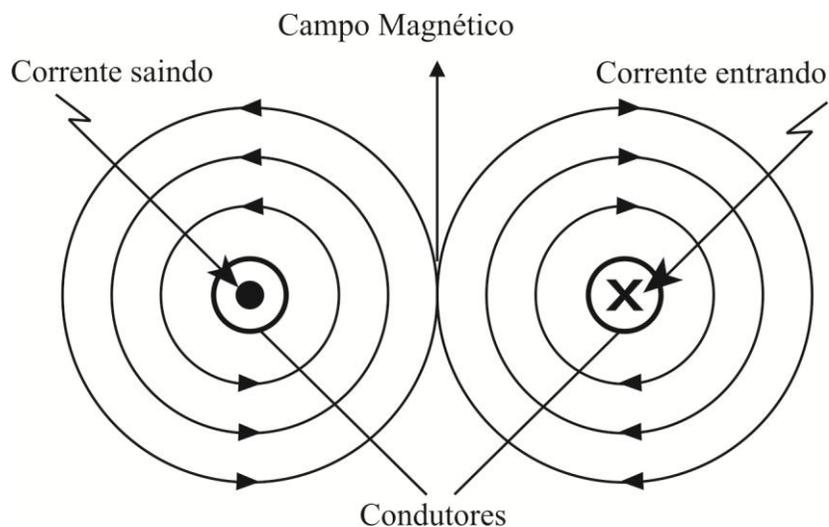


Figura 5.9 – Representação do sentido do campo eletromagnético

Quando dois condutores paralelos conduzem corrente no mesmo sentido, os campos magnéticos que se estabelecem tendem a envolver ambos os condutores, forçando a união dos mesmos.

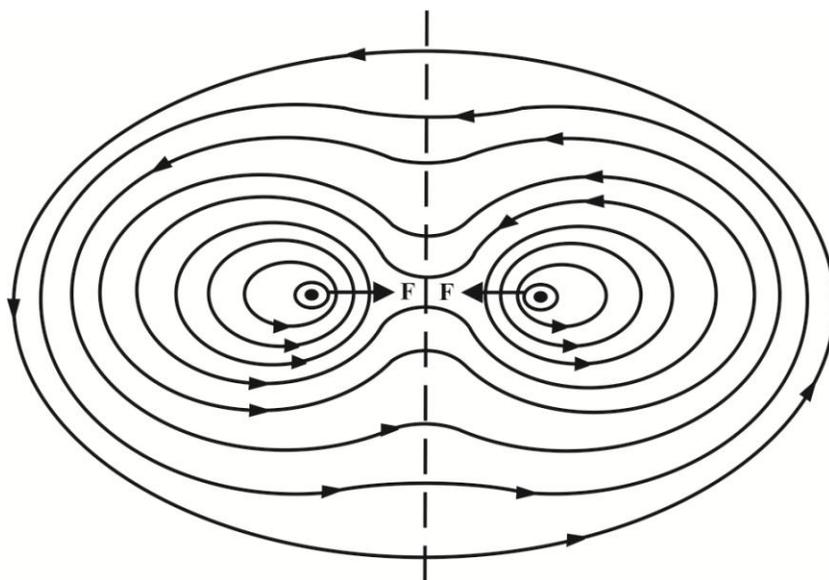


Figura 5.10 – Representação do sentido do campo eletromagnético em torno de dois condutores paralelos onde a corrente flui no mesmo sentido

Se dois condutores paralelos forem atravessados por correntes em sentido oposto, os campos magnéticos ao redor dos mesmos possuirão sentidos também opostos um do outro. As linhas de força resultante dessa interação tendem a separar os condutores.

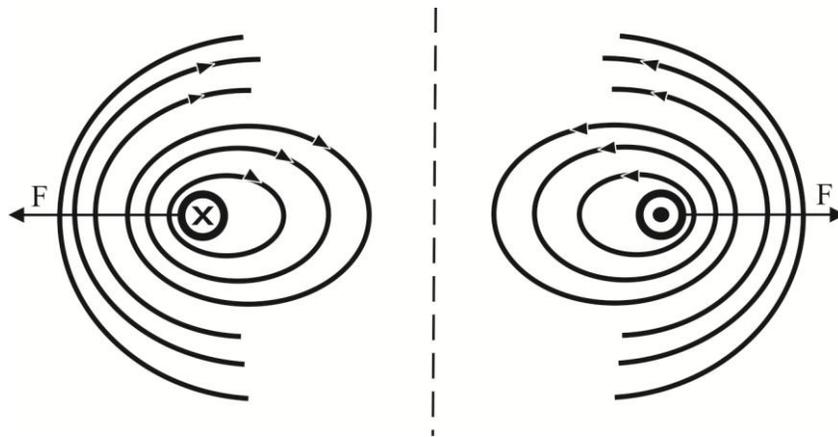


Figura 5.11 – Representação do sentido do campo eletromagnético em torno de dois condutores paralelos onde a corrente flui em sentidos opostos

Imaginemos agora que curvamos o condutor percorrido pela corrente elétrica até formarmos uma espira. É de fácil compreensão qual será a distribuição das linhas de campo magnético produzido se considerar cada elemento infinitesimal do condutor da espira como sendo retilíneo, e ao qual podem ser aplicados diretamente os princípios antes mencionados.

Aplicando-se quaisquer das regras anteriormente descritas, podemos observar que as mesmas ações magnéticas são igualmente dirigidas para cima em todos os pontos internos da espira. No interior da mesma, sendo as ações magnéticas consoantes, seus efeitos tendem a somar-se.

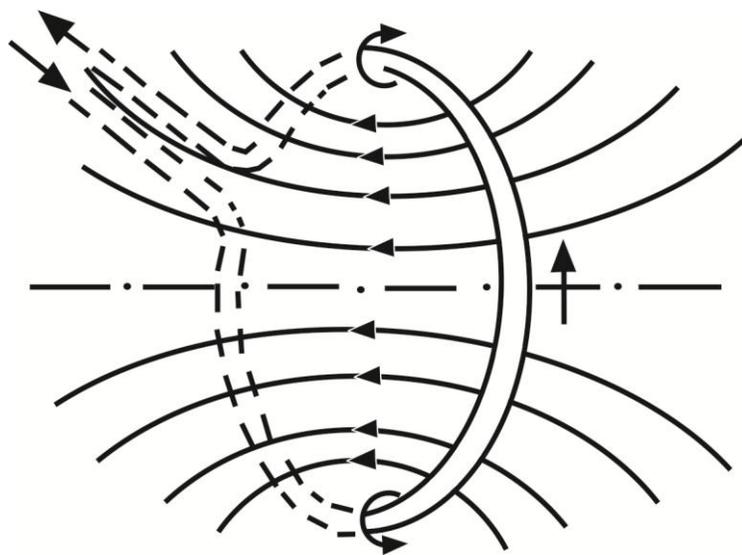


Figura 5.12 – Representação do sentido do campo eletromagnético em torno de uma espira

Tomaremos agora um determinado número de espiras, da maneira como descrito anteriormente, enroladas num núcleo de ferro laminado. A essa configuração damos o nome de solenoide.

O campo magnético de cada espira do fio se une com os campos das espiras adjacentes. A influência combinada de todas as espiras produz um campo bipolar semelhante àquele de uma barra de imã simples. Uma extremidade será pólo Norte e a outra, pólo Sul, em outras palavras, a somatória do campo magnético dos diversos condutores se somam e o conjunto se comporta como um verdadeiro imã.

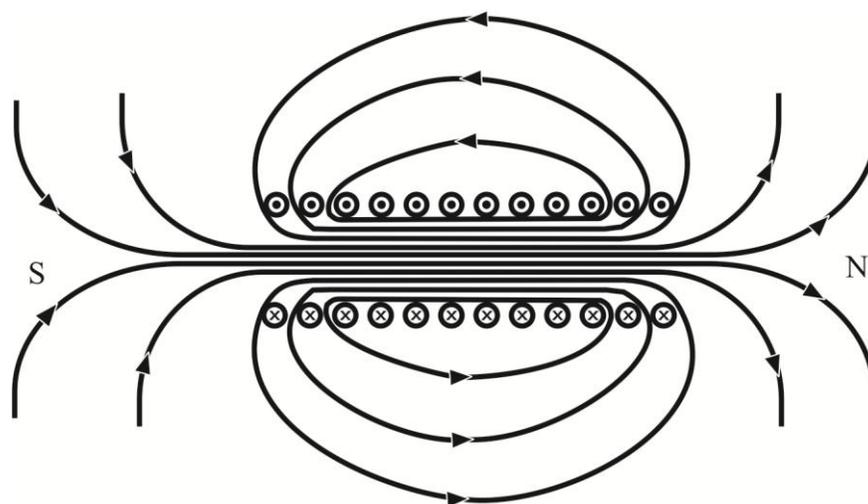


Figura 5.13 – Representação do campo magnético produzido por um solenoide

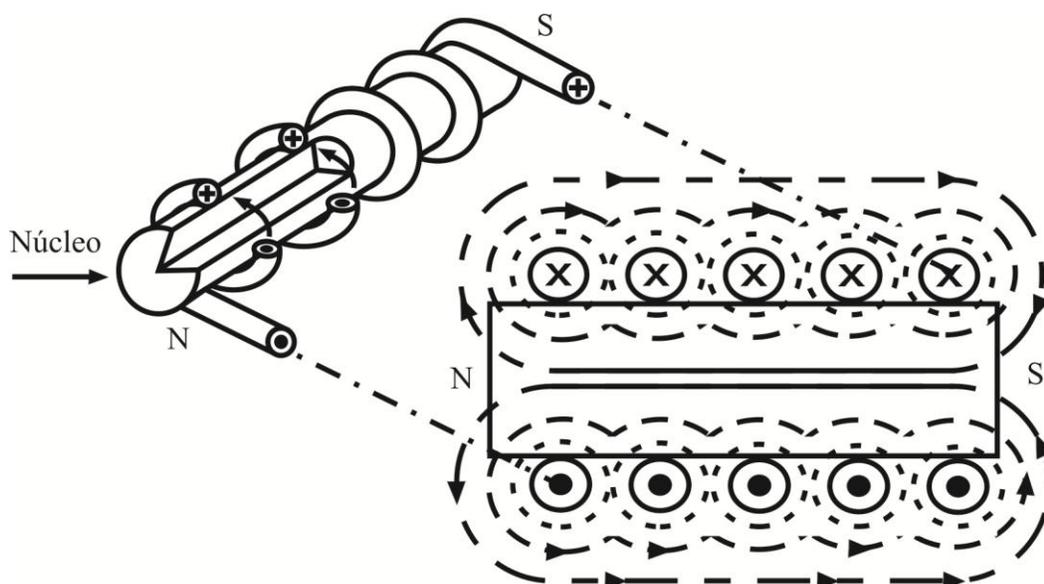


Figura 5.14 – Representação do campo magnético produzido pela corrente em um solenoide

Diante do exposto, podemos afirmar que o sentido do campo magnético em torno de um condutor reto depende do sentido da corrente que atravessa esse condutor. Uma inversão no sentido da corrente no condutor causará também uma inversão no sentido do campo magnético que é por ela produzido. Portanto, se for invertido o campo de cada espira conclui-se que o campo total (campo da bobina) também será invertido.

Quando for conhecido o sentido da corrente que atravessa uma bobina, sua polaridade também poderá ser determinada, haja vista os fundamentos apresentados pela regra da “mão direita”.

Utilizando esses princípios básicos foram desenvolvidos, no passado, muitos tipos de motores elétricos.

É importante destacar que todas as máquinas elétricas rotativas são baseadas nas ações de dois campos magnéticos colocados em posições convenientes.

Imaginem agora, um condutor sendo percorrido por uma corrente elétrica imerso em um campo magnético, por exemplo, de um ímã. Para melhor entendimento, consideraremos os campos isolados, Figura 5.15.

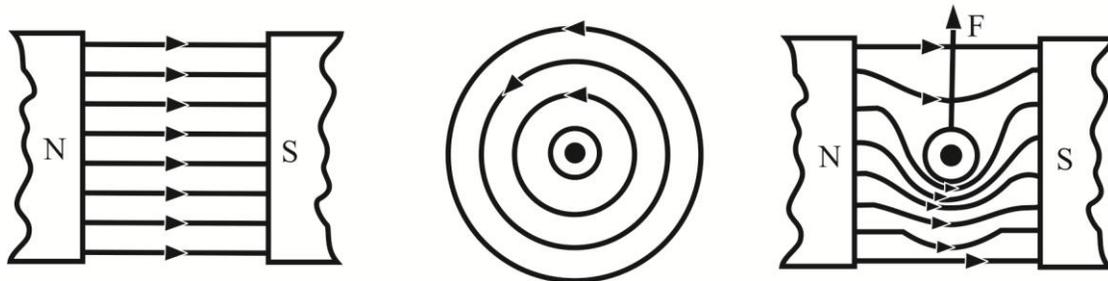


Figura 5.15 – Representação da Força (F), sobre um condutor que transporta corrente dentro de um campo magnético

A figura nos mostra primeiramente o campo magnético de um ímã, em seguida o campo magnético de um condutor considerando que a corrente esteja saindo do plano da figura. O condutor sob a ação dos campos tende a ser lançado para cima, na direção indicada por F, como se as linhas de campo do ímã se comportassem como um elástico, empurrando-o nessa direção.

A causa envolvida não é necessariamente o movimento do condutor resultante de uma força mecânica, mas a variação do fluxo concatenado. O efeito envolvido é uma corrente (devido à força eletromotriz induzida) cujo campo se opõe à causa. Assim, em todos os casos de indução

eletromagnética, sempre ocorre uma variação no fluxo concatenado, uma tensão é induzida, a qual tende a estabelecer uma corrente numa direção tal que produza um campo em oposição à variação do fluxo que concatena as espiras do circuito.

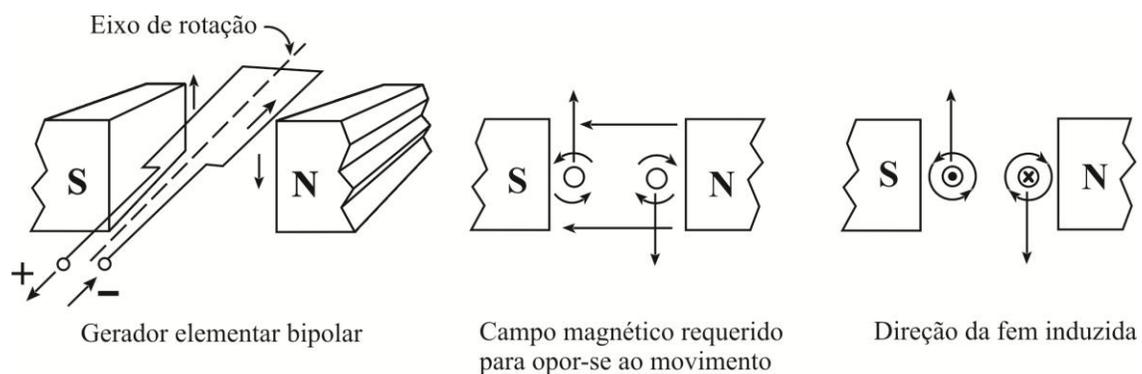


Figura 5.16 – Representação da força e da Rotação, sobre uma espira que transporta corrente dentro de um campo magnético

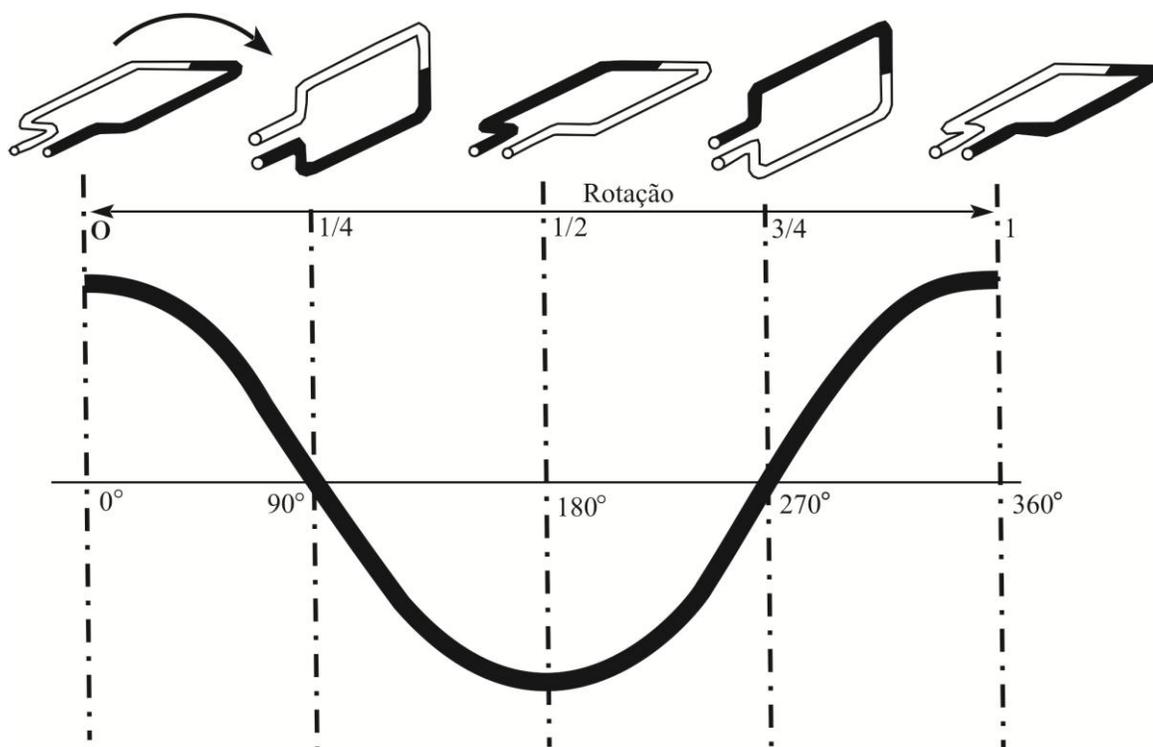


Figura 5.17 – Representação da Rotação da espira com relação a Força Eletromotriz Induzida

A partir desse ponto, temos conhecimento acerca dos elementos fundamentais que regem o funcionamento de todas as máquinas elétricas de indução conhecidas e, portanto condições de entendermos de maneira adequada os princípios elementares de construção das mesmas.

5.8 CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA

A máquina de Corrente Contínua (CC) possui uma armadura rotativa um campo estacionário. A figura 5.18 a seguir, nos mostram um corte de uma máquina CC comercial típica, simplificada e procura dar ênfase as suas partes principais.

O ROTOR consiste de Eixo da Armadura, que imprime rotação ao núcleo da armadura, enrolamentos e comutador.

Conectado mecanicamente ao eixo temos o Núcleo da Armadura, construído de camadas laminadas de aço, provendo uma faixa de baixa relutância magnética entre os polos. As lâminas servem para reduzir as correntes parasitas no núcleo, e o aço usado é de alta qualidade a fim de produzir uma baixa perda por histerese. O núcleo contém ranhuras axiais na sua periferia para colocação do Enrolamento da Armadura, colocada nas ranhuras e eletricamente ligadas ao Comutador, o qual devido à rotação do eixo providencia o necessário chaveamento para o processo de comutação. O comutador consiste de segmentos de cobre, individualmente isolados entre si e do eixo, eletricamente conectados às bobinas do enrolamento da armadura.

O rotor da armadura das máquinas CC tem quatro funções principais:

- 1 – Permitir a rotação para a ação geradora ou ação motora mecânica;
- 2 – Produzir ação de chaveamento necessária para a comutação, em virtude da rotação;
- 3 – Conter os condutores que induzem a tensão ou providenciam um torque eletromagnético;
- 4 – Providenciar uma faixa de baixa relutância para o fluxo eletromagnético.

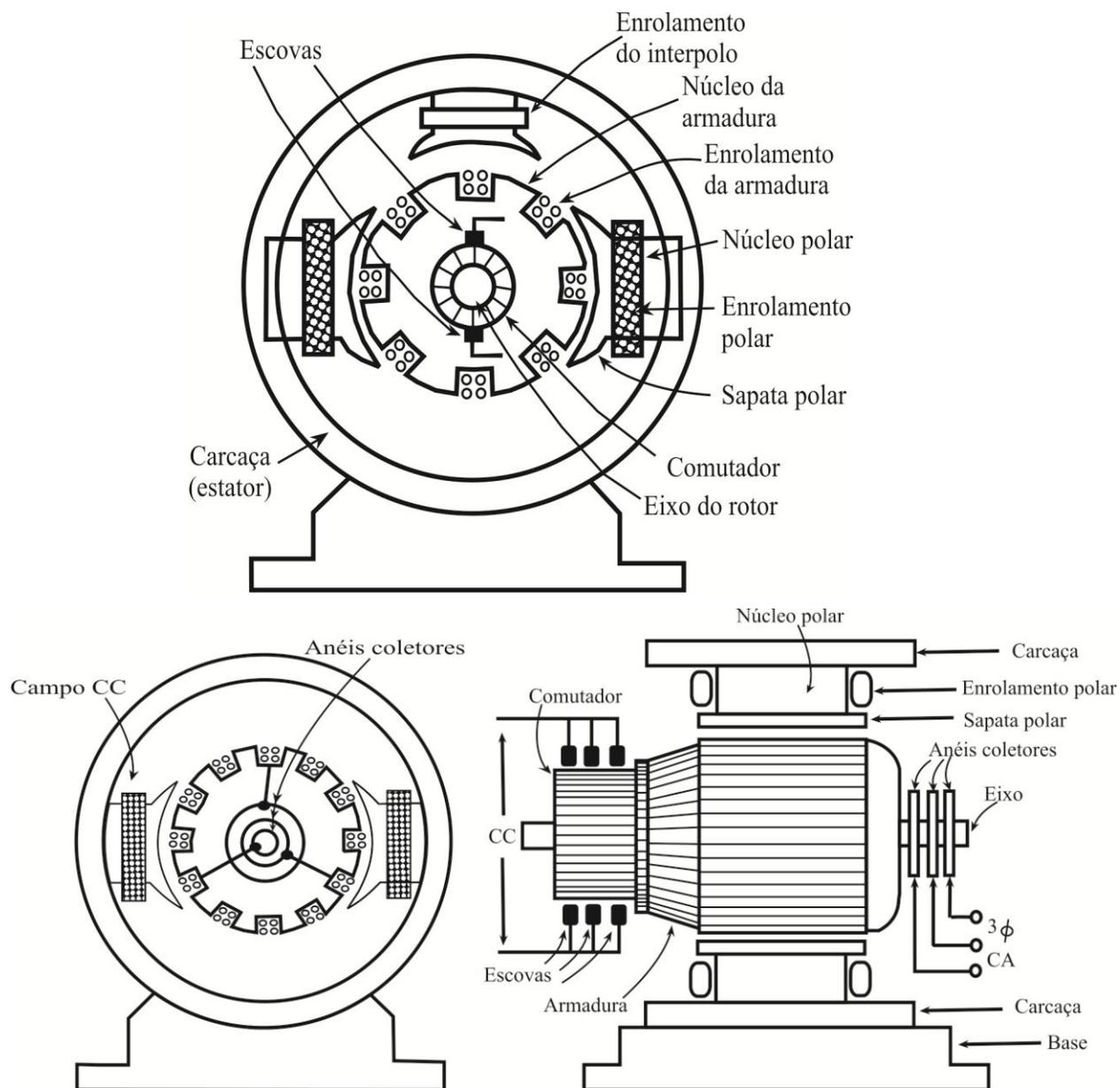


Figura 5.18 – Construção da Máquina CC

O ESTATOR da máquina CC consiste de uma *Carcaça* de aço, de ferro fundido ou laminado e serve como suporte das partes anteriormente descritas, também providencia uma faixa de retorno do fluxo para o circuito magnético criado pelos *Enrolamentos de Campo*, que são constituídos de poucas espiras de fio grosso para o campo Série ou muitas espiras para o campo Shunt. Essencialmente, as bobinas de campo são eletromagnetos, cujo ampère-espiras (Ae) providencia

uma forma magnetomotriz adequada à produção, no entreferro, do fluxo necessário para gerar uma força eletromotriz (fem) ou força mecânica.

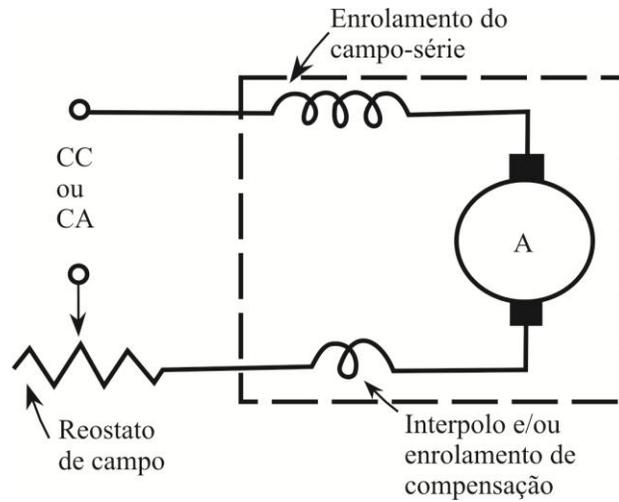


Figura 5.19 – Conexão do campo Série

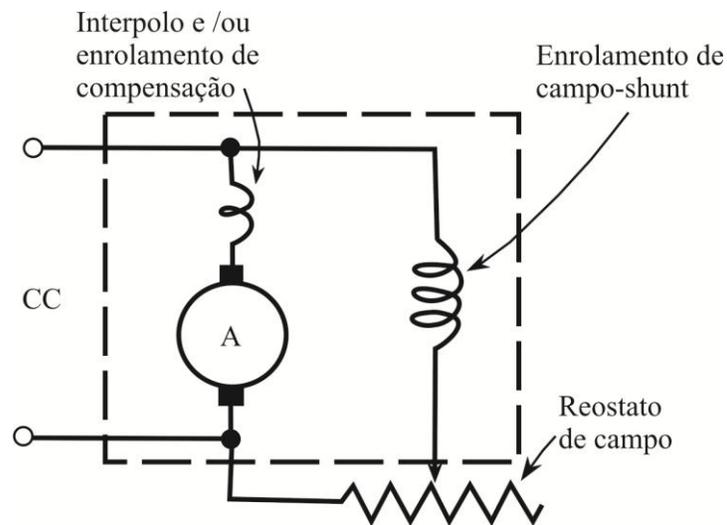


Figura 5.20 – Conexão do campo Shunt

Os enrolamentos de campo são suportados pelos *Polos*, constituídos de ferro laminado aparafusados ou soldados na carcaça após a inserção dos enrolamentos de campo nos mesmos. A sapata polar é curvada, e é mais larga que o núcleo polar, para espalhar o fluxo mais uniformemente.

O *Interpolo* e seu enrolamento também são montados na carcaça da máquina. Eles estão localizados na região interpola, entre os polos principais, e são geralmente de tamanho menor. O enrolamento do interpolo é composto de algumas poucas espiras de fio grosso, pois é ligado em série com o circuito da armadura, de modo que a força magnetomotriz (fmm) é proporcional à corrente da armadura.

Enrolamentos de compensação (não apresentados nas figuras 5.18) são opcionais. Eles são ligados da mesma maneira que os enrolamentos do interpolo, mas são colocados em ranhuras axiais na sapata polar.

Escovas e anéis-suporte de escovas como interpolos e enrolamentos de compensação são parte do circuito da armadura. As escovas são de carvão e/ou grafite, suportadas na estrutura do estator por um suporte do tipo anel, e mantidas no suporte por meio de molas, de forma que as escovas manterão um contato firme com os segmentos do comutador. As escovas estão sempre conectadas a um segmento e em contato com uma bobina localizada na zona interpolar.

Detalhes mecânicos também podem ser observados nas figuras 5.18, pois conectados à carcaça estão suportes contendo os mancais nos quais o eixo da armadura se apoia, bem como os anéis suporte de escovas disponíveis em algumas máquinas.

5.9 CONSTRUÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

A construção do estator, tanto na *máquina síncrona de campo fixo*, quanto na máquina de corrente contínua é idêntica e o enrolamento de campo é excitado através de uma fonte CC. O enrolamento da armadura, colocado no rotor, é levado a anéis coletores bem como a um comutador da mesma maneira como mostrado no corte de uma das Figuras 5.18.

Esta máquina funcionará como um gerador síncrono de armadura móvel, ou como um motor, dependendo se aplicada às escovas corrente contínua, ou aos anéis coletores de corrente alternada.

Esse tipo de máquina encontra sua maior aplicação nos conversores síncronos, utilizados para converter corrente contínua em alternada e vice-versa. Se a corrente contínua é aplicada às escovas, a máquina se comporta como um motor CC e um alternador CA, simultaneamente. Se a corrente alternada é aplicada aos anéis coletores, a máquina funciona como um motor CA e um gerador CC, simultaneamente. A ação motora e a ação geradora sempre ocorrem simultaneamente e os conversores rotativos são, talvez, o melhor exemplo do emprego de ambas.

A construção de máquina síncrona na qual o campo é fixo e a armadura gira é relativamente limitada em comparação com a máquina síncrona de campo variável. Nessa máquina, o enrolamento de campo é alimentado por uma fonte CC através de dois anéis coletores e a armadura é ligada diretamente à fonte trifásica CA ou à carga.

Se o estator (Armadura) é ligado a uma fonte monofásica ou trifásica CA, a máquina funcionará como um motor síncrono, e o rotor girará na velocidade síncrona, em sincronismo com o campo girante desenvolvido pelo enrolamento do estator e determinado pelo número de polos e a frequência da fonte. Se o rotor está girando na velocidade síncrona, através da máquina primária, a máquina funciona como um alternador quer monofásico ou trifásico, dependendo das conexões da armadura.

5.10 CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO ASSÍNCRONA

A máquina de indução assíncrona mostrada na Figura 5.21 tem idêntica construção do estator conforme descrito no item anterior para a máquina síncrona de campo variável. O enrolamento da armadura no estator, portanto, pode ser conectado a uma fonte monofásica ou trifásica CA. O rotor não é excitado separadamente com corrente contínua. A máquina de indução torna-se um gerador de indução assíncrono quando o rotor é movimentado por uma máquina primária numa velocidade que excede a velocidade síncrona.

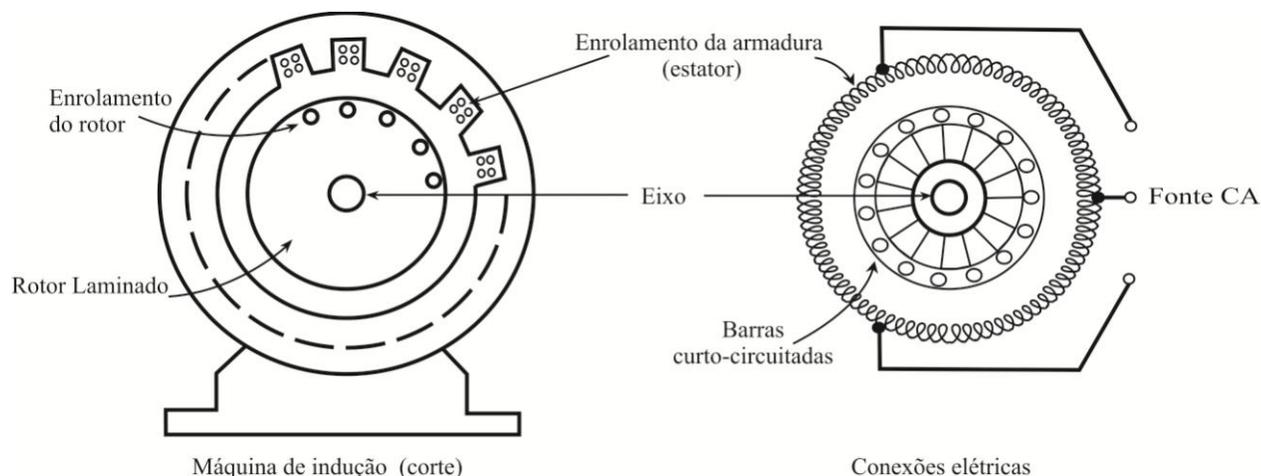


Figura 5.21 – Máquina de Indução Assíncrona e suas conexões elétricas

Se a armadura é ligada a uma fonte monofásica ou trifásica CA, a máquina funcionará normalmente como um *motor de indução*. Os motores de indução monofásicos requerem dispositivos auxiliares para a partida, mas os motores de indução trifásicos são inerentemente motores com partida própria e possuem torque de partida. Deve-se notar que, mesmo operando como gerador, a máquina de indução assíncrona requer que a armadura seja conectada a uma fonte CA.

Da mesma forma que a máquina de corrente contínua e a máquina síncrona, a máquina de indução é duplamente excitada, mas há fluxo de corrente alternada em ambos os enrolamentos, o do estator e o do rotor.

O enrolamento do rotor, que conduz corrente alternada produzida por indução pelo enrolamento do estator diretamente ligado à fonte, consiste de condutores de cobre ou alumínio enfiados ou fundidos no rotor de ferro ou aço laminado. Anéis terminais, que curto-circuitam os terminais, são colocados em ambas as extremidades, no tipo gaiola de esquilo, ou efetivamente num terminal, no tipo de rotor bobinado [21].

5.11 ESCORREGAMENTO DAS MÁQUINAS ASSÍNCRONAS

As máquinas assíncronas somente apresentam conjugado eletromecânico quando o rotor encontra-se fora de sincronismo, ou seja, quando $w_r \neq w_s$. Se designarmos w_r a velocidade angular do rotor e w_s a velocidade do campo girante do estator (ligado à linha trifásica de frequência f), o escorregamento absoluto é definido por

$$S = w_s - w_r \quad (19)$$

e o escorregamento relativo (em valor por unidade, para w_s como velocidade básica) será

$$S = \frac{w_s - w_r}{w_s} \quad (20)$$

Se fizermos a dedução, gráfica ou analítica, do campo rotativo produzido por um enrolamento de 2_p pólos, alimentado apenas com a frequência f , chegaríamos à conclusão de que o campo se desloca também de um duplo passo polar no intervalo de tempo T correspondente a um período da corrente. Como temos uma distribuição espacial da força magnetomotriz (fmm) de p duplos passos polares ao longo do perímetro do rotor, o campo girante completará uma volta em p períodos da corrente. Assim sendo, w_s não será mais igual a f , mas sim

$$w_s = \frac{2\pi}{pT} = \frac{1}{p} 2\pi f = \frac{w}{p} = 2\pi n_s \quad (21)$$

Com f em Hertz teremos w_s em radianos geométricos por segundo. Pela equação (21) conclui-se que a frequência de rotação síncrona de um campo girante de p pares de polos, em rotações por segundo será

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (22)$$

e, em rotações por minuto (rpm),

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \quad (23)$$

Voltando à equação (20) e substituindo-se também w_r por $2\pi n_r$, onde n_r é a frequência de rotação do rotor, temos

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (24)$$

Sabe-se que n_s pode ser decomposta como função do número de pólos do enrolamento do estator e da frequência de linha (22). Assim sendo, teremos

$$S = \frac{\frac{f}{p} - n_r}{\frac{f}{p}} \quad (25)$$

Por outro lado, quando uma máquina assíncrona funciona com o conjugado médio não nulo, a velocidade angular do campo girante rotórico (criado pelas correntes rotóricas) deve ser igual à diferença entre a velocidade angular do campo girante rotórico e a velocidade angular do próprio rotor, ou seja,

$$w_{cr} = w_s - w_r \quad (26)$$

Substituindo-se em (20), vem

$$S = \frac{w_{cr}}{w_s} = \frac{2\pi n_{cr}}{2\pi n_s} \quad (27)$$

Onde n_{cr} é a frequência de rotação do campo girante rotórico, relativamente ao rotor. Multiplicando-se o numerador e o denominador pelo número de pares de polos, que é o mesmo para o enrolamento do rotor e estator, teremos

$$s = \frac{pn_{cr}}{pn_s} = \frac{f_2}{f_1} \quad (28)$$

Esta expressão nos dá escorregamento relativo, ou simplesmente escorregamento, como uma relação entre a frequência das correntes rotóricas e estatóricas. O escorregamento pode assumir, teoricamente, valores de $-\infty$ a $+\infty$ (menos infinito a mais infinito).

Na região de funcionamento dos motores de indução assíncronos, $0 < n_r < n_s$, o escorregamento será $1 > s > 0$.

Com o rotor bloqueado (travado), $s = 1$. Com o rotor em sincronismo (não possível de ser atingido nesse tipo de máquina por suas próprias características de construção), $s = 0$.

Nas pequenas máquinas assíncronas o escorregamento nominal, funcionando como motor e a plena carga, está usualmente entre 2 e 5% [25].

5.12 CIRCUITOS EQUIVALENTES DAS MÁQUINAS ASSÍNCRONAS

5.12.1 Regime Permanente Senoidal – Escorregamento $S = 0$ e $S = 1$

Para correto entendimento do assunto, descreveremos a seguir o circuito equivalente da máquina assíncrona, em regime permanente senoidal, com escorregamento $s = 0$ e $s = 1$.

Como esse tipo de máquina não atinge a velocidade síncrona w_s por seus próprios meios (devido a características da sua construção), a situação de $s = 0$ só é possível acionado-a por meio de outro motor. Nessa situação, teremos e_2 e i_2 nulos e tudo se passa de maneira análoga ao circuito equivalente de um transformador no qual fora suprimido o secundário. A corrente absorvida por fase do estator será apenas a corrente de excitação, ou seja, com referência a E_1 , teremos

$$\dot{I}_{10} = I_{1P} - jI_{1mag} \quad (29)$$

O circuito equivalente por fase será conforme Figura 5.22, a seguir,

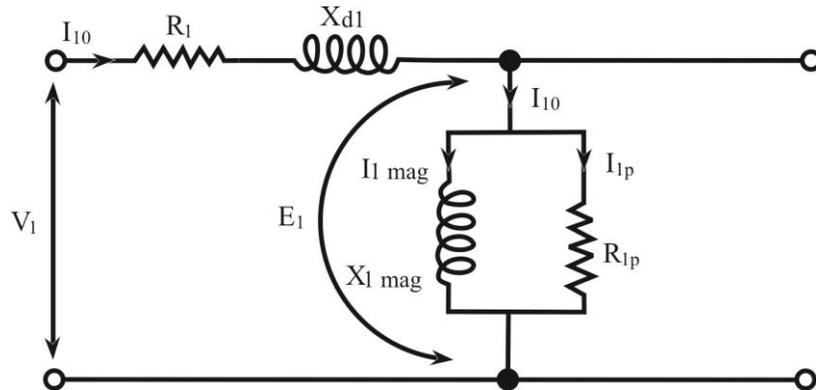


Figura 5.22 – Circuito equivalente, por fase, da Máquina Assíncrona com o rotor em sincronismo

As equações para \dot{V}_1 e \dot{V}_2 serão

$$\dot{V}_1 = (R_1 + jX_{d1})\dot{I}_{10}\dot{E}_1 \quad (30)$$

Nessa situação não há transferência de energia do estator para o rotor. Se, porém, mantivermos o rotor bloqueado, duas situações poderão ocorrer.

A primeira faz referência ao *circuito rotórico em vazio*, quando o motor de rotor bobinado está com os seus anéis abertos. Nessa situação, haverá e_2 , porém i_2 será nula, situação idêntica a um transformador operando em vazio.

A diferença do caso anterior é que as perdas no núcleo serão maiores, pois, se no primeiro caso a frequência do fluxo do rotor era nula, neste segundo caso ela será igual a f_1 . Essa alteração das perdas no núcleo para a mesma e_1 faz alterar o valor do parâmetro R_{1p} . O circuito equivalente será apresentado a seguir. É importante destacar que a Figura 5.23 pode representar o circuito secundário aberto ou fechado ($s = 1$).

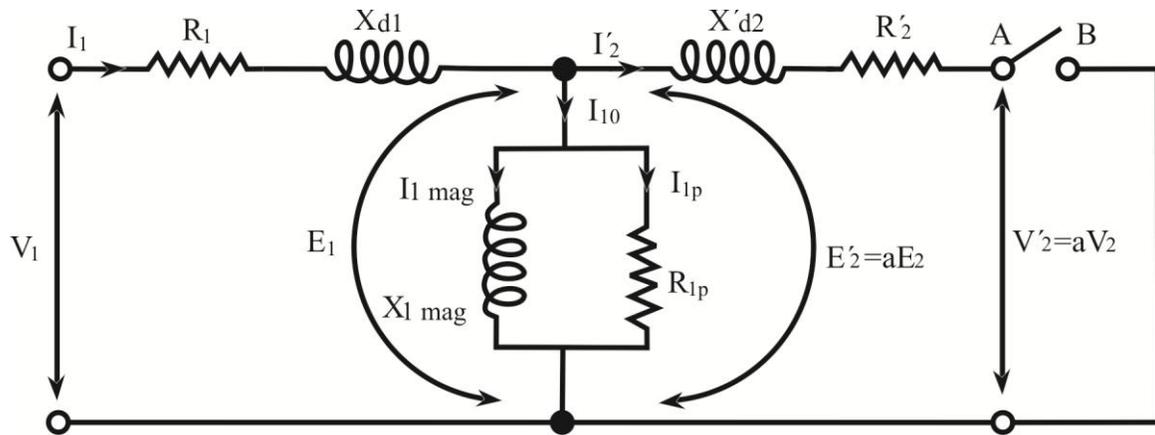


Figura 5.23 – Circuito equivalente, por fase, de uma Máquina Assíncrona com o rotor bloqueado

Nessa situação também não há conversão e nem transferência de energia do primário para o secundário, a não ser as perdas no núcleo do rotor, as quais foram transferidas do estator para o rotor.

A segunda situação (se mantivermos o rotor bloqueado), é o *circuito rotórico fechado*, aplicado a motores com rotor de gaiola de esquilo ou rotor do tipo bobinado com anéis em curto-circuito ou fechados através de uma impedância externa. É o mesmo caso de um transformador com corrente de carga I_c . Segundo a mesma expressão do transformador, para a corrente I_1 , vem

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}'_2 \quad (31)$$

e, para a tensão primária \dot{V}_1 do rotor, teremos,

$$\dot{V}_1 = (R_1 + jX_{d1})\dot{I}_1 + \dot{E}_1 = (R_1 + jX_{d1})\dot{I}_1 + jX_{1\ mag}\dot{I}_{1\ mag} \quad (32)$$

Se considerarmos os parâmetros da impedância externa adicionados aos próprios parâmetros do rotor, teremos, para o secundário, a equação

$$\dot{V}_2 = 0 = \dot{E}'_2 - (R'_2 + jX'_{d2})\dot{I}'_2 \quad (33)$$

onde, $R'_2 = a^2 R_2$ e $X'_{d2} = a^2 X_{d2}$ são a resistência e a reatância rotórica na frequência f_1 , e referidas ao estator, por fase do mesmo.

Nessa situação haverá conjugado (conjugado de partida do motor de indução), mas não haverá conversão eletromagnética, pois a potência mecânica desenvolvida será nula ($W_r = 0$). Haverá, no entanto, um fluxo de energia do primário para o secundário, e todo ele ficará confinado ao circuito elétrico do rotor.

Pela expressão (33) temos,

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_2}{R'_2 + jX'_{d2}} \quad (34)$$

ou,

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{R_2 + jX_{d2}} \quad (35)$$

A potência aparente transferida do estator para o rotor será

$$S_{tr} = E_1 I'_2 = a E_2 \frac{I_c}{a} = E_2 I_c = Z_2 I_c^2 \quad (36)$$

A parte ativa transferida e dissipada na resistência do circuito rotórico será

$$P_{tr} = E_2 I_c \cos \phi_2 = R_2 I_c^2 \quad (37)$$

5.12.2 Regime Permanente Senoidal – Escorregamento s diferente de 0 e 1

Nessas situações haverá força eletromotriz (fem) induzida no circuito secundário, haverá $I_2 \neq 0$, haverá $C \neq 0$, haverá $w_r \neq 0$ e, conseqüentemente, conversão eletromecânica com potência mecânica. Suponhamos que a máquina assíncrona em questão não apresente perdas no núcleo do rotor, mas apenas no estator. Essa aproximação é razoável para o funcionamento da máquina na região de motor e gerador com baixos escorregamentos, visto que a frequência de alternância do fluxo magnético no núcleo do rotor é muito baixa e, assim, terá pequenas perdas Foucault e por histerese. Tomemos agora um circuito equivalente com os parâmetros e variáveis do secundário não referido ao primário. Se a máquina assíncrona está girando com escorregamento s , a força eletromotriz do secundário será $E_{2s} = sE_2$ e não E_2 . A reatância de dispersão do secundário será sX_{d2} e não X_{d2} . A resistência secundária será, por hora, suposta não variável com a frequência f_2 , ou seja, com o escorregamento. A figura 5.24, a seguir, nos mostra um circuito equivalente, por fase, de uma máquina assíncrona com escorregamento s , com o secundário não referido ao primário e cuja potência no secundário representa apenas a potência elétrica desenvolvida no rotor.

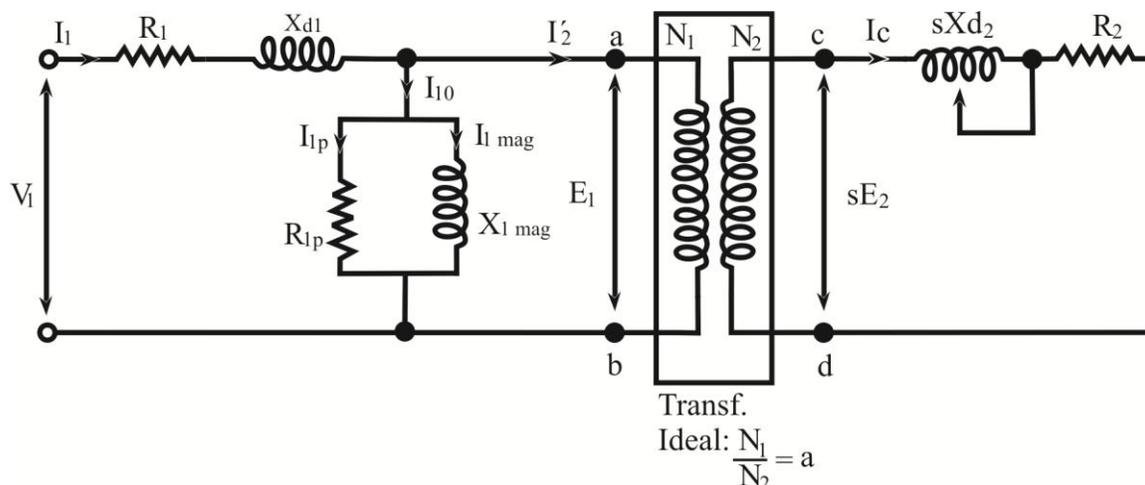


Figura 5.24 – Circuito equivalente, por fase, de uma Máquina Assíncrona com escorregamento s

A corrente I_c será

$$I_c = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_{d2}} \quad (38)$$

A potência aparente elétrica no circuito secundário será

$$S_{eletr} = sE_2 I_c = Z_{2s} I_c^2, \quad (39)$$

onde a impedância

$$Z_{2s} = R_2 + jsX_{d2}, \quad (40)$$

ou

$$Z_{2s} = \sqrt{R_2^2 + (sX_{d2})^2}, \quad (41)$$

é a impedância rotórica para o escorregamento s .

A parte ativa dessa potência será

$$P_{eletr} = sE_2 I_c \cos \phi_{2s} = R_2 I_c^2. \quad (42)$$

E a reativa

$$Q_{eletr} = sX_{d2} I_c^2. \quad (43)$$

Mas, a potência aparente transferida do estator ao rotor, através do acoplamento magnético será

$$S_{transf} = E_1 I'_2 . \quad (44)$$

Substituindo-se E_1 por E_2 , temos

$$S_{transf} = a E_2 I'_2 = E_2 I_c . \quad (45)$$

Nota-se, comparando a expressão (45) com a (40), que a potência desenvolvida no circuito elétrico secundário é s vezes a potência transferida, ou seja,

$$S_{transf} = \frac{1}{s} S_{eletr} . \quad (46)$$

Então, um circuito equivalente que representa toda a potência transferida do primário para o secundário, dada a expressão (45), deverá ter uma corrente I_c com uma força eletromotriz secundária E_2 e não sE_2 . A figura 5.25 a seguir nos apresenta um circuito equivalente análogo ao da figura 5.24, porém com uma potência secundária representando toda a potência transferida do estator ao rotor, englobando a potência elétrica mais a mecânica.

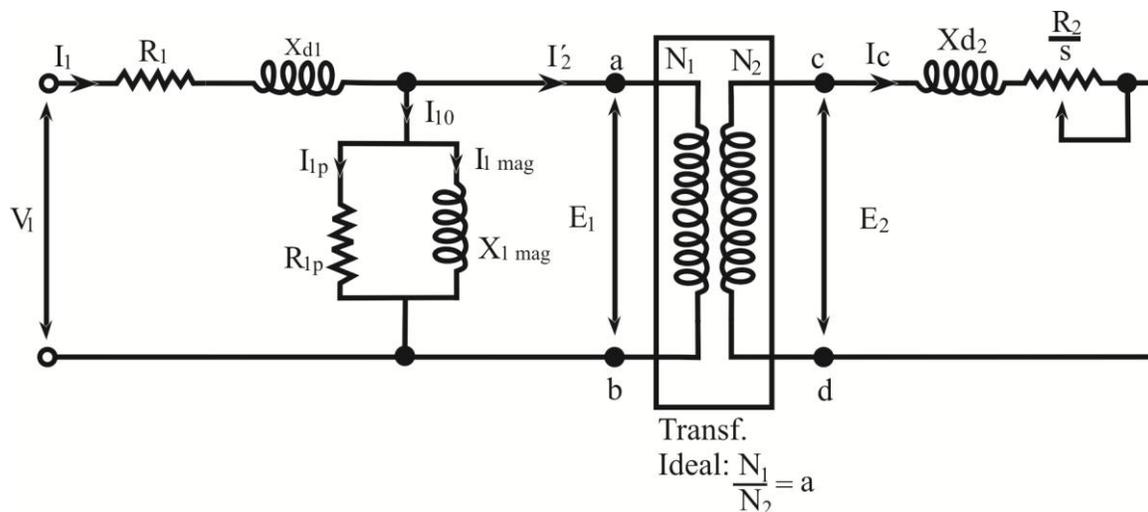


Figura 5.25 – Circuito equivalente, por fase, de uma Máquina Assíncrona com escorregamento s e potência secundária

Uma vez apresentado o circuito, para que nesse circuito a corrente seja I_c , mas com força eletromotriz E_2 , a impedância deverá ser

$$\frac{1}{s} \dot{Z}_{2s} = \frac{R_2}{s} + jX_{d2}, \quad (47)$$

ou

$$\frac{1}{s} Z_{2s} = \sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{d2})^2} \quad (48)$$

Basta examinar a expressão (38) e dividir o numerador e o denominador por s .

Essa impedância pode ser chamada de impedância secundária equivalente da máquina assíncrona. Trata-se de uma impedância idealizada para fins de circuito equivalente, consequentemente a parte ativa dessa potência será

$$P_{transf} = \frac{R_2 I_c^2}{s}, \quad (45)$$

e a parte reativa,

$$Q_{transf} = X_{d2} I_c^2. \quad (50)$$

A diferença entre a parte ativa da potência elétrica secundária (dissipada por efeito Joule na resistência R_2) é igual à quantidade de potência, por fase, que foi convertida em forma mecânica. Pelas expressões (49) e (42), vem

$$P_{mec} = \left(\frac{R_2}{s} - R_2\right) I_c^2 = \frac{1-s}{s} R_2 I_c^2. \quad (51)$$

Isso sugere desmembrar a resistência R_2/s em duas partes, ou seja,

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{1-s}{s} R_2. \quad (52)$$

A primeira parte, quando aplicada a I_c dá a perda Joule ocorrida no circuito secundário, e a segunda parte, quando aplicada a I_c^2 , proporciona numericamente o valor da potência mecânica desenvolvida pela máquina de indução com o escorregamento s . Por isso ela é chamada de resistência equivalente de carga mecânica total, por fase (total porque inclui não somente a potência mecânica útil, mas também as perdas mecânicas).

Mas, o circuito mais comum é obtido suprimindo-se o transformador ideal e referindo-se as grandezas secundárias ao primário. Isso resulta no circuito da figura 5.26, onde

$$X'_{d2} = a^2 X_{d2}; R_2 = a^2 R_2; \frac{1-s}{s} R'_2 = a^2 \frac{1-s}{s} R_2. \quad (53)$$

5.12.3 Circuito Equivalente Completo - Regime Permanente Senoidal – Escorregamento S diferente de 0 e 1

O circuito da figura 5.26 é idêntico ao circuito de um transformador cujas resistências e reatâncias de dispersão são R'_2 e X'_{d2} , e alimentando uma carga resistiva $R'_2 \frac{1-s}{s}$.

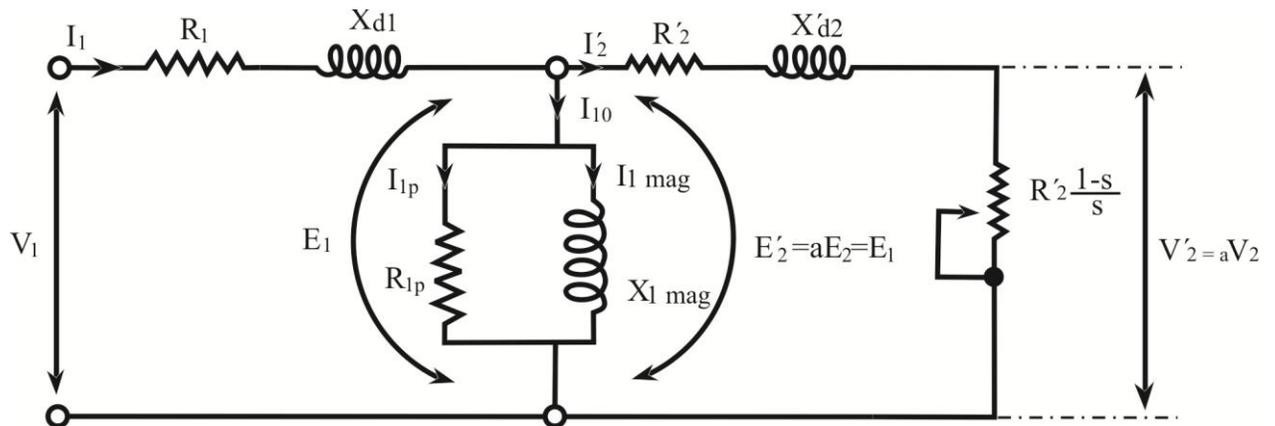


Figura 5.26 – Circuito equivalente completo, por fase, referido ao primário de uma Máquina Assíncrona com escorregamento s

É importante salientar que, o circuito equivalente da máquina assíncrona pode ser descrito de outras formas que facilitam a sua utilização, porém a forma apresentada na figura 5.26 tem a vantagem didática da semelhança com o circuito do transformador e atende perfeitamente os objetivos desta dissertação [25].

6 MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

6.1 INTRODUÇÃO

Motores de Alto Rendimento são aqueles projetados para fornecer a mesma potência útil na ponta do seu eixo utilizando menos energia da rede, se comparados com motores comuns.

Os itens a seguir, nos mostra de maneira bastante sucinta alguns parâmetros básicos para o entendimento do assunto e aborda os conceitos de perdas e de rendimento em motores elétricos.

Este capítulo busca esclarecer esses pontos com suas contribuições.

6.2 O UNIVERSO DOS MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico é a máquina destinada a transformar a energia elétrica em mecânica. Dentre os motores, o de indução é o mais utilizado, pois combinam as vantagens da utilização da energia elétrica, baixos custos de fabricação, facilidade de transporte, limpeza, robustez mecânica com sua construção simples, custo reduzido, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais variados tipos e melhores rendimentos.

Os tipos mais comuns de motores elétricos são os Motores de Corrente Contínua e os Motores de Corrente Alternada.

A figura 6.1 nos mostra os tipos de motores elétricos mais utilizados. É importante salientar que existem outros tipos de motores, porém devido ao uso e aplicações específicas ou reduzidas os mesmos não foram relacionados [24].

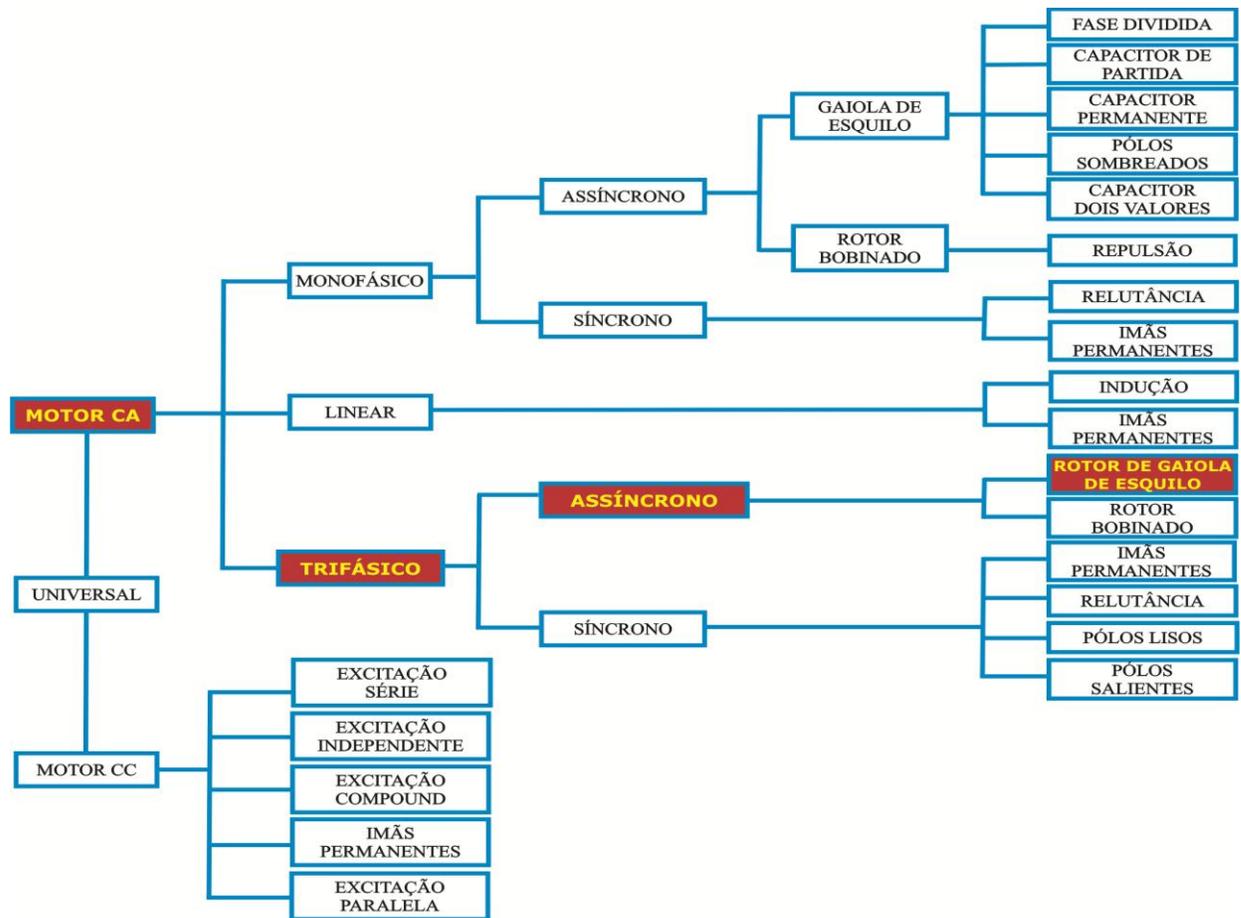


Figura 6.1 – O universo dos motores elétricos

Os motores, objeto do estudo dessa dissertação estão em destaque na figura 6.1, para os quais, foram descritos no capítulo 03, a atual legislação brasileira de eficiência energética.

6.3 MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

Como já descrito anteriormente, motores de Alto Rendimento são aqueles projetados para fornecer a mesma potência útil na ponta do seu eixo utilizando menos energia da rede, se comparados com motores comuns.

No início, um dos critérios decisivos para a escolha dos motores de Alto Rendimento para muitos consumidores era a relação entre o valor do consumo de energia gasta durante o período de vida útil do motor comparado com o seu valor de compra inicial (Custo de Aquisição).

Segundo os fabricantes de motores, o consumo de energia durante a vida útil dos motores poderia chegar a 100 vezes o seu valor de compra inicial. Assim sendo, o rendimento dos motores era utilizado como um dos critérios decisivos para a escolha entre a compra de motores novos ou o conserto dos motores antigos.

Para efeito de entendimento do exposto, tomaremos como base um motor de 100CV – IV Polos, operando em regime contínuo (24 horas por dia, 365 dias por ano) e o consumo de energia elétrica que o mesmo terá ao longo de uma vida útil média esperada de 10 anos.

O valor adotado para o kilowatt-hora de energia elétrica será R\$ 0,20.

Assim,

$365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} = 8.760 \text{ h / ano}$

$8.760 \text{ horas} \times 10 \text{ anos} = 87.600 \text{ h}$

Motor de 100 CV = 75 kW

Custo do kWh adotado = R\$ 0,20

$75 \text{ kW} \times \text{R\$ } 0,20 = \text{R\$ } 15,00/\text{kWh}$

$\text{R\$ } 15,00 \times 87.600 \text{ h (10 anos)} = \text{R\$ } 1.314.000,00$

Se considerarmos que o atualmente preço médio do motor de 100 CV – IV Polos, no mercado, gira em torno de R\$ 9.175,00 o exemplo acima nos mostra a importância de buscarmos alternativas para a redução do consumo de energia através de motores mais eficientes.

Outro ponto que também pode ser avaliado é a participação do custo relativo às manutenções que devem ser consideradas ao longo da vida útil dos motores.

Para o mesmo horizonte de 10 anos, se considerarmos que o motor não apresentou nenhuma falha grave, pelo menos duas revisões com rejuvenescimento, três instalações, lubrificações semestrais, inspeções sensitivas quinzenais, inspeções de vibração mensais deveriam ser realizadas a fim de garantirmos o correto funcionamento do equipamento o que implicaria também num custo de manutenção aproximado de R\$ R\$ 6.400,00.

Os custos das perdas de produção pela falta do motor não puderam ser estimadas e variam de acordo com a capacidade de cada indústria em tomar ações para a minimização destes eventos. As Figuras 6.2 e 6.3 a seguir procura sintetizar as informações apresentadas.

Relação entre Custos de Aquisição e Operação de Motores (R\$)

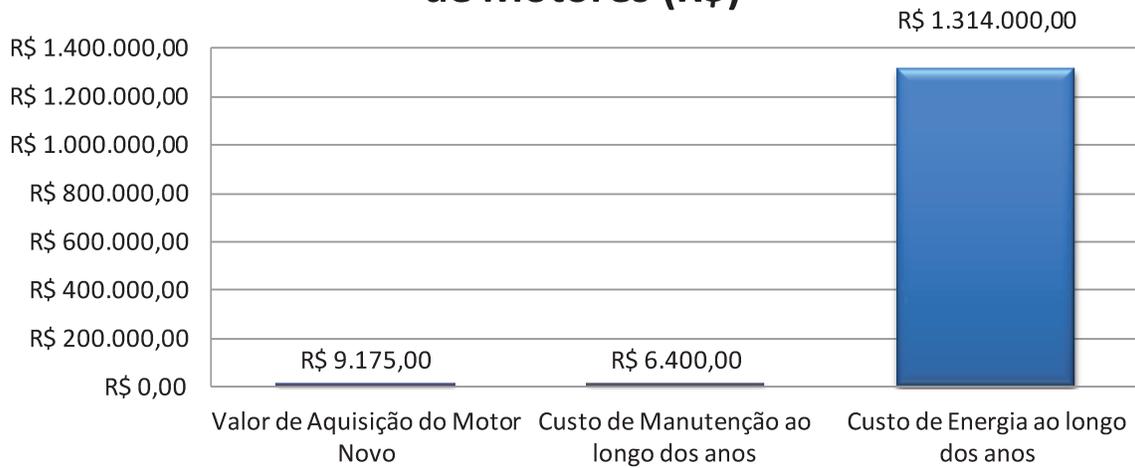


Figura 6.2 – Relação entre o custo de aquisição e o custo de operação de motores em Reais

Relação entre Custos de Aquisição e Operação de Motores (%)

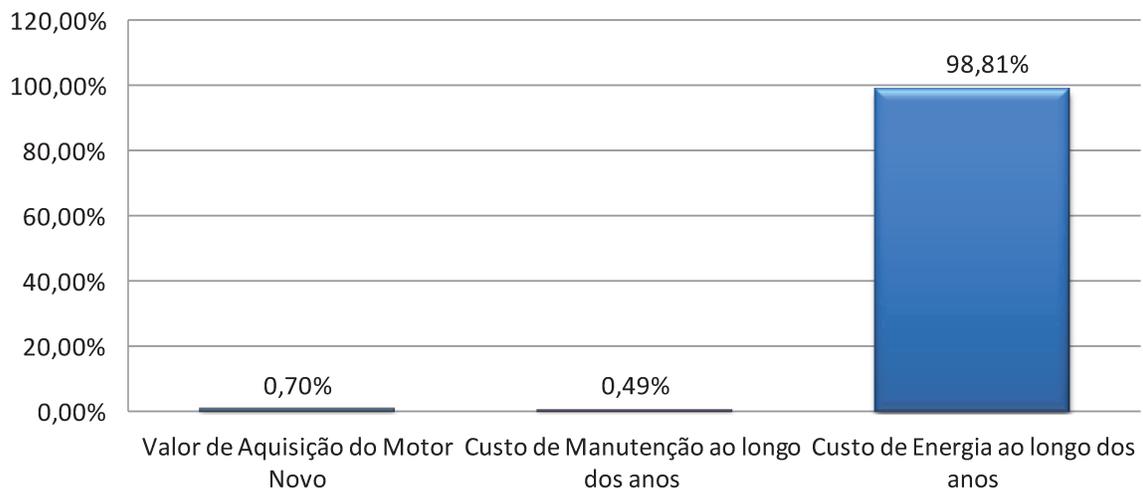


Figura 6.3 – Relação entre o custo de aquisição e o custo de operação de motores em Percentual

Diante do exposto, o rendimento dos motores tende a ser utilizado como um dos critérios para a escolha entre a compra de motores novos ou o conserto dos motores antigos.

Por estas e outras razões algumas empresas adotaram políticas de gerenciamento de motores, minimizando seus custos através do uso adequado da energia elétrica. É importante destacar que, tão importante quanto escolher um motor de Alto Rendimento é a execução do seu correto dimensionamento [29].

Os itens a seguir procura mostrar, de maneira sucinta, conceitos de rendimento e perdas em motores elétricos a fim de consolidar o entendimento desse tema.

6.4 MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

O desempenho de uma máquina é medida pelo seu rendimento e é usualmente definido como:

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{potência de saída}}{\text{potência de entrada}} = \frac{\text{potência de saída}}{\text{potência de saída} + \text{perdas}}$$

A figura 6.4 nos mostra que nem toda a potência disponível na rede para a operação do motor é transformada em trabalho, parte dela é desperdiçada na forma de perdas.

O rendimento de uma máquina pode ser definido como a relação entre a potência consumida da rede menos potência de perdas. Por sua vez, essas perdas podem ser calculadas ou determinadas por testes de carga (ensaios).

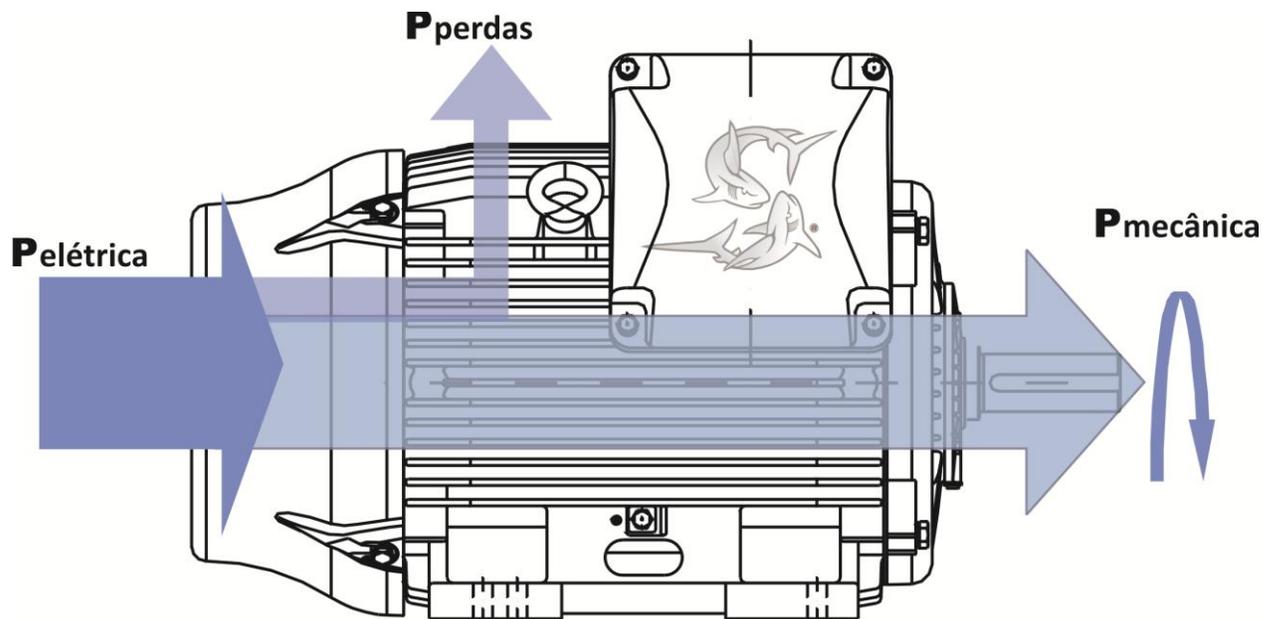


Figura 6.4 – Esquema básico: Conceitos de perdas e rendimento em Motores elétricos

As perdas são classificadas em perdas elétricas (P_{ele}) que são as perdas no cobre dos vários condutores existentes nos enrolamentos motor, tais como os enrolamentos da armadura e de campo além das perdas devido à resistência de contato da escova com o comutador, perdas magnéticas (P_{mag}) que são as perdas no ferro e incluem as perdas por histerese e correntes de Foucault nos vários circuitos magnéticos, principalmente no núcleo da armadura e nas faces polares, perdas mecânicas (P_{mec}) que incluem as perdas por atrito nos mancais, ventilação e atrito nas escovas e, por fim, as perdas suplementares (P_{sup}) que são as perdas não consideradas anteriormente. Normalmente, como regra prática, as perdas suplementares são admitidas como sendo 1% (um por cento) da potência de saída [19].

A análise das perdas nas máquinas e as componentes de quedas de tensão e corrente associadas às perdas devem ser levadas em consideração, apropriadamente, quando da modelagem da máquina e também se mostra importante pelas seguintes razões:

1 - As perdas determinam o rendimento da máquina e influenciam de forma apreciável seu custo de funcionamento;

2 - As perdas determinam o aquecimento da máquina e conseqüentemente a potência de saída nominal que pode ser obtida sem a deterioração indevida do isolamento [26].

6.4.1 Perdas no Cobre ou Perdas Ôhmicas

As perdas Ôhmicas ou RI^2 , também chamadas de *Perdas (JOULE) no cobre dos circuitos elétricos do Estator e do Rotor*, são encontradas em todos os enrolamentos de uma máquina. Por convenção, essas perdas são calculadas com base nas resistências CC do enrolamento a 75°C e decorre da variação da resistividade dos materiais condutores com a temperatura (O coeficiente de temperatura do Cobre a 0°C é $\alpha_0 = 0,00427^\circ\text{C}^{-1}$). Para efeito de cálculo do rendimento das máquinas, é costume convencionar-se que as perdas no cobre resumam, tão somente, naquelas perdas que ocorrem nos enrolamentos do estator e do rotor, delas se excluindo as perdas nos reatores de campo e nas excitatrizes (quando houver), essas passam a ser consideradas como perdas da instalação completa. Na realidade, as perdas RI^2 dependem da resistência efetiva do enrolamento na frequência de operação e nas condições de fluxo.

O incremento nas perdas, representado pela diferença entre as resistências CC e efetiva, está incluído nas perdas suplementares de carga apresentadas a seguir. Por convenção, normalmente essas perdas são desprezadas em máquinas síncronas e de indução.

6.4.2 Perdas no Ferro

As perdas no ferro consistem nas perdas por histerese e por correntes parasitas (Foucault) que surgem da alteração de densidade de fluxo no estator da máquina quando apenas o enrolamento principal está energizado e provêm de variações de indução nas massas ferromagnéticas. Nas máquinas CC e síncronas, essas perdas estão confinadas principalmente na armadura, embora as variações de fluxo que se originam nas aberturas das ranhuras também causem perdas no núcleo, particularmente nas sapatas polares ou nas superfícies do campo. Nas máquinas de indução, as perdas estão confinadas, em sua maior parte, no estator.

Um dos processos mais empregados para o cálculo das perdas no ferro consiste na utilização de curvas fornecidas pelos fabricantes das chapas. Para cada uma das frequências industriais mais comuns, podemos obter a perda total por unidade de volume de ferro, em função de diferentes valores de indução máxima. Conhecendo-se o volume de uma região da máquina, onde a in-

dução varia segundo uma única e determinada lei, basta multiplicar a perda específica obtida nas curvas pelo volume dessa região e pelo correspondente coeficiente empírico, para que se obtenham as perdas no ferro dessa região. A necessidade desse coeficiente decorre do fato de as curvas obtidas pelos fabricantes serem determinadas sob as condições diferentes daquelas que vigoram nas diferentes partes da máquina em funcionamento.

Dependendo do tipo de máquina, as perdas ocorrem com maior intensidade, hora no ferro do estator, hora no ferro do rotor. De maneira geral, as regiões onde essas perdas ocorrem serão maiores onde as frequências e as induções máximas também forem maiores.

Na verdade, as perdas no ferro obtidas através do ensaio a vazio diferem, ainda que pouco, das efetivas perdas no ferro da máquina a plena carga, porém, essa diferença deve ser considerada como parte das perdas suplementares.

As perdas no ferro ou, mais explicitamente, as perdas no ferro em vazio, podem ser definidas pela diferença entre as potências necessárias para manter a máquina sob a rotação nominal.

- a) Excitada de modo a manter a tensão (V) entre os seus terminais em vazio, igual à força eletromotriz (E) normalmente induzida em plena carga;
- b) Sem qualquer excitação e, obviamente, em vazio.

6.4.3 Perdas Mecânicas

As perdas mecânicas são provenientes do atrito em mancais e em contatos deslizantes entre escovas e comutadores e entre escovas e coletores. Delas também fazem parte as perdas por ventilação, natural ou forçada, necessária para fazer o ar circular por dentro da máquina e pelo sistema de ventilação.

O cálculo prévio e preciso dessas perdas não é tarefa simples. As perdas por atrito nos mancais dependem de vários fatores, desde o seu tipo (mancais de rolamentos ou de casquilho, por exemplo) até o seu estado e tipo de lubrificação. Fato semelhante ocorre com as perdas mecânicas geradas pelo atrito das escovas deslizantes sobre as partes girantes, elas dependem do tipo das escovas e da área de superfície de contato com o comutador ou com os anéis.

Com relação à ventilação, as incertezas não são menores. Não pretendemos, nesse trabalho, nos aprofundar nesse assunto, porém podemos mencionar que, de modo geral, as perdas se comportam como apresentadas a seguir:

a) As perdas por Atrito em mancais podem ser expressas por um produto do tipo KFv , onde:

K é um coeficiente de Atrito;

F é a Força exercida sobre os mancais;

v é a velocidade periférica, proporcional a rotação.

b) As perdas por Atrito entre escovas e comutador podem ser expressas por um produto do tipo $KPAv$, onde:

K é um coeficiente de Atrito;

P é a Pressão nos pontos das superfícies de contato entre escovas e comutador, ou anéis coletores;

A é área das superfícies de contato;

v é a velocidade periférica do comutador ou anéis coletores.

c) As perdas por Ventilação podem ser expressas por um produto do tipo KN^x , onde:

K é uma Constante;

N é a Rotação da máquina;

x é um expoente que cresce com N . (nos casos mais comuns, x é da ordem m de 2 a 3).

Para efeito de cálculo de rendimento, em geral não há nenhum interesse especial em se obter as perdas mecânicas em separado, normalmente, elas são obtidas em conjunto com as no ferro, por intermédio do ensaio a vazio, ou seja, as perdas por atrito e ventilação podem ser medidas determinando-se a potência de entrada da máquina quando ela está em velocidade nominal, mas, operando sem que haja nenhuma carga acoplada ao seu eixo.

6.4.4 Perdas Suplementares

As perdas suplementares consistem em perdas que se originam da distribuição não uniforme das correntes no cobre e em perdas adicionais no ferro, bem como das perdas produzidas no ferro pela distorção do fluxo magnético e pela corrente de carga. São perdas difíceis de serem determinadas com exatidão, por esse motivo, no caso de máquinas síncronas e de indução, elas são obtidas através de ensaio.

Uma das causas da divergência entre as perdas reais no cobre e as perdas nele convencionadas resulta de correntes parasitas que circulam internamente nas massas de cobre dos enrolamentos e provêm de variações do campo magnético nas regiões ocupadas por esses enrolamentos. Tais correntes têm a mesma natureza das correntes de Foucault, responsáveis por parte das perdas no ferro das máquinas elétricas.

Por sua vez, as perdas no ferro em geral são menores do que as perdas que realmente se desenvolvem nos núcleos ferromagnéticos e em outros materiais metálicos estruturais das máquinas em carga. A principal razão da diversidade resulta dos efeitos da reação do rotor que modifica as distribuições de indução ao redor do entreferro das máquinas. Além desses efeitos sobre o campo no entreferro, as correntes de carga produzem fluxos dispersos que podem alcançar inclusive peças estruturais como parafusos e suportes, produzindo nelas, perdas adicionais.

Essas perdas adicionais, ausentes das perdas em vazio, constituem outro grupo de perdas suplementares.

O cálculo das perdas suplementares com a aproximação satisfatória é praticamente irrealizável, daí a conveniência de se dividir as perdas nas máquinas em dois grupos:

a) Perdas no Cobre, Perdas no Ferro e Perdas Mecânicas. Estes poderiam ser chamados de *Grupo das Perdas Principais*, tendo em vista que seus valores poderiam ser obtidos com relativa facilidade por via experimental (através de ensaios);

b) Perdas Suplementares, no cobre, e no ferro (e em componentes estruturais). São de difícil determinação, seja por cálculo ou por processo experimental. Para efeito de cálculo de rendimento de máquinas rotativas, admite-se como sendo 1% (um por cento) da potência útil da máquina;

É importante salientar que as considerações das perdas suplementares, “em separado” das

perdas no cobre e no ferro, perfaz um artifício conveniente para padronizar e simplificar métodos utilizados para a determinação e fixação dos valores de rendimento das máquinas elétricas.

6.5 CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE INDUÇÃO DE ALTO RENDIMENTO

Com o objetivo de aumentar sua eficiência e minimizar o consumo de energia elétrica, os motores de Alto Rendimento são construídos de maneira a possuir perdas significativamente reduzidas, sejam elas mecânicas ou elétricas, e possuem as seguintes características:

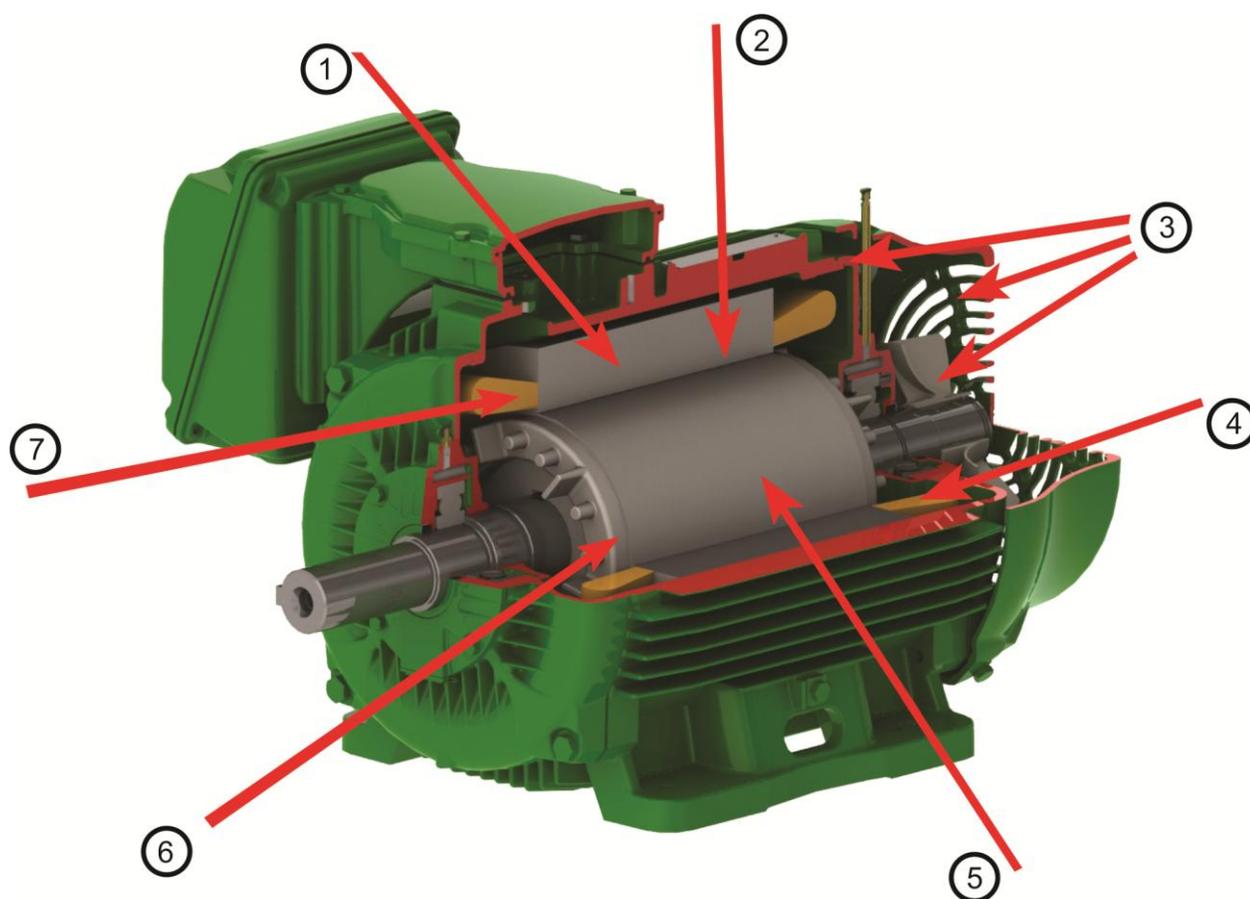


Figura 6.5 – Característica dos Motores elétricos de Alto Rendimento

- 1) Chapas metálicas com baixas perdas (Aço Silício) que reduzem a corrente de magnetização e as perdas no ferro;
- 2) Projeto das ranhuras do estator dimensionadas de tal modo que o fator de enchimento seja maior, podendo-se assim reduzir as perdas Joule dos enrolamentos;
- 3) Sistema de ventilação (ventilador, tampa traseira e tampa defletora) projetado de maneira a minimizar os níveis de ruído e a maximizar a eficiência térmica, reduzindo as perdas suplementares de ventilação.
- 4) Enrolamentos especiais de dupla camada que reduzem perdas suplementares;
- 5) Rotor tratado termicamente que reduz perdas suplementares (perdas rotóricas);
- 6) Anel de curto circuito e barras do rotor super dimensionadas para diminuir as perdas Joule;
- 7) Aprimoramento dos materiais que compõem o sistema de isolamento do motor (fios, filmes isolantes, sistemas de impregnação, verniz, cabos, e demais componentes).

A geometria e o desenho das chapas do rotor e do estator busca comportar maiores quantidades de cobre e minimizar a circulação de correntes parasitas, além de maximizar a condução do campo magnético.

Tendo em vista que a indução magnética indica, indiretamente, a quantidade de linhas de fluxo que pode passar por uma determinada região, aumentando-se o volume de cobre nos enrolamentos (número bobinas e / ou diâmetro dos fios) busca-se também aumentar a capacidade de se gerar linhas de fluxo magnético, ocupar de maneira mais adequada as ranhuras do estator (contribuindo a melhorar o fator de enchimento) e diminuir as perdas Joule e suplementares.

Quanto o tratamento térmico, no processo de estampagem (que pode ser traduzido como sendo o processo de corte) das chapas metálicas que compõem o estator e o rotor de um motor, são verificadas alterações nas propriedades do aço dessas chapas provocando o encruamento das mesmas e produzindo rebarba na região do corte. Estima-se que a região afetada pela estampagem seja da mesma ordem de grandeza da espessura da chapa.

Durante a estampagem, são geradas nas chapas tensões internas que deterioram suas propriedades e desorientam a estrutura atômica do aço nas regiões periféricas das chapas que constituirão o pacote do rotor e do estator, conseqüentemente o aumento da circulação de correntes parasitas (Foucault). Para minimizar essa influência, faz-se o tratamento térmico para o alívio de tensões e reorganização da estrutura interna do aço.

Especificamente na fabricação do rotor, podem ocorrer que rebarbas provenientes da usinagem do pacote e da injeção do alumínio estabeleçam contato entre as chapas isoladas do mesmo. Como o pacote de chapas necessita ser aquecido para que se possa prensar o eixo, aplica-se o choque térmico com o objetivo de prevenir eventuais problemas que possam ocorrer desses contatos.

O choque térmico consiste em um resfriamento brusco do rotor. A variação brusca da temperatura oxida e torna frágeis as rebarbas existentes, ao mesmo tempo em que provoca a contração parcial do alumínio dentro das ranhuras do rotor devido ao coeficiente de dilatação linear do alumínio ser maior que a do aço e, conseqüentemente, alivia as tensões e reorganiza a estrutura interna do aço.

O sistema de ventilação, além de minimizar os níveis de ruído produzido pela máquina e que podem ser bastante prejudiciais à saúde, busca arrefecer a região interna do motor (estator, rotor, enrolamentos) a fim de preservar a vida útil dos materiais isolantes aplicados na construção da máquina. O conjunto ventilador, tampa traseira e tampa defletora tem por objetivo expulsar as temperaturas mais elevadas provenientes da região interna do motor e que ficam confinadas entre as aletas, na região mais próxima a carcaça, ou seja, sua função é fazer a troca de calor entre as temperaturas mais elevadas e provenientes do ambiente interno da máquina com a temperatura ambiente.

As características acima descritas visam diminuir as perdas (estão relacionadas com o exposto no item 6.4) e podem ser mais bem entendidas se levarmos em conta o fato de que motores com melhores rendimentos exigem o uso de materiais mais nobres e/ou de maiores quantidades de materiais, bem como o entendimento de que o aperfeiçoamento das técnicas de projeto e de fabricação dos mesmos se faz estritamente necessários.

6.6 CONSIDERAÇÕES PARA A SELEÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO

Para a correta seleção e dimensionamento de motores elétricos é necessário conhecimento dos equipamentos a ser acionados e sua influência no processo como um todo, suas principais

características de operação, o tipo de acoplamento, a potência consumida, os conjugados, o regime de serviço, a inércia, etc.

É fundamental também o conhecimento das características da rede de alimentação (Tensão, Freqüência) e o ambiente onde o equipamento será utilizado.

Os dimensionamento de motores, não serão detalhados nesse trabalho, porém poderão seguir os seguintes critérios:

- a) Critério da Potência Eficaz;
- b) Critério do Conjugado Máximo Motor;
- c) Critério dos Conjugados Motor e Resistente de Partida;
- d) Critério do Tempo de Aceleração;
- e) Critério da Potência Disponível.

6.7 A EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

A indústria tem trabalhado ao longo dos anos na busca por melhores materiais e por projetos que venham a melhorar a eficiência dos motores. Convênios com universidades e testes em laboratórios internacionais com novos materiais são práticas comuns nos dias de hoje.

Um dos grandes desafios é aumentar ainda mais o rendimento dos motores sem aumentar o seu tamanho, que está fixado na Norma brasileira NBR 17094, nem seus custos de fabricação.

Uma alternativa que vem sendo estudada é a substituição do alumínio fundido na gaiola do rotor por cobre, também fundido. No entanto, o aumento da condutividade do material das barras e anéis do rotor, se por um lado aumenta o rendimento, por outro reduz o torque na partida, assim, é importante ressaltar que a utilização de rotores com gaiola de alumínio ou de cobre dependeria da aplicação do motor [30].

A utilização de cobre na gaiola do rotor é recomendável para o aumento do rendimento do motor apenas em aplicações de baixo escorregamento. Isso se dá ao fato de que, nessa região, o valor da parcela resistiva do circuito da gaiola é muito maior do que a parcela reativa, assim, a

utilização de um material com alta condutividade no rotor, em relação a um de menor condutividade, proporciona um aumento significativo da corrente circulante na mesma e consequentemente a redução das perdas joule correspondente, o que incrementa de forma notável o torque e o rendimento do motor.

Já em regiões de alto escorregamento, como na partida por exemplo, ocorre exatamente o contrário do exposto.

Em outras palavras, quando aumentamos o valor da parte resistiva do circuito da gaiola, embora diminuamos a corrente circulante, aumentamos em muito o valor do fator de potência da mesma, de tal modo que o torque resultante também aumente.

Quando se deseja torques de partida elevados, não é recomendável a utilização de cobre na gaiola do rotor, porém, se os torques de partida não forem significativos para o acionamento da carga, a utilização de cobre passa a ser um fator importante a ser considerado na construção dos motores na busca por melhores rendimentos [30].

A figura 6.6, a seguir nos dá a ideia de quanto se evoluiu em termos de rendimento nos últimos 50 anos.

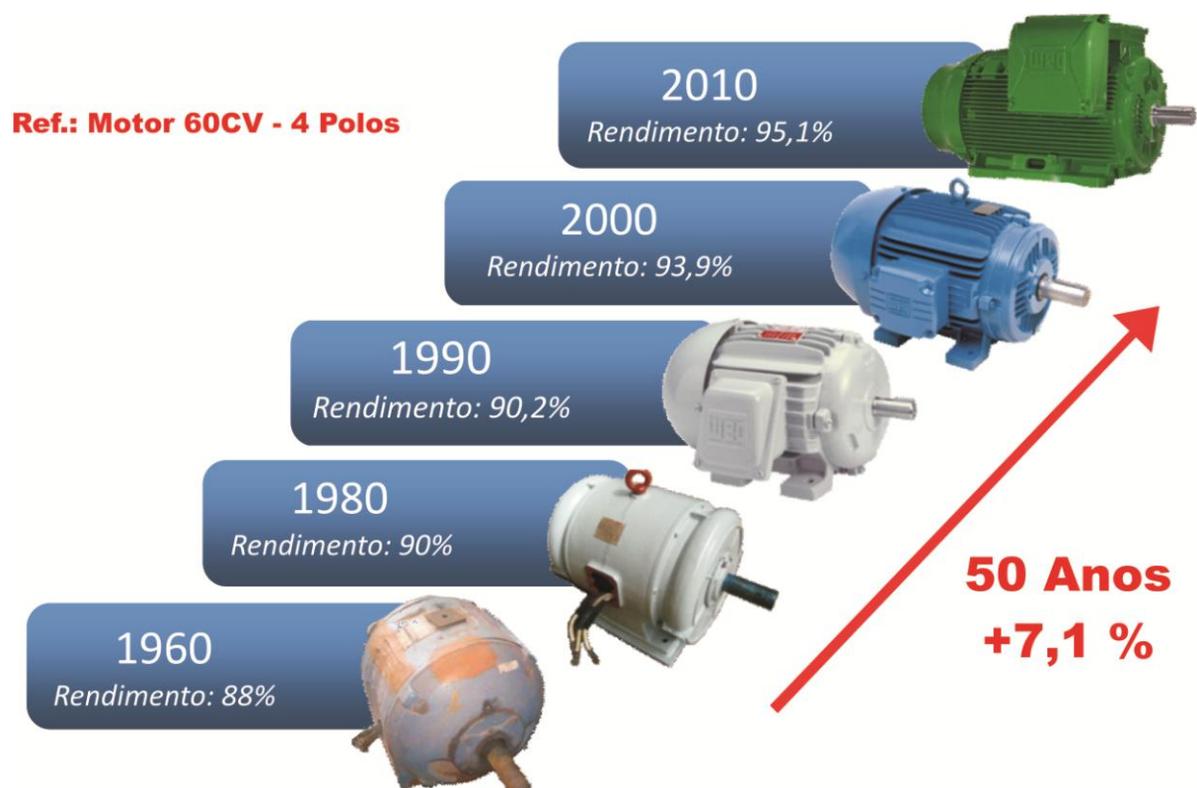


Figura 6.6 – Evolução tecnológica dos Motores elétricos de Indução trifásicos

Por outro lado, o aumento do rendimento das máquinas elétricas está ligado ao aperfeiçoamento do projeto eletromagnético e do processo de fabricação, ao uso de maiores quantidades e melhores materiais. No entanto, parece que o limite das propriedades eletromagnéticas de alguns materiais já foi atingido, como o cobre, o alumínio e até mesmo as chapas de aço. Enquanto novos materiais não forem descobertos, o aumento do rendimento das máquinas elétricas será limitado pelo seu custo de fabricação e pelo tamanho do motor [30].

7 ANÁLISE DOS DADOS, RESULTADOS E TRABALHOS FUTUROS

7.1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista a análise dos dados e a projeção da redução do consumo de energia elétrica que a atual legislação de eficiência brasileira apresenta, podemos projetar importantes avanços para o uso mais eficiente de energia com a utilização em motores elétricos de alto rendimento com o passar dos anos.

Segundo informação colhida junto a um dos maiores fabricantes nacional, análises preliminares indicaram um crescimento superior a 600% na venda de motores de alto rendimento, ou seja, que atendem a atual legislação de eficiência energética, se compararmos o volume vendido em 2011 com o mesmo período de 2009, quando ainda não existia a obrigatoriedade da utilização destes motores. Por outro lado, a quantidade exata de motores elétricos de indução vendidos no Brasil não é divulgada pelos principais fabricantes que atuam no país por razões estratégicas e comerciais.

Muito embora não tenhamos uma avaliação precisa da redução do consumo de energia já explorado no período anterior a atual legislação, podemos afirmar que existe um potencial enorme a ser trabalhado e melhor aproveitado.

7.2 ANÁLISES QUANTITATIVAS

Consideremos a estimativa apresentada pela ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica) como sendo o valor aproximado do volume de motores vendidos no Brasil em 2011.

A tabela 7.1, a seguir, apresenta tais dados.

Tabela 7.1 – Quantidade de Motores Elétricos Trifásicos de Indução de Baixa Tensão vendidos no Brasil

Faixa de Potências	Quantidade Motores vendidos (Ano 2011)
≤ 1 CV	496.000
> 1 CV ≥ 10 CV	670.000
> 10 CV ≥ 30 CV	81.000
> 30 CV ≥ 100 CV	27.300
> 100 CV ≥ 250 CV	7.000
TOTAL	1.281.300

Tomando-se como base os dados apresentados na tabela 7.1, expressaremos em percentual o volume de motores vendidos no Brasil no ano de 2011 conforme tabela 7.2 a seguir:

Tabela 7.2 – Quantidade de Motores Elétricos Trifásicos de Indução de Baixa Tensão vendidos no Brasil em percentual

Faixa de Potências	Quantidade Motores vendidos - Ano 2011 (%)
≤ 1 CV	39%
> 1 CV ≥ 10 CV	52%
> 10 CV ≥ 30 CV	6%
> 30 CV ≥ 100 CV	2%
> 100 CV ≥ 250 CV	1%
TOTAL	100%

Verificamos que quase a totalidade dos motores fabricados e comercializados no Brasil no ano de 2011, cerca de 90%, está compreendida na faixa que varia entre 0,16 e 10CV (Faixas de potências normalizadas para motores elétricos de indução trifásicos) e que 39% dessas potências estão fora do limite estabelecido pela Lei 10.295, que determina valores de rendimento somente a partir de 1CV.

Para fins didáticos e de entendimento do assunto, consideraremos a diferença do rendimento das tabelas 3.1 e 3.3 e faremos a média para o grupo de potências compreendidas nos volumes da tabela 7.1 apresentando seus respectivos rendimentos, por polaridade, de acordo com a legislação atual.

Tabela 7.3 – Média do ganho de rendimento em percentual de Motores Elétricos Trifásicos de Indução de Baixa Tensão de acordo com a Lei 10.295

Faixa de Potências	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos
≤ 1 CV	3,0%	2,5%	7,0%	4,0%
> 1 CV ≥ 10 CV	3,0%	2,6%	3,9%	4,4%
> 10 CV ≥ 30 CV	2,0%	2,1%	1,4%	1,8%
> 30 CV ≥ 100 CV	1,2%	1,0%	1,4%	0,9%
> 100 CV ≥ 250 CV	1,2%	1,0%	1,0%	0,6%

Para as potências menores ou iguais a 1CV, o rendimento considerado foi o da potência de 1CV, tendo em vista que as potências inferiores não são discriminadas na tabela de rendimento constantes na Lei 10.295.

Se considerarmos que os motores mais comumente utilizados e com o maior número de aplicações na indústria são os de 2 e de 4 polos, teremos o ganho médio de rendimento conforme tabela 7.4 a seguir:

Tabela 7.4 – Média do incremento de rendimento em percentual de Motores Elétricos Trifásicos de Indução de Baixa Tensão de 2 e 4 polos de acordo com a Lei 10.295

Faixa de Potências	Média do incremento do Rendimento - Motores de 2 e 4 polos (%)
≤ 1 CV	2,75%
> 1 CV ≥ 10 CV	2,80%
> 10 CV ≥ 30 CV	2,05%
> 30 CV ≥ 100 CV	1,10%
> 100 CV ≥ 250 CV	1,10%

Ao contrário do que supúnhamos, os rendimentos estabelecidos pela Lei 10.295 apresenta os maiores incrementos nos motores de MENOR potência, justamente os motores compreendidos na faixa de maior volume de vendas no ano de 2011 de acordo com os dados colhidos junto a ABINEE.

O entendimento de que essa razão fosse invertida, ou seja, maiores ganhos de rendimento seriam verificados nas maiores potências, se dá ao fato de que os motores menores, de maneira geral, trabalham normalmente saturados. Isto significa dizer que eles apresentam uma corrente a

vazio muito próxima da corrente nominal, o que não acontece com os motores maiores. Outro ponto seria a dificuldade em se adicionar mais material nos motores (como ferro e cobre) para minimizar suas perdas devido a limitação do espaço pela a padronização das carcaças.

Por outro lado, se tomarmos como base os dados apresentados na tabela 7.1, transformarmos a média das potências compreendidas nos grupos para KW (Kilowatts) e multiplicarmos pelo volume de motores vendidos, poderemos estimar a quantidade de energia elétrica média necessária para o acionamento dessas máquinas. A tabela 7.5, a seguir, nos mostra as potências em CV usualmente utilizadas na indústria para motores elétricos de indução trifásicos que estão compreendidas nos grupos apresentado na tabela 7.1.

Tabela 7.5 – Potências Normalizadas que compõem o grupo de motores estudado

Grupo de Potências	Potências Normalizadas (CV)
≤ 1 CV	0,16 / 0,25 / 0,33 / 0,5 / 0,75 / 1,0
> 1 CV ≥ 10 CV	1,5 / 2,0 / 3,0 / 4,0 / 5,0 / 6,0 / 7,5 / 10
> 10 CV ≥ 30 CV	12,5 / 15,0 / 20,0 / 25,0 / 30,0
> 30 CV ≥ 100 CV	40,0 / 50,0 / 60,0 / 75,0 / 100,0
> 100 CV ≥ 250 CV	125,0 / 150,0 / 175,0 / 200,0 / 250

Tabela 7.6 – Média da Potências Normalizadas que compõem o grupo de motores estudado

Média das Potências Normalizadas		
Grupo de Potências	CV	KW
≤ 1 CV	0,5	0,37
> 1 CV ≥ 10 CV	5,0	3,67
> 10 CV ≥ 30 CV	20,0	14,68
> 30 CV ≥ 100 CV	65,0	47,71
> 100 CV ≥ 250 CV	180,0	132,2

Assim, se multiplicarmos o número de motores vendidos pela potência média em KW descrita na tabela 7.6,

Tabela 7.7 – Média do consumo de energia elétrica necessária para acionar o volume de motores que compõem o grupo de motores estudado

Grupo de Potências	Potência Média (KW)	Motores vendidos - 2011	KW Total por grupo
≤ 1 CV	0,37	496.000	183.520
> 1 CV ≥ 10 CV	3,67	670.000	2.458.900
> 10 CV ≥ 30 CV	14,68	81.000	1.189.080
> 30 CV ≥ 100 CV	47,71	27.300	1.302.483
> 100 CV ≥ 250 CV	132,2	7.000	925.400
TOTAL		1.281.300	6.059.383

podemos verificar que o consumo médio de energia elétrica para a utilização dos motores vendidos em 2011 foi superior a 6.000 KW.

Por outro lado, se considerarmos que os valores estabelecidos na Lei 10.295 proporcionaram um incremento médio de rendimento da ordem de 2% (dois por cento) podemos dizer que, com base no exemplo acima, o Brasil deixou de consumir, em média, cerca de 120.000 KW em potência elétrica apenas com a validação da atual legislação.

7.3 ANÁLISES QUANTITATIVAS

De acordo com o apresentado no capítulo 2 dessa dissertação, motores elétricos são responsáveis por cerca de 75% da potência consumida na indústria brasileira. Se considerarmos que os valores estabelecidos na Lei 10.295 proporcionaram um incremento médio de rendimento da ordem de 2% (dois por cento) podemos estabelecer a redução do consumo de energia elétrica (a partir da figura 2.8) como mostrado a seguir:

Consumo de Energia Elétrica por Motores Elétricos na Indústria após a Lei 10.295 (TWh)

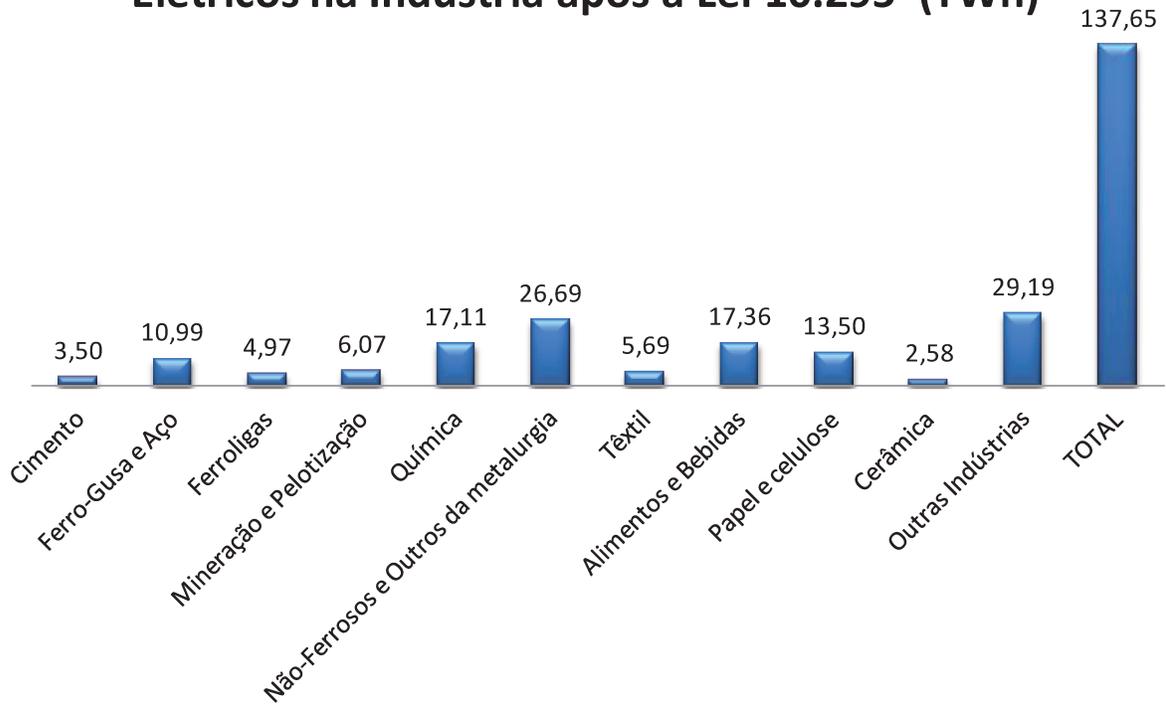


Figura 7.1 – Consumo de Energia Elétrica por Motores Elétricos na Indústria brasileira após a obrigatoriedade da Lei 10.295

Conclui-se assim que, somente no primeiro ano da obrigatoriedade do atendimento dos valores de rendimento dispostos na Lei 10.295 mais de 2.800 GWh de energia elétrica deixaram de ser consumidos, somente em motores elétricos.

Trata-se de um valor bastante expressivo e, se comparado com os valores apresentados na figura 2.8, representa mais que a totalidade do consumo de motores elétricos na indústria cerâmica e cerca da metade do consumo da indústria têxtil.

Consumo de Energia Elétrica por Motores Elétricos na Indústria (TWh)

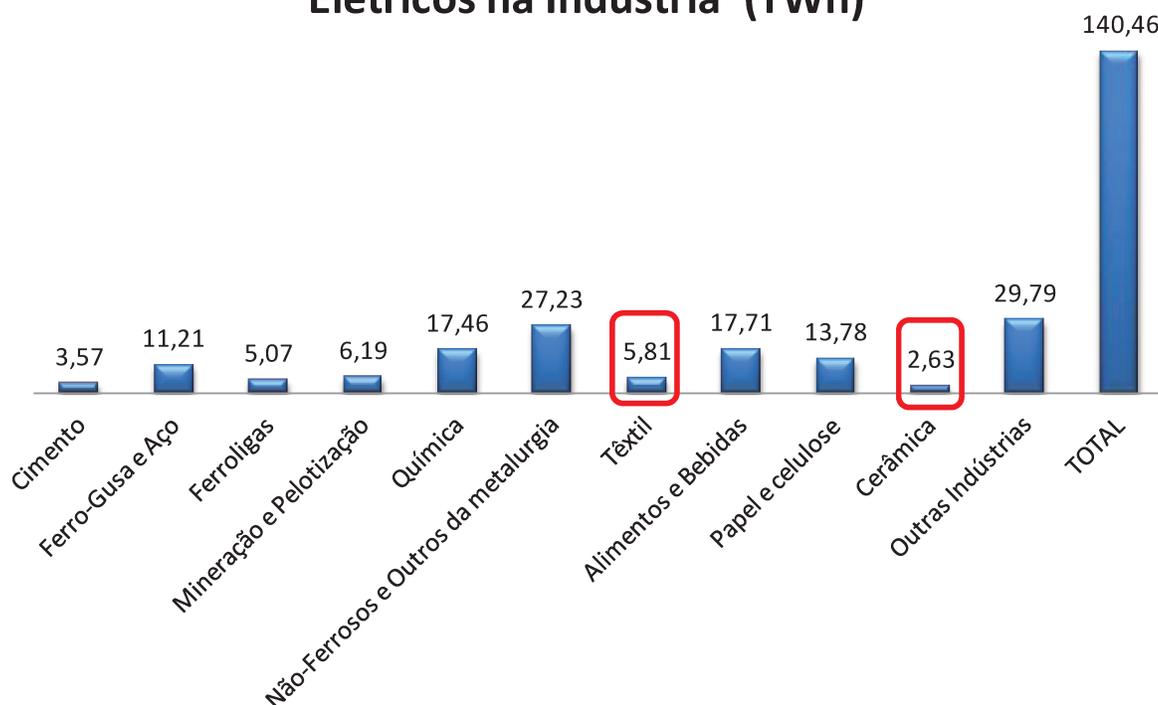


Figura 7.2 – Reexibição da Figura 2.8 – Destaque para os resultados obtidos

Se compararmos com os dados apresentados na figura 2.4, observamos que essa redução equivale a quase metade do consumo residencial da região Norte do Brasil e cerca de 80% do montante consumido pelo comércio da mesma região no ano de 2009.

Consumo de energia Elétrica por Mercado (GWh)

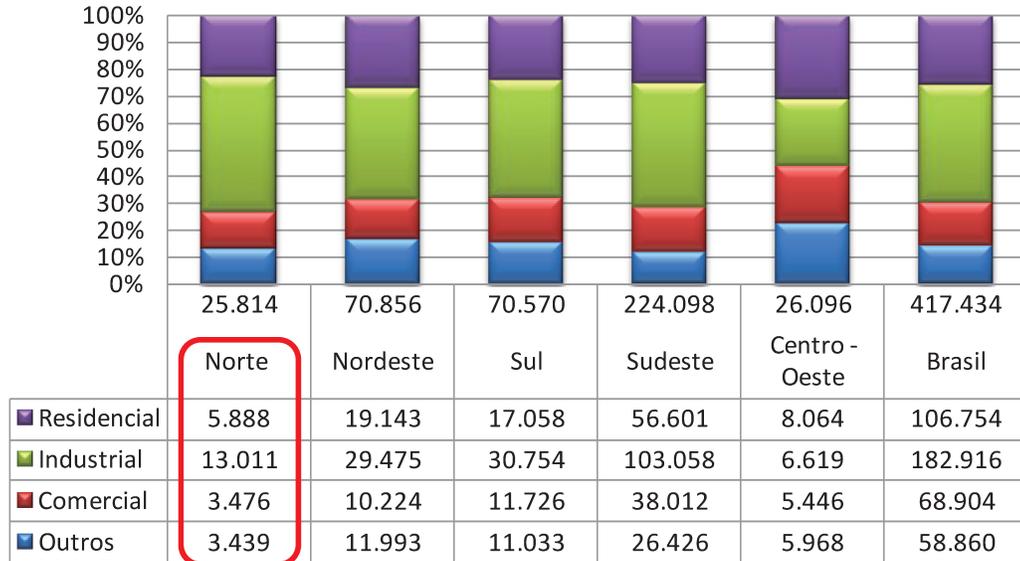


Figura 7.3 – Reexibição da Figura 2.4 – Destaque para os resultados obtidos

Se compararmos com a Matriz de Energia Elétrica brasileira, de acordo com os dados do Balanço Energético Nacional estudado, 2,8 TWh representa cerca de 3 vezes toda a energia eólica disponível no Brasil e mais do que toda a energia importada de países com o a Argentina, a Venezuela e o Uruguai juntos [3] [14].

7.4 TRABALHOS FUTUROS

- Análise da contribuição da redução do consumo de eletricidade e de eficiência energética a partir da utilização de motores de Alto Rendimento e a relação com a emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil;

- Contribuições para a conservação de energia através da utilização de motores de indução de Extra Alto Rendimento para cargas variáveis com a utilização de inversores de frequência e o impacto do aumento da eficiência energética na indústria brasileira;

- Criação de modelo para servir de suporte para a verificação e validação dos percentuais mínimos de eficiência energética estabelecidos pelas Normas brasileiras das máquinas e equipamentos importados no Brasil com motores elétricos;

- Análise da Geração elétrica no Brasil e a contribuição que a proposição de normas de eficiência energética para os geradores e transformadores atualmente utilizados nas usinas hidrelétricas brasileiras bem como proposição da atualização do parque de geração atual e os valores mínimos de rendimento para novos empreendimentos;

8 CONCLUSÕES

Um dos principais objetivos do estudo dessa dissertação era verificar quais os impactos que a Lei 10.295 traria sobre a Matriz Energética brasileira e se haveriam ganhos efetivos.

Diante dos dados e resultados apresentados nos itens 5.1 e 5.2, podemos afirmar que o atendimento da Lei trará, em um curto espaço de tempo, índices significativos de redução do consumo de energia elétrica e de eficiência energética no Brasil.

Por outro lado, a fabricação de motores com maiores rendimentos necessita que maiores quantidades de matéria-prima (cobre, ferro, alumínio) sejam extraídas da natureza.

Podemos contribuir com este estudo a necessidade de:

- Que haja maiores incentivos por parte do governo, bem como a criação de normas rígidas, para a reciclagem dos materiais existentes;
- A criação de um “Selo Verde” para os motores que utilizem materiais reciclados na sua composição;
- Entendermos que, tão importante quanto a reciclagem dos materiais na fabricação dos motores, os valores de rendimento estabelecidos na atual lei 10.295 devam ser revistos, para cima, periodicamente a fim de incentivar novas práticas industriais e promover que investimentos em pesquisa e desenvolvimento ocorram, fomentando uma maior participação do meio acadêmico junto a indústria nacional;
- A adequação do parque industrial brasileiro promovendo que as ações descritas contribuam de maneira significativa na conservação de energia, na matriz energética do país e na preservação dos recursos naturais existentes;
- A elaboração de Balanços Energéticos específicos e individualizados por indústria a fim de maximizar a eficiência energética por planta e por segmento;
- A criação de uma cultura de eficiência energética promovendo a educação continuada e treinamento para toda a sociedade;
- Inserir o tema Eficiência Energética na educação formal, associada a questões ambientais e de combate ao desperdício de uma forma geral;
- Introduzir a Eficiência Energética no currículo de engenharia e arquitetura e também o conceito de Eficiência Energética em cursos de administração e economia;

- Ampliar a etiquetagem promovida pelo INMETRO para outros produtos, incluindo equipamentos industriais com maior potencial de economia e considerar a retirada compulsória de produtos que não atendam a índices mínimos de Eficiência Energética do mercado brasileiro;

- Buscamos a atuação conjunta do meio acadêmico com o PROCEL / INMETRO, para ampliar a eficácia dos programas de eficiência energética bem como desenvolver novos programas a médio e longo prazo;

- O entendimento da necessidade de políticas para o gerenciamento energético nas instalações industriais brasileiras e buscar o entendimento quanto à relação entre a competitividade na produção industrial nacional e a redução da participação do insumo energia elétrica na composição dos custos totais de produção no Brasil;

E refletir sobre os seguintes aspectos:

- O que está sendo feito para que a Lei seja efetivamente cumprida, a fim de garantir que os equipamentos importados com motores elétricos de Indução de outros países atendam a legislação brasileira?

- Existe um planejamento para a efetiva verificação da legislação?

Assim, com esse trabalho, concluímos a necessidade da continuidade dos estudos referente aos aspectos levantados e propomos que grupos de trabalho para o acompanhamento das metas de Eficiência Energética, reciclagem e preservação dos recursos naturais existentes bem como a readequação do parque industrial brasileiro envolvendo pesquisadores, empresários, órgãos governamentais e usuários sejam criados, estimulados e apoiados.

REFERÊNCIAS

- [1] EPE – Empresa de Pesquisa Energética - Resenha mensal o Mercado de Energia Elétrica – Ano IV – Nº 39 – Dezembro de 2010 - Publicação da Diretoria de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais - disponível no site: http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/20101222_1.pdf [Acesso em 23 de Janeiro de 2011].
- [2] EPE – Empresa de Pesquisa Energética – Plano Decenal de Energia (PDE) 2010-2019 – Nota Técnica DEA 13/10 – Caracterização do Cenário Macroeconômico – Rio de Janeiro - Julho de 2010 - disponível no site: http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20100809_3.pdf [Acesso em 23 de Janeiro de 2011].
- [3] EPE – Empresa de Pesquisa Energética - Balanço Energético Nacional 2010 - BEN - Ano Base 2009 – disponível no site: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf [Acesso em 23 de Janeiro de 2011].
- [4] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Publicação da Diretoria de Pesquisa, Coordenação de Contas Nacionais, Sistemas de Contas Nacionais – Referência 2002-2007 - disponível no site: http://www.ibge.gov.br/brasil_em_sintese/tabelas/contas_nacionais_tabela01.htm, <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/contasnacionais/2006/default.shtm> e http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1766 [Acesso em 25 de Janeiro de 2011] e [Atualizado em 09 de Maio de 2012].
- [5] ELETROBRAS/ PROCEL – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. / Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Diretoria de Tecnologia - Consórcio ECOLUZ / PUC - Rio - Departamento de Planejamento e Estudos de Eficiência Energética - Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Ano Base 2005 - Publicado em Março de 2008 - disponível no site: <http://www.eletronbras.com/pci/main.asp> [Acesso em 27 de Fevereiro de 2011].
- [6] PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Informação ao consumidor - disponível no site: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/etiquetas.asp> [Acesso em 06 de Março de 2011].
- [7] INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - apostila disponível no site: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/eficiencia.asp> [Acesso em 22 de Janeiro de 2011].
- [8] INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - apostila disponível no site: http://www.inmetro.gov.br/noticias/verNoticia.asp?seq_noticia=640 [Acesso em 22 de Janeiro de 2011].

- [9] Presidência da república - Casa Civil – Subchefia para assuntos Jurídicos - disponível no sítio: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/LEIS_2001/L10295.htm [Acesso em 08 de Março de 2011].
- [10] Senado Federal – Subsecretaria de Informações - disponível no sítio: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=234101> [Acesso em 08 de Março de 2011].
- [11] Presidência da república - Casa Civil – Subchefia para assuntos Jurídicos - disponível no sítio: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4508.htm [Acesso em 08 de Março de 2011].
- [12] Ministério de Minas e Energia – Consultoria Jurídica - disponível no sítio: http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/legislacao/portaria_interministerial/Portaria_MME-MCT-MDIC_no_553-2005.pdf [Acesso em 08 de Março de 2011].
- [13] Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO - disponível no sítio: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001485.pdf> [Acesso em 08 de Março de 2011].
- [14] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL - disponível no sítio: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp> [Acesso em 20 de Março de 2011- Atualizado em 21.05.2012].
- [15] Geller, H - O Uso Eficiente da Eletricidade - INEE - 1991.
- [16] JANNUZZI, G. de M., SWISHER, J. N. P. Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis. Campinas – SP: Autores Associados, 1997.
- [17] WOLFF, JOCA – O Motor elétrico: uma história de energia, inteligência e trabalho – Projeto Editorial UNERJ - Jaraguá do Sul – SC – Editora UNERJ, 2004.
- [18] HAYT, WILLIAM H., Jr. – Eletromagnetismo – Tradutores Ricardo Furtado de Mendonça, 2ª Edição e Paulo Cesar Pfaltzgraff Ferreira 3ª edição – 3ª Ed. – Rio de Janeiro – LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 1983.
- [19] NASSAR, SAYED ABU – Máquinas Elétricas – Tradução Heloi José Fernandes Moreira – São Paulo - Editora McGraw-Hill do Brasil, 1984. (Coleção Schaum)
- [20] CREDER, HÉLIO – Instalações Elétricas – 11ª Ed. – Rio de Janeiro – LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 1991.
- [21] KOSOW, IRVING LIONEL – Máquinas Elétricas e Transformadores – Tradução de Felipe Luis Daiello e Percy Antonio Soares – Rio de Janeiro – Globo, 1986.

[22] MARTIGNONI, AFONSO – Teoria da Eletrotécnica – Série Manuais técnicos - volume 3 – Edart Livraria Editora Ltda – São Paulo – 1967.

[23] BOTTURA, CELSO PASCOLI e BARRETO, GILMAR – Veículos Elétricos – Série Pesquisas – Editora da UNICAMP – Campinas – 1989.

[24] WEG Equipamentos Elétricos S/A – Manual de Motores Elétricos – Nº 050.09/112009 – Manuais Técnicos – Jaraguá do Sul – 2009 - disponível em: <http://www.weg.net/files/products/WEG-motores-eletricos-baixa-tensao-mercado-brasil-050-catalogo-portugues-br.pdf>.

[25] FALCONE, AURIO GILBERTO – Eletromecânica – Transformadores e transdutores, conversão eletromecânica de energia, máquinas elétricas – Volumes I e II – Editora Edgard Blücher – São Paulo – 1979.

[26] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr, CHARLES; UMANS, STEPHEN D. – Máquinas Elétricas – Tradução de Anatólio Laschuk – 6º Edição - Porto Alegre – Bookman, 2006.

[27] JORDÃO, RUBENS GUEDES – Máquinas Síncronas – Livros Técnicos e Científicos - Rio de Janeiro - Editora da Universidade de São Paulo - São Paulo - (LTC/EDUSP), 1980.

[28] GRAY, ALEXANDER e WALLACE, G. A. – Eletrotécnica: Princípios e Aplicações – Tradução da 7ª Edição: Miguel Magaldi - Revisão de Amaury Alves Menezes – 7º Edição - Livros Técnicos e Científicos (LTC) - Rio de Janeiro, 1976 (Do original em Inglês: Principles and practice of electrical engineering).

[29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – Sistemas de Gestão da Energia – Requisitos com orientação para o uso – Número de referência ABNT NBR ISO 50001:2011- Primeira Edição 15.06.2011 – Válida a partir de 15.07.2011.

[30] NAU, SEBASTIÃO LAURO; SIGUIMOTO, CELIA MIWA e CARVALHO, RUBENS BERNARDES de – Influência dos Materiais Condutores e Magnéticos no Desempenho de Motores Elétricos e sua Correlação com a Qualidade de Energia Elétrica – In: Apostila do Curso de Engenharia Elétrica – UNERJ – Jaraguá do Sul - SC – Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto – WEG Equipamentos Elétricos S/A, 2003.

[31] SOUZA, HAMILTON MOSS de – Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) - Departamento de Desenvolvimento Energético – Ministério de Minas e Energia – Palestra apresentada em Juiz de Fora - Minas Gerais - IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética 2011 - Agosto de 2011.

[32] JARDIM, SERGIO ROBERTO e BARRETO, GILMAR – A Conservação de Energia Através da Utilização de Motores Elétricos de Alto Rendimento – In: IV CBEE, 2011, Juiz de Fora - Minas Gerais - IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2011.

[33] JARDIM, SERGIO ROBERTO e BARRETO, GILMAR – O Panorama Energético Brasileiro e a Contribuição da Utilização de Motores Elétricos de Alto Rendimento para a Conservação de Energia – Em: Eletricidade Moderna, 2012, São Paulo - São Paulo

[34] JARDIM, SERGIO ROBERTO e BARRETO, GILMAR – Energy conservation using high-efficiency electric motors – In: ICREPQ'12, 2012, Santiago de Compostela - Espanha - International Conference on Renewable Engines and Power Quality (ICREPQ) - European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (A4EPQ)

[35] JARDIM, SERGIO ROBERTO e BARRETO, GILMAR – Energy conservation using high-efficiency electric motors – In: Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQ) – No.10, 25th April 2012, RE&PQJ-10, ISSN 2172-038X - Publicado em Lalín - Espanha - Abril de 2012

APÊNDICES

APÊNDICE A – Artigos publicados a partir do tema abordado nessa dissertação



A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE ALTO RENDIMENTO

Eng^o Sergio Roberto Jardim e Prof. Dr. Gilmar Barreto

*Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC,
Departamento de Máquinas Componentes e Sistemas Inteligentes – DMCSI –
Av. Albert Einstein, 400 – Cidade Universitária Zeferino Vaz –
Barão Geraldo – Campinas – SP – CEP: 13083-852 – Brasil -
sergiojardim@squadcorp.com.br e gbarreto@dmcsi.fee.unicamp.br*

Abstract: In view of the current policy of Conservation and Rational Use of Energy in Brazil which aims at the efficient allocation of energy resources and preserve the environment, understanding the legislation and the problems related to inadequate intake of energy promotes the creation of basic parameters as well as the formation of industrial policies for energy conservation and efficiency that will promote better use of resources at lower cost. This paper seeks to emphasize this matter with your contributions. *Copyright © 2011 CBEE/ABEE*

Keywords: Energy Efficiency, Energy Conservation, Electrical Motors.

Resumo: Tendo em vista a atual política de Conservação e Uso Racional de Energia no Brasil, que tem por objetivo a alocação eficiente de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente, o entendimento da Legislação e dos problemas relacionados ao consumo inadequado da energia propicia a criação de parâmetros básicos bem como a formação de políticas industriais de conservação e eficiência energética que venham a promover um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis a menores custos. Este trabalho procura enfatizar este tema com suas contribuições.

Palavras Chaves: Eficiência Energética, Conservação de Energia, Motores Elétricos.

1 INTRODUÇÃO

A gestão e a conservação de energia são temas de grande importância. Nesse sentido, estudiosos, empresários e os mais diversos setores do governo têm trabalhado para que a conservação de energia e a eficiência energética sejam elevadas nos mais diversos setores.

Aliar ao ambiente acadêmico o aspecto prático, buscar soluções para a economia de energia através do debate de soluções bem como avaliar o quanto se evoluiu no Brasil desde a criação da Lei de Eficiência Energética (Lei 10.295, de 17 de outubro de 2001) é determinante para o desenvolvimento do setor elétrico brasileiro.

O entendimento da legislação e dos problemas relacionados ao consumo inadequado da energia propicia a criação de parâmetros básicos bem como a formação de políticas industriais de conservação e eficiência energética que venham a promover um

melhor aproveitamento dos recursos disponíveis a menores custos.

Novas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento tanto no setor energético quanto no setor produtivo surgem e nos trazem a possibilidade que avanços tecnológicos ocorram. Este trabalho procura enfatizar esse tema com suas contribuições.

2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

De acordo com divulgado no Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica, a energia produzida no Brasil a partir de usinas hidráulicas representa 66,27% da produção de energia elétrica total. Nelas a energia potencial da água é transformada em cinética e esta é transformada em energia elétrica através da conversão eletromecânica que ocorre no interior das máquinas síncronas.

O estudo da evolução do consumo de energia elétrica é um indicador do comportamento socioeconômico de uma sociedade.

Aspectos como crescimento da produção industrial, evolução demográfica e inserção de novos hábitos de conservação estão fortemente ligados ao uso da eletricidade como insumo básico.

Assim, podemos definir Eficiência Energética como uma atividade que procura aperfeiçoar o uso das fontes de energia disponíveis, sejam elas renováveis ou não.

Conseguiremos alcançar níveis satisfatórios de eficiência energética quando for possível atendermos a necessidade por energia de todos os seguimentos da sociedade sem que seja necessário o investimento em novas fontes geradoras de energia, ou seja, quando pudermos utilizar melhor e de forma mais inteligente os recursos já disponíveis.

2.1 Previsão de crescimento da participação da indústria em relação ao PIB

De acordo com as informações contidas no Plano Decenal de Energia (PDE) 2010-2019 publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), para o horizonte indicado, a evolução industrial apresentará participação relativa no PIB brasileiro da ordem de 26,6% entre 2010-2014 e de 27,3% entre 2015-2019 (EPE 2010 - Plano Decenal de Energia 2010-2019).

2.2 O Consumo Energético no Brasil

De acordo com o apurado no Balanço Energético Nacional 2010 – BEN o consumo de energia no Brasil está representado por sete setores distintos. São eles: o industrial, responsável por cerca de 37% do consumo total, o residencial por cerca de 11%, o comercial por cerca de 3%, o público por cerca de 2%, o agropecuário por cerca de 5%, o setor energético por cerca de 12% e o de transportes, responsável por cerca de 30% de toda a energia demandada no país.

É importante salientar que os dois maiores consumidores estão subdivididos. O setor de Transportes é subdividido em Rodoviário, Ferroviário, Aéreo e Hidroviário.

O setor Industrial é subdividido em Cimento, Ferro-Gusa e Aço, Ferroligas, Mineração e Pelotização, Química, Não-Ferrosos e Outros da Metalurgia, Têxtil, Alimentos e Bebidas, Papel e Celulose, Cerâmica e por fim, Outras Indústrias. (EPE 2010–BEN 2010 - Ano Base 2009).

2.3 A Geração e o Consumo de Energia Elétrica no Brasil

A geração de energia elétrica no Brasil atingiu 466,2 TWH em 2009, enquanto que as importações líquidas foram de 40,0 TWH. Somadas, permitiram uma oferta interna de energia elétrica de 506,1 TWH, montante 0,2% superior a 2008, (EPE 2010–BEN 2010 - Ano Base 2009).

O Brasil tem hoje cerca de 190 milhões de habitantes e, segundo a Resenha mensal do Mercado de Energia Elétrica de dezembro de 2010, o consumo de energia elétrica acumulado entre novembro de 2009 a

novembro de 2010 totalizou mais de 417 TWH. O destaque foi o incremento no consumo de energia residencial do Nordeste do país. Segundo o documento, o crescimento no consumo está relacionado com o aumento do emprego e dos programas de transferência de renda. De acordo com o CAGED – Cadastro Geral de Empregados e Desempregados, órgão ligado ao Ministério do Trabalho e Emprego, de janeiro a outubro de 2010 foram criados 383 mil empregos formais na região, incrementando assim o consumo de energia elétrica no país (EPE 2010 - Resenha mensal do Mercado de Energia Elétrica).

2.4 O Consumo de Energia Elétrica na Indústria Brasileira

O consumo de energia elétrica no Brasil totalizou 417.434 gigawatts-hora (GWH) no ano de 2010 de acordo com a EPE – Empresa de Pesquisa Energética, empresa ligada ao Ministério de Minas e Energia, alta de 8,1% frente ao mesmo período de 2009, sendo que a Indústria brasileira representou 43,82% do total consumido no país.

O montante de energia elétrica consumido na indústria é dividido de acordo com a segmentação disposta no Balanço Energético Nacional 2010 – BEN e é apresentado no gráfico 1.1.

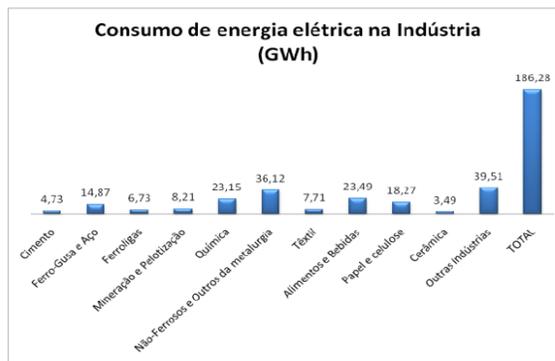


Figura 1.1 – Consumo Energia Elétrica na Indústria (GWH)
Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN.

2.5 A distribuição do Consumo de Energia Elétrica na Indústria brasileira

De acordo com o último Relatório de Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo elaborado pelo PROCEL/ELETROBRAS, publicado no Brasil em 2008, podemos verificar que na indústria brasileira, dentre os principais sistemas motrizes, ou seja, que se utilizam de motores elétricos, os sistemas de ar comprimido e vácuo são os que estão mais presentes, com uma participação de 72% do consumo, seguido pelos sistemas de bombeamento com 59%, o de movimentação, manuseio e tratamento com 47% e o de ventilação com 46%.

O Relatório também esclarece que não há, dentro do universo considerado, uma política para o Gerenciamento Energético das instalações.

A ausência de ações desse tipo enseja um potencial expressivo para a aplicação de melhorias da eficiência energética do setor.

Os custos da energia elétrica, de maneira geral, representam em média cerca de 10% dos custos totais das empresas.

Por outro lado, setores como o de produtos de Madeira (45%), de Metalurgia básica (12,4%), produtos Minerais Não-metálicos (11,4%), Artefatos de couro (14,7%), Reciclagem (14,4%) participam com percentuais significativos dos seus custos de produção para a utilização de energia elétrica.

Essa participação determina, em parte, a propensão dessas indústrias em investir em medidas de eficiência energética.

A distribuição do consumo da energia motriz, proveniente de motores elétricos, na indústria brasileira é apresentada na figura 1.2 (ELETROBRAS/PROCEL - Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso).

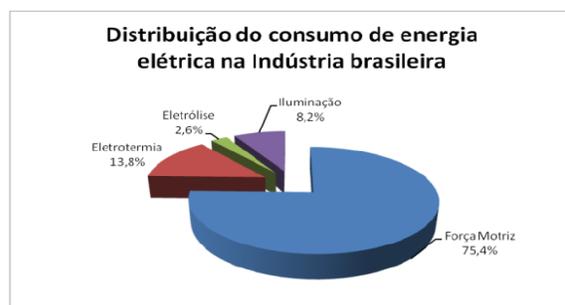


Figura 1.2 – Consumo Energia Elétrica na Indústria

Fonte: Relatório de Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo

2.6 A Contribuição do Consumo de Energia Elétrica por motores elétricos de Indução na Indústria brasileira

As informações retiradas do Relatório de Pesquisa de Posse de equipamentos elétricos e Hábitos de Consumo nos deram subsídios para avaliar que 75,4% do consumo de energia elétrica da indústria advêm dos motores elétricos.

Podemos assim transformar o gráfico obtido através do Balanço Energético Nacional, que nos mostra o consumo de energia elétrica na indústria, de maneira a obter o consumo de energia elétrica utilizado nas indústrias somente para a utilização de motores elétricos de indução, figura 1.3.

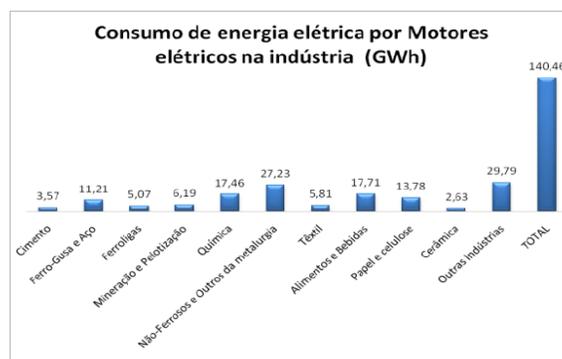


Figura 1.3 – Consumo de Energia Elétrica por Motores Elétricos na Indústria brasileira

Avaliando-se os índices de rendimento apontados na Portaria Interministerial N° 553 de 08 de dezembro de 2005 em cumprimento da Lei 10.295, podemos estabelecer para fins de interpretação do assunto, que atualmente os motores elétricos trifásicos a ser utilizados no Brasil devem possuir índices de rendimento melhorados em pelo menos 2% na sua média, o que representaria um decréscimo no consumo total de energia na indústria em torno de 2,8 GWH.

3 LEGISLAÇÃO

3.1 A Crise Energética no Brasil

A maior parte da energia produzida no Brasil é proveniente de usinas hidrelétricas que por sua vez dependem que os volumes de água dos seus reservatórios estejam sempre com níveis adequados para o perfeito funcionamento do sistema.

Períodos com menor intensidade de chuvas, a ausência de investimentos no setor além da falta de planejamento por parte do governo e dos órgãos regulamentadores contribuíram para a ocorrência de uma série de “apagões” ao longo das últimas décadas. Ao longo da história, a população brasileira atravessou inúmeras situações de falta de energia, porém, o ano de 2001 foi determinante para o Brasil, tendo em vista a necessidade de racionamento, o incremento no preço da tarifa de energia, além da instituição de metas de redução de consumo de energia elétrica em todos os setores da sociedade brasileira.

Naquele ano, através da Medida Provisória N° 2.147 de 15.05.2001, o então governo do Presidente Fernando Henrique Cardoso criou e instalou a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica que estabeleceu diretrizes para programas de enfrentamento da crise de energia elétrica.

Após isso, estabeleceram-se regimes especiais de tarifação, limites de uso e de fornecimento de energia elétrica além de medidas de redução de consumo.

O resultado mais significativo e de maior visibilidade para a população brasileira foi a obrigatoriedade da redução do consumo de energia elétrica no setor residencial, compulsoriamente em 20%, sob a

penalidade de multas e do corte do fornecimento de energia.

A demissão de parte dos funcionários das indústrias e a busca por lâmpadas eletrônicas, por grupos geradores e por motores de maior rendimento também puderam ser verificadas nessa ocasião.

Ações isoladas dos governos estaduais e municipais para atingir as metas estabelecidas pelo governo federal como, por exemplo, o desligamento de parte da iluminação pública na cidade de São Paulo e a diminuição do período do atendimento nos setores públicos foram procedimentos adotados.

3.2 Legislação brasileira de Eficiência Energética

O INMETRO, tendo em vista a deficiência do setor elétrico brasileiro, em 1984, iniciou com a sociedade brasileira a discussão quanto à questão da eficiência energética buscando racionalizar o uso dos diversos tipos de energia no país. O objetivo era o de informar os consumidores sobre a eficiência de cada produto e estimulá-los a fazer compras mais conscientes.

No início, o projeto estava ligado à área automotiva e, diante do crescimento e aceitação, ganhou status de Programa Brasileiro de Etiquetagem, atuando principalmente na área de produtos consumidores de energia elétrica.

Diante da crise energética brasileira, ocorrida em 2001, o governo brasileiro decidiu resgatar e publicar um Projeto de Lei que tramitava no Senado Federal que tratava de estabelecer uma política nacional de eficiência energética para máquinas e aparelhos consumidores de energia comercializados no país.

A referida lei foi decretada pelo Presidente da República em 17 de outubro de 2001, Lei 10.295, determinando que o Poder Executivo estabelecesse os níveis máximos de consumo ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia comercializados no país.

Ficou estabelecido ainda que, num prazo de até 1 ano a partir da regulamentação específica de cada produto, seria elaborado um programa de metas, para uma progressiva evolução dos índices.

O passo seguinte à publicação da lei foi a criação e publicação do Decreto 4059, que regulamentou a Lei e que estabeleceu os pontos a serem abordados para a regulamentação específica de cada produto (normas técnicas de referência, mecanismo de avaliação da conformidade, níveis a serem atingidos, fiscalização etc.) e estabeleceu também que o INMETRO seria o órgão responsável pelos programas de fiscalização e avaliação da conformidade no Brasil.

O Decreto foi o responsável pela criação do Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE, com a função, entre outras, de elaborar regulamentação específica para cada tipo de aparelho e máquina consumidora de energia.

A partir deste Decreto, o INMETRO, que de forma voluntária, estabelecia programas de etiquetagem, passou a ter a responsabilidade de estabelecer programas de avaliação da conformidade

compulsórios na área de desempenho energético. Tendo, portanto, papel fundamental na implementação da Lei de Eficiência Energética.

3.3 Cronologia da Legislação brasileira de Eficiência em Motores Elétricos

Lei Nº 10.295 – de 17 de outubro de 2001: Determinou que o Poder Executivo da União estabelecesse os níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no Brasil, com base nos indicadores técnicos pertinentes.

O não cumprimento da presente regulamentação acarretaria aos infratores a aplicação das penalidades previstas na Lei (multa de até 100% do preço de venda por eles praticados por equipamento encontrado).

Decreto Nº 4.059 – de 19 de dezembro de 2001: Instituiu o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE, sob a presidência e a coordenação do Ministério de Minas e Energia.

Decreto Nº 4.508 – de 11 de dezembro de 2002: Definiu os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor de gaiola de esquilo (Padrão e de Alto Rendimento) de fabricação nacional ou importada, para comercialização ou uso no Brasil.

Portaria Interministerial Nº 553 – de 08 de dezembro de 2005: Estabeleceu os níveis mínimos de rendimento nominal a serem atendidos pelos motores elétricos de indução trifásicos, sem a distinção dos níveis de rendimento nominal entre as linhas Padrão e de Alto Rendimento.

A data limite para fabricação no país ou importação do exterior de motores, bem como a sua comercialização, foi alterada para 4 (quatro) anos após a entrada em vigor desta Portaria.

Portaria INMETRO Nº 243 – de 04 de setembro de 2009: Aprovou os Requisitos de Avaliação da Conformidade – RAC para os motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo e a etiquetagem compulsória para esses motores comercializados individualmente ou acoplados em máquinas motrizes de uso final.

4 MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO DE ALTO RENDIMENTO

4.1 Introdução

Motores de Alto Rendimento são aqueles projetados para fornecer a mesma potência útil na ponta do seu eixo utilizando menos energia da rede, se comparados com motores comuns.

No início, um dos critérios decisivos para a escolha dos motores de Alto Rendimento para muitos consumidores era a relação entre o valor do consumo de energia gasta durante o período de vida útil do motor comparado com o seu valor de compra inicial.

Segundo os fabricantes de motores, o consumo de energia durante a vida útil dos motores poderia chegar a 100 vezes o seu valor de compra inicial. Assim sendo, o rendimento dos motores era utilizado como um dos critérios decisivos para a escolha entre a compra de motores novos ou o conserto dos motores antigos.

Por estas e outras razões algumas empresas adotaram políticas de gerenciamento de motores, minimizando seus custos através do uso adequado da energia elétrica. É importante destacar que, tão importante quanto escolher um motor de Alto Rendimento é a execução do seu correto dimensionamento.

4.2 Características básicas ou diferenciais técnicos de comparação dos motores de Indução de Alto Rendimento

Com o objetivo de reduzir as perdas e aumentar seu rendimento, os motores de Alto Rendimento possuem as seguintes características:

- Chapas metálicas com baixas perdas (Aço Silício) que reduzem a corrente de magnetização e as perdas no ferro;
- Enrolamentos especiais de dupla camada que reduzem perdas suplementares;
- Rotor tratado termicamente que reduz perdas suplementares (perdas rotóricas);
- Anel de curto circuito e barras do rotor super dimensionadas para diminuir as perdas Joule;
- Projeto das ranhuras do estator dimensionadas de tal modo que o fator de enchimento seja maior, podendo-se assim reduzir as perdas Joule dos enrolamentos;
- Aprimoramento dos materiais que compõem o sistema de isolamento do motor (fios, filmes isolantes, sistemas de impregnação, verniz, cabos, e demais componentes).

4.3 Considerações para a seleção de Motores Elétricos de Indução

Para a correta seleção e dimensionamento de motores elétricos é necessário conhecimento dos equipamentos a ser acionados e sua influência no processo como um todo, suas principais características de operação, o tipo de acoplamento, a potência consumida, os conjugados, o regime de serviço, a inércia etc.

É fundamental também o conhecimento das características da rede de alimentação (Tensão, Freqüência) e o ambiente onde o equipamento será utilizado.

Os critérios para o dimensionamento de motores poderão seguir os seguintes itens:

- Critério da Potência Eficaz;
- Critério do Conjugado Máximo Motor;
- Critério dos Conjugados Motor e Resistente de Partida;
- Critério do Tempo de Aceleração;
- Critério da Potência Disponível.

5 CONCLUSÕES

O presente artigo aborda o panorama geral do consumo de energia elétrica no Brasil e a redução do consumo de energia que a utilização de motores de Alto Rendimento proporciona.

Foi demonstrado de forma sucinta o histórico da crise energética no Brasil e a evolução da legislação brasileira de eficiência energética em motores elétricos de indução.

Análises quantitativas visando à substituição de motores tradicionais por motores que atendam a legislação atual estão sendo elaboradas e serão apresentadas em trabalhos futuros. Análises preliminares nos indicam um crescimento superior a 600%, se compararmos o volume atual de motores vendidos em 2011 com o volume vendido em 2009, quando ainda não existia a obrigatoriedade da utilização destes motores.

Podemos considerar também que 70% desses novos motores destinam-se a novas instalações e 30% para o mercado de reposição.

Deste modo, a necessidade de uma política para o gerenciamento energético nas instalações industriais brasileiras e buscar o entendimento quanto à relação entre a competitividade na produção industrial nacional e a redução da participação do insumo energia elétrica na composição dos custos totais de produção no Brasil se fazem necessários.

Por outro lado nos levam a reflexões sobre alguns pontos:

- Quais os impactos da Lei 10.295 sobre a matriz energética brasileira? Haverá ganhos efetivos?
- O que está sendo feito para que a Lei seja efetivamente cumprida? Existe um planejamento para a efetiva verificação da legislação?
- O que está sendo feito para garantir que os equipamentos importados com motores elétricos de Indução de outros países principalmente os asiáticos atendam a legislação brasileira?
- Quais serão os investimentos necessários para se obter pouco mais de 2% de rendimento? Quanto tempo será necessário para que essa economia de energia pague o investimento necessário?

Portanto, para termos respostas adequadas para estes questionamentos, grupos de trabalho envolvendo pesquisadores, empresários, órgãos governamentais e usuários devem ser criados, estimulados e apoiados.

6 REFERÊNCIAS

- ELETRONBRAS/PROCEL – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. / Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (2010). *Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Ano Base 2005* – Diretoria de Tecnologia - Consórcio ECOLUZ / PUC - Rio Departamento de Planejamento e Estudos de Eficiência Energética - Publicado em Março de 2008 - disponível em: <http://www.eletronbras.com/pci/main.asp>

- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2010). *Balanço Energético Nacional 2010 - BEN - Ano Base 2009*, páginas 11, 23 e 28 – Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2010). *Plano Decenal de Energia 2010-2019 - Nota Técnica DEA 13/10 – Caracterização do Cenário Macroeconômico*, página 31. Disponível em: http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20100809_3.pdf
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2010). *Resenha mensal o Mercado de Energia Elétrica – Ano IV – Nº 39 – Dezembro de 2010* - Publicação da Diretoria de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais – disponível em: http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/20101222_1.pdf
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – *Apostila de eficiência energética* - disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/eficiencia.asp>
- LOBOSCO, O. S., DIAS, J. L. P. DA (1988) - *Seleção e Aplicação de Motores Elétricos*. - Ed. McGraw-Hill.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – Consultoria Jurídica – *Portaria Interministerial Nº 553 de 08 de Dezembro de 2005* – disponível em: http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/legislacao/portaria_interministerial/Portaria_ME-MCT-MDIC_no_553-2005.pdf
- MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO - *Portaria Inmetro nº 243, de 04 de setembro de 2009* – disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001485.pdf>
- PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – Casa Civil – Subchefia para assuntos Jurídicos - *Lei Nº 10.295, de 17 de Outubro de 2001* - disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/LEIS_2001/L10295.htm
- PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA - Casa Civil – Subchefia para assuntos Jurídicos - *Decreto Nº 4.508, de 11 de Dezembro de 2002* - disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4508.htm
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – *Informação ao consumidor* – disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/etiquetas.asp>
- SENADO FEDERAL – Subsecretaria de Informações - *Decreto Nº 4.059, de 19 de Dezembro de 2001* – disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=234101>
- WEG Equipamentos Elétricos S/A - *Manual de Motores elétricos (050.09/112009)* - disponível em: <http://www.weg.net/files/products/WEG-motores-eletricos-baixa-tensao-mercado-brasil-050-catalogo-portugues-br.pdf>

O PANORAMA ENERGÉTICO BRASILEIRO E A CONTRIBUIÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE ALTO RENDIMENTO PARA A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Engº Sergio Roberto Jardim

*Mestrando em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP,
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC, Departamento de
Máquinas Componentes e Sistemas Inteligentes – DMCSI –
sergiojardim@squadcorp.com.br*

Prof. Dr. Gilmar Barreto

*Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Faculdade de Engenharia Elétrica e
de Computação – FEEC, Departamento de Máquinas Componentes e Sistemas
Inteligentes – DMCSI – gbarreto@dmcsi.fee.unicamp.br*

INTRODUÇÃO

A gestão e a conservação de energia são temas de grande importância. Nesse sentido, estudiosos, empresários e os mais diversos setores do governo têm trabalhado para que a conservação de energia e a eficiência energética sejam elevadas nos mais diversos setores.

Aliar ao ambiente acadêmico o aspecto prático, buscar soluções para a economia de energia através do debate de soluções bem como avaliar o quanto se evoluiu no Brasil desde a criação da Lei de Eficiência Energética (Lei 10.295, de 17 de outubro de 2001) é determinante para o desenvolvimento do setor elétrico brasileiro.

Novas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento tanto no setor energético quanto no setor produtivo surgem e nos trazem a possibilidade que avanços tecnológicos ocorram.

A atual política de Conservação e uso Racional de Energia no Brasil, que busca alocar de maneira eficiente os recursos energéticos e a preservação do meio ambiente, o entendimento da Legislação e dos problemas relacionados ao consumo inadequado da energia propiciam a criação de parâmetros para a formação de políticas industriais de conservação e eficiência energética que venham a promover um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis a menores custos.

Este artigo procura enfatizar este tema com suas contribuições além de apresentar de maneira sucinta o panorama energético no Brasil, e a contribuição que a utilização dos motores de alto rendimento representa diante desse cenário.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

De acordo com divulgado no Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica, a energia produzida no Brasil a partir de usinas hidráulicas representa 66,27% da produção de energia

elétrica total. Nelas a energia potencial da água é transformada em cinética e esta é transformada em energia elétrica através da conversão eletromecânica que ocorre no interior das máquinas síncronas.

O estudo da evolução do consumo de energia elétrica é um indicador do comportamento sócio-econômico de uma sociedade.

Aspectos como crescimento da produção industrial, evolução demográfica e inserção de novos hábitos de conservação estão fortemente ligados ao uso da eletricidade como insumo básico.

Assim, podemos definir Eficiência Energética como uma atividade que procura aperfeiçoar o uso das fontes de energia disponíveis, sejam elas renováveis ou não.

Conseguiremos alcançar níveis satisfatórios de eficiência energética quando for possível atendermos a necessidade por energia de todos os segmentos da sociedade sem que seja necessário o investimento em novas fontes geradoras de energia, ou seja, quando pudermos utilizar melhor e de forma mais inteligente os recursos já disponíveis.

A Crise Energética no Brasil

A maior parte da energia produzida no Brasil é proveniente de usinas hidrelétricas que por sua vez dependem que os volumes de água dos seus reservatórios estejam sempre com níveis adequados para o perfeito funcionamento do sistema.

Períodos com menor intensidade de chuvas, a ausência de investimentos no setor além da falta de planejamento por parte do Governo e dos órgãos regulamentadores contribuíram para a ocorrência de uma série de “apagões” ao longo das últimas décadas. Ao longo da história, a população brasileira atravessou inúmeras situações de falta de energia, porém, o ano de 2001 foi determinante para o Brasil

tendo em vista a necessidade de racionamento, o incremento no preço da tarifa de energia, além da instituição de metas de redução de consumo de energia elétrica em todos os setores da sociedade brasileira.

Nesse ano, através da Medida provisória Nº 2.147 de 15.05.2001, o então governo do Presidente Fernando Henrique Cardoso, criou e instalou a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica que estabeleceu diretrizes para programas de enfrentamento da crise de energia elétrica.

Após isso, estabeleceram-se regimes especiais de tarifação, limites de uso e de fornecimento de energia elétrica além de medidas de redução de consumo.

O resultado mais significativo e de maior visibilidade para a população brasileira foi a obrigatoriedade da redução do consumo de energia elétrica no setor residencial, compulsoriamente em 20%, sob a penalidade de multas e do corte do fornecimento de energia.

A demissão de parte dos funcionários das indústrias, a busca por lâmpadas eletrônicas, por grupos geradores e por motores de maior rendimento também pôde ser verificada nessa ocasião.

Ações isoladas dos governos estaduais e municipais para o atingimento das metas estabelecidas pelo governo federal como, por exemplo, o desligamento de parte da iluminação pública na cidade de São Paulo e a diminuição do período do atendimento nos setores públicos foram procedimentos adotados.

A Geração e o Consumo de Energia Elétrica no Brasil

A geração de energia elétrica no Brasil atingiu 466,2 TWH (Terawatts Hora) em 2009, enquanto que as importações líquidas foram de 40,0 TWH. Somadas, permitiram uma oferta interna de energia elétrica de 506,1 TWH, montante 0,2% superior a 2008, (EPE 2010–BEN 2010 - Ano Base 2009).

O Brasil tem hoje, cerca de 190 milhões de habitantes e, segundo a Resenha mensal do Mercado de Energia Elétrica de dezembro de 2010, o consumo de energia elétrica acumulado entre Novembro de 2009 a novembro de 2010 totalizou mais de 417 TWH.

O destaque foi o incremento no consumo de energia residencial do Nordeste do país. Segundo o documento, o crescimento no consumo está relacionado com o aumento do emprego e dos programas de transferência de renda. De acordo com o CAGED – Cadastro Geral de Empregados e Desempregados, órgão ligado ao Ministério do Trabalho e Emprego, de Janeiro de à Outubro de 2010 foram criados 383 mil emprego formais na região, incrementando assim o consumo de energia elétrica no país.

O consumo de energia elétrica no Brasil no ano de 2010 de acordo com a EPE – Empresa de Pesquisa Energética, empresa ligada ao Ministério de Minas e Energia, apresentou alta de 8,1% frente o mesmo período de 2009 e está representado por sete setores

distintos, são eles: O industrial responsável por cerca de 37% do consumo total, o residencial 11%, o comercial 3%, o público 2%, o agropecuário 5%, o setor energético 12% e o de transportes, responsável por cerca de 30% de toda a energia demandada no país.

O Consumo de Energia Elétrica na Indústria Brasileira

De acordo com a EPE – Empresa de Pesquisa Energética, a Indústria brasileira representou 43,82% do total consumido no país em 2010.

O montante de energia elétrica consumido na indústria é subdividido de acordo com o Balanço Energético Nacional 2010 – BEN e está apresentado na Figura 1.

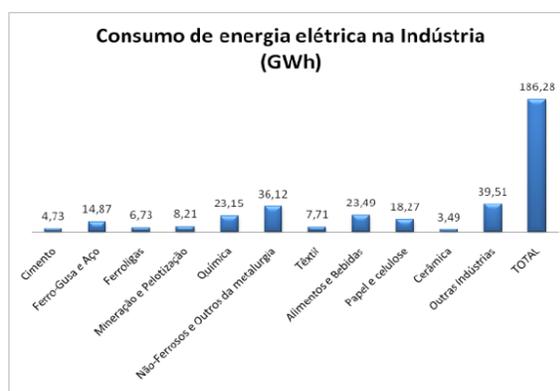


Figura 1 – Consumo Energia Elétrica na Indústria (GWH)
Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN.

A distribuição do Consumo de Energia Elétrica na Indústria brasileira

Conforme o último Relatório de Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo elaborado pelo PROCEL/ELETROBRAS, publicado no Brasil em 2008, podemos verificar que na indústria brasileira, dentre os principais sistemas motrizes, ou seja, que se utiliza de motores elétricos, os sistemas de ar comprimido e vácuo são o que estão mais presentes, com uma participação de 72% do consumo, seguido pelos sistemas de bombeamento com 59%, o de movimentação manuseio e tratamento com 47% e o de ventilação com 46%.

O Relatório também esclarece que não há, dentro do universo considerado, uma política para o Gerenciamento Energético das instalações.

A ausência de ações desse tipo enseja um potencial expressivo para a aplicação de melhorias da eficiência energética do setor.

Os custos da energia elétrica, de maneira geral, representam em média cerca de 10% dos custos totais das empresas

Por outro lado, setores como o de produtos de Madeira (45%), de Metalurgia básica (12,4%),

produtos Minerais não-metálicos (11,4%), Artefatos de couro (14,7%), reciclagem (14,4%) participam com percentuais significativos dos seus custos de produção para a utilização de energia elétrica.

Essa participação determina, em parte, a propensão dessas indústrias em investir em medidas de eficiência energética.

A distribuição do consumo da energia motriz, proveniente de motores elétricos, na indústria brasileira é apresentada na Figura 2

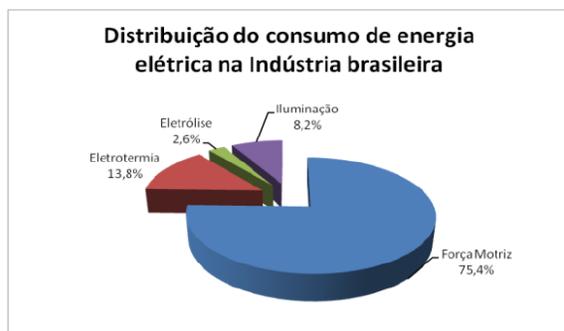


Figura 2 – Consumo Energia Elétrica na Indústria
Fonte: Relatório de Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo

A Legislação brasileira de Eficiência Energética

O INMETRO tendo em vista a deficiência do setor elétrico brasileiro, em 1984, iniciou com a sociedade brasileira a discussão quanto à questão da eficiência energética buscando racionalizar o uso dos diversos tipos de energia no país. O objetivo era o de informar os consumidores sobre a eficiência de cada produto e estimulá-los a fazer compras mais conscientes.

No início, o projeto estava ligado a área automotiva e, diante do crescimento e aceitação ganhou status de Programa Brasileiro de Etiquetagem, atuando principalmente na área de produtos consumidores de energia elétrica.

Diante da crise energética brasileira, ocorrida em 2001, o Governo Brasileiro decidiu resgatar e publicar um Projeto de Lei que tramitava no Senado Federal que tratava de estabelecer uma política nacional de eficiência energética para máquinas e aparelhos consumidores de energia comercializados no país.

A referida lei foi Decretada pelo Presidente da República em 17 de outubro de 2001, Lei 10.295, determinando que o Poder Executivo estabelecesse os níveis máximos de consumo ou mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia comercializados no País.

Ficou estabelecido ainda que, num prazo de até 1 ano a partir da regulamentação específica de cada produto, seria elaborado um programa de metas, para uma progressiva evolução dos índices.

O passo seguinte à publicação da lei foi a criação e publicação do Decreto 4059, que regulamentou a Lei e que estabeleceu os pontos a serem abordados para a regulamentação específica de cada produto (normas técnicas de referência, mecanismo de avaliação da

conformidade, níveis a serem atingidos, fiscalização, etc.) e estabeleceu também que o INMETRO seria o órgão responsável pelos programas de fiscalização e Avaliação da Conformidade no Brasil.

O Decreto foi o responsável pela criação do Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE, com a função, entre outras, de elaborar regulamentação específica para cada tipo de aparelho e máquina consumidora de energia.

A partir deste Decreto, o Inmetro, que de forma voluntária, estabelecia programas de etiquetagem, passou a ter a responsabilidade de estabelecer programas de avaliação da conformidade compulsórios na área de desempenho energético. Tendo, portanto, papel fundamental na implementação da Lei de Eficiência Energética.

Cronologia da Legislação brasileira de Eficiência em Motores Elétricos

Lei Nº 10.295 – de 17 de Outubro de 2001: Determinou que o poder executivo da União estabelecesse os níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no Brasil, com base nos indicadores técnicos pertinentes.

O não cumprimento da presente regulamentação acarretaria aos infratores, a aplicação das penalidades previstas na Lei (multa de até 100% do preço de venda por eles praticados por equipamento encontrado).

Decreto Nº 4.059 – de 19 de Dezembro de 2001: Instituiu o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE, sob a presidência e a coordenação do Ministério de Minas e Energia.

Decreto Nº 4.508 – de 11 de Dezembro de 2002: Definiu os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor de gaiola de esquilo (Padrão e de Alto Rendimento) de fabricação nacional ou importada, para comercialização ou uso no Brasil.

Portaria Interministerial Nº 553 – de 08 de Dezembro de 2005: Estabeleceu os níveis mínimos de rendimento nominal a serem atendidos pelos motores elétricos de indução trifásicos, sem a distinção dos níveis de rendimento nominal entre as linhas Padrão e de Alto Rendimento.

A data limite para fabricação no país ou importação do exterior de motores, bem como a sua comercialização, foi alterada para 4 (QUATRO) anos após a entrada em vigor desta Portaria.

Portaria INMETRO Nº 243 – de 04 de Setembro de 2009: Aprovou os Requisitos de Avaliação da Conformidade – RAC para os motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo e a etiquetagem compulsória para esses motores comercializados individualmente ou acoplados em máquinas motrizes de uso final.

MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO DE ALTO RENDIMENTO

Motores de Alto Rendimento são aqueles projetados para fornecer a mesma potência útil na ponta do seu eixo utilizando menos energia da rede, se comparados com motores comuns.

No início, um dos critérios decisivos para a escolha dos motores de alto rendimento para muitos consumidores era a relação entre o valor do consumo de energia gasta durante o período de vida útil do motor comparado com o seu valor de compra inicial. Segundo os fabricantes de motores, em alguns casos, o consumo de energia durante a vida útil dos motores poderia chegar a 100 vezes o seu valor de compra inicial.

Para efeito de entendimento do exposto, tomaremos como base um motor de 100CV – IV Pólos, operando em regime contínuo (24 horas por dia, 365 dias por ano) e o consumo de energia elétrica que o mesmo terá ao longo de uma vida útil média esperada de 10 anos.

O valor adotado para o Kilowatt-hora de energia elétrica será R\$ 0,20.

Assim,

$$365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas} = 8.760 \text{ h / ano};$$

$$8.760 \text{ horas} \times 10 \text{ anos} = 87.600 \text{ h}$$

$$\text{Motor de } 100 \text{ CV} = 75 \text{ KW}$$

$$\text{Custo do KWh adotado} = \text{R\$ } 0,20$$

$$75 \text{ KW} \times \text{R\$ } 0,20 = \text{R\$ } 15,00/\text{KWh}$$

$$\text{R\$ } 15,00 \times 87.600 \text{ h (10 anos)} = \text{R\$ } 1.314.000,00$$

Se considerarmos que o atualmente preço médio do motor de 100 CV – IV Pólos, no mercado, gira em torno de R\$ 9.175,00 o exemplo acima nos mostra a importância de buscarmos alternativas para a redução do consumo de energia através de motores mais eficientes.

Outro ponto que também pode ser avaliado é a participação do custo relativo às manutenções que devem ser realizadas ao longo da vida útil dos motores.

Para o mesmo horizonte de 10 anos, se considerarmos que o motor não apresentou nenhuma falha grave, pelo menos duas revisões com rejuvenescimento, três instalações, lubrificações semestrais, inspeções sensíveis quinzenais, inspeções de vibração mensais deveriam ser realizadas a fim de garantirmos o correto funcionamento do equipamento o que implicaria também num custo de manutenção aproximado de R\$ R\$ 6.400,00.

Os custos das perdas de produção pela falta do motor não puderam ser estimadas e variam de acordo com a capacidade de cada indústria em tomar ações para a minimização destes eventos. A Figura 3 procura sintetizar as informações apresentadas.

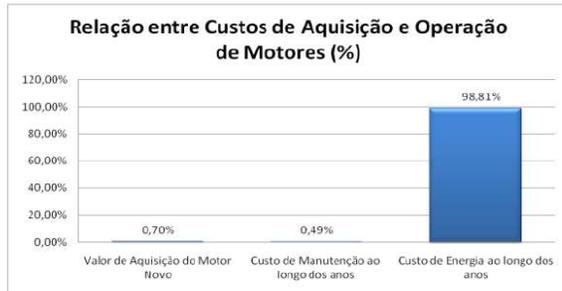


Figura 3 – Custos de Aquisição e Manutenção de Motores x Custo da Energia Elétrica

Assim sendo, o rendimento dos motores pode ser utilizado como um dos critérios decisivos para a escolha entre a compra de motores novos ou o conserto dos motores antigos.

Por estas e outras razões algumas empresas adotaram políticas de gerenciamento de motores, minimizando seus custos através do uso adequado da energia elétrica. É importante destacar que, tão importante quanto escolher um motor de alto rendimento é a execução do seu correto dimensionamento.

Características básicas ou diferenciais técnicos de comparação dos motores de Indução de Alto Rendimento

Com o objetivo de reduzir as perdas e aumentar seu rendimento, os Motores de Alto rendimento possuem as seguintes características:

- Chapas metálicas com baixas perdas (Aço Silício) que reduzem a corrente de magnetização e as perdas no ferro;
- Enrolamentos especiais de dupla camada que reduzem perdas suplementares;
- Rotor tratado termicamente que reduzem perdas suplementares (perdas rotóricas);
- Anel de curto circuito e barras do rotor super dimensionadas para diminuir as perdas Joule;
- Projeto das ranhuras do estator dimensionadas de tal modo que o fator de enchimento seja maior, podendo-se assim reduzir as perdas Joule dos enrolamentos;
- Aprimoramento dos materiais que compõe o sistema de isolamento do motor (fios, filmes isolantes, sistemas de impregnação, verniz, cabos, e demais componentes).

Considerações para a Seleção de Motores Elétricos de Indução

Para a correta seleção e dimensionamento de motores elétricos é necessário conhecimento dos equipamentos a ser acionados e sua influência no processo como um todo, suas principais características de operação, o tipo de acoplamento, a potência consumida, os conjugados, o regime de serviço, a inércia, etc.

É fundamental também o conhecimento das características da rede de alimentação (Tensão, Freqüência) e o ambiente onde o equipamento será utilizado.

Os critérios para o dimensionamento de motores poderão seguir os seguintes itens:

- Critério da Potência Eficaz;
- Critério do Conjugado Máximo Motor;
- Critério dos Conjugados Motor e Resistente de partida;
- Critério do Tempo de Aceleração;
- Critério da Potência Disponível.

A Contribuição do Consumo de Energia Elétrica por Motores Elétricos de Indução na Indústria Brasileira

As informações retiradas do Relatório de Pesquisa de Posse de equipamentos elétricos e Hábitos de Consumo nos deram subsídios para avaliar que 75,4% do consumo de energia elétrica da indústria advém dos motores elétricos.

Podemos assim transformar o gráfico obtido através do Balanço energético nacional, que nos mostra o consumo de energia elétrica na indústria, de maneira a obter o consumo de energia elétrica utilizado nas indústrias somente para a utilização de motores elétricos de indução, figura 5.

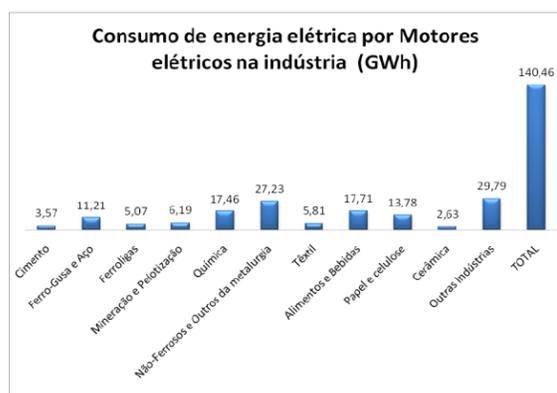


Figura 5 – Consumo de Energia Elétrica por Motores Elétricos na Indústria brasileira

Avaliando-se os índices de rendimento apontados na Portaria Interministerial N° 553 de 08 de Dezembro de 2005 em cumprimento da Lei 10.295, podemos estabelecer para fins de interpretação e entendimento do assunto, que atualmente os motores elétricos trifásicos a ser utilizados no Brasil devem possuir índices de rendimento melhorados em pelo menos 2% na sua média, o que representaria um decréscimo no consumo total de energia na indústria em torno de 2,8 GWh.

CONCLUSÕES

O presente artigo aborda o panorama geral do consumo de energia elétrica no Brasil e a redução do consumo de energia que a utilização de motores de alto rendimento proporciona.

Foi demonstrado de forma sucinta o histórico da crise energética no Brasil e a evolução da legislação brasileira de eficiência energética em motores elétricos de indução.

Para o exemplo apresentado do motor de 100 CV – IV Pólos, caso conseguíssemos 2% de eficiência, a economia com o custo da energia poderia ser realocada para a continuidade do processo de eficiência energética e conseqüentemente melhorar a competitividade da produção industrial.

Deste modo, a necessidade de uma política para o gerenciamento energético nas instalações industriais brasileiras, buscar o entendimento quanto a relação entre a competitividade na produção industrial nacional e a redução da participação do insumo energia elétrica na composição dos custos totais de produção no Brasil se fazem necessários.

Por outro lado nos levam a reflexões sobre alguns pontos:

- Quais os impactos da Lei 10.295 sobre a matriz energética brasileira? Haverá ganhos efetivos?
- O que está sendo feito para que a Lei seja efetivamente cumprida? Existe um planejamento para a efetiva verificação da legislação?
- O que está sendo feito para garantir que os equipamentos importados com motores elétricos de Indução de outros países principalmente os Asiáticos atendam a legislação brasileira?
- Quais serão os investimentos necessários para se obter pouco mais de 2% de rendimento? De maneira geral, quanto tempo será necessário para que essa economia de energia pague o investimento necessário?

Portanto, para termos respostas adequadas para estes questionamentos, grupos de trabalho envolvendo pesquisadores, empresários, órgãos governamentais e usuários devem ser criados, estimulados e apoiados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2010). *Plano Decenal de Energia 2010-2019 - Nota Técnica DEA 13/10 – Caracterização do Cenário Macroeconômico*, página 31. Disponível em: http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20100809_3.pdf
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2010). *Balanço Energético Nacional 2010 - BEN - Ano Base 2009*, páginas 11, 23 e 28 – Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Financial_BEN_2010.pdf

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2010). *Resenha mensal o Mercado de Energia Elétrica – Ano IV – Nº 39 – Dezembro de 2010* - Publicação da Diretoria de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais - disponível em: http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/201012_22_1.pdf

ELETRONBRAS/PROCEL – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. / Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (2010). *Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Ano Base 2005* – Diretoria de Tecnologia - Consórcio ECOLUZ / PUC - Rio - Departamento de Planejamento e Estudos de Eficiência Energética - Publicado em Março de 2008 - disponível em: <http://www.eletronbras.com/pci/main.asp>

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – *Informação ao consumidor* – disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/etiquetas.asp>

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – *Apostila de eficiência energética* - disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/eficiencia.asp>

WEG Equipamentos Elétricos S/A - *Manual de Motores elétricos (050.09/112009)* - disponível em: <http://www.weg.net/files/products/WEG-motores-eletricos-baixa-tensao-mercado-brasil-050-catalogo-portugues-br.pdf>

LOBOSCO, O. S., DIAS, J. L. P. DA (1988) - *Seleção e Aplicação de Motores Elétricos*. - Ed. McGraw-Hill.

FALCONE, AURIO GILBERTO (1985) – *Eletromecânica: transformadores e transdutores, conversão eletromecânica de energia, máquinas elétricas*. - Ed. Edgard Blücher Ltda.

SOBRE OS AUTORES

Sergio Roberto Jardim é Engenheiro Eletricista pela Faculdade de Engenharia de São Paulo – FESP, Pós Graduado em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas - FGV e Mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade estadual de Campinas – UNICAMP.

Desde 1995 trabalha no GRUPO WEG onde atualmente exerce a função de Representante Comercial.

Gilmar Barreto é Engenheiro Químico pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

Autor do Livro Veículos Elétricos em co-autoria com o Prof. Dr. Celso Pascoli Bottura. Atualmente é professor da Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos.

	European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ)	International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12) Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012
---	--	---

Energy conservation using high-efficiency electric motors

Engineer Sergio Roberto Jardim and Prof Gilmar Barreto, PhD

*State University of Campinas - UNICAMP,
School of Electrical and Computer Engineering – FEEC,
Department of Machine Components and Smart Systems – DMCSI –
Av. Albert Einstein, 400 – Cidade Universitária Zeferino Vaz –
Barão Geraldo – Campinas – SP – CEP: 13083-852 - Brazil –
Phone number: +55 1196312065, +55 1135213817
e-mail: sergiojardim@squadcorp.com.br, gbarreto@dmcsi.fee.unicamp.br*

Abstract. The current policy to keep and rationally use energy in Brazil is focused on allocating energy resources efficiently and preserving the environment. Thus, understanding the legislation and the problems tied in with inadequate consumption of energy promotes creating basic parameters and formation of industrial policies to keep energy efficiently. Moreover, it offers using better the available resources at a lower cost.

Given the current policy of Conservation and Rational Use of Energy in Brazil, which aims at the efficient allocation of energy resources and preserving the environment, understanding the Legislation and the problems related to inadequate consumption of energy promotes the creation of basic parameters as well as industrial policies of conservation and energy efficiency that will promote a better use of available resources at lower costs. We can say that of all the motors used in industry, the electric induction motor is the most used, as it combines the advantages of using electric power, low manufacturing costs, ease of transport, cleaning, simplicity in control and mechanical robustness with its simple construction, versatility to adapt to various types of loads and better performance. The purpose of this study is to highlight this theme and its contributions.

Key words

Energy efficiency, Energy conservation, Electric motors.

1. Introduction

Managing and conserving energy is hugely important. In this respect, scholars, entrepreneurs, and various government sectors have been working to conserve energy efficiently in diverse sectors.

Bringing practicality to the academic environment, searching energy-saving solutions by debating how to solve problems and assessing the level Brazil developed since the creation of the Energy Efficiency Law (Law No.

10, 295, 17 October 2001) is pivotal to the development of the energy sector in Brazil.

Understanding the legislation and the problems related with inadequate consumption of energy promotes the creation of basic parameters as well as the formation of industrial policies to preserve energy efficiently. Moreover, it offers using better the available resources at a lower cost.

New opportunities for R&D both in the energy and productive sectors have surfaced and brought us possibilities for technological advances. The purpose of this study is to highlight such theme and its contributions.

2. Energy Efficiency

According to information disclosed on the *Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica* (Information Bank of the National Agency for Electricity Generation), the energy produced in Brazil from hydraulic power plants represents 66.27% of total electricity production. At these plants, the potential energy of water is transformed into kinetic energy which, in turn, is transformed into electrical energy by electromechanical conversion that occurs within the synchronous machines [1].

Studying how electricity consumption increases is an indicator of the socio-economic behaviour of a society.

Aspects such as industrial production growth, demographic development, and insertion of new conservation habits are strongly linked to the use of electricity as a basic resource.

Thus, we can define energy efficiency as an activity that seeks to improve the use of available energy sources, whether renewable or not.

We will be able to achieve satisfactory levels of energy efficiency when we meet the need for energy of all segments of society without requiring investment in new

sources of energy, i.e. when we can use the resources already available in a better and smarter way.

2.1 Growth forecast of industry share in relation to Brazilian GDP

According to the information contained in the *Plano Decenal de Energia - PDE* (Ten Year Energy Plan) 2010–2019, published by the *Empresa de Pesquisa Energética – EPE* (Energy Research Company), for the indicated horizon, industrial evolution will have a relative participation in the Brazilian GDP, i.e. 26.6% 2010–2014 and 27.3% 2015–2019 (EPE 2010 – Ten Year Energy Plan 2010–2019) [2].

2.2 Energy consumption in Brazil

According to what was verified in the 2010 *Balanço Energético Nacional – BEN* (National Energy Balance), energy consumption in Brazil is represented by seven different sectors. The sectors are: industrial, responsible for nearly 37% of total consumption; residential, for roughly 11%; commercial, for nearly 3%; public, for nearly 2%; agriculture, for roughly 5%; energy sector, for nearly 12% and transport, for nearly 30% of all energy demand in the country.

Importantly, the two largest consumers are subdivided. The transport sector is divided into Motorway, Railway, Air and Waterway.

The industrial sector is subdivided into Cement, Pig iron and Steel, Iron alloys, Mining and Pelletising, Chemical, Non-ferrous and others from Metallurgy, Textile, Food and Beverage, Pulp & Paper, Ceramics, and, finally, other industries. (EPE 2010–BEN 2010 – Base Year 2009). [3]

2.3 Electricity generation and consumption in Brazil

Generating electricity energy in Brazil reached 466.2 TWh in 2009, while net imports were 40.0 TWh. Together, they allow a domestic supply of 506.1 TWh of electricity, an amount of 0.2 % superior to 2008, (EPE 2010–BEN 2010 – Base Year 2009).

Currently, Brazil has nearly 190 million inhabitants and, according to the Monthly Review of the Electricity Market in December 2010, the cumulative energy consumption from November 2009 to November 2010 totalled more than 417 TWh. The highlight was the increase in residential energy consumption in the Northeast. The report said growth in consumption is related to the increase in employment and income transfer programmes. According to the *Cadastro Geral de Empregados e Desempregados – CAGED* (General Register of Employed and Unemployed), an entity linked to the Ministry of Labour and Employment, from January to October 2010, 383,000 formal jobs were created in the region, thus increasing the consumption of electricity in the country (EPE 2010 – Monthly Review of the Electricity Market) [4].

2.4 Electricity consumption in Brazilian industry

The electricity consumption in Brazil totalled 417,434 GWh in 2010 according to the Energy Research Company (EPE), a company linked to the Ministry of Mines and Energy, a rise in 8.1% compared to the same period of 2009. The Brazilian industry represented 43.82% from total consumption in the country.

The amount of electricity consumed by the industry is divided according to the segmentation shown on the National Energy Balance (BEN, 2010), presented in figure 1. [5]

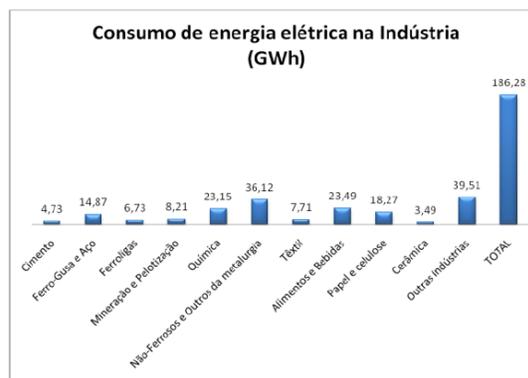


Fig. 1 – Industry electricity consumption (GWH)
Source: National Energy Balance (BEN).

Key: Figure 1

Industry electricity consumption (GWH)

Cement,

Pig iron and Steel

Iron alloys

Mining and Pelletising

Chemistry

Non-ferrous and others from metallurgy

Textile

Food & Beverage

Pulp & Paper

Ceramics

Other industries

Total

2.5 Distribution of Electric Energy Consumption in Brazilian Industry

According to the latest Research Report on Ownership of Equipment and Consumption Habits, prepared by PROCEL/ELETOBRAS, published in Brazil in 2008, we can verify that in the Brazilian industry, with the main drive systems, that is, those using electric motors, the compressed and vacuum air systems are more present, with a share of 72% of consumption, followed by pumping systems with 59% of the movement, handling and treatment with 47% and ventilation with 46%.

The report also states that there is a policy to manage energy facilities.

The absence of such actions presents itself as an expressive potential to improve energy efficiency in the sector.

In general, the costs of electricity represent on average of nearly 10% of the total costs of companies.

In contrast, sectors such as wood products (45%), basic metallurgy (12.4%), non-metallic mineral products (11.4%), leather (14.7%), recycling (14.4%) participate with significant percentages of their production costs in the use electricity.

Such participation slightly defines the propensity for these industries to invest in energy efficiency measures.

Figure 2 presents how consumption of motive power from electric motors in the Brazilian industry is distributed (Eletrobras/PROCEL – Research on Ownership of Equipment and Use Habits) [5].

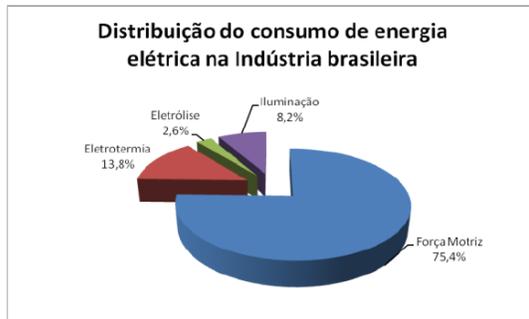


Fig. 2 – Industry electricity consumption

Source: Research Report on Ownership of Equipment and Consumption Habits

Key: Figure 2

Distribution of energy consumption in Brazilian industry

Electric heating

Electrolysis

Lighting

Driving force

2.6 Contribution of energy consumption by electric induction motors in Brazilian industry

The information taken from the Research Report on Ownership of Electrical Equipment and Consumption Habits gave us subsidies to assess that 75.4% of electricity consumption in the industry come from electric motors.

We can thus transform the graph provided by the National Energy Balance, which shows the energy consumption in the industry, to obtain the electricity consumption used in the industry only for the use of induction motors (figure 3).

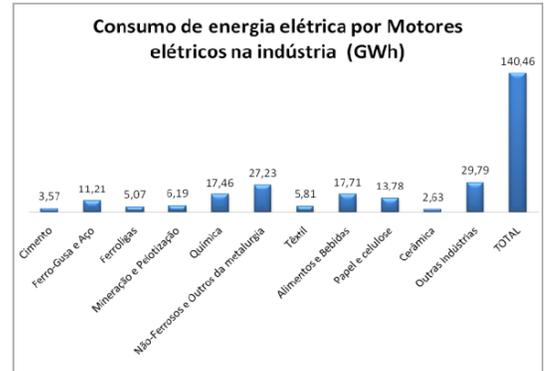


Fig. 3 – Electricity Consumption by induction electric motors in Brazilian industry

Key: figure 3

Electricity consumption by electric motors in industry (GWH)

Cement,

Pig iron and Steel

Iron alloys

Mining and Pelletising

Chemistry

Non-ferrous and other from metallurgy

Textile

Food & Beverage

Pulp & Paper

Ceramics

Other industries

TOTAL

Assessing the performance indexes mentioned in the Interministerial Directive No. 553 (8 December 2005), based on Law 10,295, we can establish for the purpose of interpretation that, nowadays three-phase electric motors to be used in Brazil must have indexes to improve performance in at least 2% in average. This would represent a drop in total energy consumption in the industry of roughly 2.8 GWH.

3. Energy Efficiency

3.1 Energy crisis in Brazil

Most of the energy produced in Brazil comes from hydroelectric plants. The volume of water in the reservoirs of such plants must always be adequate to the perfect operation of the system.

Periods of rain with less intensity, lack of investments in the sector, and in particular lack of planning by government and regulating agencies, contributed to several 'blackouts' during the last decades.

Throughout its history, Brazil has faced several situations involving lack of energy, however, 2001 was determinant with the rationing, the increase in the price of electricity and the encouragement to reduce energy consumption in all Brazilian sectors.

In that year, through Provisional Measure No. 2147 (15 May 2001), the government of President Fernando Henrique Cardoso created and installed the Electricity

Crisis Management Chamber which established guidelines for programmes to fight the energy crisis.

After that, the government settled special pricing, usage limits and electricity supply as well as measures to reduce consumption.

The most significant result for the Brazilian population was when people were obliged to consume less residential electricity (20%), under penalty of fines and energy cuts.

Dismissal of part of the employees from the industry and the search for electronic lamps, for generators and for higher-efficiency motors could also be verified at the time.

Isolated actions from state and local governments to achieve the goals set by the federal government, e.g. public power cuts in parts of São Paulo and reduction in public services, were adopted.

3.2 Brazilian legislation of energy efficiency

In 1984, realising the deficiency of the energy sector, INMETRO (National Institute of Metrology, Quality and Technology) – linked to the Ministry of Development, Industry and Foreign Trade – started discussing the matter of energy efficiency with Brazilian society, seeking to rationalise the use of various types of energy. The aim was to inform consumers on how efficient each product is and encourage them to think about what they were buying.

At the beginning, the project was linked to the automotive industry, and, with its growth and acceptance, it received the status of Brazilian Labelling Programme, acting mainly in energy consuming products.

In the face of the Brazilian energy crisis in 2001, the government decided to recover and publish a bill of the Senate which established a national policy on energy efficiency for machines and appliances that use electricity sold in the country.

This law was enacted by the President on 17 October 2001, Law No. 10,295, stating that the Executive Branch should establish maximum or minimum levels of consumption for energy used by machines and appliances, sold in the country.

It was also established that, within one year, from the regulation for each product, a programme of goals would be drawn up for a progressive evolution of the indexes.

The next step after publication of the law was to create and publish Decree 4,059, which regulated the Law and established the points to be addressed for the specific regulation of each product (technical reference standards, mechanism to assess compliance, levels to be achieved, inspection, etc). It also established that INMETRO would be responsible for programmes to monitor and assess the conformity in Brazil.

The Decree was responsible for the creation of the *Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética* – CGIEE (Management Committee for Indicators and Levels of Energy Efficiency), to develop specific regulations for each type of machine and machine-consuming energy.

From this decree, INMETRO voluntarily established labelling programmes, which had the responsibility to establish the conformity assessment programmes, compulsory in the field of energy performance. It was,

therefore, essential in implementing the Energy Efficiency Law [8] - [13].

3.3 Timeline of Brazilian legislation of efficiency in electric motors

Law No.10,295 – 17 October 2001: The Executive Branch determined that the Union should establish maximum levels of specific energy consumption, or minimum energy efficiency of machines and appliances that use energy produced or marketed in Brazil, based on relevant technical indicators.

Non-compliance with these rules would bring about penalties to the offenders foreseen in the Law (a fine of up to 100% of the sales price practised per equipment found).

Decree No. 4,059 – 19 December 2001: Instituted the CGIEE, chaired and coordinated by the Ministry of Mines and Energy.

Decree No 4,508 – 11 December 2002: Defined the minimum levels of energy efficiency of three-phase electric motors of squirrel-cage rotor induction (standard, high-performance) domestically manufactured (or imported) for sale or use in Brazil.

Ministerial Directive No. 553 – 8 December 2005: Established minimum levels of nominal income to be met by the three-phase induction motors, without distinction of levels of nominal income between the standard and high-performance lines.

The deadline for manufacturing or importing, as well as marketing, was changed to four years after this Directive became effective.

INMETRO Directive No. 243 – 4 September 2009: Approved the Requirements for Conformity Assessment (RAC) for three-phase electric motors of squirrel-cage rotor induction and mandatory labelling for these motors sold apart or coupled in driving end-use machines [8] - [13].

By way of understanding the current situation, the process for certification of the leading manufacturers of induction motors in Brazil occurred in an orderly and relatively fast manner, considering that they already lines of motors that met the new legislation perfectly.

From that point, new processes for energy conservation and energy efficiency gained strength in Brazil as well as new equipment now have legislation and specific classification as to the consumption of electricity for its operation.

4. High-Efficiency Electric Motors

4.1 Introduction

High-efficiency motors are those designed to provide the same useful power in its output shaft by using less network energy when compared with ordinary motors.

At first, the decisive criteria to select high-efficiency motors for many consumers was the relationship between the values of energy consumption during the life of the motor and its initial purchase price.

According to motor manufacturers, energy consumption during the life of the motors could reach 100 times its initial purchase price. Thus, the performance of the motor was used as decisive criteria for the choice between buying new motors and repairing old motors.

For these and other reasons, some companies have adopted motor management policies, minimising their costs through the appropriate use of electricity. As important as choosing a high-efficiency motor is to design it correctly.

4.2 Basic characteristics or technical differences to compare high-efficiency induction motors

To reduce losses and increase performance, high-performance motors present:

- Sheet metal with low losses (silicon steel) that reduce the magnetising current and iron losses;
- Special dual-layer windings that reduce additional losses;
- Rotor heat treated to reduce additional losses (rotor losses);
- Ring short circuit and rotor bars super-sized to reduce Joule losses;
- Design of slot stator for a higher fill factor, thus reducing winding Joule losses;
- Enhancement of the materials making up the motor insulation system (wires, insulating films, impregnation systems, varnish, cables and other components).

4.3 Considerations to select induction Electric motors

To correctly select and design induction electric motors one needs to know the equipment and how it affects the process as a whole, its main operating characteristics, the type of coupling, the power consumed, conjugates, service system, inertia, etc.

To know the characteristics of the power supply (voltage, frequency) and the environment where the equipment will be used is also essential.

Basic criteria to design motors involve:

- Effective Power Criterion;
- of Motor Maximum Conjugate Criterion;
- Discretion of Motor Conjugates and Resistant;
- Acceleration Time Criterion;
- Available Power Criterion.

5. Conclusions

Herein, we discussed the overall picture of energy consumption in Brazil and the drop in the energy consumption provided by high-performance motors.

The history of the energy crisis in Brazil and the evolution of Brazilian legislation on energy efficiency in induction motors were demonstrated.

Quantitative analysis aimed at replacing traditional motors with motors meeting current regulations has been developed and will be presented in future studies.

Preliminary analysis indicates a growth in more than 600%, if we compare the current volume of motors sold in 2011 with sales volume in 2009, when it was not compulsory to use these motors yet.

We also consider that 70% of these new motors are intended for new installations and 30% to replace the market.

Thus, there is a need for a policy for energy management in industrial plants in Brazil, in particular seeking to understand the relationship between the competitiveness of the domestic industrial production and the reduced share of electricity input when making up total production costs.

In contrast, there are some points we should think over:

- What is the impact of Law 10,295 on the Brazilian energy matrix? Will there be effective gains?
- What has been done to accomplish this Law effectively? Is there a plan to verify the legislation effectively?
- What has been done to ensure that the imported equipment with induction motors from other countries meets the Brazilian legislation?
- What are the investments needed to achieve a bit more than 2% of income? How long will it take for the energy savings to pay for the necessary investment?

Therefore, for satisfactory answers to such questions, working groups, e.g. researchers, entrepreneurs, government agencies and users must be created, encouraged and supported.

6. References

- [1] BIG/ANEEL – Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica – Capacidade de Geração do Brasil – Source: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>
- [2] EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2010). Plano Decenal de Energia 2010-2019 - Nota Técnica DEA 13/10 – Caracterização do Cenário Macroeconômico, página 31. Source: http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20100809_3.pdf
- [3] EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2010). Balanço Energético Nacional 2010 - BEN - Ano Base 2009, páginas 11, 23 e 28 – Source: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf
- [4] EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2010). Resenha mensal o Mercado de Energia Elétrica – Ano IV – Nº 39 – Dezembro de 2010 - Publicação da Diretoria de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais – Source: http://www.epe.gov.br/ResenhaMensal/20101222_1.pdf
- [5] ELETROBRAS/PROCEL – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. / Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (2010). Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Ano Base 2005 – Diretoria de Tecnologia - Consórcio ECOLUZ / PUC - Rio Departamento de Planejamento e Estudos de Eficiência Energética - Published on March 2008 – Source: <http://www.eletronbras.com/pci/main.asp>

[6] INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Apostila de eficiência energética - Source: <http://www.inmetro.gov.br/qualidade/eficiencia.asp>

[7] LOBOSCO, O. S., DIAS, J. L. P. DA (1988) - Seleção e Aplicação de Motores Elétricos. - Ed. McGraw-Hill.

[8] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – Consultoria Jurídica – Portaria Interministerial Nº 553 de 08 de Dezembro de 2005 – Source: http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/legislacao/portaria_interministerial/Portaria_MME-MCT-MDIC_no_553-2005.pdf

[9] MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO - Portaria Inmetro nº 243, de 04 de setembro de 2009 – Source: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001485.pdf>

[10] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – Casa Civil – Subchefia para assuntos Jurídicos - Lei No 10.295, de 17 de Outubro de 2001 – Source: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/LEIS_2001/L10295.htm

[11] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA - Casa Civil – Subchefia para assuntos Jurídicos - Decreto Nº 4.508, de 11 de Dezembro de 2002 – Source: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4508.htm

[12] PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Informação ao consumidor – Source: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/etiquetas.asp>

[13] SENADO FEDERAL – Subsecretaria de Informações - Decreto Nº 4.059, de 19 de Dezembro de 2001 – Source: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=234101>

[14] WEG Equipamentos Elétricos S/A - Manual de Motores elétricos (050.09/112009) – Source: <http://www.weg.net/files/products/WEG-motores-eletricos-baixa-tensao-mercado-brasil-050-catalogo-portugues-br.pdf>

