



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUCAS PEREIRA LIMA E SILVA

**NORMATIZAÇÃO, LINHAS COMERCIAIS E OPERAÇÃO ÓTIMA DE MOTORES
DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

FORTALEZA

2018

LUCAS PEREIRA LIMA E SILVA

NORMATIZAÇÃO, LINHAS COMERCIAIS E OPERAÇÃO ÓTIMA DE MOTORES DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Sérgio Daher.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S581n Silva, Lucas Pereira Lima e.
Normatização, linhas comerciais e operação ótima de motores de indução trifásicos / Lucas Pereira Lima e Silva. – 2018.
119 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Sérgio Daher.
1. Motores de indução. 2. Otimização. 3. Eficiência. 4. Mercado brasileiro. 5. Ponto ótimo de operação. I. Título.

CDD 621.3

LUCAS PEREIRA LIMA E SILVA

NORMATIZAÇÃO, LINHAS COMERCIAIS E OPERAÇÃO ÓTIMA DE MOTORES DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr.-Ing. Sérgio Daher (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Domenico Sgrò
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M.Sc. Rodnei Regis de Melo
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

A Lia, minha esposa, e ao nosso bebê, a quem aguardamos com profunda alegria.

A minha avó Dacir (in memorian), quem sempre expressou seu anseio de presenciar minha formatura.

AGRADECIMENTOS

O mais importante registro de agradecimento é dedicado ao senhor Deus. Ele me concedeu vida, saúde e todos os recursos que precisei para chegar ao fim deste curso.

Agradeço com todas as minhas forças aos meus pais, Pereira e Cleuma. Eles sempre foram além das suas obrigações, me deram um lar amoroso, me ensinaram a palavra de Deus e me repreenderam nas muitas vezes em que precisei. Sou grato por me incentivarem e por sempre investirem tudo o que podem para realizar meus sonhos.

A minha esposa, Lia, da qual subtraí muitas horas envolvido nas obrigações acadêmicas e profissionais. Me sinto muito agradecido por sua paciência, por suas palavras de ânimo, pelo conhecimento de engenharia elétrica que me passou e por toda a ajuda. Você e o nosso filho são minha maior motivação.

Aos meus irmãos, Daniel e Thaisy, que sempre me ajudaram de muitas formas, inclusive cedendo espaço e o computador quando precisei estudar.

A minha sogra e quase mãe, Itala, por todo o incentivo e por me presentear com um smartphone e com um notebook, sem os quais este trabalho não seria realizado.

Ao Prof. Dr.-Ing. Sérgio Daher, pela orientação atenciosa e solícita, pela proposição do tema, e por me ajudar em tudo e em todos os momentos em que precisei. Por me ceder o *software* que ele mesmo desenvolveu (PAPAMIT) e por todo o esforço em melhorá-lo para meu uso neste trabalho.

Aos meus grandes amigos Herbet (mala-man), Victor (Canela), Jonatas (Engenheiro chefe), Lucas, Carlos de Castro (Mãozinha), Abraão e Régis. Obrigado pela amizade e por tudo o que me proporcionaram. A presença de vocês tornou minha vida melhor e me deu força para superar muitos desafios.

Aos engenheiros Leo Vidal (Leozão), Ana Rosa (Dona Rosa) e Jonatas pela oportunidade de estágio e recepção no Laboratório de Medidas Elétricas da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC). Obrigado pelos ensinamentos, pelas conversas, pelos dias em que me deram folga e me permitiram estudar (isto fez uma enorme diferença).

A Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP) pelo programa de estágios exemplar. Aos engenheiros Lázaro Pereira, Carlos Barroso, Carlos Felipe, Rafael Fares, Raul Dantas, Douglas Valentim e a toda a equipe de engenharia da EIC. Obrigado pelo aprendizado que me proporcionaram, pelo suporte, pelas brincadeiras e por esta oportunidade, que foi revolucionária em minha vida profissional.

Aos engenheiros Severino e Filipe, pela confiança e pelo espaço a mim concedido na Sevel Engenharia. Sou muito grato pelos ensinamentos, pelas várias experiências gratificantes e por toda a flexibilidade que apresentaram para que me fosse possível concluir a graduação.

Ao Governo e ao povo brasileiro, por também serem financiadores dos meus estudos.

A Universidade Federal do Ceará (UFC), pelo ensino de qualidade, pela infraestrutura, pelas bolsas que me concedeu durante a graduação, pelas refeições no RU e por todo o mais.

A todos que, de forma direta e indireta, me ajudaram a concluir esta árdua etapa.

“(...) eu disse: sabedoria adquirirei; mas ela ainda estava longe de mim.”

(Eclesiastes 7:23)

“Tudo quanto te vier a mão para fazer, faze-o conforme as tuas forças (...)”

(Provérbios 6:10)

RESUMO

No intuito de contribuir com o consumo eficiente de energia elétrica, este trabalho apresenta um histórico e um breve resumo dos métodos de otimização de motores de indução. As principais normatizações vigentes no Brasil e no mundo (como IEC e NEMA) também são apresentadas, destacando-se os tópicos de maior relevância, como as classes de eficiência, e analisando as diferenças entre elas. Os níveis de rendimento de máquinas elétricas rotativas fabricadas por quatro grandes companhias (WEG, Siemens, Baldor e Voges) são comparados com aqueles estabelecidos pela legislação brasileira. As soluções de maior rendimento são analisadas tendo como referência o mercado no país. Em seguida os motores de ímãs permanentes são apresentados como alternativas ainda mais eficientes para os acionamentos industriais, apesar de mais caros. Foram analisadas ainda as condições de operação ótima para alguns MIT's. Como resultado, houve a constatação de que é possível alcançar maiores níveis de rendimento para máquinas de indução acionadas por inversores de frequência em comparação com aquelas que trabalham com controle clássico. Esta otimização resulta em consideráveis reduções de gastos com energia elétrica e em melhor aproveitamento deste insumo.

Palavras-chave: Motores de indução. Otimização. Eficiência. Normatização. Mercado brasileiro. Ponto ótimo de operação.

ABSTRACT

In order to contribute to the efficient consumption of electric energy, this work presents a history and a brief summary of the methods of optimization of induction motors. The main regulations in force in Brazil and in the world (such as IEC and NEMA) are also presented, highlighting the most relevant topics, such as efficiency classes, and analyzing the differences between them. The performance levels of rotating electric machines manufactured by four large companies (WEG, Siemens, Baldor and Voges) are compared to those established by Brazilian legislation. The higher efficiency solutions are analyzed with reference to the market in the country. Then permanent magnet motors are presented as even more efficient alternatives to industrial drives, although more expensive. The optimum operating conditions for some MIT's were also analyzed. As a result, it has been found that higher performance levels can be achieved for induction machines driven by frequency inverters compared to those working with classical control. This optimization results in considerable reductions in energy costs and in the better use of this input.

Keywords: Induction motors. Optimization. Efficiency. Standardization. Brazilian market. Optimum operating point.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	– Representação da roda de Barlow.....	17
Figura 2.2	– Primeiro motor elétrico de Moritz Jacobi.....	18
Figura 2.3	– Representação da armadura em duplo T, desenvolvida por Siemens....	19
Figura 2.4	– Esquemático do primeiro motor de indução de Galileo Ferrari.....	20
Figura 2.5	– Esquemático do primeiro motor de indução de Nicola Tesla.....	20
Figura 2.6	– Primeiro motor de indução com rotor em gaiola, de Dolivo-Dobrowolsky.....	21
Figura 2.7	– Enrolamento de armadura de uma máquina de indução.....	22
Figura 2.8	– Rotores em gaiola (superior) e bobinado (inferior).....	23
Figura 2.9	– Modelos estáticos dos motores de indução: (a) e (b) são os mais comuns; (c) e (d) incluem parâmetros de perdas no ferro.....	26
Figura 2.10	– Circuito do estator de um MI.....	27
Figura 2.11	– Circuito do rotor de um MI.....	27
Figura 2.12	– Circuito expandido do rotor de um MI.....	28
Figura 2.13	– Circuito equivalente de um MI, do ponto de vista do estator.....	28
Figura 3.1	– Percentual médio de perdas em motores de indução com rotor em gaiola em função de sua potência nominal.....	30
Figura 3.2	– Eficiência em função do material do rotor.....	32
Figura 3.3	– Mudanças no tamanho e na massa de um motor de 5 HP da Hitachi.....	33
Figura 3.4	– Curvas de magnetização.....	34
Figura 3.5	– Comparação volumétrica de materiais de igual energia magnética.....	34
Figura 3.6	– Curva típica de torque por velocidade de um motor de indução com rotor em gaiola.....	36
Figura 3.7	– Vista em corte de um rotor com dupla gaiola de esquilo.....	38
Figura 3.8	– Curvas de torque por escorregamento de motores de indução de classes A – D, padronizados pela NEMA.....	39
Figura 4.1	– Indicação de alguns órgãos responsáveis pela normatização dos motores elétricos ao redor do mundo.....	44
Figura 4.2	– Níveis mínimos de eficiência de acordo com as regulamentações.....	45
Figura 4.3	– Níveis mínimos de eficiência exigidos pelas normas IEC 60034-30 e 31, para motores de indução trifásicos de quatro polos que podem operar em 50 e em 60 Hz.....	47
Figura 4.4	– Comparativo entre as classes de eficiência EFF e IE.....	55
Figura 4.5	– Níveis de eficiência padronizados por algumas organizações ao redor do mundo.....	56
Figura 5.1	– Níveis de eficiência dos motores de indução de 2 polos da WEG – classe IR2.....	63
Figura 5.2	– Níveis de eficiência dos motores de indução de 4 polos da WEG – classe IR2.....	63
Figura 5.3	– Níveis de eficiência dos motores de indução de 6 polos da WEG – classe IR2.....	64
Figura 5.4	– Níveis de eficiência dos motores de indução de 8 polos da WEG – classe IR2.....	64
Figura 5.5	– Eficiência dos motores de indução de 2 polos da Siemens – classe IR2.....	67
Figura 5.6	– Eficiência dos motores de indução de 4 polos da Siemens – classe	67

	IR2.....	
Figura 5.7	– Eficiência dos motores de indução de 6 polos da Siemens – classe IR2.....	67
Figura 5.8	– Eficiência dos motores de indução de 8 polos da Siemens – classe IR2.....	68
Figura 5.9	– Eficiência dos motores de indução de 2 polos da ABB, classe IR2, 0,25 a 15 cv.....	71
Figura 5.10	– Eficiência dos motores de indução de 2 polos da ABB, classe IR2, 20 a 350 cv.....	71
Figura 5.11	– Eficiência dos motores de indução de 4 polos da ABB, classe IR2, 0,25 a 15 cv.....	71
Figura 5.12	– Eficiência dos motores de indução de 4 polos da ABB, classe IR2, 20 a 500 cv.....	72
Figura 5.13	– Eficiência dos motores de indução de 6 polos da ABB, classe IR2, 0,25 a 15 cv.....	72
Figura 5.14	– Eficiência dos motores de indução de 6 polos da ABB, classe IR2, 20 a 350 cv.....	72
Figura 5.15	– Eficiência dos motores de indução de 2 polos da Voges, classe IR2, 0,16 a 15 cv.....	75
Figura 5.16	– Eficiência dos motores de indução de 2 polos da Voges, classe IR2, 20 a 450 cv.....	75
Figura 5.17	– Eficiência dos motores de indução de 4 polos da Voges, classe IR2, 0,16 a 15 cv.....	75
Figura 5.18	– Eficiência dos motores de indução de 4 polos da Voges, classe IR2, 20 a 500 cv.....	76
Figura 5.19	– Eficiência dos motores de indução de 6 polos da Voges, classe IR2, 0,16 a 15 cv.....	76
Figura 5.20	– Eficiência dos motores de indução de 6 polos da Voges, classe IR2, 20 a 450 cv.....	76
Figura 5.21	– Eficiência dos motores de indução de 8 polos da Voges, classe IR2, 0,16 a 15 cv.....	77
Figura 5.22	– Eficiência dos motores de indução de 8 polos da Voges, classe IR2, 20 a 350 cv.....	77
Figura 5.23	– Produção, por fabricante, dos mais eficientes motores de indução de dois polos.....	80
Figura 5.24	– Produção, por fabricante, dos mais eficientes de motores de indução de quatro polos.....	80
Figura 5.25	– Produção, por fabricante, dos mais eficientes motores de indução de seis polos.....	81
Figura 5.26	– Produção, por fabricante, dos mais eficientes motores de indução de oito polos.....	81
Figura 6.1	– Comparativo entre um motor de indução e outro da linha IR4 Super Premium.....	84
Figura 7.1	– Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (0,16 cv – 4 polos).....	93
Figura 7.2	– Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (0,16 cv – 4 polos).....	93
Figura 7.3	– Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (1,5 cv – 2 polos).....	95
Figura 7.4	– Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da	95

	potência nominal da máquina (1,5 cv – 2 polos).....	
Figura 7.5	– Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (4,0 cv – 8 polos).....	97
Figura 7.6	– Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (4,0 cv – 8 polos).....	98
Figura 7.7	– Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (5,0 cv – 4 polos).....	100
Figura 7.8	– Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (5,0 cv – 4 polos).....	100
Figura 7.9	– Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (10,0 cv – 4 polos).....	102
Figura 7.10	– Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (10,0 cv – 4 polos).....	103
Figura 7.11	– Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (15,0 cv – 4 polos).....	105
Figura 7.12	– Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (15,0 cv – 4 polos).....	105
Figura 7.13	– Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (50,0 cv – 4 polos).....	107
Figura 7.14	– Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (50,0 cv – 4 polos).....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	– Consumo anual de energia elétrica por classe.....	14
Tabela 3.1	– Principais propriedades dos materiais amorfos e do aço de silício.....	35
Tabela 3.2	– Composição dos limites de elevação de temperatura.....	40
Tabela 4.1	– Relação das principais normas da ABNT referentes a máquinas elétricas.....	43
Tabela 4.2	– Categorias mínimas de eficiência de motores de indução trifásicos em alguns países, em 2011, de acordo com a designação proposta pela EIC.....	47
Tabela 4.3	– Rendimento mínimo estabelecido pela legislação brasileira para motores de indução trifásicos.....	49
Tabela 4.4	– Tolerâncias para os motores contemplados pela NBR 17094-1:2018...	49
Tabela 4.5	– Menores valores de rendimento nominal a plena carga, para motores da classe IR2 ou alto rendimento.....	51
Tabela 4.6	– Menores valores de rendimento nominal a plena carga, para motores da classe IR3 ou rendimento “Premium”	53
Tabela 4.7	– Eficiência normalizada para motores de indução abertos enquadrados na linha NEMA Standard, na condição de plena carga.....	57
Tabela 4.8	– Eficiência normalizada para motores de indução fechados enquadrados na linha NEMA Standard, na condição de plena carga....	58
Tabela 5.1	– Níveis mínimos de eficiência exigidos pela legislação brasileira, considerando as tolerâncias.....	59
Tabela 5.2	– Comparativo dos níveis de eficiência estabelecidos para a classe IR2 e apresentados pelos motores IR2 da linha W22 em 2018.....	61
Tabela 5.3	– Comparativo dos níveis de eficiência estabelecidos para a classe IR3 e apresentados pelos motores IR3 Premium da linha W22 em 2018.....	62
Tabela 5.4	– Comparativo dos níveis de eficiência apresentados pelos motores IR2 da Siemens e estabelecidos para a classe IR2, no Brasil, em 2018.....	66
Tabela 5.5	– Níveis de eficiência dos motores de indução da Baldor, voltados ao mercado estadunidense, e da classe IR3 padronizada pela NBR 17094-1:2018.....	69
Tabela 5.6	– Níveis de eficiência dos motores de indução da ABB, voltados ao mercado brasileiro, e da classe IR2 padronizada pela NBR 17094-1:2018.....	70
Tabela 5.7	– Níveis de eficiência dos motores de indução da Voges e da classe IR2 padronizada pela NBR 17094-1:2018.....	74
Tabela 5.8	– Comparativo dos níveis de eficiência dos motores de indução de 2 e 4 polos, fabricados por WEG, Siemens, Baldor e Voges.....	78
Tabela 5.9	– Comparativo dos níveis de eficiência dos motores de indução de 2 e 4 polos, fabricados por WEG, Siemens, Baldor e Voges.....	79
Tabela 6.1	– Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR4, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 3600 rpm...	84
Tabela 6.2	– Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR4, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 1800 rpm...	85
Tabela 6.3	– Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR4, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 1200 rpm...	86
Tabela 6.4	– Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR5, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 3600 rpm...	87

Tabela 6.5	– Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR5, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 1800 rpm...	87
Tabela 6.6	– Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR5, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 1200 rpm...	88
Tabela 6.7	– Vantagem financeira de utilizar motores de classe IR5, ao invés de IR4, para substituir motores de indução de classe IR2, todos de 3600 rpm.....	89
Tabela 6.8	– Vantagem financeira de utilizar motores de classe IR5, ao invés de IR4, para substituir motores de indução de classe IR2, todos de 1800 rpm.....	89
Tabela 6.9	– Vantagem financeira de utilizar motores de classe IR5, ao invés de IR4, para substituir motores de indução de classe IR2, todos de 1200 rpm.....	90
Tabela 7.1	– Dados de placa do MIT de 0,16 cv – 4 polos.....	92
Tabela 7.2	– Parâmetros do MIT de 0,16 cv, 4 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas.....	92
Tabela 7.3	– Parâmetros do MIT de 0,16 cv, 4 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades.....	93
Tabela 7.4	– Dados de placa do MIT de 1,5 cv – 2 polos.....	94
Tabela 7.5	– Parâmetros do MIT de 1,5 cv, 2 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas.....	94
Tabela 7.6	– Parâmetros do MIT de 1,5 cv, 2 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades.....	95
Tabela 7.7	– Dados de placa do MIT de 4,0 cv – 8 polos.....	96
Tabela 7.8	– Parâmetros do MIT de 4,0 cv, 8 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas.....	97
Tabela 7.9	– Parâmetros do MIT de 4,0 cv, 8 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades.....	97
Tabela 7.10	– Dados de placa do MIT de 5,0 cv – 4 polos.....	99
Tabela 7.11	– Parâmetros do MIT de 5,0 cv, 4 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas.....	99
Tabela 7.12	– Parâmetros do MIT de 5,0 cv, 4 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades.....	99
Tabela 7.13	– Dados de placa do MIT de 10,0 cv – 4 polos.....	101
Tabela 7.14	– Parâmetros do MIT de 10,0 cv, 4 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas.....	102
Tabela 7.15	– Parâmetros do MIT de 10,0 cv, 4 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades.....	102
Tabela 7.16	– Dados de placa do MIT de 15,0 cv – 4 polos.....	104
Tabela 7.17	– Parâmetros do MIT de 15,0 cv, 4 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas.....	104
Tabela 7.18	– Parâmetros do MIT de 15,0 cv, 4 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades.....	104
Tabela 7.19	– Dados de placa do MIT de 50,0 cv – 4 polos.....	106
Tabela 7.20	– Parâmetros do MIT de 50,0 cv, 4 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas.....	106
Tabela 7.21	– Parâmetros do MIT de 50,0 cv, 4 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFC	Universidade Federal do Ceará
PAPAMIT	Programa de Apoio ao Projeto de Acionamentos Baseados em Motores de Indução Trifásicos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
MME	Ministério de Minas e Energia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
EISA	<i>Energy Independency and Security Act</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
CEMEP	<i>European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics</i>
IGLVM	<i>Industry Group Low Voltage Motors</i>
JEMA	<i>The Japan Electrical Manufacturers Association</i>
MI	Motor de indução
MIT	Motor de indução trifásico
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
Al	Alumínio
Cu	Cobre
SmCo	Samário-Cobalto
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
cv	Cavalo vapor
hp	<i>Horse power</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidade
e	Tensão induzida	V
$d\lambda$	Variação de fluxo magnético	Wb
dt	Variação de tempo	s
N_s	Velocidade síncrona do campo girante	rpm
f	Frequência	Hz
p	Número de polos da máquina	-
s	Escorregamento	%
η	Rendimento	%
$\cos \varphi$	Fator de potência	-
T_{max}	Torque máximo desenvolvido pelo motor	N.m
P_n	Potência nominal do motor	cv
n_s	Velocidade síncrona	rpm
n_r	Velocidade do rotor	rpm
E_{ef}	Tensão eficaz induzida	V
f_{me}	Frequência da tensão elétrica gerada	Hz
k_{enr}	Fator de enrolamento	-
N_{fase}	Total de espiras em série no enrolamento de campo	-
φ_p	Fluxo de entreferro por polo	Wb
R_h	Resistência que modela perdas devido a histerese	Ω
R_e	Resistência que modela perdas devido as correntes de Foucault	Ω
R_1	Resistência de dispersão dos enrolamentos do estator	Ω
X_1	Reatância de dispersão dos enrolamentos do estator	Ω
R_c	Resistência que modela perdas no núcleo	Ω
X_m	Reatância de magnetização	Ω
X_r	Reatância de dispersão dos enrolamentos do rotor	Ω
X_2	Reatância de dispersão dos enrolamentos do rotor, vista do estator	Ω
R_2/s	Resistência do rotor	Ω
P_e	Potência elétrica demandada por um MI	W
I_r	Corrente no rotor de um MI	A
P_2	Perdas em um MI	W

P_m	Potência elétrica convertida em mecânica por um MI	W
Δt	Temperatura máxima de operação	°C
%	Porcentagem	

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Considerações iniciais	15
1.2 Motivações	15
1.3 Objetivos.....	15
1.4 Estrutura do trabalho	16
2 HISTÓRICO DOS MOTORES DE INDUÇÃO	17
2.1 Princípios de funcionamento	21
2.1.1 Estator e rotor	22
2.1.2 Conceitos elementares	23
2.1.3 Modelo matemático	25
3 OTIMIZAÇÃO DAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO.....	29
3.1 Materiais utilizados no rotor.....	30
3.2 Tamanho dos motores	31
3.3 Materiais utilizados no núcleo.....	34
3.4 Projetos do estator e do rotor.....	35
3.5 Processo produtivo	38
3.6 Sistemas de resfriamento	38
3.7 Ímãs permanentes	39
3.8 Sistemas de acionamentos	39
4 NORMAS DE PADRONIZAÇÃO DOS MOTORES DE INDUÇÃO.....	41
4.1 International Electrotechnical Commission (IEC).....	44
4.2 Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT).....	47
4.2.1 Classe IR2 ou alto rendimento.....	47
4.2.2 Classe IR3 ou rendimento premium	51
4.3 European Comitee of Manufacturers of Electrical Machines And Power Electronics (CEMEP)	51
4.4 National Electrical Manufacturers Association (NEMA).....	54
5 ANÁLISE DE LINHAS COMERCIAIS.....	58
5.1 WEG	59
5.2 Siemens.....	64
5.3 Baldor (ABB)	67
5.4 Voges.....	72
5.5 Melhor solução em termos de eficiência	76
6 MOTORES DE ÍMÃS PERMANENTES COMO ALTERNATIVA.....	81
6.1 Motores de ímãs permanentes da WEG	82
6.1.1 IR4 Super Premium	82

6.1.2 IR5 Ultra Premium	85
6.1.3 Maior atratividade entre motores das classes IR4 E IR5	87
7 PONTO ÓTIMO DE OPERAÇÃO DE MIT's	90
7.1 MIT de 0,16 cv – 4 polos	90
7.2 MIT de 1,5 cv – 2 polos	93
7.3 MIT de 4,0 cv – 8 polos	95
7.4 MIT de 5,0 cv – 4 polos	97
7.5 MIT de 10,0 cv – 4 polos	99
7.6 MIT de 15,0 cv – 4 polos	102
7.7 MIT de 50,0 cv – 4 polos	104
8. CONCLUSÃO	107
8.1 Sugestões de trabalhos futuros	107
REFERÊNCIAS	109

INTRODUÇÃO

Eficiência nos processos produtivos é um tema que interessa e que beneficia não apenas aos profissionais da engenharia elétrica. Se tratando de processos industriais, o desejo último é a máxima produtividade ao menor custo e, mais recentemente, ao menor impacto ambiental.

O setor industrial foi responsável pelo consumo de 35,92% de toda a eletricidade gerada no Brasil em 2017, segundo o levantamento anual de energia elétrica por classe, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017) e conforme pode ser visualizado na tabela 1.

Tabela 1 – Consumo anual de energia elétrica por classe

CONSUMO (GWh)	2015		2016		2017	
BRASIL	465.290	100%	461.484	100%	465.130	100%
RESIDENCIAL	131.190	28,20	132.872	28,79	133.904	28,79
INDUSTRIAL	169.170	36,36	165.213	35,80	167.065	35,92
COMERCIAL	90.768	19,51	87.873	19,04	88.129	18,95
OUTROS	74.163	15,94	75.526	16,37	76.031	16,35

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017).

A maior parte do consumo de eletricidade é dada pela utilização de máquinas elétricas rotativas. Em 2001, nos países desenvolvidos, havia mais de 3 kW de motores elétricos instalados por pessoa, sendo a maioria deles de indução (adaptado de BOLDEA; NASAR, 2002). Os motores de indução são os mais utilizados em todo o Brasil, por serem robustos, construtivamente simples e por apresentarem baixos custos com manutenção. Chegam a apresentar rendimento superior a 90%, mas motores de alta potência exigem altos custos com técnicas adequadas de acionamento (como o uso de inversores de frequência).

Este trabalho mostra um apanhado histórico e técnico sobre as máquinas elétricas rotativas. É apresentada parte da evolução científica neste campo, como as descobertas da Lei da indução eletromagnética, da reversibilidade entre motores e geradores, da viabilidade do sistema trifásico, dentre outras. O desenvolvimento de tecnologias fundamentais também é abordado, como as criações do dínamo, do comutador e do primeiro motor de indução, até chegar aos motores de ímãs permanentes.

Alguns métodos de acionamentos são discutidos, bem como as vantagens e as desvantagens de seu uso. E, além disso, as padronizações internacionais para motores elétricos são apresentadas, juntamente com as exigências referentes às dimensões das máquinas, ao rendimento e ao grau de proteção das mesmas.

1.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentadas as motivações e os objetivos deste trabalho, que é teórico mas que busca servir de embasamento e de estímulo para a realização de estudos aplicados dentro do próprio mercado de trabalho. As análises realizadas buscaram ter clareza e mostrar a viabilidade da utilização de motores de ímãs permanentes nos processos industriais, apesar de seu preço mais elevado que o dos motores de indução de mesma potência.

1.2 Motivações

De acordo com a Resenha Energética Brasileira, do Ministério de Minas e Energia, 67,1% da eletricidade consumida no Brasil em 2016 foi proveniente das usinas hidroelétricas. O baixo índice pluviométrico em algumas regiões do país têm sido um dos principais responsáveis pelas muitas variações das tarifas de energia elétrica. Diante desta situação instável, os apelos ao consumo consciente de eletricidade tem se intensificado. (PATUSCO, 2017)

Este estudo foi motivado pela possibilidade de apresentar soluções alternativas no que diz respeito a máquinas elétricas rotativas, capazes de reduzir os níveis de energia elétrica consumida, especialmente pelo setor industrial brasileiro. Além disso, serviu de motivação a constatação da falta de interesse de muitos profissionais em buscarem conhecimento das tecnologias que têm sido desenvolvidas nos seus campos de atuação.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como um de seus objetivos realizar uma análise histórica e técnica do desenvolvimento das máquinas elétricas rotativas, com foco no motor de indução, apresentando as inovações tecnológicas e analisando-as do ponto de vista técnico. Busca-se ainda, apresentar as exigências referentes à padronização destes motores, tanto no Brasil quanto no exterior.

É objetivo deste estudo apresentar uma revisão do funcionamento das máquinas de indução e, como tópico adicional, abordar da mesma forma os motores de ímãs permanentes, os apresentando como alternativa de utilização em acionamentos industriais e afirmando os benefícios disto, como a redução no consumo de energia elétrica, a melhora no fator de potência global das instalações e a garantia de maior confiabilidade operacional.

As abordagens aqui realizadas visam ainda estimular profissionais na área de engenharia elétrica a sempre buscarem novas soluções, mais eficientes e mais confiáveis, para aplicarem nos processos aos quais estão envolvidos.

1.4 Estrutura do trabalho

O capítulo 1 revela as principais motivações os objetivos deste estudo. O capítulo 2 apresenta uma abordagem histórica da invenção e do processo construtivo dos motores elétricos, buscando organizar os fatos cronologicamente e destacando as principais descobertas.

O capítulo 3 mostra tópicos referentes à otimização das máquinas de indução, envolvendo estudos da teoria eletromagnética, utilização de materiais de alta qualidade e métodos de acionamento eficientes. Já o capítulo 4 trata da normatização construtiva e operacional dos motores em questão, conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a International Electrotechnical Commission (IEC) e a National Electrical Manufacturers Association (NEMA).

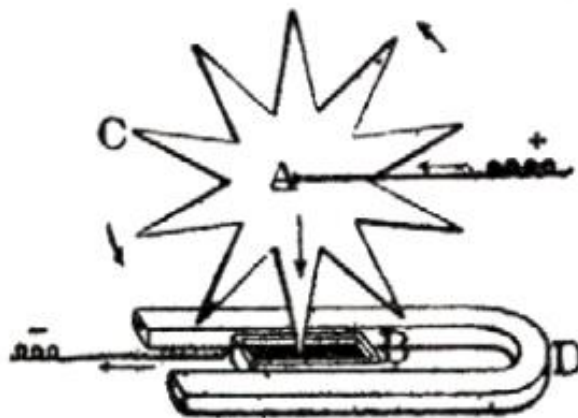
No capítulo 5 é realizado um comparativo das especificações dos motores de indução produzidos por grandes fabricantes, como WEG, Siemens, Voges e Baldor. No capítulo 6 há uma abordagem técnica dos motores de ímãs permanentes, que são apresentados como uma alternativa nos acionamentos industriais. Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões e os objetivos alcançados com a realização deste trabalho.

2 HISTÓRICO DOS MOTORES DE INDUÇÃO

Ao redor do mundo, as tentativas de construção do que conhecemos por motor elétrico foram baseadas em criações e descobertas anteriores, como a bateria (Alessandro Volta, 1800), a geração de campos magnéticos por correntes elétricas (Hans Christian Oersted, 1820) e o eletroímã (William Sturgeon, 1825).

O primeiro dispositivo rotativo acionado eletromagneticamente foi desenvolvido por Peter Barlow (roda de Barlow), em 1822 e pode ser visualizado na figura 2.1. Tratava-se de uma roda dentada, suspensa por um eixo horizontal, posta entre os polos de um ímã de forma que campo magnético fosse perpendicular à roda e gerasse sobre ela uma força. Daí o movimento.

Figura 2.1 – Representação da roda de Barlow



Fonte: (SARAIVA, 2007).

Em 1831, Michael Faraday constata que o inverso da descoberta de Oersted é verdadeiro, ou seja, corrente elétrica é produzida por uma variação de um campo magnético. No mesmo ano, o estadunidense Joseph Henry também descobre a Lei da indução, mas de forma independente ao trabalho de Faraday, e constrói uma pequena balança magnética.

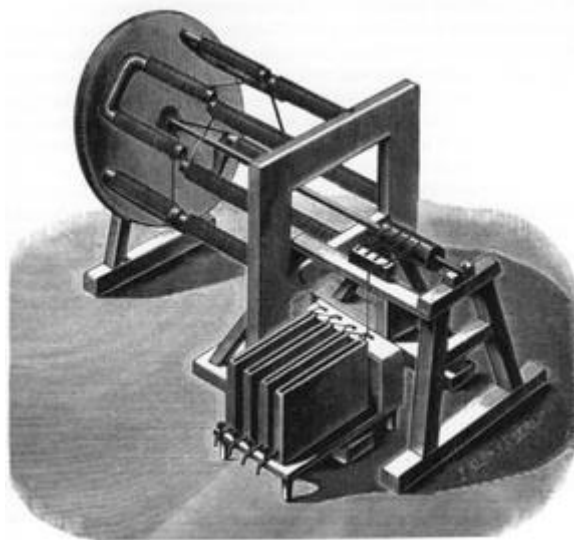
Em julho de 1832, Faraday realiza a primeira publicação que descrevia uma máquina elétrica rotativa. O conteúdo foi recebido por ele através de uma carta assinada apenas com as iniciais P. M. Entre 1832 e 1834, alguns dispositivos elétricos rotativos foram desenvolvidos, inclusive o primeiro gerador de corrente contínua com e sem comutador (DOPPELBAUER, 2018).

Nos primeiros anos de estudo neste campo, havia uma clara distinção entre o que

seriam máquinas magneto-elétricas, eletromagnéticas e geradores elétricos. No entanto, já ao final de 1833, Heinrich Friedrich Emil Lenz percebeu que existia reciprocidade entre os fenômenos elétricos e magnéticos. Então constatou a reversibilidade entre motores e geradores elétricos.

Já o primeiro motor elétrico rotativo foi concebido por Moritz Jacobi, em maio de 1834. Disponibilizava uma potência mecânica da ordem de 15 Watts e era capaz de levantar corpos de aproximadamente 5 kg com uma velocidade de 0,30 m/s. Uma representação desta máquina é apresentada na figura 2.2. O motor original não existe mais, mas o Dr. Kowaleski fez uma reconstrução do mesmo, que está no Museu Politécnico de Moscou.

Figura 2.2 – Primeiro motor elétrico, criado por Moritz Jacobi

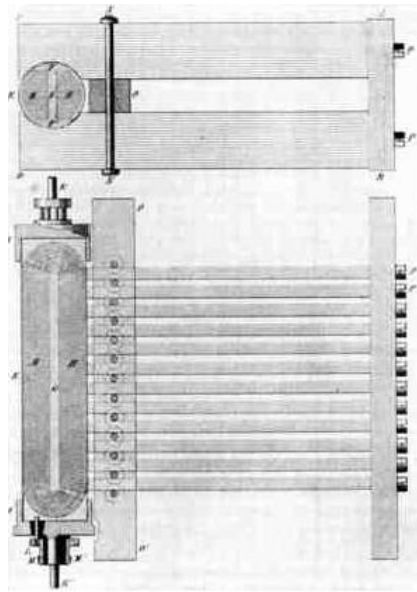


Fonte: (DOPPELBAUER, 2018).

Apesar de todos os avanços até então, a primeira patente de um motor elétrico nos Estados Unidos foi dada a Thomas Davenport, em fevereiro de 1837. Em sua criação ele utilizou quatro eletroímãs rotativos que eram alternados por um comutador e ímãs permanentes em forma de anéis (WHELAN, 2018).

Em 1856, o alemão Werner Siemens apresentou um gerador elétrico com enrolamento de armadura em duplo T, sendo o primeiro a utilizar ranhuras para receber os enrolamentos. A desvantagem deste tipo de armadura, representada na figura 2.3, é que ela produz uma corrente contínua pulsante.

Figura 2.3 – Representação da armadura em duplo T, desenvolvida por Siemens



Fonte: (DOPPELBAUER, 2018).

James Clerk Maxwell conseguiu sintetizar todo o conhecimento de sua época sobre o eletromagnetismo em 20 equações. Siemens possivelmente fez uso destas informações e em 1866 apresentou um dínamo elétrico, uma invenção baseada em sua armadura em duplo T. Com isso, no ano seguinte, um gerador elétrico de maior potência estava disponível.

Siemens e Hefner-Alteneck, um companheiro próximo, começaram a desenvolver um motor que tinha uma armadura em forma de tambor, uma versão melhorada da armadura em duplo T. Esta máquina agora era capaz de produzir uma tensão contínua suave, mas os inventores perceberam que ela apresentava perdas por correntes parasitas e, em 1875, atenuaram este problema utilizando fios de ferro no núcleo magnético, ao invés de usar pedaços maciços (DOPPELBAUER, 2018).

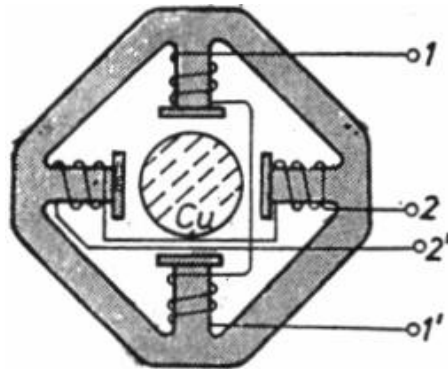
Importantes invenções como o comutador, o gerador, a armadura em forma de tambor e a laminação do circuito magnético, foram fundamentais para o desenvolvimento dos motores CC como conhecemos hoje. A confecção deste tipo de máquina emergiu a partir da invenção do dínamo, por Siemens.

Como a maior parte dos motores eram alimentados por baterias, o maior foco foi o desenvolvimento de máquinas rotativas de corrente contínua. No entanto, partindo da descoberta das leis da indução eletromagnética, houve um contínuo avanço nas tecnologias de design, de materiais e de técnicas construtivas de motores que funcionam com base nesse princípio eletromagnético citado.

Em 1885, o italiano Galileo Ferraris construiu o primeiro motor de indução, usando

duas fases, cujo esquemático está na figura 2.4. Ele acreditava que estes motores jamais teriam eficiência superior a 50% e então perdeu o interesse de permanecer desenvolvendo este tipo de máquina. Pouco antes disso, em 1882, Nicola Tesla já se mostrava interessado em desenvolver um sistema elétrico polifásico e, em 1885, sem conhecer o trabalho de Ferraris, também apresentou um motor de indução bifásico, do qual a figura 2.5 apresenta o esquemático (DOPPELBAUER, 2018).

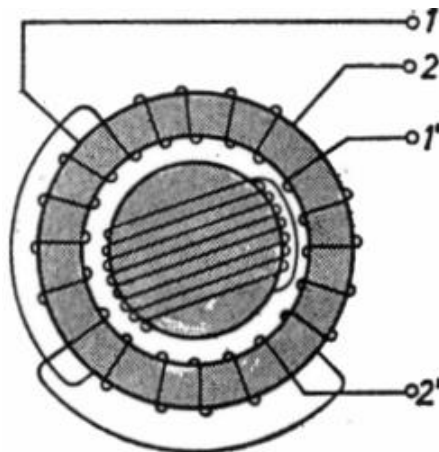
Figura 2.4 – Esquemático do primeiro motor de indução de Galileo Ferraris



Fonte: (BOLDEA; NASAR, 2002).

Friedrich August Haselwander foi o primeiro a surgir com a ideia de utilizar um sistema trifásico de corrente alternada, em julho de 1887, na Alemanha. Ele chegou a construir um gerador trifásico, síncrono e de polos salientes, mas as autoridades alemãs não o permitiram colocar a máquina em funcionamento, por medo de ocasionar distúrbios nas linhas telegráficas (DOPPELBAUER, 2018).

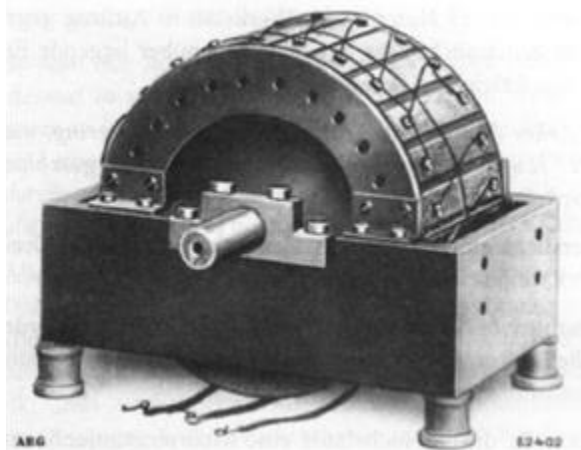
Figura 2.5 – Esquemático do primeiro motor de indução de Nicola Tesla



Fonte: (BOLDEA; NASAR, 2002).

Ainda na Alemanha, em 1889, o russo Michael Dolivo-Dobrowolsky, engenheiro da companhia AEG, apresentou ao mundo o motor de indução trifásico com rotor em gaiola, o qual funcionava adequadamente e é ilustrado na figura 2.6 (MIRCEVSKI, 2007).

Figura 2.6 – Primeiro motor de indução de rotor em gaiola, de Dolivo-Dobrowolsky



Fonte: (DOPPELBAUER, 2018).

Dobrowolsky também inventou o motor de indução trifásico de anéis deslizantes com resistores de partida. Em algumas palestras ele explicou a natureza e as características dos sistemas e dos motores trifásicos.

Desde o início do século XX, diversos fabricantes de motores investiram de forma intensa na melhoria das máquinas que desenvolviam. Os materiais dos quais dispunham eram fatores limitantes da eficiência das mesmas e isto alavancou o interesse por buscar melhores insumos. O princípio de funcionamento dos motores de indução permanece o mesmo até os dias atuais, mas os esforços para lhes garantir maior aproveitamento de energia ainda não cessou. Esta problemática da otimização destas máquinas será abordada com maiores detalhes no capítulo 3.

2.1 Princípios de funcionamento

Não é objetivo deste trabalho realizar uma abordagem exaustiva sobre o funcionamento dos motores de indução, mas apenas tratar das ideias mais fundamentais. Conforme já citado, estes fundamentos permanecem os mesmos desde a concepção do primeiro MI, mas as descrições qualitativa e quantitativa ainda evoluem.

Com a experimentação, a fundamentação teórica foi sendo solidificada até que foi possível compreender com detalhes o processo de conversão de energia elétrica em energia

mecânica por meio dos motores elétricos. Vale ressaltar que apesar da modelagem semelhante, o modo de operação dos geradores não será parte deste estudo.

2.1.1 Estator e rotor

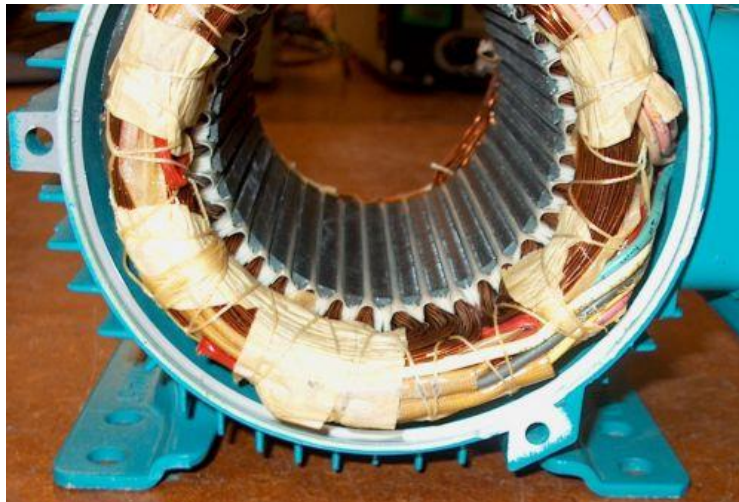
Descrições precisas destes componentes das máquinas elétricas seriam extensas e complexas, mas isto não é interesse deste trabalho. Formalizando uma definição simples e fazendo uso de ilustrações, este tópico apresenta e distingue o que são estas duas partes dos motores elétricos.

A peça estática das máquinas de indução, conhecida como estator, contém uma série de ranhuras que alojam bobinas, chamadas enrolamento de armadura, que a título de exemplificação, podem ser visualizadas na figura 2.7.

Já o rotor, a parte móvel, pode apresentar bobinas em curto-circuito ou um conjunto de barras curto-circuitadas por anéis em suas duas extremidades. Os tipos de rotor citados podem ser vistos na figura 2.8.

Mais informações construtivas são abordadas no capítulo 3 deste estudo.

Figura 2.7 – Enrolamento de armadura de uma máquina de indução



Fonte: (KNIGHT, 2018).

Figura 2.8 – Rotores em gaiola (superior) e bobinado (inferior)



Fonte: (KNIGHT, 2018).

2.1.2 Conceitos elementares

Como a própria nomenclatura sugere, os motores de indução têm seu funcionamento baseado na lei da indução eletromagnética, formulada por Michael Faraday. De acordo com (FITZGERALD, 2006), em estruturas magnéticas com enrolamentos de alta condutividade elétrica (caso dos motores elétricos), a lei de Faraday pode ser reduzida, como indicado na equação (1).

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.1)$$

Em resumo a equação (2.1) afirma que tensões elétricas são induzidas por campos magnéticos variáveis no tempo. Nas máquinas rotativas, elas são geradas nos enrolamentos ou nos grupos de bobinas quando elas giram mecanicamente dentro de um campo magnético ou quando o campo gira mecanicamente próximo aos enrolamentos (adaptado de FITZGERALD, 2006).

Com base na última afirmação do parágrafo anterior, é possível produzir um campo magnético girante de amplitude constante instalando bobinas igualmente espaçadas na armadura de um motor, as quais devem ser alimentadas por correntes defasadas entre si. As características do enrolamento do estator, em função da frequência e do número de polos, influenciam na velocidade síncrona deste campo girante produzido, a qual é expressa pela

equação (2.2) (KOSOW, 1982).

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.2)$$

Onde:

N_s – velocidade síncrona do campo girante;

f – frequência da fonte;

p – número de polos da máquina.

Quando em funcionamento, o campo magnético gerado no estator induz tensões e correntes no rotor. Pela lei de Lenz, o sentido da tensão induzida produz um campo que tende a se opor ao movimento que a induziu. Como em todas as máquinas, o torque eletromagnético resulta da interação entre os campos do estator e do rotor (KOSOW, 1982).

Frente à velocidade síncrona do campo gerado na armadura, parte móvel dos motores de indução opera com um pequeno atraso, chamado de escorregamento e expresso pela equação (2.3). Isto é necessário para que haja um movimento relativo entre os campos gerados no estator e no rotor e, assim, seja possível produzir torque (KNIGHT, 2018b).

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \text{ [%]} \quad (2.3)$$

Onde:

n_s – velocidade síncrona;

n_r – velocidade do rotor.

Por meio de algumas demonstrações matemáticas, que serão omitidas neste trabalho, foi verificado que o valor de tensão eficaz produzido quando uma máquina de indução opera normalmente é dado pela equação (2.4), retirada de (FITZGERALD, 2006).

$$E_{ef} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_{me} \cdot k_{enr} \cdot N_{fase} \cdot \Phi_p \quad (2.4)$$

Onde:

f_{me} – velocidade elétrica do motor medida em Hz, que também é igual a frequência

elétrica da tensão gerada;

k_{enr} – fator de enrolamento do enrolamento de campo;

N_{fase} – total de espiras em série no enrolamento de campo;

ϕ_p – fluxo de entreferro por polo [Wb].

Com base na equação (2.4), constata-se que é possível manipular a tensão induzida por meio de mudanças construtivas e operacionais na máquina. No entanto, vale ressaltar que existem limitações físicas e que nem sempre os resultados das manipulações matemáticas podem ser obtidos na prática. Um destes fatores limitantes é a saturação do material magnético, que vai ocorrendo à medida que o fluxo magnético é aumentado.

Neste processo, a permeabilidade magnética do material diminui gradualmente, juntamente com sua capacidade de contribuir com a densidade de fluxo total do motor elétrico. O conjugado e a tensão gerada em todas as máquinas elétricas rotativas dependem do fluxo concatenado nos seus enrolamentos e a saturação pode influenciar consideravelmente nas características delas (FITZGERALD, 2006).

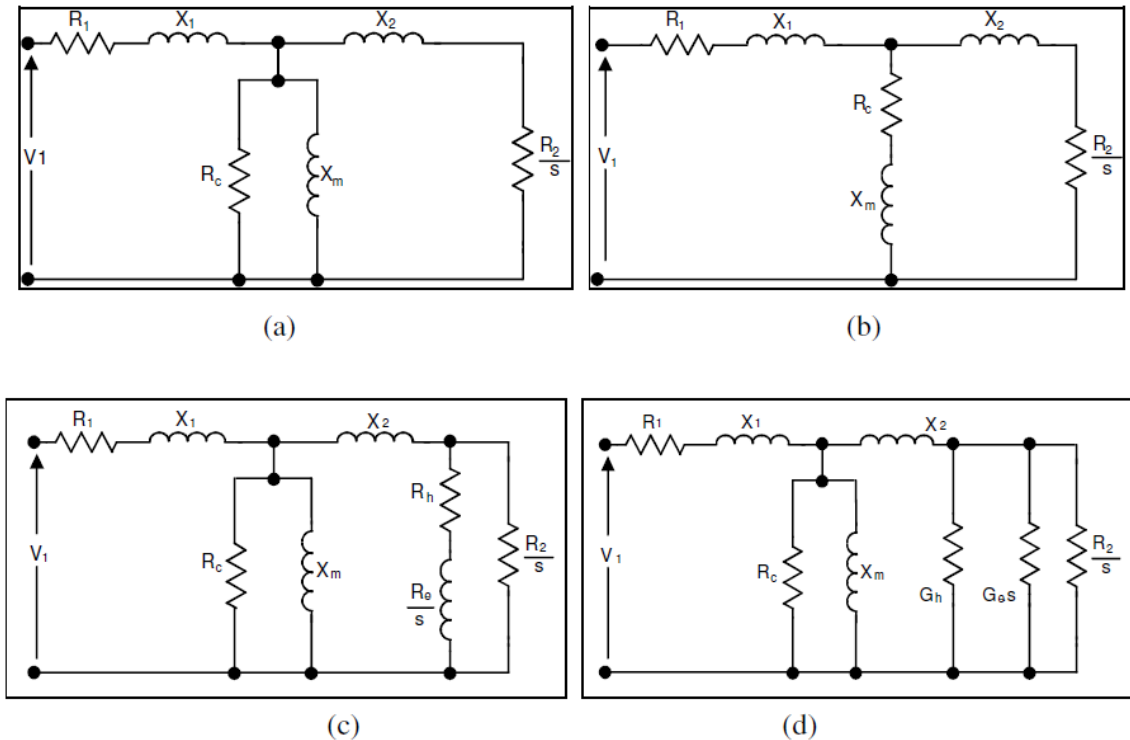
2.1.3 Modelo matemático

Para estudo e projeto de motores elétricos é necessário conhecer as equações que expressam os sistemas elétrico e mecânico (mesmo que não totalmente) e o acoplamento entre eles. Esta modelagem matemática pode ser expressa fazendo uso de modelos estáticos e alguns deles são apresentados na figura 2.9.

O modelo estático de uma máquina de indução polifásica é, em essência, igual ao de um transformador com movimento relativo entre os enrolamentos primário e secundário. Apesar de apresentarem algumas deficiências na modelagem das perdas no ferro e da saturação magnética, os modelos (a) e (b), mostrados na figura 2.9, são os mais comuns. Nos modelos (c) e (d) da mesma ilustração, as resistências R_h e R_e representam as perdas devido a histerese e devido às correntes de Foucault, respectivamente (DAHER, 1997).

O termo X_m , que se refere à reatância de magnetização da máquina, pode sofrer saturação e considerar este efeito torna os cálculos mais complexos. Diante disto, é importante destacar que para alcançar um determinado resultado, nem sempre é recomendado utilizar um modelo mais complexo, especialmente quando um modelo mais simples fornece resultados aceitáveis (DAHER, 1997).

Figura 2.9 – Modelos estáticos dos motores de indução: (a) e (b) são os mais comuns; (c) e (d) incluem parâmetros de perdas no ferro



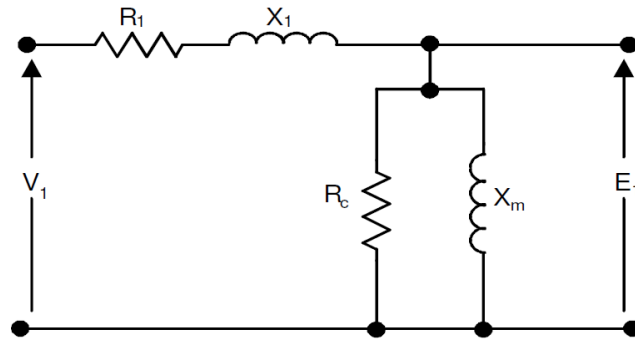
Fonte: (DAHER, 1997).

Sendo considerado suficiente para os propósitos abordados neste estudo, será trabalhado o circuito (a) da figura 2.9, que é um circuito equivalente visto do estator. As componentes do circuito referentes ao estator incluem R_1 , X_1 , R_c e X_m , que são, respectivamente: resistência e reatância de dispersão dos enrolamentos, resistência que modela perdas no núcleo e reatância de magnetização. X_2 e R_2 representam, respectivamente, a reatância de dispersão e a resistência do rotor.

O circuito do estator de um motor de indução é mostrado na figura 2.10.

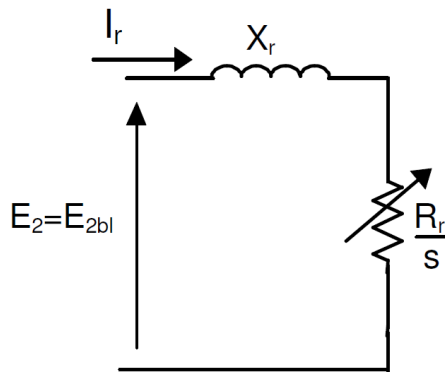
Analisando matematicamente apenas o circuito do rotor de um MI, mostrado na figura 2.11, é possível modelar as parcelas de potência demandada, dissipada e convertida, como apresentado nas equações (2.5), (2.6) e (2.7).

Figura 2.10 – Circuito do estator de um MI



Fonte: (DAHER, 1997).

Figura 2.11 – Circuito do rotor de um MI



Fonte: (DAHER, 2017).

A equação (2.5) revela que a potência demandada pela máquina é diretamente proporcional à resistência do rotor, mas inversamente proporcional ao escorregamento. De acordo com (DAHER, 1997), pode-se pensar que quanto menores os valores de escorregamento, maior o rendimento da máquina. No entanto, valores de “s” muito pequenos fazem com que as perdas no estator aumentem e reduzam o rendimento do motor. Ainda assim, apesar da aparente contradição, é possível definir um valor de escorregamento ótimo para uma dada velocidade de operação.

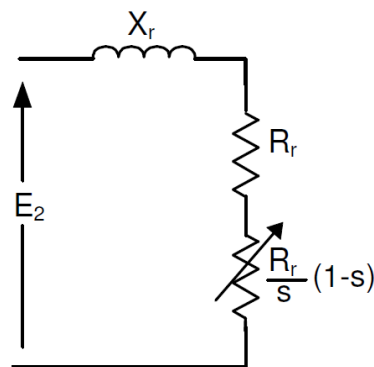
$$P_e = I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \quad [W] \quad (2.5)$$

$$P_2 = I_r^2 \cdot R_r \quad [W] \quad (2.6)$$

$$P_m = P_e - P_2 = I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \cdot (1 - s) \quad [W] \quad (2.7)$$

A equação (2.6) indica que as perdas na máquina de indução são diretamente dependentes da resistência rotórica. Aumentar ou diminuir essa resistência tem efeitos que são melhor abordados no capítulo 3 deste trabalho. A equação (2.7) sugere que o termo R_r/s pode ser representado por meio de duas resistências em série, conforme ilustrado na figura 2.12. O termo R_r representa a resistência do rotor, mas o parâmetro $R_r(1-s)/s$ não existe na prática e é incluso no modelo apenas para representar a parcela de potência convertida, de elétrica para mecânica.

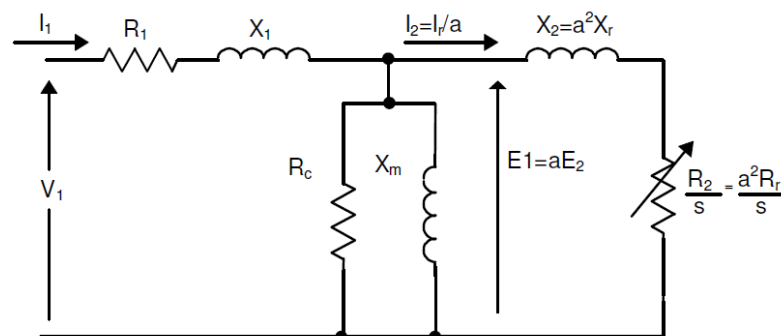
Figura 2.12 – Circuito expandido do rotor de um MI



Fonte: (DAHER, 1997).

Como pode ser confirmado na figura 2.12, a tensão E_2 e a reatância X_r não dependem de s . Com isso, é possível unir os circuitos do estator e do rotor para formar um circuito equivalente do ponto de vista do estator, mostrado na figura 2.13. As equações de tensões, de correntes, de fator de potência, de rendimento, entre outras, não serão desenvolvidas, mas podem servir de exercício para o leitor.

Figura 2.13 – Circuito equivalente de um MI, do ponto de vista do estator



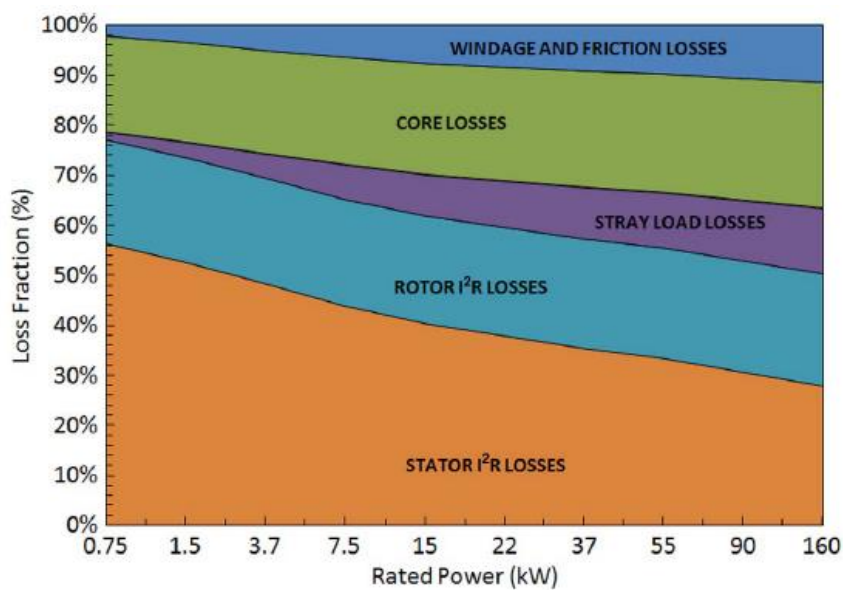
Fonte: (DAHER, 1997).

3 OTIMIZAÇÃO DAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO

Como citado no capítulo 2, após os primeiros anos de implementação, os motores elétricos não eram muito competitivos. Seu uso só se tornou mais atrativo após a criação do gerador e, a partir de então, com a crescente aplicação e com o estudo destas máquinas, percebeu-se que é possível otimizar seu funcionamento.

Com o sucesso em compreender fisicamente e representar matematicamente o funcionamento dos motores de indução, novas condições construtivas passaram a ser consideradas com o intuito de aumentar a eficiência destas máquinas. Verificou-se que a alteração de certos parâmetros resulta em maiores ou menores perdas de energia. O percentual destas perdas nos motores de indução com rotor em gaiola, em função de sua potência nominal, pode ser verificado na figura 3.1.

Figura 3.1 – Percentual médio de perdas em MI's com rotor em gaiola em função de sua potência nominal



Fonte: (ALMEIDA, 2014).

Nos motores de indução mais modernos, quanto maior sua potência nominal, maior sua eficiência. Diante desta constatação, é possível que algumas informações da figura 3.1 induzam o leitor a achar que as perdas nos motores de indução não diminuem em função do aumento da potência da máquina. É notável que o percentual das perdas por fricção e das perdas suplementares aumenta para motores maiores, mas vale ressaltar que este percentual é exclusivamente sobre as perdas de energia.

Exemplificando a análise da figura 3.1, suponha que dois motores, um de 0,75 kW e outro de 160 kW, apresentem rendimento de 87% e 95%, respectivamente. A distribuição percentual de perdas será sobre 13 % e 5 % da energia total consumida, nesta ordem. Tomando como referência as perdas suplementares e as perdas por fricção, é possível verificar na figura supracitada que suas participações percentuais nas perdas totais aumenta.

Isto não significa que a quantidade de energia perdida destas duas formas necessariamente aumentou, pois se estas quantias permanecem constantes enquanto as perdas totais diminuem, certamente a participação percentual delas aumenta. É interessante notar que independentemente da forma como a dissipação de energia é percentualmente distribuída, a eficiência ainda é maior nas máquinas de indução de potências maiores.

Com a comprovação prática que as máquinas elétricas gerariam lucros elevadíssimos, houve um aumento significativo do estudo de materiais condutores, isolantes e magnéticos. Além disso, constata-se o contínuo refino nos métodos de produção e de montagem e o desenvolvimento de novas ferramentas de projeto.

Este capítulo trata da evolução tecnológica de diversos constituintes dos motores de indução, inclusive dos métodos de acionamento destas máquinas. As alternativas de otimização aqui apresentadas não resumem toda a tecnologia existente, mas apenas destacam algumas das técnicas utilizadas.

3.1 Materiais utilizados no rotor

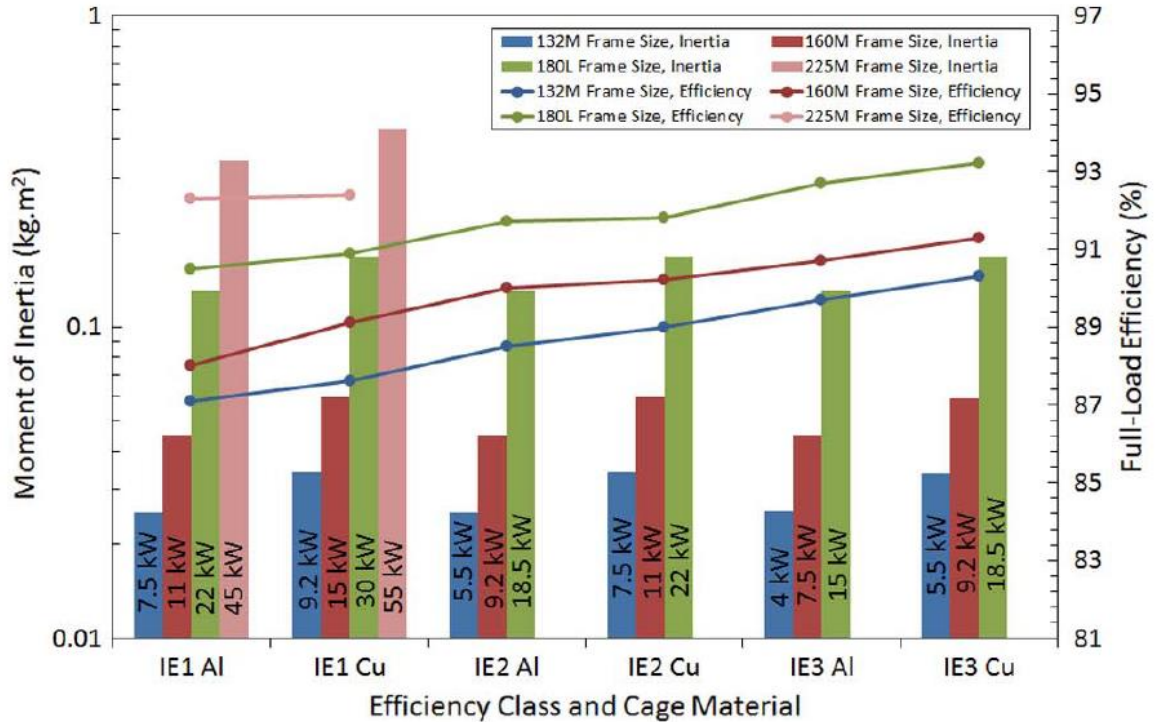
Grande parte dos fabricantes de MI's empregam o alumínio fundido para confecção do rotor de motores pequenos e médios. No entanto, como o cobre apresenta uma maior condutividade elétrica, constatou-se que a sua utilização no rotor pode reduzir as perdas totais das máquinas de indução em até 18%. Além disso, por proporcionar uma maior densidade de potência, o uso do cobre permitiu o desenvolvimento de motores menores para uma dada potência, comparando-se com a aplicação do alumínio (ALMEIDA, 2014).

Com esta alteração de material, o rotor apresenta um maior momento de inércia e é possível perceber isso com clareza, já que o cobre é mais denso que o alumínio. Em adição a isto, a resistência rotórica é diminuída e a consequência é a diminuição do torque de partida, que é um ponto negativo para muitas aplicações.

Em termos de economia de energia a utilização do cobre é muito mais vantajosa, o que é ilustrado na figura 3.2. No entanto, o processo de fundição do cobre é mais oneroso que o do alumínio e dependendo da aplicação, da potência do motor e de quantas horas ele

permanecerá em funcionamento, este investimento é compensado pela economia energética (ALMEIDA, 2014).

Figura 3.2 – Eficiência em função do material do rotor



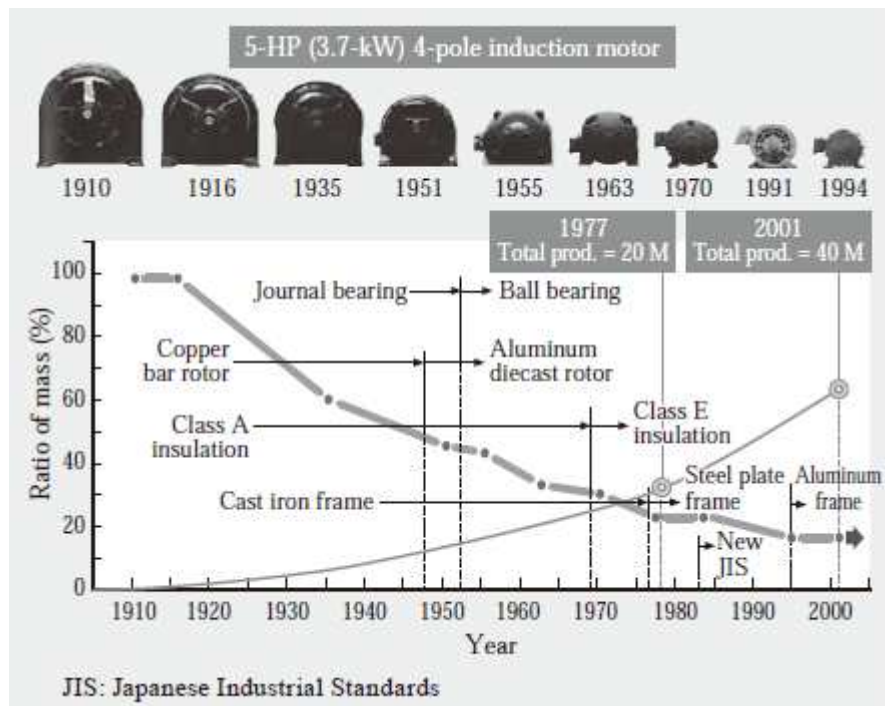
Fonte: (ALMEIDA, 2014).

3.2 Tamanho dos motores

Reduzir as dimensões e o peso das máquinas é, muitas vezes, indício de um processo de otimização bem sucedido. Os materiais utilizados são responsáveis pela maior contribuição nesse processo de melhora, o que se tornou bem evidente com a fabricação do aço elétrico.

A figura 3.3 exemplifica a evolução dos motores de indução de quatro polos, desenvolvidos pela Hitachi, fabricante japonesa, ao longo do século XX. “Observando-se o peso de um motor de mesma potência no decorrer do tempo, pode-se verificar que o motor atual tem 8% do peso do seu antecessor de 1891. O tamanho das máquinas vem diminuindo cerca de 20% a cada década.” (SENS, 2001, p. 13).

Figura 3.3 – Mudanças no tamanho e na massa de um motor de 5 HP da Hitachi



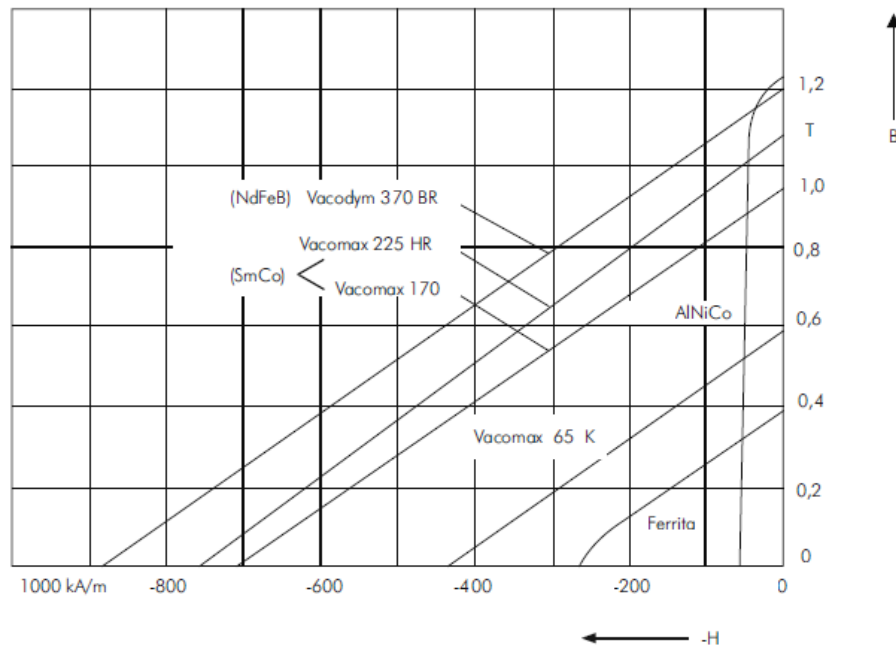
Fonte: (MIKAMI, 2011).

Com a descoberta de materiais magnéticos como SmCo (Samário-Cobalto) e NdFeB (Neodímio-Ferro-Boro) foi possível projetar máquinas de maior relação torque/volume, sendo ainda mais eficientes. Isto porque os elementos citados possuem magnetismo remanescente e força coercitiva bem superiores, em comparação com os materiais considerados tradicionais (HANITSCH, 1990). Estas informações podem ser constatadas na figura 3.4.

Na figura 3.5 é possível constatar a influência destes novos materiais magnéticos no volume e no peso das máquinas elétricas. Apesar do avanço, logo foram sentidos os problemas da falta de padronização entre as características dos motores desenvolvidos por diferentes fabricantes. Dessa forma, os clientes enfrentavam sérias dificuldades na substituição destes dispositivos. Iniciando a resolução deste problema, a norma DIN-VDE-2650 foi publicada em 1923, na Alemanha (SENS, 2001).

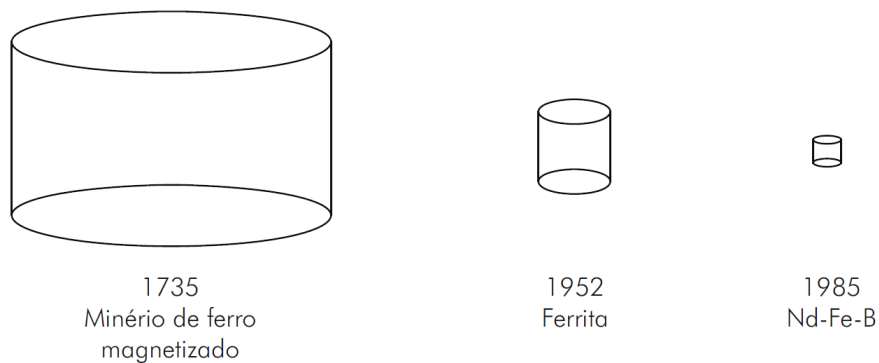
Os tamanhos das carcaças dos motores são especificados por um número e uma letra, especificando a altura do eixo e a distância entre as linhas centrais dos furos de fixação, nesta ordem. As letras S, M e L são referentes ao comprimento e indicam pequeno, médio e grande, respectivamente (ALMEIDA, 2014). No Brasil, as classificações das formas construtivas e das montagens das máquinas elétricas são padronizadas pela ABNT NBR 5031/2008.

Figura 3.4 – Curvas de magnetização



Fonte: (STEPHAN, 2008).

Figura 3.5 – Comparação volumétrica de materiais de igual energia magnética



Fonte: (STEPHAN, 2008).

Utilizar uma maior carcaça de motor para uma dada potência pode resultar em redução dos níveis de perdas, já que permite aumentar a quantidade de materiais utilizados. Esta melhora está mais diretamente ligada ao aumento da altura do eixo do que com a ampliação do comprimento da carcaça. No entanto, um ponto a ser cuidadosamente analisado é o fato de que esta técnica reduzirá a densidade de potência (kW/kg) da máquina e isto pode ocasionar um aumento de custo significativo, que pode não ser compensado pela economia no consumo de energia (ALMEIDA, 2014).

3.3 Materiais utilizados no núcleo

Os estudos referentes a este componente do motor se intensificaram com a verificação de que as perdas no ferro representam aproximadamente 20% das perdas totais, conforme visto na figura 3.1.

Atualmente as chapas de aço-silício são utilizadas em larga escala por conta de suas propriedades favoráveis. No entanto, de acordo com (ALMEIDA, 2014), os materiais amorfs podem reduzir as perdas no núcleo dos motores de indução em até 70%. Este material apresenta características magnéticas superiores àquelas verificadas em chapas de aço-silício de mesma espessura. Um breve comparativo de características destes elementos pode ser visualizado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Principais propriedades dos materiais amorfs e do aço-silício

Material	AM (2605SA1)	Si Steel (35A300)
Conductivity ($\mu\Omega.m$)	1.3	0.52
Density (kg/m^3)	7.18	7.65
Nominal Thickness (mm)	0.025	0.35
Vickers Hardness (GN/m^3)	900	187
Tensile Strength (MN/m^2)	1~1.7	0.5
Iron Losses (W/kg) as a function of frequency for $B_{max} = 0.1 T$		

Fonte: (ALMEIDA, 2014).

Ainda comparando estes elementos, os materiais amorfs são saturados mais facilmente e isto pode exigir um núcleo de maior volume para uma dada potência. Substituir o aço-silício pelo concorrente em questão disponibilizaria motores de indução mais eficientes, mas muito mais caros (considerando o alto custo de produção dos materiais amorfs).

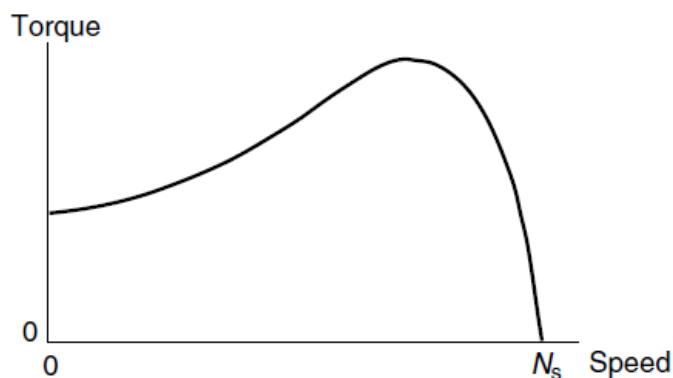
3.4 Projetos do estator e do rotor

Na elaboração do projeto de uma máquina elétrica rotativa, as decisões que visam a otimização são indispensáveis. Quando há melhora no projeto eletromagnético de um motor, pode haver significativa melhoria na sua curva de torque-velocidade e redução das perdas no núcleo, no estator e no rotor. Demais impactos provenientes da fase de projeto estão relacionados ao grau de saturação do núcleo, à densidade de corrente nos condutores, ao efeito pelicular e à geometria do estator e do rotor (ALMEIDA, 2014).

Um dos pontos de partida para projetar uma máquina é conhecer bem o comportamento da carga que será acionada. As características do motor devem ser adequadas às solicitações que a ele são efetuadas. Neste sentido, para exemplificar, pode ser imprescindível que o torque na partida seja alto, mesmo que hajam efeitos negativos em consequência disto.

O comportamento característico de torque por velocidade nos MIT's é apresentado na figura 3.6. Baixo torque na partida resulta em um tempo de aceleração maior até chegar à velocidade nominal. Com isso, as altas correntes deste período inicial estressam os componentes do motor por mais tempo. Uma maneira de reduzir este intervalo é deslocar a curva típica do motor para a esquerda, de forma que ele desenvolva um alto torque na partida.

Figura 3.6 – Curva típica de torque por velocidade de um motor de indução com rotor em gaiola



Fonte: (HUGHES, 2006).

De acordo com (KNIGHT, 2018), a resistência do rotor tem um impacto significativo sobre a curva característica de torque por velocidade de um motor. Quanto maior a resistência rotórica, maior o torque na partida. As grandes vantagens disto são a redução no tempo em que o motor chega à condição de operação desejada e no estresse provocado pelas altas correntes iniciais. Em contrapartida, em regime permanente, há um aumento do

escorregamento da máquina de indução e do nível de perdas no rotor, tornando-a menos eficiente.

Das tecnologias desenvolvidas para atenuar os efeitos do problema supracitado, três serão brevemente abordadas: rotores bobinados, com barras profundas e com dupla gaiola de esquilo. Existem semelhanças no comportamento elétrico, mas muitas diferenças construtivas.

Os motores com rotor bobinado são flexíveis quanto a lidar com a necessidade de variar a resistência rotórica. O enrolamento do rotor é projetado para apresentar baixa resistência, de modo que à plena carga apresente baixas perdas e baixo escorregamento. Os terminais das bobinas do rotor são ligados a anéis deslizantes, mas na partida podem ser associados a resistências em série. Neste período, esta medida aumentará a resistência rotórica (e dissipará a maior parte da energia nos resistores externos), aumentará o torque, reduzirá as correntes e melhorará o fator de potência (FITZGERALD, 2006).

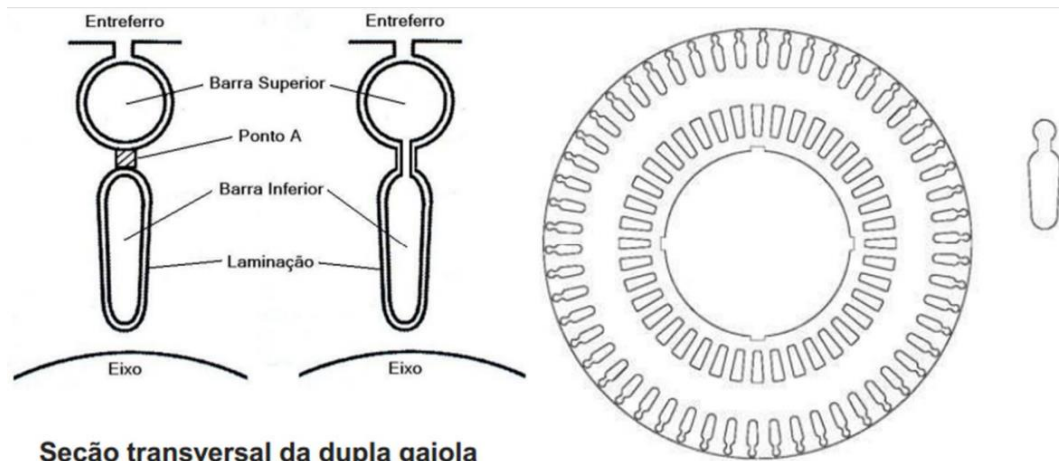
Utilizando um valor de resistência adequado, será possível fazer com que o motor produza o torque máximo em sua partida. Ao longo do período de aceleração da máquina, as resistências externas podem ser diminuídas de forma que proporcione conjugado máximo ao longo de todo o intervalo. Quando o regime permanente for alcançado, os enrolamentos podem ser ligados diretamente aos anéis. As maiores desvantagens destes tipos de motores, com relação às máquinas com rotor em gaiola, são a maior complexidade e o maior custo (FITZGERALD, 2006).

Tratando das técnicas para variar a resistência dos rotores em gaiola, foi verificada a viabilidade de produzi-los com barras profundas. Os efeitos eletromagnéticos que ocorrem não serão aprofundados neste trabalho, mas este tipo de rotor pode ser projetado para ter uma resistência efetiva algumas vezes maior que sua resistência em corrente contínua. À medida que o motor acelera a frequência do rotor diminui e, chegando em regime permanente, sua resistência efetiva é reduzida a valores que se aproximam da resistência observada em CC. Outra vantagem desta técnica é a manutenção de um baixo escorregamento (FITZGERALD, 2006).

Os motores de indução com rotor com dupla gaiola apresentam duas camadas de barras curto-circuitadas por anéis em suas extremidades, conforme mostrado na figura 3.7. Normalmente as barras superiores apresentam menor seção transversal que as barras inferiores, o que confere às primeiras uma maior resistência. Mais uma vez, sem aprofundamento nos fenômenos que ocorrem no interior do motor, quando o mesmo está parado a frequência do rotor é igual à do estator e com isto, a resistência rotórica se aproxima da alta resistência das barras superiores. Quando o motor acelera e a frequência do rotor diminui, a resistência deste

último se aproxima da resistência equivalente das duas camadas de barras em paralelo (FITZGERALD, 2006). Esta técnica também proporciona baixos valores de escorregamento.

Figura 3.7 – Vista em corte de um rotor com dupla gaiola de esquilo



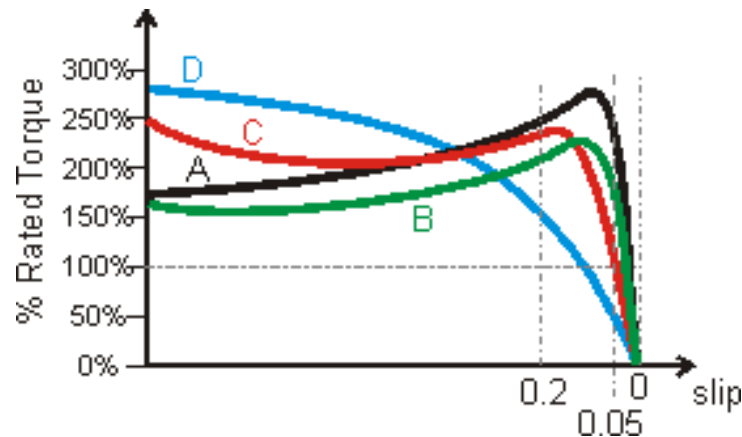
Fonte: (ALEIXO, 2014).

Diante da imensa variedade de características que as máquinas de indução podem apresentar, a organização estadunidense National Electrical Manufacturers Association (NEMA) especificou quatro classes de motores de indução com base nas suas curvas típicas de torque por velocidade e escorregamento, como mostrado na figura 3.8.

Para maior aproveitamento da energia que flui pelo motor, algumas outras variáveis precisam ser cuidadosamente analisadas, como: o tipo de enrolamento a ser utilizado, o fator de preenchimento dos slots, o comprimento médio e o passo das bobinas. Estas escolhas influenciam de forma significativa no grau de perdas, especialmente no estator da máquina (ALMEIDA, 2014).

Utilizar condutores mais grossos no estator contribui com a diminuição das perdas, por conta da menor resistência dos mesmos. Aumentar o comprimento de uma máquina faz com que ela solicite uma menor densidade de torque e, como consequência, um menor densidade de fluxo magnético. O ganho disto é uma redução das perdas no ferro (ALMEIDA, 2014).

Figura 3.8 – Curvas de torque por escorregamento de motores de indução de classes A – D, padronizados pela NEMA



Fonte: (KNIGHT, 2018).

3.5 Processo produtivo

Esta é uma das etapas que exigem maior precisão. Por exemplo, com relação ao gap dos motores de indução, um pequeno desvio em seu tamanho pode provocar consequências desastrosas para a máquina, como corrente de magnetização e tolerâncias mecânicas diferentes do previsto em projeto. Além disso, assimetrias na montagem aumentam os níveis de perdas por dispersão (ALMEIDA, 2014).

A forma como os componentes são processados também exerce influência considerável quanto ao bom ou ao mal aproveitamento de energia. Processos avançados de fundição dos materiais podem ser responsáveis por diminuir as perdas por dispersão e as técnicas utilizadas para cortar as placas de aço-silício podem diminuir as perdas no núcleo (ALMEIDA, 2014).

3.6 Sistemas de resfriamento

Os sistemas de resfriamento são essenciais para o bom funcionamento dos motores elétricos, especialmente devido aos efeitos inconvenientes de altas temperaturas sobre os isolantes das máquinas. Um aumento de 10 °C é suficiente para reduzir a vida útil destes materiais pela metade.

O desenvolvimento de isolantes mais resistentes ao calor abre margem para a aplicação de motores em ambientes cuja temperatura chega a 180 °C, como é mostrado na tabela 3.2. No entanto, esta capacidade de operação em altas temperaturas está relacionada à

integridade dos isolantes do motor, e não necessariamente com sua eficiência.

Tabela 3.2 – Composição dos limites de elevação de temperaturas (°C)

Classe de isolamento	A	E	B	F	H
Temperatura ambiente	40	40	40	40	40
Temperatura máxima de operação (Δt)	60	75	80	105	125
Diferença entre o ponto mais quente e a carcaça	5	5	10	10	15
Temperatura máxima suportada pelo isolamento	105	120	130	155	180

Fonte: (DAHER, 2018).

É fácil perceber que o sistema de refrigeração também depende do meio no qual o motor opera, já que o ar é normalmente realiza o papel de fluido refrigerante. A forma como o ar escoar por entre as regiões do motor é de significativa importância, apesar de que em muitos casos o arrefecimento não seja alvo de projetos mais elaborados.

De acordo com (ALMEIDA, 2014), é possível obter ganhos expressivos de eficiência reduzindo o atrito nos rolamentos do sistema de resfriamento, além de diminuir os níveis de ruído. Ainda conforme o autor supracitado, é possível obter um melhor gerenciamento térmico dos motores elétricos a partir da utilização de ventiladores acoplados ao eixo da máquina e com a elaboração de um bom projeto eletromagnético, otimizando o fluxo de potência no núcleo e diminuindo o aquecimento.

3.7 Ímãs permanentes

Com a utilização destes materiais, foi possível obter consideráveis aumentos de eficiência e de densidade de potência de motores elétricos. No entanto, máquinas que utilizam ímãs permanentes de alta performance, como o neodímio, são muito mais caras. A ferrite pode ser utilizada como alternativa, mas as máquinas ainda precisariam de otimização para alcançar o desempenho que teriam fazendo uso do neodímio (ALMEIDA, 2014).

Uma abordagem mais detalhada sobre este tipo de máquina é realizada no capítulo 6, no qual uma análise de motores disponíveis no mercado também é feita.

3.8 Sistemas de acionamentos

Estes sistemas foram desenvolvidos com o intuito de solucionar alguns problemas presentes na operação dos mais diversos tipos de motores. Na partida, a alta corrente e o baixo torque desenvolvido pelos motores de indução os tornavam inaptos para diversas aplicações.

Além disso, o sobreaquecimento e o desgaste dos isolantes da máquina também são problemas que foram parcialmente reduzidos pelas novas técnicas de acionamento.

O dispositivo que mais tem auxiliado na otimização do funcionamento de motores de indução é o inversor de frequência. Muitas máquinas, inclusive as de ímãs permanentes, são vendidas em conjunto com o inversor. Seu uso proporcionou o desenvolvimento, pelo motor, de maiores níveis de torque em qualquer ponto de operação e inclusive, o alcance de maiores níveis de eficiência.

Existem ainda outros sistemas de acionamento, como o soft starter e ligação estrela-triângulo, mas o aprofundamento neste tópico não é objetivo deste trabalho.

4 NORMAS DE PADRONIZAÇÃO DOS MOTORES DE INDUÇÃO

As necessidades dos clientes não foram a única motivação da padronização dos motores elétricos. Fabricantes diversos passaram a produzir estas máquinas com especificações bastante diferentes, sendo algumas maiores e pouco eficientes, outras com características totalmente opostas, apresentando-se como mais atrativas. A percepção da viabilidade de fabricar motores de uma dada potência utilizando menos material atraiu o empenho dos fabricantes, que diante da oportunidade de economizar com matéria-prima, de tornar a produção menos onerosa e de reduzir o consumo energético, não hesitaram em investir nisso.

Uma rápida verificação dos dados de placa de motores mais antigos, comprova que estas máquinas eram bem menos eficientes. No entanto, de acordo com Knight (2018, p.1), apesar do progresso resultante da padronização, estabelecer requisitos mínimos de eficiência e dimensões fixas para motores elétricos desestimula grande parte dos fabricantes a produzirem máquinas melhores. Isto porque este processo torna o produto mais caro e, conseqüentemente, o faz perder competitividade.

Por outro lado, após o estabelecimento de padronizações, os consumidores têm a garantia de que o produto adquirido apresenta as características que foram determinadas, independentemente do fabricante. Além disso, a comparação entre as máquinas foi facilitada. Um motor de uma dada potência certamente apresentará as mesmas dimensões, mas não necessariamente a mesma massa, o mesmo rendimento e o mesmo preço (adaptado de KINGHT, 2018).

Esta necessidade de normalização das máquinas elétricas rotativas foi iniciada em 1923, na Alemanha, com a norma DIN VDE – 2650, por meio da qual foram estabelecidos parâmetros para motores abertos trifásicos com rotor em curto-circuito de 0,12 a 100 kW. Esta norma contemplava rendimento, torque e corrente de partida e fator de potência, mas somente após a segunda guerra mundial foi iniciada a padronização dimensional, limitada ainda a apenas motores de quatro polos (SENS, 2001).

Em 1950, com o objetivo de aprimorar a standardização das máquinas elétricas girantes, foi criado o subcomitê da International Electrotechnical Commission (IEC). Seis anos depois a primeira edição da norma IEC-72 foi publicada para instruir aos países membros da comissão (SENS, 2001).

Como consequência desta necessidade de reduzir o consumo de energia e emissão de gases do efeito estufa, governos de diversos países no mundo estão estabelecendo requisitos mínimos de eficiência energética, também conhecidos como MEPS (Minimum Energy Performance Standards) para diversos tipos de equipamentos, inclusive motores elétricos (WEG, 2017).

No Brasil a padronização, não apenas das máquinas elétricas, é de responsabilidade da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Foi fundada em 1940 e desde então é membro da IEC, seguindo suas diretrizes. Possui comitês, organismos de normalização setorial e comissões de estudos especiais, os quais são responsáveis pela elaboração de todas as normas (DIAS, 2011).

Com relação aos padrões estabelecidos para os motores elétricos, as principais normas elaboradas pela ABNT estão relacionadas na tabela 4.1.

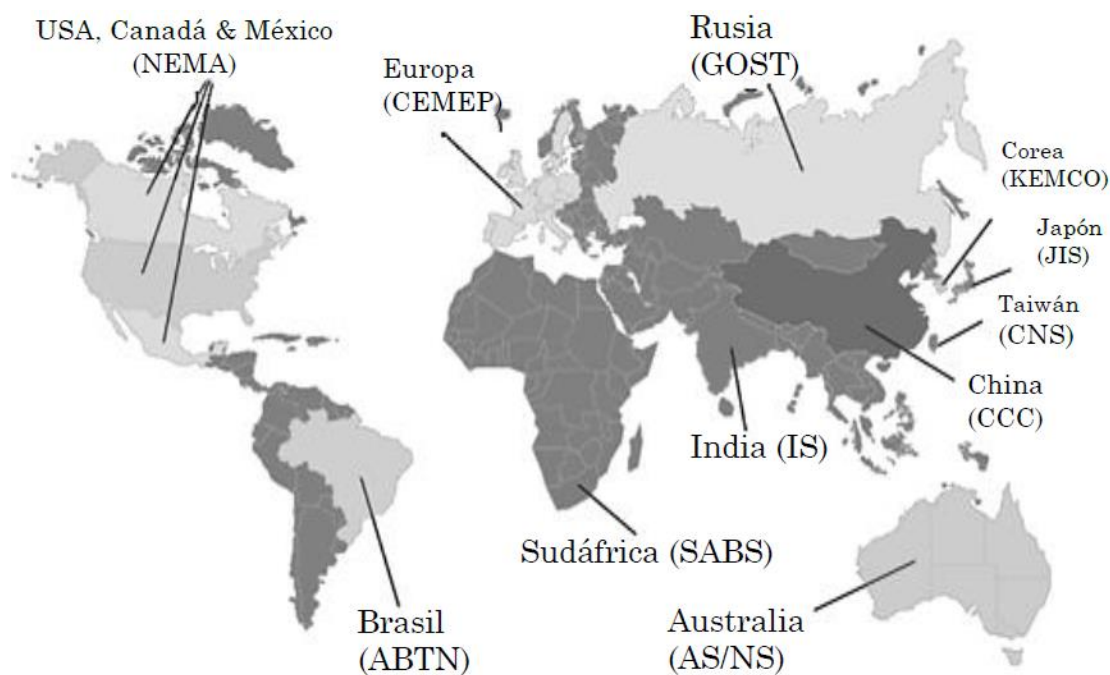
Tabela 4.1 – Relação das principais normas da ABNT referentes a máquinas elétricas

Norma	Descrição
ABNT NBR 17094-1:2018	Máquinas elétricas girantes – Parte 1: Motores de indução trifásicos – Requisitos.
ABNT NBR 17094-2:2016	Máquinas elétricas girantes – Parte 2: Motores de indução monofásicos – Requisitos.
ABNT NBR 17094-3:2018	Máquinas elétricas girantes – Parte 3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaio.
ABNT NBR IEC 60034-5:2009	Máquinas elétricas girantes – Parte 5: Graus de proteção proporcionados pelo projeto completo de máquinas elétricas girantes (Código IP) – Classificação.
ABNT NBR IEC 60034-6:2013	Máquinas elétricas girantes – Parte 6: Métodos de resfriamento (Código IC).
ABNT NBR IEC 60034-7:2013	Máquinas elétricas girantes – Parte 7: Classificação dos tipos de construção, arranjos de montagem e posição da caixa de terminais (Código IM).
ABNT NBR IEC 60034-9:2011	Máquinas elétricas girantes – Parte 9: Limites de ruído.
ABNT NBR 15623-1:2008	Máquina elétrica girante – Dimensões e séries de potências para máquinas elétricas girantes – Padronização parte 1: Designação de carcaças entre 56 a 400 e flanges entre 55 e 1080.
ABNT NBR IEC 60085:2017	Avaliação elétrica – Avaliação e designação térmicas.
ABNT NBR 5457:1980	Eletrotécnica e eletrônica – Máquinas girantes (Cancelada em 27/05/2013 e ainda sem substituição).

Fonte: O próprio autor.

Existem ainda diversas outras normas internacionais direcionadas à fabricação de motores elétricos, como a IEEE 112, a NEMA MG1-1 e a Diretiva Europeia 640. Na figura 4.1 são indicados alguns dos órgãos responsáveis pela standardização das máquinas elétricas rotativas ao redor do mundo.

Figura 4.1 – Indicação de alguns órgãos responsáveis pela normatização dos motores elétricos ao redor do mundo



Fonte: (PARRA, 2013).

Já na figura 4.2 é possível verificar quais países apresentam as legislações mais exigentes quanto ao rendimento dos motores elétricos. Nesta ilustração, o mínimo grau de eficiência a ser atendido aumenta conforme a cor escurece.

Os próximos itens deste capítulo apresentam uma abordagem qualitativa e quantitativa, de caráter não exaustivo, do rendimento exigido pelas principais normas brasileiras e internacionais.

Figura 4.2 – Níveis mínimos de eficiência de acordo com as regulamentações



Fonte: (WEG, 2017).

4.1 International Electrotechnical Commission (IEC)

As normas internacionais, publicadas por esta instituição, que fornecem classificações de eficiência de máquinas elétricas rotativas, são a IEC 60034-30:2014 e a IEC 60034-31:2010. Um dos objetivos principais é padronizar globalmente as classes de eficiência energética destes motores, fornecendo valores mínimos de rendimento a serem atingidos. Segundo afirma Parra (2013, p. 127), este trabalho tem sido realizado em conjunto com outras organizações internacionais, como: NEMA, IEEE, CEMEP, JEMA e outras.

Em conformidade com esta norma é necessário que o rendimento e a classe de eficiência do motor estejam gravados em sua placa de especificações. No caso de máquinas que operem em duas frequências, os níveis de aproveitamento de energia para cada condição de operação também devem ser indicados.

De acordo com Almeida (2011, p. 13), os motores contemplados por estas normas podem ser acionados por dispositivos que trabalham variando a velocidade da máquina. No entanto, o usuário deve ter ciência de que a indicação de rendimento dada pelo fabricante não será alcançada caso os motores operem com velocidade variável.

Estas normatizações não englobam motores totalmente interiores a máquinas (os quais não podem ser separados destas últimas), nem motores de propósitos específicos (como os que operam em ambientes com elevadas temperaturas) e nem mesmo aqueles que apresentam um grande número de paradas e partidas em sua operação normal.

A IEC 60034-30:2014 apresenta três classificações de motores de indução trifásicos com rotor em gaiola, tomando como referência os seus níveis de rendimento: IE1 (Standard efficiency); IE2 (High efficiency); IE3 (Premium efficiency). Estas classes de eficiência compreendem a maioria dos motores em utilização, cujas potências nominais estão entre 1 e 500 hp, ou seja, 0,75 e 375 kW. Além disso, engloba motores de dois, quatro e seis polos, com tensão nominal de até 1000 volts e que operem em 50 ou em 60 hertz.

Como destacado por Almeida (2011, p. 13), a primeira edição IEC 60034-31 (ainda vigente) apresenta uma quarta classificação, a IE4 (Super-premium efficiency). Esta última classe tem caráter apenas informativa, pois ainda não há mercado e tecnologia suficientes para sua fabricação.

A IEC 60034-30 alerta que os fabricantes de motores devem seguir as especificações da legislação dos locais para onde produzem, especialmente com relação às dimensões dos motores. Conforme é citado na própria norma, é possível que altos níveis de eficiência não possam ser alcançados em alguns mercados, justamente pela limitação dimensional das máquinas.

Ilustrativamente, na figura 4.3, é possível verificar os níveis mínimos de eficiência requeridos pelas normas IEC 60034-30:2014 e IEC 60034-31:2010 para cada um dos grupos. É importante destacar que estes valores são referentes a motores de indução trifásicos de quatro polos, que podem operar tanto em cinquenta quanto em sessenta hertz.

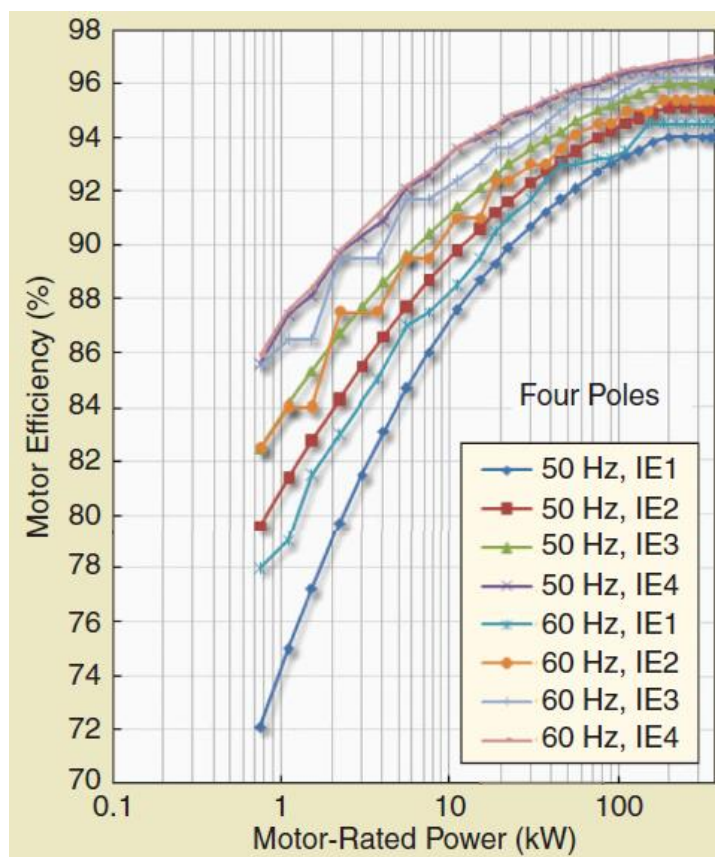
Na tabela 4.2 são mostrados os requisitos de rendimento obrigatórios em alguns países, seguindo a nomenclatura formulada pela IEC.

Tabela 4.2 – Categorias mínimas de eficiência de motores de indução trifásicos em alguns países, em 2011, de acordo com a designação proposta pela IEC

Categoria	Código IE	País
Super Premium Efficiency	IE4	-
Premium Efficiency	IE3	Canadá
		México
		Estados Unidos
High Efficiency	IE2	Brasil
		China
		Coréia do Sul
		Austrália
		Suíça
		Alguns países da Europa
Standard Efficiency	IE1	Israel
		Costa Rica
		Taiwan

Fonte: (BRUNNER, 2011).

Figura 4.3 – Níveis mínimos de eficiência exigidos pelas normas IEC 60034-30 e 31, para motores de indução trifásicos de quatro polos, que podem operar em 50 e em 60 Hz



Fonte: (ALMEIDA, 2011).

4.2 Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT)

Como já citado neste capítulo, a ABNT é membro da IEC e é a organização responsável pelas normatizações brasileiras. Em se tratando de motores de indução trifásicos, a NBR 17094-1:2018 é a norma vigente que estabelece requisitos para estas máquinas, especialmente construtivos e operacionais.

O documento supracitado esclarece que não se aplica a motores de indução utilizados em veículos de tração e que as máquinas abrangidas pela normalização podem estar sujeitas a outras normas brasileiras (NBR 17094-1, 2018).

Para motores de indução de gaiola, trifásicos, com capacidade de operação contínua em suas condições nominais sem que a elevação de temperatura ultrapasse a classe térmica especificada, uma rotação, categorias N, H, NY, HY e as categorias equivalentes A, B e C, com refrigeração a ar, acoplada ou solidária ao próprio eixo do motor elétrico, de potência nominal igual ou superior às indicadas (...) para operação em 60 Hz, tensão nominal igual ou inferior a 1000 V, qualquer forma construtiva, são estabelecidas duas linhas padronizadas no que se refere ao rendimento de plena carga (...). Para quaisquer outros motores de indução, não há valores de rendimento normalizados nem método de ensaio estabelecido, cabendo ao fabricante marcar o rendimento na placa de identificação e indicar o método de ensaio (NBR 17094-1, 2018, p. 49).

As duas classes de eficiência estabelecidas pela NBR 17094-1:2018 são IR2 ou alto rendimento e IR3 ou rendimento “*Premium*”. Ambas são equivalentes, respectivamente, às linhas IE2 e IE3 estabelecidas pela IEC.

4.2.1 Classe IR2 ou alto rendimento

A eficiência nominal dos motores que compõem esta linha foi estabelecida tendo uma relação direta com a potência e com a quantidade de polos da máquina. Deve estar gravada na placa de identificação do motor e diz respeito a condição de plena carga. O valor mínimo de rendimento encontrado através do ensaio não deve ser inferior ao nível estabelecido pela norma, acrescido ainda da tolerância, que é mostrada na tabela 4.4 (NBR 17094-1, 2018).

Em nota, na página 49, a norma em questão afirma que este grau de eficiência normalizado é resultado de uma média de valores encontrados para uma grande quantidade de motores do mesmo projeto e que deve ser expressa em porcentagem, utilizando três dígitos. Estes níveis de rendimento podem ser verificados na tabela 4.5. Vale ressaltar que os níveis de eficiência dos motores de indução devem atender às determinações da Portaria Interministerial Nº 553, de 08 de dezembro de 2005, da Lei de Eficiência Energética Nº 10.295. Estes valores

são disponibilizados na tabela 4.3 e são iguais aos da classe IR2 contidos na NBR 17094-1:2018, apesar de a abrangência não ser a mesma.

Tabela 4.3 – Rendimento mínimo estabelecido pela legislação brasileira para motores de indução trifásicos

Potência nominal		Número de polos			
kW	cv ou hp	2	4	6	8
		Rendimento nominal			
0,75	1,0	80,0	80,5	80,0	70,0
1,1	1,5	82,5	81,5	77,0	77,0
1,5	2,0	83,5	84,0	83,0	82,5
2,2	3,0	85,0	85,0	83,0	84,0
3,0	4,0	85,0	86,0	85,0	84,5
3,7	5,0	87,5	87,5	87,5	85,5
4,4	6,0	88,0	88,5	87,5	85,5
5,5	7,5	88,5	89,5	88,0	85,5
7,5	10,0	89,5	89,5	88,5	88,5
9,2	12,5	89,5	90,0	88,5	88,5
11,0	15,0	90,2	91,0	90,2	88,5
15,0	20,0	90,2	91,0	90,2	89,5
18,5	25,0	91,0	92,4	91,7	89,5
22,0	30,0	91,0	92,4	91,7	91,0
30,0	40,0	91,7	93,0	93,0	91,0
37,0	50,0	92,4	93,0	93,0	91,7
45,0	60,0	93,0	93,6	93,6	91,7
55,0	75,0	93,0	94,1	93,6	93,0
75,0	100	93,6	94,5	94,1	93,0
90,0	125	94,5	94,5	94,1	93,6
110	150	94,5	95,0	95,0	93,6
132	175	94,7	95,0	95,0	-
150	200	95,0	95,0	95,0	-
185	250	95,4	95,0	-	-

Fonte: (Portaria Interministerial Nº 553, 2005).

Tabela 4.4 – Tolerâncias para os motores contemplados pela NBR 17094-1:2018 (continua)

Item	Grandeza	Tolerância
1	Rendimento η^a $\eta \geq 0,851$ $\eta \leq 0,851$	+ sem limite - $0,2 \times (1 - \eta)$ - $0,15 \times (1 - \eta)$ Valores em p.u.
2	Fator de potência, $\cos \phi$	- $1/6 \times (1 - \cos \phi)$, sendo 0,02 o valor mínimo e 0,07 o valor máximo a ser utilizado. Exemplo: Sendo 0,92 o fator de potência declarado de um determinado motor: - $1/6 \times (1 - 0,92) = 0,013$. Neste caso o valor a ser adotado é 0,02. Então: $0,92 - 0,02 = 0,90$. 0,90 é o valor de fator de potência mínimo que o motor pode apresentar como resultado de ensaio.

3	Escorregamento (a plena carga e à temperatura de funcionamento) de: a) $P_n < 1 \text{ kW}$ b) $P_n > 1 \text{ kW}$	$\pm 30 \%$ do escorregamento garantido $\pm 20 \%$ do escorregamento garantido
4	Corrente com rotor bloqueado para motores de gaiola com rotor em curto-circuito e com qualquer equipamento de partida especificado: a) motores especificados pela categoria ou pelo correspondente valor máximo de potência aparente com rotor bloqueado (Ver Seção 8) b) motores não especificados conforme a) ^b	Nenhuma tolerância no limite superior, porém sem limite inferior $\pm 20 \%$ do valor garantido, porém sem limite inferior
5	Conjugado com rotor bloqueado para: a) motores especificados pela categoria ou pelo correspondente valor mínimo do conjugado (ver Seção 8) b) motores não especificados conforme a) ^b	Nenhuma tolerância no limite inferior - 15% do valor garantido. Não há limite superior, salvo acordo entre fabricante e comprador
6	Conjugado mínimo de partida para: a) motores especificados pela categoria ou pelo correspondente valor mínimo do conjugado (ver Seção 8) b) motores não especificados conforme a) ^b	Nenhuma tolerância no limite inferior - 15 % do valor garantido
7	Conjugado máximo para: a) motores especificados pela categoria ou pelo correspondente valor mínimo do conjugado (ver Seção 8) b) motores não especificados conforme a) ^b	Nenhuma tolerância no limite inferior - 10 % do valor garantido, desde que, aplicada esta tolerância, o conjugado permaneça igual ou superior a 1,6 vez ou 1,5 vez o conjugado nominal (ver Seção 13)
8	Momento de inércia	$\pm 10 \%$ do valor garantido
<p>^a A determinação do rendimento consta na ABNT NBR 17094-3.</p> <p>^b Quando for especificada a categoria e um valor garantido diferente do normalizado, a tolerância aplicada ao valor garantido não pode resultar em um valor inferior (caso dos conjugados) ou em um valor superior (caso da corrente com rotor bloqueado) ao normalizado para a categoria.</p>		

Fonte: (NBR 17094-1, 2018).

Tabela 4.5 – Menores valores de rendimento nominal a plena carga, para motores da classe IR2 ou alto rendimento

Potência nominal		Número de polos			
kW	cv	2	4	6	8
		Rendimento nominal			
0,12	0,16	59,5	64,0	50,5	40,0
0,18	0,25	64,0	68,0	55,0	46,0
0,25	0,33	68,0	70,0	59,5	52,0
0,37	0,50	72,0	72,0	64,0	58,0
0,55	0,75	74,0	75,5	68,0	62,0
0,75	1,0	80,0	80,5	80,0	70,0
1,1	1,5	82,5	81,5	77,0	77,0
1,5	2,0	83,5	84,0	83,0	82,5
2,2	3,0	85,0	85,0	83,0	84,0
3,0	4,0	85,0	86,0	85,0	84,5
3,7	5,0	87,5	87,5	87,5	85,5
4,4	6,0	88,0	88,5	87,5	85,5
5,5	7,5	88,5	89,5	88,0	85,5
7,5	10,0	89,5	89,5	88,5	88,5
9,2	12,5	89,5	90,0	88,5	88,5
11,0	15,0	90,2	91,0	90,2	88,5
15,0	20,0	90,2	91,0	90,2	89,5
18,5	25,0	91,0	92,4	91,7	89,5
22,0	30,0	91,0	92,4	91,7	91,0
30,0	40,0	91,7	93,0	93,0	91,0
37,0	50,0	92,4	93,0	93,0	91,7
45,0	60,0	93,0	93,6	93,6	91,7
55,0	75,0	93,0	94,1	93,6	93,0
75,0	100	93,6	94,5	94,1	93,0
90,0	125	94,5	94,5	94,1	93,6
110	150	94,5	95,0	95,0	93,6
132	175	94,7	95,0	95,0	94,5
150	200	95,0	95,0	95,0	94,5
185	250	95,4	95,0	95,0	95,0
220	300	94,5	95,5	95,0	95,0
260	350	95,0	95,5	95,4	95,0
300	400	-	95,5	95,4	-
330	450	-	95,8	95,4	-
370	500	-	95,8	-	-

NOTA As potências padronizadas em cv, equivalentes aos valores de potências em kW, estão indicadas no Anexo D.

Fonte: (NBR 17094-1, 2018).

4.2.2 Classe IR3 ou rendimento premium

Da mesma forma que na linha IR2, a eficiência nominal dos motores que fazem parte da classe IE3 foi estabelecida em função da potência e da quantidade de polos da máquina. O valor do rendimento continua sendo referente a condição de plena carga e também deve estar gravado na placa de identificação do motor. O valor mínimo de eficiência encontrado através do ensaio deve ser pelo menos igual ao nível estabelecido pela norma. Nesta linha também deve ser considerada a tolerância, que é mesma mostrada na tabela 4.4 (NBR 17094-1, 2018).

Ainda à semelhança da classe IR2, a norma em questão afirma em nota, na página 51, que o grau de eficiência normalizado é resultado de uma média de valores encontrados para uma grande quantidade de motores do mesmo projeto e que também deve ser expressa em porcentagem, utilizando três dígitos. Este níveis de rendimento determinados pela NBR 17094-1:2018 para a linha IR3 podem ser verificados na tabela 4.6.

No dia 29 de junho de 2017 a Portaria Interministerial N° 1, da Lei de Eficiência energética N° 10.295, determinou que os níveis mínimos de rendimento dos motores de indução trifásicos devem ser iguais aos da classe IR3, estabelecidos pela NBR 17094-1:2013 e que são exatamente iguais aos apresentados pela versão da mesma norma publicada em 2018. Esta mudança entrará em vigor em 2019 e, segundo o Ministério de Minas e Energia, “a previsão é que as metas de rendimento gerem uma economia acumulada de 11.213 GWh no período de 2019 a 2030, atingindo no ano de 2030, a economia de 1.830 GWh/ano...” (MME, 2017).

4.3 European Comitee of Manufacturers of Electrical Machines And Power Electronics (CEMEP)

Esta organização é integrada por países como Alemanha, França, Itália e Inglaterra, além de vários outros. Permite que a indústria direcione suas operações na Europa, tendo como alguns dos principais tópicos as evoluções do mercado, as regulações e as normatizações (CEMEP, 2018).

É composta por quatro grupos industriais, dentre os quais está o Industry Group Low Voltage Motors (IGLVM). O objetivo dele é garantir a competitividade no campo dos motores elétricos de baixa tensão na Europa. Também auxilia os fabricantes a manterem a atratividade de suas máquinas no mercado globalizado (CEMEP, 2018).

Tabela 4.6 – Menores valores de rendimento nominal a plena carga, para motores da classe IR3 ou rendimento “Premium”

Potência nominal		Número de polos			
kW	cv	2	4	6	8
		Rendimento nominal			
0,12	0,16	62,0	66,0	64,0	59,5
0,18	0,25	65,6	69,5	67,5	64,0
0,25	0,33	69,5	73,4	69,0	68,0
0,37	0,50	73,4	78,2	75,3	72,0
0,55	0,75	76,8	79,0	79,5	74,0
0,75	1,0	80,5	83,5 ^a	82,5	75,5
1,1	1,5	84,0	86,5 ^b	87,5 ^c	78,5
1,5	2,0	85,5	86,5	88,5 ^d	84,0
2,2	3,0	86,5	89,5 ^e	89,5 ^f	85,5
3,0	4,0	88,5	89,5	89,5	86,5
3,7	5,0	88,5	89,5	89,5	86,5
4,4	6,0	88,5	89,5	89,5	86,5
5,5	7,5	89,5	91,7 ^g	91,0	86,5
7,5	10,0	90,2 ^g	91,7	91,0	89,5
9,2	12,5	91,0	92,4	91,7	89,5
11,0	15,0	91,0	92,4	91,7	89,5
15,0	20,0	91,0	93,0	91,7	90,2
18,5	25,0	91,7	93,6	93,0	90,2
22,0	30,0	91,7	93,6	93,0	91,7
30,0	40,0	92,4	94,1	94,1	91,7
37,0	50,0	93,0	94,5	94,1	92,4
45,0	60,0	93,6	95,0	94,5	92,4
55,0	75,0	93,6	95,4	94,5	93,6
75,0	100	94,1	95,4	95,0	93,6
90,0	125	95,0	95,4	95,0	94,1
110	150	95,0	95,8	95,8	94,1
132	175	95,4	96,2	95,8	94,5
150	200	95,4	96,2	95,8	94,5
185	250	95,8	96,2	95,8	95,0
220	300	95,8	96,2	95,8	95,0
260	350	95,8	96,2	95,8	95,0
300	400	95,8	96,2	95,8	95,0
330	450	95,8	96,2	95,8	95,0
370	500	95,8	96,2	95,8	95,0

NOTA As potências padronizadas em cv, equivalentes aos valores de potências em kW, estão indicadas no Anexo D.

^a Para motores na carcaça 80, o valor mínimo de rendimento é 83,0 %.

^b Para motores na carcaça 80, o valor mínimo de rendimento é 84,0 %.

^c Para motores na carcaça 90, o valor mínimo de rendimento é 85,5 %.

^d Para motores na carcaça 100, o valor mínimo de rendimento é 86,5 %.

^e Para motores na carcaça 90, o valor mínimo de rendimento é 87,5 %.

^f Para motores na carcaça 100, o valor mínimo de rendimento é 87,0 %.

^g Para motores na carcaça 112, o valor mínimo de rendimento é 91,0 %.

Fonte: (NBR 17094-1, 2018).

Um acordo voluntário realizado entre alguns fabricantes de motores elétricos da Europa entrou em vigor em 1998, tendo como objetivo determinar requisitos mínimos de rendimento para estas máquinas. Foram estabelecidas três linhas de eficiência, abrangendo motores de 1,1 a 90 kW de potência, sendo de dois ou de quatro polos e que possuíssem frequência de operação como sendo cinquenta hertz. As classes de motores elétricos eram: EFF1 – motores de alto rendimento, EFF2 – motores com rendimento melhorado, e EFF3 – motores de baixo rendimento (SALVADOR, 2010).

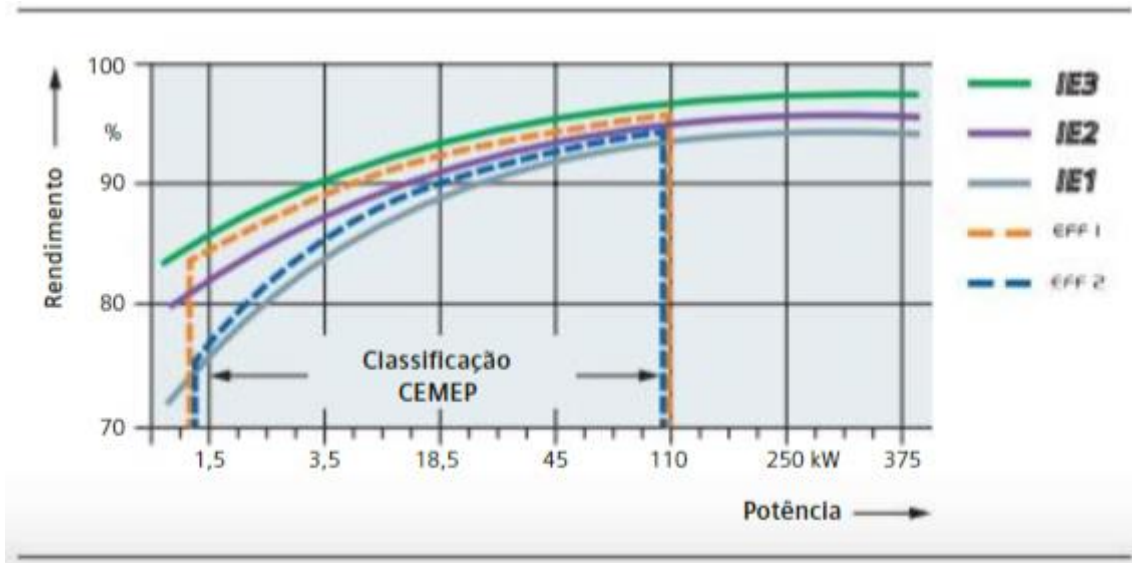
Com a publicação da primeira edição da norma IEC 60034-30 e como o objetivo de muitas organizações normativas era estabelecer uma nomenclatura mundial para os níveis de eficiência dos motores elétricos, as máquinas cujas classificações eram EFF1 e EFF2 passaram a ser IE2 e IE3, respectivamente (SALVADOR, 2010).

Apesar da suposta equivalência de valores mínimos de rendimento requisitados, é possível verificar na figura 4.4 que os níveis anteriormente exigidos pelo CEMEP são superiores àqueles determinados pela IEC. Conforme declara Salvador (2010, p. 75), isto se deve à mudança do método utilizado para determinar as perdas nos motores. O valor das perdas suplementares, por exemplo, deixou de ser considerado com 0,5 % (valor fixo) e passou a ser calculado indiretamente a partir de medições. Para evitar conflitos de informações, durante o período de mudança das normas, foi exigido que os fabricantes especificassem os dois valores de rendimento calculado para os motores.

Outra diferença entre estas duas standardizações, e que é bastante perceptível a partir da figura 4.4, é a abrangência. As classes IE compreendem uma quantidade muito maior de motores do que as classes EFF, envolvendo tanto máquinas de potência inferior a 1,1 kW quanto aquelas de potência superior a 90 kW (antigo intervalo compreendido pelas linhas EFF).

O acordo voluntário entre a União Europeia e a CEMEP compreendia motores de 2 e de 4 polos, cuja tensão nominal fosse de 400 V, enquanto que a norma IEC 60034-30 inclui ainda máquinas de 6 polos e das quais a tensão de alimentação é de até 1000 volts.

Figura 4.4 – Comparativo entre as classes de eficiência EFF e IE



Fonte: (SALVADOR, 2010).

4.4 National Electrical Manufacturers Association (NEMA)

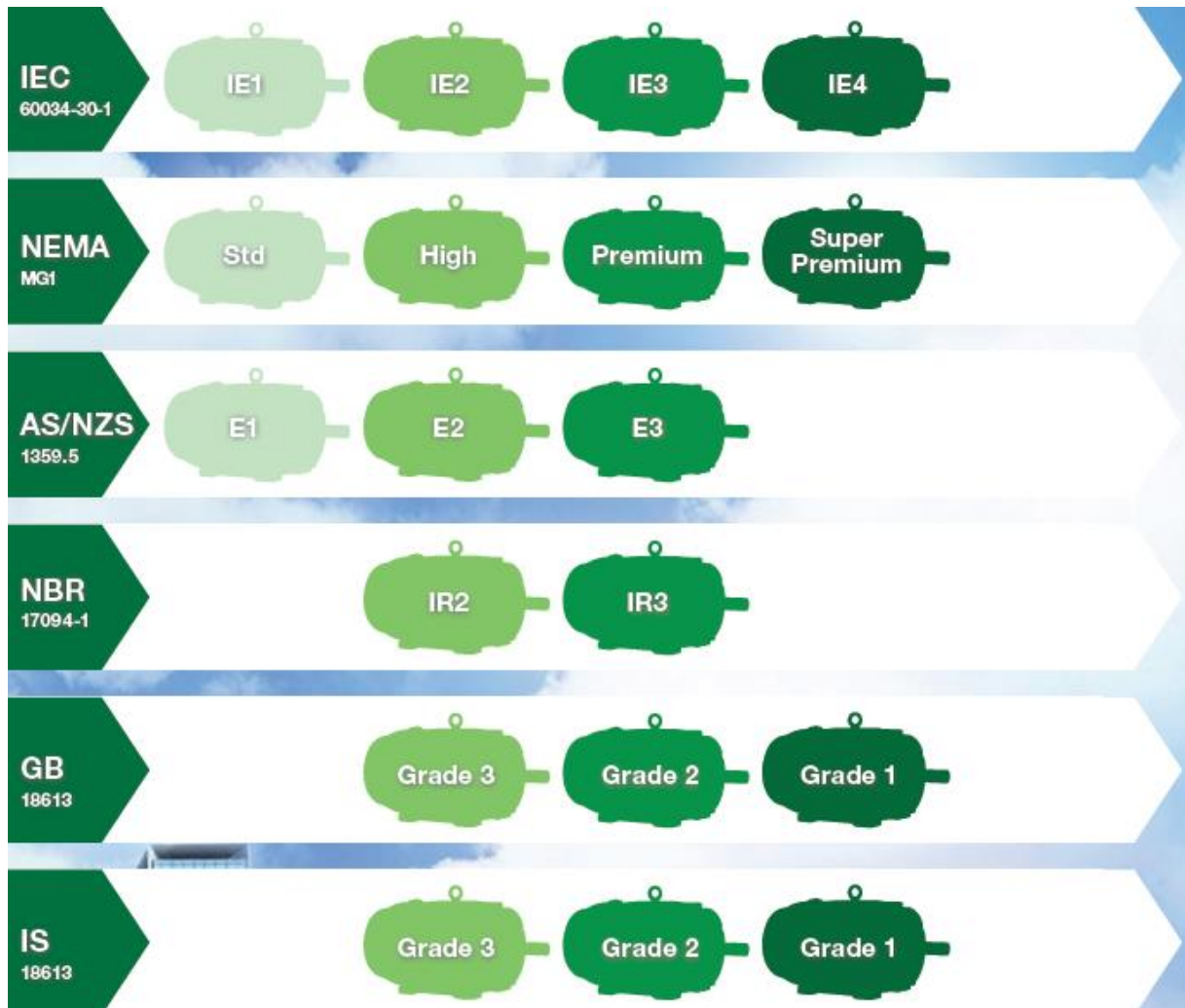
Esta é uma organização estadunidense responsável pela normatização de diversos produtos, como motores, geradores, máquinas de raio-x, baterias, luminárias e outros. Na visão desta associação, a elaboração de normas é indispensável para as etapas de projeto, de produção e até mesmo de distribuição de produtos que circulam tanto no mercado nacional quanto no internacional. Isto porque beneficia o fabricante, o usuário e a relação entre eles, eliminando conflitos de informação e garantido que determinado bem produzido é adequado para o fim desejado (NEMA, 2018).

Estados Unidos, Canadá e México adotam as diretivas estabelecidas pela norma MG-1, elaborada pela NEMA para padronizar, dentre outros parâmetros, o rendimento dos motores de indução. São estabelecidas quatro linhas de eficiência, as quais podem ser verificadas na figura 4.5, juntamente com as classes estabelecidas por outras organizações.

Com a Electric Horsepower Rule, uma determinação do U.S. Energy Policy Act, todos os motores de indução (de potência nominal entre um e duzentos HP's) deveriam atender aos níveis de eficiência energética da linha NEMA Standard, estabelecidos pela norma MG-1, elaborada pela própria NEMA. Por meio do Energy Independency and Security Act (EISA), ao final de 2010, o nível de eficiência da classe NEMA Premium passou a ser exigido para máquinas de indução do intervalo de potência supracitado. A partir de então, para os motores nesta faixa de potência que eram isentos e aqueles capazes de desenvolver entre duzentos e um

e 500 HP's, foi exigido o rendimento atendesse aos critérios da classe NEMA Standard (LEWOTSKY, 2016).

Figura 4.5 – Níveis de eficiência padronizados por algumas organizações ao redor do mundo



Fonte: (WEG, 2017).

Em 2014, através da Integral Horsepower Motor Amended Rule, foi determinado que todos os motores de indução entre um e quinhentos HP's de potência deveriam apresentar eficiência condizente com a linha NEMA Premium. Este foi o resultado de uma aliança, a Motor Coalition, firmada entre esta associação citada e um grupo de indústrias do setor, visando novas melhorias (LEWOTSKY, 2016).

Não foi possível ter acesso aos níveis de rendimento estabelecidos pela norma MG1 republicada 2016, mas foi possível verificar estes valores contidos na versão publicada realizada em 2009. A partir da análise do Summary of Changes made to MG 1-2016 revision/edition, documento disponibilizado pela NEMA, foi constatado que os valores de

eficiência das classes padronizadas por esta instituição não sofreram alterações.

Estas informações estão disponíveis nas tabelas 4.7 e 4.8 e vale ressaltar que a MG 1 apresenta valores de rendimento mínimo para motores de indução que operam em 50 e em 60 hertz. No entanto, todas as informações contidas nas tabelas supracitadas são referentes à frequência utilizada no sistema elétrico brasileiro, ou seja, 60 hertz.

Diferentemente da NBR 17094-1, a MG 1 apresenta normalização de classes de eficiência equivalentes as linhas IE1 e IE4, da IEC. Isto, além de abranger uma maior quantidade de motores, facilita análise e comparações de máquinas provenientes de mercados não embasados nas normas da NEMA.

Para encontrar os níveis mínimos de eficiência estabelecidos pela MG 1 para as linhas High, Premium e Super Premium, o leitor deve consultar a norma.

Tabela 4.7 – Eficiência normalizada para motores de indução abertos enquadrados na linha NEMA Standard, na condição de plena carga

MOTORES ABERTOS								
Hp	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS		8 POLOS	
	Eficiência Nominal	Eficiência Mínima	Eficiência Nominal	Eficiência Mínima	Eficiência Nominal	Eficiência Mínima	Eficiência Nominal	Eficiência Mínima
1	-	-	82,5	80,0	80,0	77,0	74,0	70,0
1,5	82,5	80,0	84,0	81,5	84,0	81,5	75,5	72,0
2	84,0	81,5	84,0	81,5	85,5	82,5	85,5	82,5
3	84,0	81,5	86,5	84,0	86,5	84,0	86,5	84,0
5	85,5	82,5	87,5	85,5	87,5	85,5	87,5	85,5
7,5	87,5	85,5	88,5	86,5	88,5	86,5	88,5	86,5
10	88,5	86,5	89,5	87,5	90,2	88,5	89,5	87,5
15	89,5	87,5	91,0	89,5	90,2	88,5	89,5	87,5
20	90,2	88,5	91,0	89,5	91,0	89,5	90,2	88,5
25	91,0	89,5	91,7	90,2	91,7	90,2	90,2	88,5
30	91,0	89,5	92,4	91,0	92,4	91,0	91,0	89,5
40	91,7	90,2	93,0	91,7	93,0	91,7	91,0	89,5
50	92,4	91,0	93,0	91,7	93,0	91,7	91,7	90,2
60	93,0	91,7	93,6	92,4	93,6	92,4	92,4	91,0
75	93,0	91,7	94,1	93,0	93,6	92,4	93,6	92,4
100	93,0	91,7	94,1	93,0	94,1	93,0	93,6	92,4
125	93,6	92,4	94,5	93,6	94,1	93,0	93,6	92,4
150	93,6	92,4	95,0	94,1	94,5	93,6	93,6	92,4
200	94,5	93,6	95,0	94,1	94,5	93,6	93,6	92,4
250	94,5	93,6	95,4	94,5	95,4	94,5	94,5	93,6
300	95,0	94,1	95,4	94,5	95,4	94,5	-	-
350	95,0	94,1	95,4	94,5	95,4	94,5	-	-
400	95,4	94,5	95,4	94,5	-	-	-	-
450	95,8	95,0	95,8	95,0	-	-	-	-
500	95,8	95,0	95,8	95,0	-	-	-	-

Fonte: (MG 1, 2009).

Tabela 4.8 – Eficiência normalizada para motores de indução fechados enquadrados na linha NEMA Standard, na condição de plena carga

MOTORES FECHADOS								
Hp	2 POLOS		4 POLOS		6 POLOS		8 POLOS	
	Eficiência Nominal	Eficiência Mínima	Eficiência Nominal	Eficiência Mínima	Eficiência Nominal	Eficiência Mínima	Eficiência Nominal	Eficiência Mínima
1	75,5	72,0	82,5	80,0	80,0	77,0	74,0	70,0
1,5	82,5	80,0	84,0	81,5	85,5	82,5	77,0	74,0
2	84,0	81,5	84,0	81,5	86,5	84,0	82,5	80,0
3	85,5	82,5	87,5	85,5	87,5	85,5	84,0	81,5
5	87,5	85,5	87,5	85,5	87,5	85,5	85,5	82,5
7,5	88,5	86,5	89,5	87,5	89,5	87,5	85,5	82,5
10	89,5	87,5	89,5	87,5	89,5	87,5	88,5	86,5
15	90,2	88,5	91,0	89,5	90,2	88,5	88,5	86,5
20	90,2	88,5	91,0	89,5	90,2	88,5	89,5	87,5
25	91,0	89,5	92,4	91,0	91,7	90,2	89,5	87,5
30	91,0	89,5	92,4	91,0	91,7	90,2	91,0	89,5
40	91,7	90,2	93,0	91,7	93,0	91,7	91,0	89,5
50	92,4	91,0	93,0	91,7	93,0	91,7	91,7	90,2
60	93,0	91,7	93,6	92,4	93,6	92,4	91,7	90,2
75	93,0	91,7	94,1	93,0	93,6	92,4	93,0	91,7
100	93,6	92,4	94,5	93,6	94,1	93,0	93,0	91,7
125	94,5	93,6	94,5	93,6	94,1	93,0	93,6	92,4
150	94,5	93,6	95,0	94,1	95,0	94,1	93,6	92,4
200	95,0	94,1	95,0	94,1	95,0	94,1	94,1	93,0
250	95,4	94,5	95,0	94,1	95,0	94,1	94,5	93,6
300	95,4	94,5	95,4	94,5	95,0	94,1	-	-
350	95,4	94,5	95,4	94,5	95,0	94,1	-	-
400	95,4	94,5	95,4	94,5	-	-	-	-
450	95,4	94,5	95,4	94,5	-	-	-	-
500	95,4	94,5	95,8	95,0	-	-	-	-

Fonte: (MG 1, 2009).

5 ANÁLISE DE LINHAS COMERCIAIS

Neste capítulo foram analisadas algumas linhas comerciais de motores de indução fornecidas por quatro grandes fabricantes. A ideia central é verificar o rendimento nominal das máquinas oferecidas, comparando com os valores mínimos estabelecidos pela legislação brasileira e que são orientados pelas classes propostas pela IEC. Vale ressaltar que nesta verificação foram considerados os intervalos de tolerância definidos pela NBR 17094-1:2018 e que são mostrados na tabela 5.1, para assim constatar se a classificação da máquina em termos de eficiência está correta.

Tabela 5.1 – Níveis mínimos de eficiência exigidos pela legislação brasileira, considerando as tolerâncias

Potência nominal		Número de polos							
kW	cv ou hp	2		4		6		8	
		Nominal	Com tolerância	Nominal	Com tolerância	Nominal	Com tolerância	Nominal	Com tolerância
0,75	1,0	80	77,0	80,5	77,6	80	77,0	70	65,5
1,1	1,5	82,5	79,9	81,5	78,7	77	73,6	77	73,6
1,5	2,0	83,5	81,0	84	81,6	83	80,5	82,5	79,9
2,2	3,0	85	82,8	85	82,8	83	80,5	84	81,6
3,0	4,0	85	82,8	86	83,2	85	82,8	84,5	82,2
3,7	5,0	87,5	85,0	87,5	85,0	87,5	85,0	85,5	82,6
4,4	6,0	88	85,6	88,5	86,2	87,5	85,0	85,5	82,6
5,5	7,5	88,5	86,2	89,5	87,4	88	85,6	85,5	82,6
7,5	10,0	89,5	87,4	89,5	87,4	88,5	86,2	88,5	86,2
9,2	12,5	89,5	87,4	90	88,0	88,5	86,2	88,5	86,2
11,0	15,0	90,2	88,2	91	89,2	90,2	88,2	88,5	86,2
15,0	20,0	90,2	88,2	91	89,2	90,2	88,2	89,5	87,4
18,5	25,0	91	89,2	92,4	90,9	91,7	90,0	89,5	87,4
22,0	30,0	91	89,2	92,4	90,9	91,7	90,0	91	89,2
30,0	40,0	91,7	90,0	93	91,6	93	91,6	91	89,2
37,0	50,0	92,4	90,9	93	91,6	93	91,6	91,7	90,0
45,0	60,0	93	91,6	93,6	92,3	93,6	92,3	91,7	90,0
55,0	75,0	93	91,6	94,1	92,9	93,6	92,3	93	91,6
75,0	100	93,6	92,3	94,5	93,4	94,1	92,9	93	91,6
90,0	125	94,5	93,4	94,5	93,4	94,1	92,9	93,6	92,3
110	150	94,5	93,4	95	94,0	95	94,0	93,6	92,3
132	175	94,7	93,6	95	94,0	95	94,0	-	-
150	200	95	94,0	95	94,0	95	94,0	-	-
185	250	95,4	94,5	95	94,0	-	-	-	-

Fonte: O próprio autor.

Esta investigação servirá como indício de quais fabricantes conseguem otimizar seus projetos de máquinas, de modo que os motores de indução fornecidos apresentem rendimento que exceda os níveis exigidos pela normalização. Neste caso, pode-se entender uma pretensão destas empresas de também ganhar competitividade no mercado internacional.

Este não será um estudo envolvendo motores já em operação nas suas respectivas aplicações, mas um diagnóstico a partir dos catálogos disponibilizados pelas companhias. Também não serão discutidas outras problemáticas, como classe de isolamento, dimensões e fator de potência.

Como a NBR 17094-1:2018 estabelece apenas valores mínimos de rendimento para as classes IR2 e IR3, apenas estas duas linhas serão comparadas com aquelas equivalentes apresentadas nos catálogos analisados. Vale ressaltar que, no caso de o fabricante oferecer apenas motores de uma destas classes, somente esta será parte da análise.

A comparação seguirá um padrão para todas máquinas de indução estudadas neste capítulo. Os números em negrito evidenciam que a eficiência do motor excede ao valor normalizado e os números vermelhos destacam que o rendimento da máquina é inferior ao valor tolerado, apresentado na tabela 5.1.

5.1 WEG

A WEG é uma empresa brasileira que fabrica diversos componentes do setor elétrico, como motores, geradores, painéis, inversores de frequência e muitos outros. Sua visão é se tornar uma referência mundial em máquinas elétricas, sempre fornecendo produtos eficientes em sua ampla linha de atuação. Seus principais valores são companhia humana, flexibilidade, eficiência, trabalho em equipe, liderança e inovação (WEG, 2018).

No que se refere aos motores de indução oferecidos, podem ser destacados os motores da linha W22, a qual está disponível em três versões: IR2, IR3 Premium e IR4 Super Premium. De acordo com a própria WEG, em seu catálogo dos motores W22, os mesmos foram desenvolvidos para superar os níveis de rendimento especificados na norma ABNT NBR 17094 e para atender a Portaria Nº 553 da Lei de Eficiência Energética Nº 10.295.

Além disso, os motores da linha IR4 Super Premium apresentam valores de rendimento que atendem às exigências da classe IE4. Nas tabelas 5.2 e 5.3 é possível verificar todas estas informações referentes aos motores de indução IR2 e IR3 Premium da linha W22.

Tabela 5.2 – Comparativo dos níveis de eficiência estabelecidos para a classe IR2 e apresentados pelos motores IR2 da linha W22 em 2018

Potência nominal		Número de polos							
kW	cv	2		4		6		8	
		NBR 17094	WEG	NBR 17094	WEG	NBR 17094	WEG	NBR 17094	WEG
0,12	0,16	59,5	61,0	64,0	64,0	50,5	50,5	40,0	51,0
0,18	0,25	64,0	65,0	68,0	68,0	55,0	55,0	46,0	56,0
0,25	0,33	68,0	68,0	70,0	70,0	59,5	59,5	52,0	59,0
0,37	0,50	72,0	72,0	72,0	72,0	64,0	64,0	58,0	65,0
0,55	0,75	74,0	74,0	75,5	75,5	68,0	68,0	62,0	66,0
0,75	1,0	80,0	80,5	80,5	80,5	80,0	80,5	70,0	70,0
1,1	1,5	82,5	82,6	81,5	81,6	77,0	77,0	77,0	78,0
1,5	2,0	83,5	83,7	84,0	84,2	83,0	83,9	82,5	83,5
2,2	3,0	85,0	85,5	85,0	85,1	83,0	83,9	84,0	84,5
3,0	4,0	85,0	87,5	86,0	86,5	85,0	86,5	84,5	85,1
3,7	5,0	87,5	87,6	87,5	88,0	87,5	87,7	85,5	85,6
4,4	6,0	88,0	88,5	88,5	88,5	87,5	88,0	85,5	87,0
5,5	7,5	88,5	88,7	89,5	90,0	88,0	88,5	85,5	87,5
7,5	10,0	89,5	89,6	89,5	91,0	88,5	88,5	88,5	89,5
9,2	12,5	89,5	90,2	90,0	91,0	88,5	89,5	88,5	90,0
11,0	15,0	90,2	90,5	91,0	91,7	90,2	91,0	88,5	90,4
15,0	20,0	90,2	90,8	91,0	92,4	90,2	91,3	89,5	90,5
18,5	25,0	91,0	91,5	92,4	92,8	91,7	92,4	89,5	91,0
22,0	30,0	91,0	91,5	92,4	93,0	91,7	93,0	91,0	91,7
30,0	40,0	91,7	92,4	93,0	93,4	93,0	93,4	91,0	92,2
37,0	50,0	92,4	93,0	93,0	93,6	93,0	93,6	91,7	92,6
45,0	60,0	93,0	93,5	93,6	94,1	93,6	93,8	91,7	92,6
55,0	75,0	93,0	93,8	94,1	94,4	93,6	94,1	93,0	93,5
75,0	100	93,6	94,3	94,5	94,6	94,1	94,4	93,0	93,7
90,0	125	94,5	94,6	94,5	94,9	94,1	94,7	93,6	94,2
110	150	94,5	94,8	95,0	95,2	95,0	95,1	93,6	94,5
132	175	94,7	95,0	95,0	95,3	95,0	95,3	94,5	95,0
150	200	95,0	95,2	95,0	95,5	95,0	95,4	94,5	95,2
185	250	95,4	95,6	95,0	95,7	95,0	95,5	95,0	95,3
220	300	94,5	95,8	95,5	95,9	95,0	95,6	95,0	95,5
260	350	95,0	95,9	95,5	96,0	95,4	95,7	95,0	95,5
300	400	-	95,9	95,5	96,1	95,4	95,9	-	95,5
330	450	-	96,00	95,8	96,2	95,4	96,0	-	95,8
370	500	-	96,2	95,8	96,3	-	96,0	-	-

Fonte: O próprio autor.

Da tabela 5.2 é possível concluir que os motores IR2 da WEG que foram listados atendem completamente as exigências da legislação brasileira (Portaria Interministerial N° 553, 08 de dezembro de 2005), que estará em vigor até junho de 2019. As figura 5.1 a 5.4 ilustram este fato.

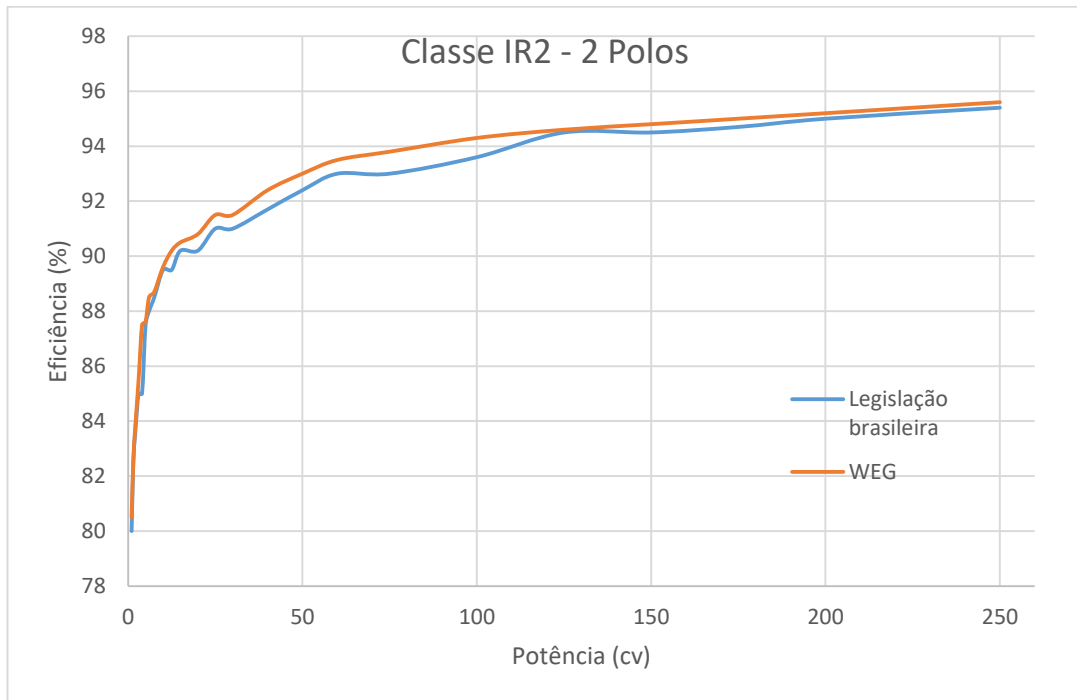
Tabela 5.3 – Comparativo dos níveis de eficiência estabelecidos para a classe IR3 e apresentados pelos motores IR3 Premium da linha W22 em 2018

Potência nominal		Número de polos							
kW	cv	2		4		6		8	
		NBR 17094	WEG	NBR 17094	WEG	NBR 17094	WEG	NBR 17094	WEG
0,12	0,16	62,0	62,0	66,0	66,0	64,0	52,0	59,5	59,5
0,18	0,25	65,6	66,0	69,5	70,0	67,5	58,0	64,0	64,0
0,25	0,33	69,5	70,0	73,4	73,4	69,0	69,0	68,0	68,0
0,37	0,50	73,4	73,4	78,2	78,2	75,3	75,3	72,0	72,0
0,55	0,75	76,8	76,8	79,0	79,0	79,5	72,5	74,0	74,0
0,75	1,0	80,5	82,5	83,5	83,0	82,5	82,5	75,5	75,5
1,1	1,5	84,0	84,6	86,5	83,0	87,5	87,5	78,5	81,6
1,5	2,0	85,5	85,7	86,5	86,5	88,5	86,5	84,0	84,5
2,2	3,0	86,5	86,5	89,5	87,5	89,5	87,0	85,5	86,5
3,0	4,0	88,5	88,5	89,5	89,5	89,5	89,5	86,5	86,6
3,7	5,0	88,5	88,6	89,5	89,5	89,5	89,5	86,5	86,7
4,4	6,0	88,5	89,4	89,5	89,5	89,5	89,5	86,5	88,5
5,5	7,5	89,5	89,7	91,7	91,0	91,0	91,0	86,5	88,4
7,5	10,0	90,2	90,6	91,7	92,0	91,0	91,0	89,5	90,6
9,2	12,5	91,0	91,2	92,4	92,4	91,7	91,7	89,5	91,0
11,0	15,0	91,0	91,5	92,4	92,4	91,7	91,8	89,5	91,3
15,0	20,0	91,0	92,2	93,0	93,4	91,7	92,2	90,2	91,6
18,5	25,0	91,7	92,8	93,6	93,8	93,0	93,1	90,2	92,1
22,0	30,0	91,7	92,8	93,6	94,0	93,0	93,6	91,7	92,4
30,0	40,0	92,4	93,4	94,1	94,4	94,1	94,1	91,7	93,5
37,0	50,0	93,0	94,0	94,5	94,6	94,1	94,2	92,4	93,6
45,0	60,0	93,6	94,0	95,0	95,1	94,5	94,5	92,4	93,6
55,0	75,0	93,6	94,2	95,4	95,4	94,5	94,7	93,6	94,3
75,0	100	94,1	95,0	95,4	95,5	95,0	95,0	93,6	94,5
90,0	125	95,0	95,3	95,4	95,6	95,0	95,3	94,1	94,9
110	150	95,0	95,5	95,8	95,8	95,8	95,8	94,1	95,0
132	175	95,4	95,6	96,2	96,2	95,8	95,8	94,5	95,4
150	200	95,4	95,8	96,2	96,2	95,8	95,9	94,5	95,6
185	250	95,8	96,1	96,2	96,3	95,8	96,0	95,0	95,7
220	300	95,8	96,3	96,2	96,4	95,8	96,1	95,0	95,9
260	350	95,8	96,4	96,2	96,5	95,8	96,2	95,0	95,9
300	400	95,8	96,4	96,2	96,6	95,8	96,4	95,0	-
330	450	95,8	96,0	96,2	96,7	95,8	-	95,0	-
370	500	95,8	-	96,2	96,7	95,8	-	95,0	-

Fonte: O próprio autor.

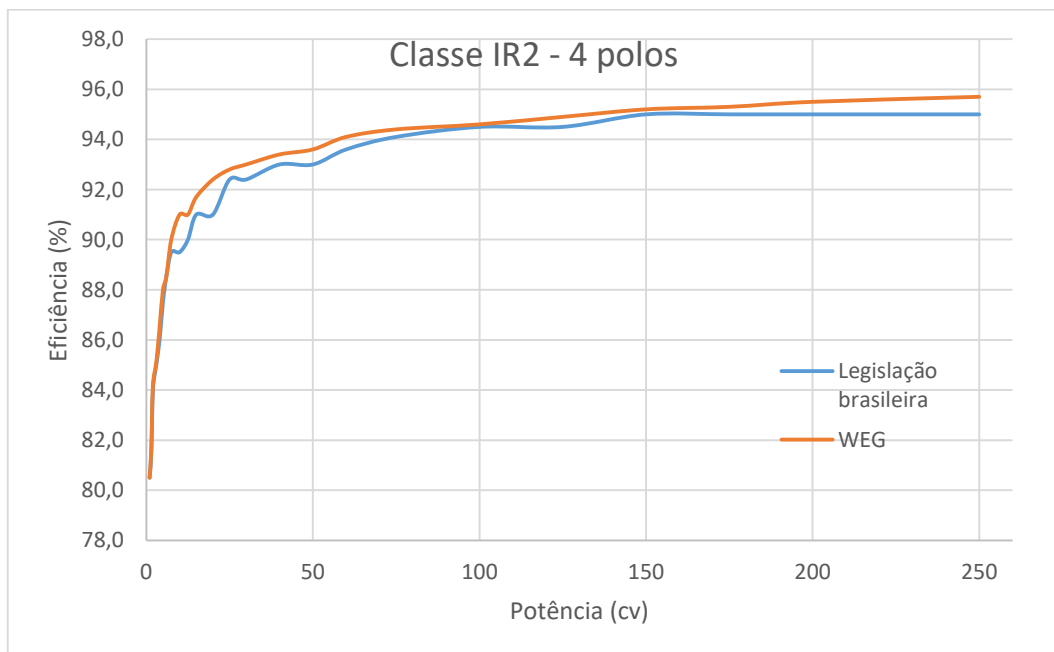
Os números vermelhos na tabela 5.3 mostram que o nível de eficiência da classe IR3 Premium não foi atingido para as máquinas em questão, ainda que considerada a tolerância concedida pela NBR 17094-1:2018. Conforme já explicitado no capítulo anterior, a partir do segundo semestre de 2019, por meio da Portaria Interministerial N° 1 de 29 de junho de 2017, os rendimentos mínimos dos motores de indução trifásicos determinados pela legislação brasileira serão iguais aos da linha IR3 da NBR 17094-1:2018. Desta forma, caso não haja um trabalho de otimização das máquinas de indução destacadas, estes produtos da WEG apresentarão não conformidades.

Figura 5.1 – Níveis de eficiência dos motores de indução de 2 polos da WEG – classe IR2



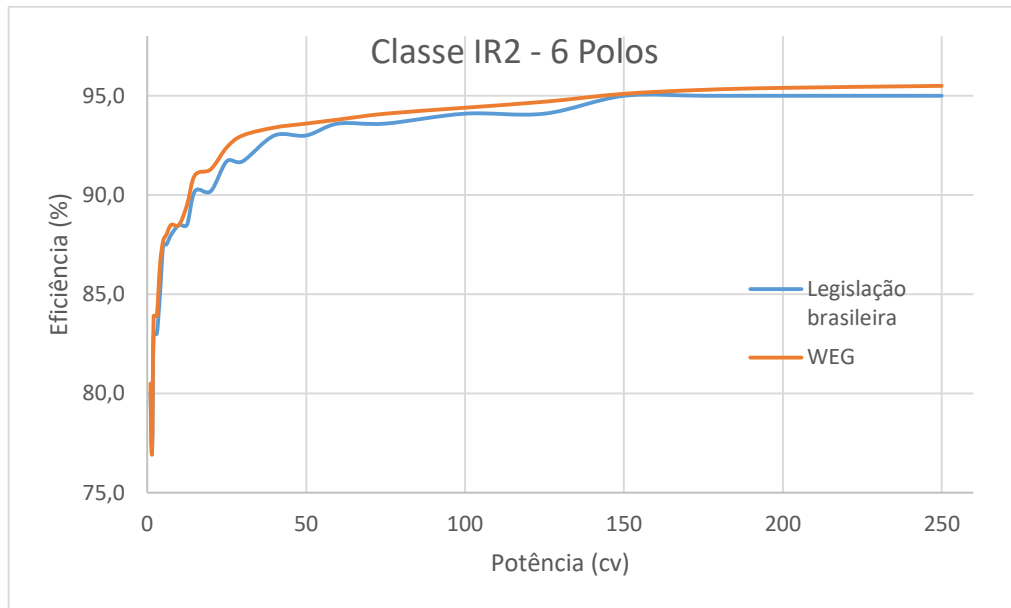
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.2 – Níveis de eficiência dos motores de indução de 4 polos da WEG – classe IR2



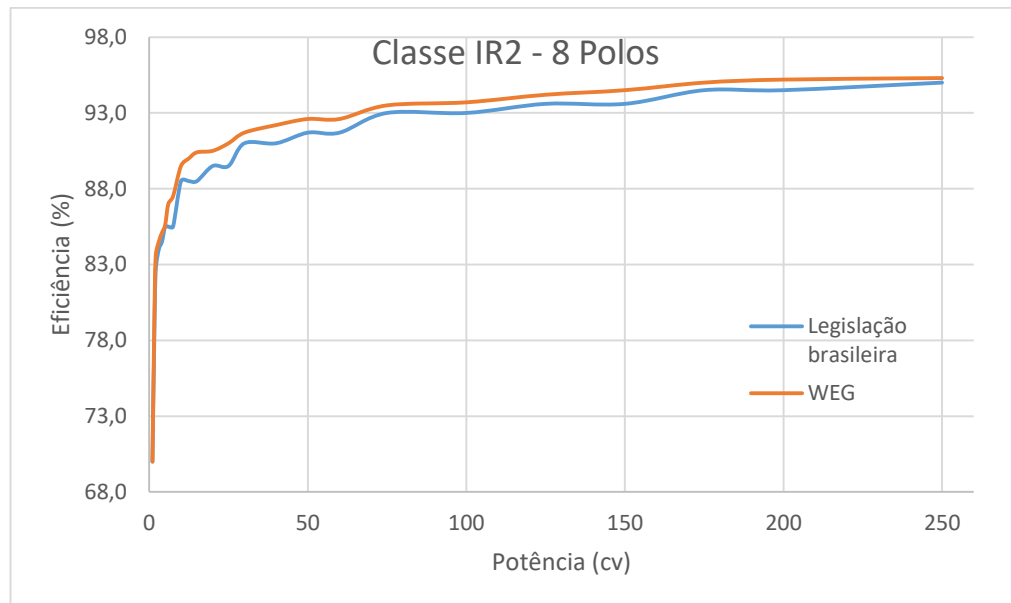
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.3 – Níveis de eficiência dos motores de indução de 6 polos da WEG – classe IR2



Fonte: O próprio autor.

Figura 5.4 – Níveis de eficiência dos motores de indução de 8 polos da WEG – classe IR2



Fonte: O próprio autor.

Além das quatro classes de eficiência mencionadas, a WEG possui uma linha superior: a IR5 Ultra Premium, que não é apresentada em nenhuma norma (seja nacional ou internacional), mas que é uma terminologia da própria fabricante para uma classe de motores síncronos de ímãs permanentes que apresenta menores perdas que a linha IR4 Super Premium.

5.2 Siemens

Esta é uma empresa de origem alemã e que se instalou no Brasil em 1905. Hoje está presente em quase todos os países do mundo, investindo com ênfase nas áreas de eletrificação, automação e digitalização. Atualmente a empresa se denomina como a maior companhia de tecnologia integrada do Brasil, sempre destacando a importância das pessoas e tendo como valores centrais a responsabilidade, a excelência e a inovação (Sobre a Siemens no Brasil, 2018).

Entre os produtos oferecidos pela Siemens que se tornaram mais populares no Brasil estão os disjuntores, os relés e os aerogeradores. Sobre a sua oferta de motores de indução trifásicos no mercado brasileiro, apenas a classe IR2 é disponibilizada, já que esta é a classificação exigida no país. Assim como realizado no item 5.1, os níveis de rendimento dos motores de indução Siemens foram comparados com os valores mínimos determinados no Brasil e os resultados podem ser verificados na tabela 5.4.

É possível concluir, a partir dos dados da tabela 5.4, que os motores de indução de baixas potências oferecidos pela Siemens conseguem exceder de forma considerável a legislação brasileira no quesito eficiência, sendo que esta ultrapassagem chega a 15,5 %. É importante salientar que as tecnologias utilizadas pela empresa não são o foco deste trabalho, mas este fato pode servir de motivação para análises futuras.

Aplicando as tolerâncias da NBR 17094-1:2018, percebe-se ainda que apenas um motor permanece sem atender aos requisitos da norma (em vermelho na tabela 5.4). No entanto, a atual legislação brasileira regula o rendimento de motores cuja potência está entre 1 e 250 cv. Logo, a máquina em questão (0,75 cv) está isenta de não conformidade.

Vale lembrar que em 2019 a eficiência exigida no Brasil será a da classe IR3, incluindo máquinas de potência entre 0,16 e 500 cv. Neste caso, espera-se que até lá a Siemens apresente uma nova linha de máquinas de indução de baixa tensão que atenda aos novos requisitos.

As figuras 5.5 a 5.8 ilustram o desempenho de alguns dos motores analisados neste item em comparação com a classe IR2 estandardizada pela NBR 17094-1:2018. É importante destacar que nos valores de rendimento propostos pela norma já estão sendo consideradas as tolerâncias. Por esta razão os valores de eficiência são menores que aqueles mostrados na tabela 4.5. Foram consideradas apenas as máquinas de potências 0,16, 0,25, 0,33, 0,50 e 0,75 cv, pois neste intervalo a Siemens supera de forma considerável o rendimento padronizado.

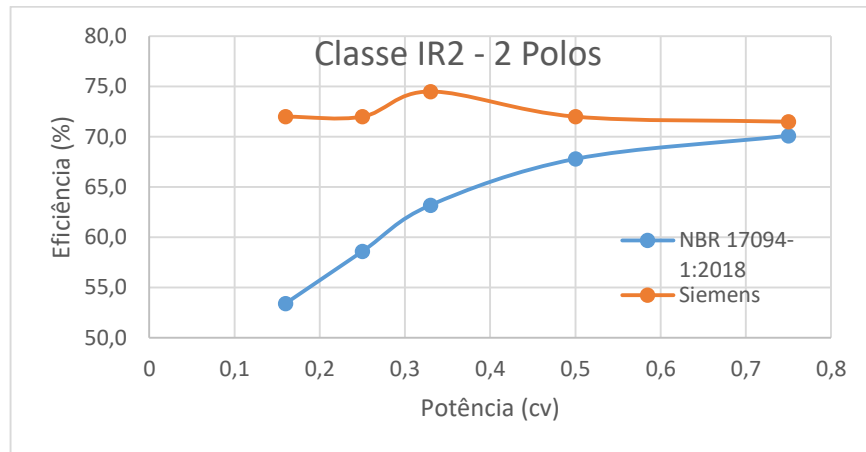
Tabela 5.4 – Comparativo dos níveis de eficiência apresentados pelos motores IR2 da Siemens e estabelecidos para a classe IR2, no Brasil, em 2018

Potência nominal		Número de polos							
kW	cv	2		4		6		8	
		NBR 17094	SIEM ENS	NBR 17094	SIEM ENS	NBR 17094	SIEM ENS	NBR 17094	SIEM ENS
0,12	0,16	59,5	72,0	64,0	66,0	50,5	52,0	40,0	55,5
0,18	0,25	64,0	72,0	68,0	66,0	55,0	60,5	46,0	55,0
0,25	0,33	68,0	74,5	70,0	66,0	59,5	65,0	52,0	58,0
0,37	0,50	72,0	72,0	72,0	68,0	64,0	67,0	58,0	67,0
0,55	0,75	74,0	71,5	75,5	67,5	68,0	72,5	62,0	71,5
0,75	1,0	80,0	80,0	80,5	80,5	80,0	80,0	70,0	70,0
1,1	1,5	82,5	82,5	81,5	81,5	77,0	77,0	77,0	77,0
1,5	2,0	83,5	83,5	84,0	84,0	83,0	83,0	82,5	82,5
2,2	3,0	85,0	85,0	85,0	85,0	83,0	83,0	84,0	84,0
3,0	4,0	85,0	85,0	86,0	86,0	85,0	85,0	84,5	84,5
3,7	5,0	87,5	87,5	87,5	87,5	87,5	87,5	85,5	85,5
4,4	6,0	88,0	88,0	88,5	88,5	87,5	87,5	85,5	85,5
5,5	7,5	88,5	88,5	89,5	89,5	88,0	88,0	85,5	85,5
7,5	10,0	89,5	89,5	89,5	89,5	88,5	88,5	88,5	88,5
9,2	12,5	89,5	89,5	90,0	90,0	88,5	88,5	88,5	89,0
11,0	15,0	90,2	90,2	91,0	91,0	90,2	90,2	88,5	88,9
15,0	20,0	90,2	90,2	91,0	91,0	90,2	90,2	89,5	89,6
18,5	25,0	91,0	91,0	92,4	92,4	91,7	91,7	89,5	89,5
22,0	30,0	91,0	91,0	92,4	92,4	91,7	91,7	91,0	91,0
30,0	40,0	91,7	91,7	93,0	93,0	93,0	93,0	91,0	91,0
37,0	50,0	92,4	92,4	93,0	93,0	93,0	93,0	91,7	91,8
45,0	60,0	93,0	93,0	93,6	93,6	93,6	93,6	91,7	92,0
55,0	75,0	93,0	93,0	94,1	94,1	93,6	93,7	93,0	93,0
75,0	100	93,6	93,6	94,5	94,5	94,1	94,2	93,0	93,2
90,0	125	94,5	94,5	94,5	94,5	94,1	94,2	93,6	93,6
110	150	94,5	94,5	95,0	95,1	95,0	95,0	93,6	93,8
132	175	94,7	94,7	95,0	95,1	95,0	95,0	94,5	-
150	200	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	94,5	-
185	250	95,4	95,4	95,0	95,1	95,0	95,0	95,0	-
220	300	94,5	95,4	95,5	96,0	95,0	-	95,0	-
260	350	95,0	-	95,5	-	95,4	-	95,0	-
300	400	-	-	95,5	96,0	95,4	-	-	-
330	450	-	-	95,8	-	95,4	-	-	-
370	500	-	-	95,8	-	-	-	-	-

Fonte: O próprio autor.

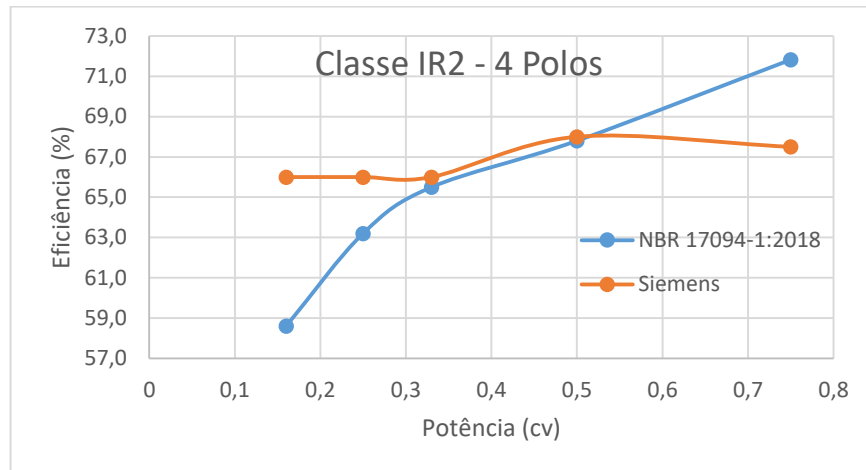
Pode-se concluir, pela análise realizada, que a maior parte dos motores de indução IR2 oferecidos pela Siemens têm rendimento apenas igual ao estabelecido pela NBR 17094-1:2018. Não faz parte do escopo deste estudo aprofundar-se nas razões de a empresa não oferecer, no Brasil, máquinas de indução de classe IR2 que excedam a eficiência esperada.

Figura 5.5 – Eficiência dos motores de indução de 2 polos da Siemens – classe IR2



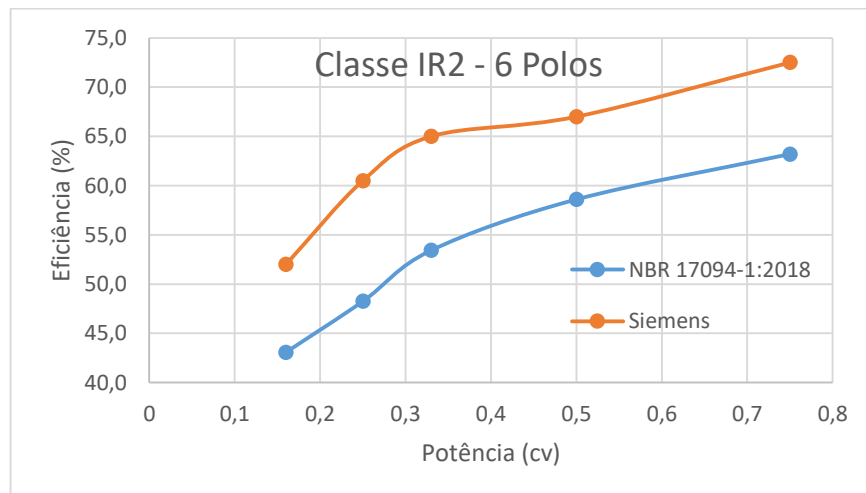
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.6 – Eficiência dos motores de indução de 4 polos da Siemens – classe IR2



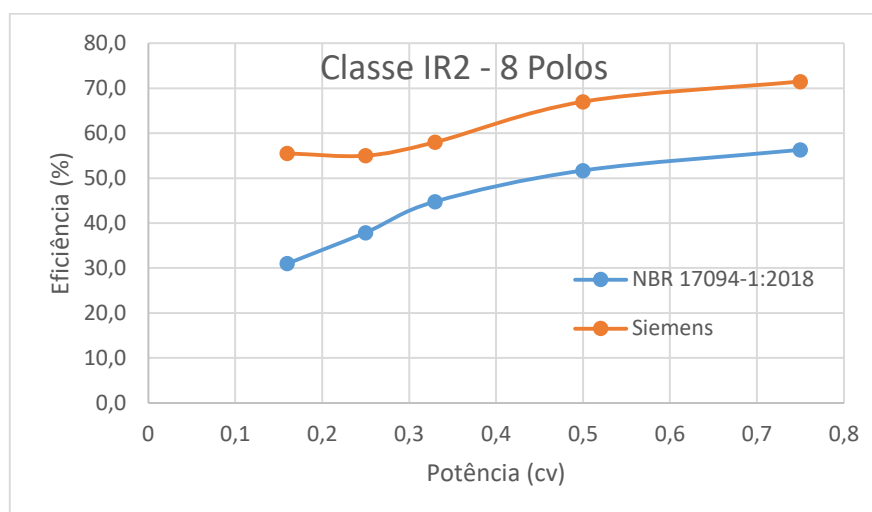
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.7 – Eficiência dos motores de indução de 6 polos da Siemens – classe IR2



Fonte: O próprio autor.

Figura 5.8 – Eficiência dos motores de indução de 8 polos da Siemens – classe IR2



Fonte: O próprio autor.

5.3 Baldor (ABB)

A Baldor Electric Company é uma empresa fundada nos Estados Unidos e que em 2010 passou a ser integrante do grupo ABB. Segundo nota oficial da empresa, a mesma passou a ser conhecida apenas como ABB a partir de março de 2018.

A companhia disponibiliza uma ampla faixa de motores, que atendem tanto às diretrizes da NEMA quanto as da IEC. No catálogo direcionado ao mercado estadunidense o fabricante não disponibiliza as informações de eficiência dos motores que seguem as exigências da IEC, mas apenas das máquinas em conformidade com os padrões da NEMA. Estas últimas são da classe Premium, que é equivalente a IE3, e suas características de rendimento podem ser verificadas na tabela 5.5.

Apesar de esta linha não ser direcionada ao mercado brasileiro, é interessante notar que alguns motores de potência entre 0,16 e 1 cv não conseguem atender às exigências de eficiência padronizadas pela NBR 17094-1:2018, ainda que levada em conta a tolerância. Além de se tratar de um grande fabricante de motores de indução e de fazer parte do grupo ABB, a Baldor foi incluída neste estudo pelo rendimento apresentado por suas máquinas de potência superior a 1 cv ser equivalente ao normalizado para a classe IR3.

Caso algum usuário brasileiro opte por adquirir motores fabricados pela Baldor, é importante verificar as dimensões da carcaça da máquina e outros parâmetros essenciais, não se prendendo apenas ao aproveitamento de energia.

Tabela 5.5 – Níveis de eficiência dos motores de indução da Baldor, voltados ao mercado estadunidense, e da classe IR3 padronizada pela NBR 17094-1:2018

Potência nominal		Número de polos							
kW	cv	2		4		6		8	
		NBR 17094	BALD OR	NBR 17094	BALD OR	NBR 17094	BALD OR	NBR 17094	BALD OR
0,12	0,16	62,0	-	66,0	62,0	64,0	57,5	59,5	-
0,18	0,25	65,6	-	69,5	64,0	67,5	68,0	64,0	57,5
0,25	0,33	69,5	72,0	73,4	68,0	69,0	70,0	68,0	59,5
0,37	0,50	73,4	68,0	78,2	74,0	75,3	72,0	72,0	70,0
0,55	0,75	76,8	74,0	79,0	75,5	79,5	77,0	74,0	-
0,75	1,0	80,5	77,0	83,5	85,5	82,5	82,5	75,5	74,0
1,1	1,5	84,0	84,0	86,5	86,5	87,5	87,5	78,5	78,5
1,5	2,0	85,5	85,5	86,5	86,5	88,5	88,5	84,0	84,0
2,2	3,0	86,5	86,5	89,5	89,5	89,5	89,5	85,5	86,5
3,0	4,0	88,5	-	89,5	-	89,5	-	86,5	-
3,7	5,0	88,5	88,5	89,5	89,5	89,5	89,5	86,5	86,5
4,4	6,0	88,5	-	89,5	-	89,5	-	86,5	-
5,5	7,5	89,5	89,5	91,7	91,7	91,0	91,0	86,5	86,5
7,5	10,0	90,2	90,2	91,7	91,7	91,0	91,0	89,5	89,5
9,2	12,5	91,0	-	92,4	-	91,7	-	89,5	-
11,0	15,0	91,0	91,0	92,4	92,4	91,7	91,7	89,5	89,5
15,0	20,0	91,0	91,0	93,0	93,0	91,7	91,7	90,2	90,2
18,5	25,0	91,7	91,7	93,6	93,6	93,0	93,0	90,2	90,2
22,0	30,0	91,7	91,7	93,6	93,6	93,0	93,0	91,7	92,4
30,0	40,0	92,4	92,4	94,1	94,1	94,1	94,1	91,7	93,0
37,0	50,0	93,0	93,0	94,5	94,5	94,1	94,1	92,4	93,0
45,0	60,0	93,6	95,0	95,0	95,0	94,5	95,0	92,4	93,0
55,0	75,0	93,6	94,5	95,4	95,4	94,5	94,5	93,6	-
75,0	100	94,1	95,0	95,4	95,4	95,0	95,0	93,6	-
90,0	125	95,0	95,0	95,4	95,4	95,0	95,0	94,1	-
110	150	95,0	95,0	95,8	95,8	95,8	95,8	94,1	-
132	175	95,4	-	96,2	-	95,8	-	94,5	-
150	200	95,4	95,4	96,2	96,2	95,8	95,8	94,5	-
185	250	95,8	95,8	96,2	96,2	95,8	95,8	95,0	-
220	300	95,8	95,8	96,2	96,2	95,8	95,8	95,0	-
260	350	95,8	96,2	96,2	96,2	95,8	95,2	95,0	-
300	400	95,8	-	96,2	96,2	95,8	95,5	95,0	-
330	450	95,8	-	96,2	95,8	95,8	95,5	95,0	-
370	500	95,8	-	96,2	96,0	95,8	95,6	95,0	-

Fonte: O próprio autor.

O grupo ABB disponibiliza uma linha de motores de indução em baixa tensão direcionada ao Brasil, a qual é classificada como IR2. Curiosamente não são oferecidas máquinas de 8 polos, mas todas as demais atendem aos requisitos da legislação brasileira. Conforme pode ser constatado na tabela 5.6, apenas o motor de 0,75 cv (2 polos) não atende ao nível de eficiência proposto pela NBR 17094-1:2018, mas, atualmente, motores desta potência não estão englobados nas determinações do governo brasileiro. Portanto, não há desconformidade.

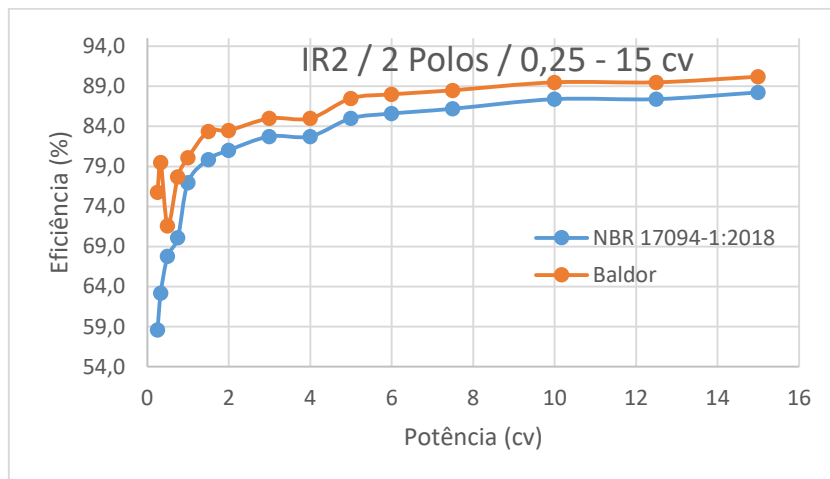
Tabela 5.6 – Níveis de eficiência dos motores de indução da ABB, voltados ao mercado brasileiro, e da classe IR2 padronizada pela NBR 17094-1:2018

Potência nominal		Número de polos							
kW	cv	2		4		6		8	
		NBR 17094	BALD OR	NBR 17094	BALD OR	NBR 17094	BALD OR	NBR 17094	BALD OR
0,12	0,16	59,5	-	64,0	-	50,5	-	40,0	-
0,18	0,25	64,0	75,8	68,0	68,5	55,0	55,0	46,0	-
0,25	0,33	68,0	79,5	70,0	70,9	59,5	62,3	52,0	-
0,37	0,50	72,0	71,6	72,0	68,4	64,0	67,2	58,0	-
0,55	0,75	74,0	77,7	75,5	69,0	68,0	68,5	62,0	-
0,75	1,0	80,0	80,1	80,5	81,0	80,0	80,0	70,0	-
1,1	1,5	82,5	83,4	81,5	82,7	77,0	78,7	77,0	-
1,5	2,0	83,5	83,5	84,0	84,0	83,0	83,5	82,5	-
2,2	3,0	85,0	85,0	85,0	85,4	83,0	84,1	84,0	-
3,0	4,0	85,0	85,0	86,0	87,0	85,0	85,0	84,5	-
3,7	5,0	87,5	87,5	87,5	87,5	87,5	87,5	85,5	-
4,4	6,0	88,0	88,0	88,5	88,5	87,5	87,5	85,5	-
5,5	7,5	88,5	88,5	89,5	89,5	88,0	88,0	85,5	-
7,5	10,0	89,5	89,5	89,5	90,0	88,5	88,5	88,5	-
9,2	12,5	89,5	89,5	90,0	90,0	88,5	90,3	88,5	-
11,0	15,0	90,2	90,2	91,0	91,0	90,2	90,2	88,5	-
15,0	20,0	90,2	91,8	91,0	92,0	90,2	90,2	89,5	-
18,5	25,0	91,0	92,2	92,4	92,4	91,7	92,1	89,5	-
22,0	30,0	91,0	92,2	92,4	92,9	91,7	92,6	91,0	-
30,0	40,0	91,7	92,9	93,0	93,5	93,0	93,0	91,0	-
37,0	50,0	92,4	93,2	93,0	93,9	93,0	93,6	91,7	-
45,0	60,0	93,0	93,3	93,6	94,0	93,6	93,7	91,7	-
55,0	75,0	93,0	93,7	94,1	94,2	93,6	93,8	93,0	-
75,0	100	93,6	94,5	94,5	94,7	94,1	94,1	93,0	-
90,0	125	94,5	94,5	94,5	94,8	94,1	94,1	93,6	-
110	150	94,5	94,5	95,0	95,0	95,0	95,0	93,6	-
132	175	94,7	94,7	95,0	95,0	95,0	95,1	94,5	-
150	200	95,0	95,0	95,0	95,0	95,0	95,2	94,5	-
185	250	95,4	95,4	95,0	95,5	95,0	95,6	95,0	-
220	300	94,5	94,8	95,5	95,6	95,0	95,5	95,0	-
260	350	95,0	95,1	95,5	95,7	95,4	95,7	95,0	-
300	400	-	95,2	95,5	95,7	95,4	95,6	-	-
330	450	-	95,3	95,8	95,8	95,4	95,7	-	-
370	500	-	95,3	95,8	95,8	-	95,7	-	-

Fonte: O próprio autor.

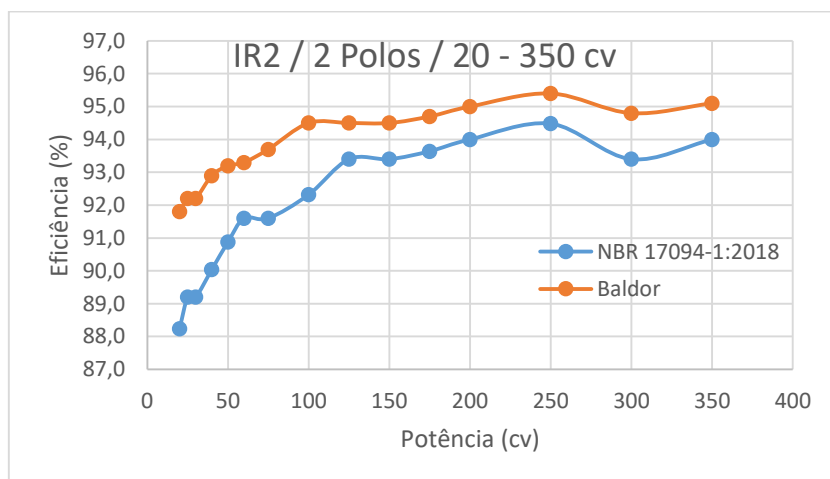
As figuras 5.9 a 5.14 retratam a boa performance dos motores de indução da ABB diante das exigências da NBR 17094-1:2018, considerando as tolerâncias.

Figura 5.9 – Eficiência dos motores de indução de 2 polos da ABB, classe IR2, 0,25 a 15 cv



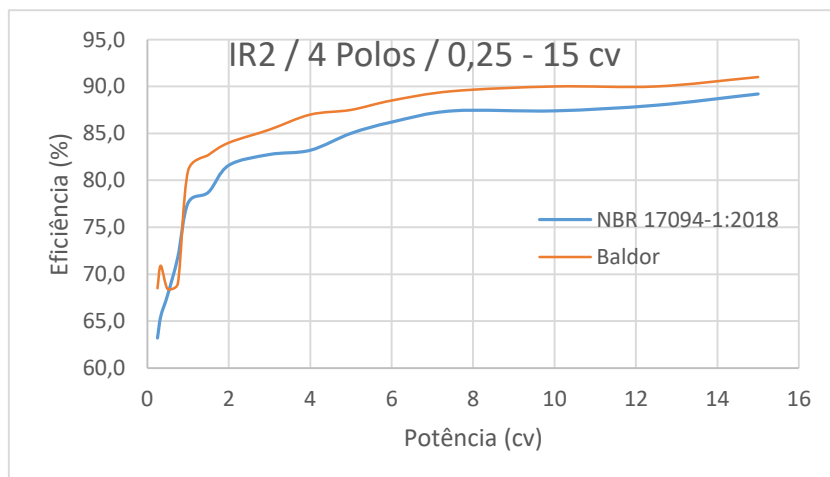
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.10 – Eficiência dos motores de indução de 2 polos da ABB, classe IR2, 20 a 350 cv



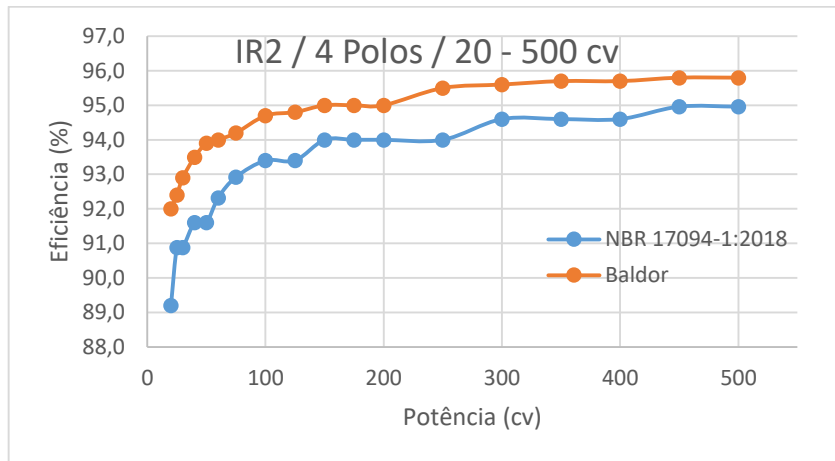
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.11 – Eficiência dos motores de indução de 4 polos da ABB, classe IR2, 0,25 a 15 cv



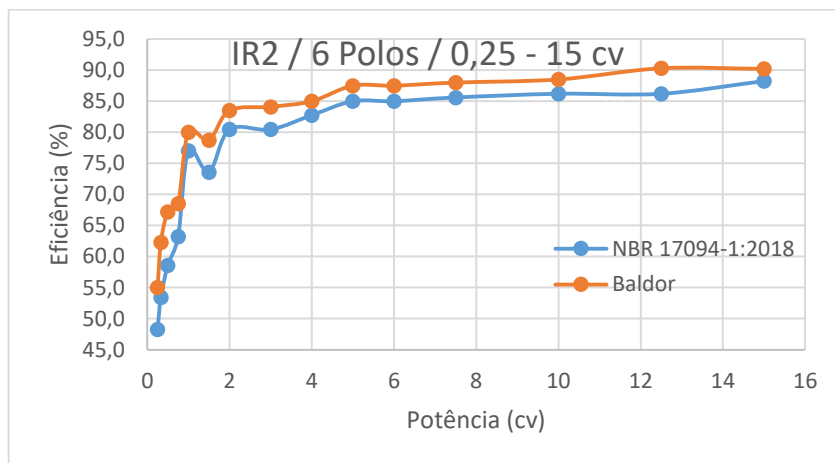
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.12 – Eficiência dos motores de indução de 4 polos da ABB, classe IR2, 20 a 500 cv



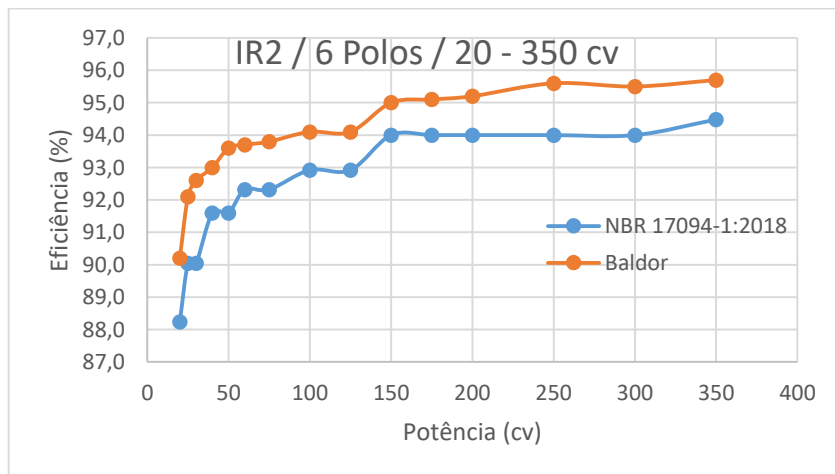
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.13 – Eficiência dos motores de indução de 6 polos da ABB, classe IR2, 0,25 a 15 cv



Fonte: O próprio autor.

Figura 5.14 – Eficiência dos motores de indução de 6 polos da ABB, classe IR2, 20 a 350 cv



Fonte: O próprio autor.

5.4 Voges

A Voges Motores também é um empreendimento brasileiro, fundado em 2004. Conforme sua própria descrição, a empresa tem o compromisso de aprimorar continuamente todos os produtos e os serviços prestados, usando novos métodos e novas tecnologias para atender às necessidades de seus clientes de forma satisfatória (GRUPO VOGES, 2018).

Sua linha de motores de indução trifásicos é conhecida como VTop e apresenta rendimento (classe IR2) e fator de potência aprovados pelo INMETRO. Houve uma otimização no projeto inicial destas máquinas, que resultou na otimização da dissipação do calor, redução das vibrações e dos ruídos (GRUPO VOGES, 2010). Em seu catálogo, a Voges aponta as melhorias que se fizeram necessárias para atender aos requisitos da Portaria N° 553 da Lei de Eficiência Energética N° 10.295.

A fabricante oferece motores de praticamente todas as potências normalizadas pela NBR 17094-1:2018 (ver tabela 5.7), além de uma máquina de 0,13 cv que não foi incluída nesta análise e isto porque a mesma não é contemplada pela norma em questão. Apenas os motores de 0,33 e 0,50 cv não atendem aos níveis de eficiência estabelecidos pela versão atual da NBR 17094-1, mesmo que considerada a tolerância concedida. Como estas duas potências não estão englobadas na legislação vigente no Brasil, não há desconformidade quanto ao rendimento.

Um fato interessante para o consumidor é que todos os motores de 8 polos superam a eficiência estandardizada e também quase todas as máquinas de 6 polos, conforme pode ser constatado na tabela 5.7. Na linha de motores de 2 polos, a maior parte das unidades produzidas apenas se iguala em eficiência ao exigido pela ABNT.

A partir da análise das figuras 5.15 a 5.22, pode-se constatar mais facilmente o bom desempenho dos motores VTop frente aos níveis mínimos tolerados pela padronização. Assim como no caso das máquinas dos demais fabricantes, a eficiência dos motores de maior potência da Voges superam de forma mais larga aos valores normalizados.

Apesar de ser uma empresa que segue as diretrizes da ABNT e, conseqüentemente, da IEC, a Voges disponibiliza no Brasil uma linha alternativa de motores monofásicos e trifásicos em conformidade com os padrões da NEMA, especialmente direcionados às seguintes aplicações: sistemas de bombeamento de água, compressores, exaustores e outras.

Tabela 5.7 – Níveis de eficiência dos motores de indução da Voges e da classe IR2 padronizada pela NBR 17094-1:2018

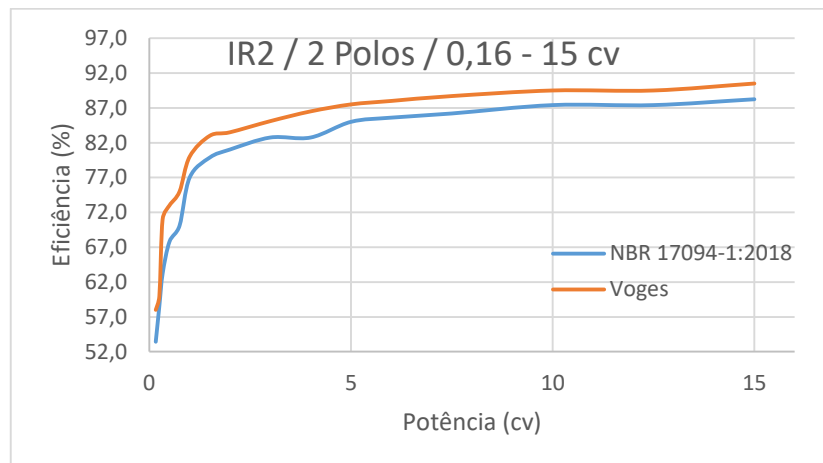
Potência nominal		Número de polos							
kW	cv	2		4		6		8	
		NBR 17094	VOGES	NBR 17094	VOGES	NBR 17094	VOGES	NBR 17094	VOGES
0,12	0,16	59,5	58,0	64,0	60,0	50,5	56,0	40,0	51,5
0,18	0,25	64,0	60,0	68,0	64,0	55,0	53,0	46,0	54,0
0,25	0,33	68,0	71,0	70,0	65,0	59,5	55,0	52,0	56,0
0,37	0,50	72,0	73,0	72,0	71,0	64,0	69,0	58,0	61,0
0,55	0,75	74,0	75,0	75,5	72,0	68,0	71,0	62,0	66,0
0,75	1,0	80,0	80,0	80,5	80,5	80,0	80,5	70,0	78,5
1,1	1,5	82,5	83,0	81,5	82,0	77,0	81,0	77,0	81,5
1,5	2,0	83,5	83,5	84,0	84,0	83,0	83,9	82,5	84,3
2,2	3,0	85,0	85,1	85,0	85,0	83,0	83,8	84,0	85,6
3,0	4,0	85,0	86,5	86,0	86,3	85,0	86,3	84,5	86,5
3,7	5,0	87,5	87,5	87,5	87,5	87,5	87,7	85,5	85,6
4,4	6,0	88,0	88,0	88,5	88,5	87,5	88,5	85,5	88,1
5,5	7,5	88,5	88,7	89,5	89,5	88,0	89,5	85,5	89,7
7,5	10,0	89,5	89,5	89,5	91,0	88,5	90,2	88,5	90,5
9,2	12,5	89,5	89,5	90,0	91,4	88,5	90,6	88,5	91,0
11,0	15,0	90,2	90,5	91,0	91,7	90,2	91,0	88,5	91,2
15,0	20,0	90,2	90,2	91,0	92,4	90,2	91,7	89,5	91,5
18,5	25,0	91,0	91,0	92,4	92,4	91,7	92,2	89,5	92,0
22,0	30,0	91,0	91,3	92,4	92,4	91,7	93,0	91,0	92,3
30,0	40,0	91,7	92,0	93,0	93,0	93,0	93,4	91,0	93,5
37,0	50,0	92,4	92,4	93,0	93,0	93,0	94,0	91,7	93,6
45,0	60,0	93,0	93,0	93,6	93,8	93,6	93,7	91,7	93,6
55,0	75,0	93,0	93,2	94,1	94,1	93,6	93,8	93,0	94,1
75,0	100	93,6	93,8	94,5	94,5	94,1	94,2	93,0	94,5
90,0	125	94,5	94,5	94,5	95,0	94,1	94,5	93,6	94,7
110	150	94,5	94,5	95,0	95,0	95,0	95,0	93,6	94,9
132	175	94,7	94,7	95,0	95,0	95,0	95,1	94,5	95,1
150	200	95,0	95,0	95,0	95,3	95,0	95,3	94,5	95,3
185	250	95,4	95,4	95,0	95,5	95,0	95,3	95,0	95,3
220	300	94,5	95,5	95,5	95,6	95,0	95,4	95,0	95,5
260	350	95,0	95,5	95,5	95,7	95,4	95,4	95,0	95,6
300	400	-	95,6	95,5	95,9	95,4	95,7	-	-
330	450	-	95,7	95,8	96,0	95,4	96,0	-	-
370	500	-	-	95,8	96,1	-	-	-	-

Fonte: O próprio autor.

A partir das informações dadas na tabela 5.7, pode-se inferir que o aproveitamento de energia dos motores da linha VTop pode suplantiar o esperado em até 11,5%.

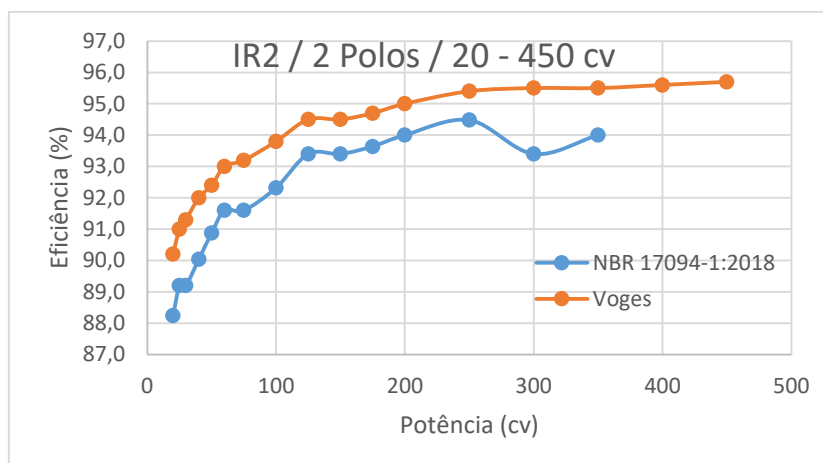
Nas figuras 5.15, 5.17, 5.19 e 5.21, como as curvas estão mais próximas, com o intuito de facilitar a visualização não foram utilizados marcadores.

Figura 5.15 – Eficiência dos motores de indução de 2 polos da Voges, classe IR2, 0,16 a 15 cv



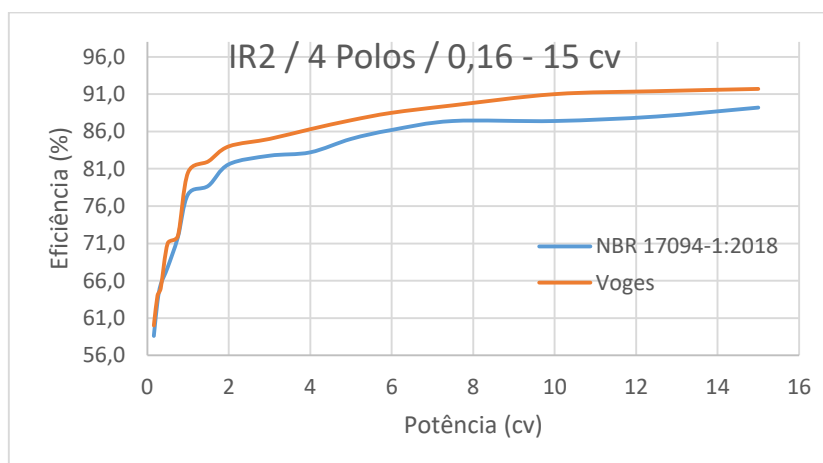
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.16 – Eficiência dos motores de indução de 2 polos da Voges, classe IR2, 20 a 450 cv



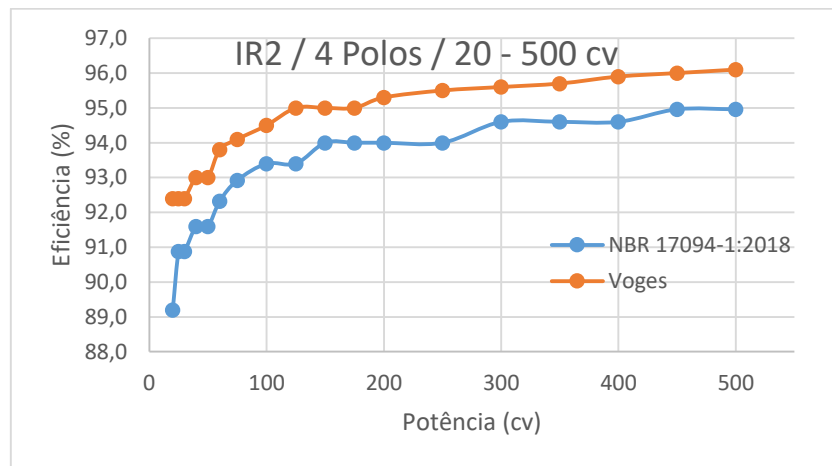
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.17 – Eficiência dos motores de indução de 4 polos da Voges, classe IR2, 0,16 a 15 cv



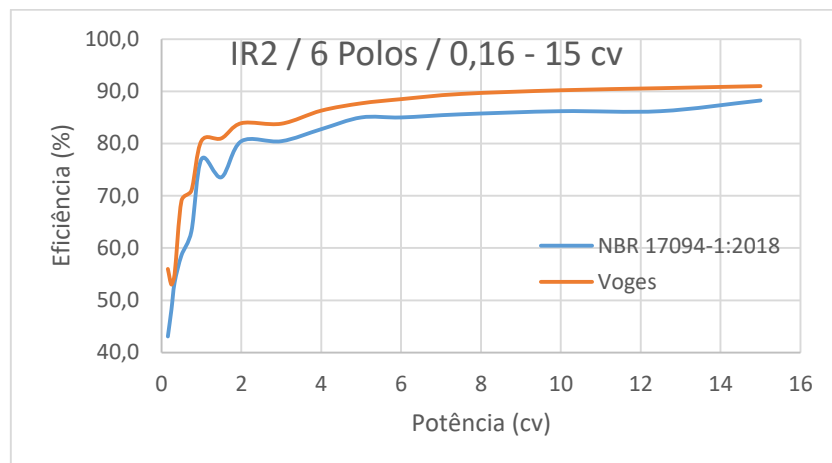
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.18 – Eficiência dos motores de indução de 4 polos da Voges, classe IR2, 20 a 500 cv



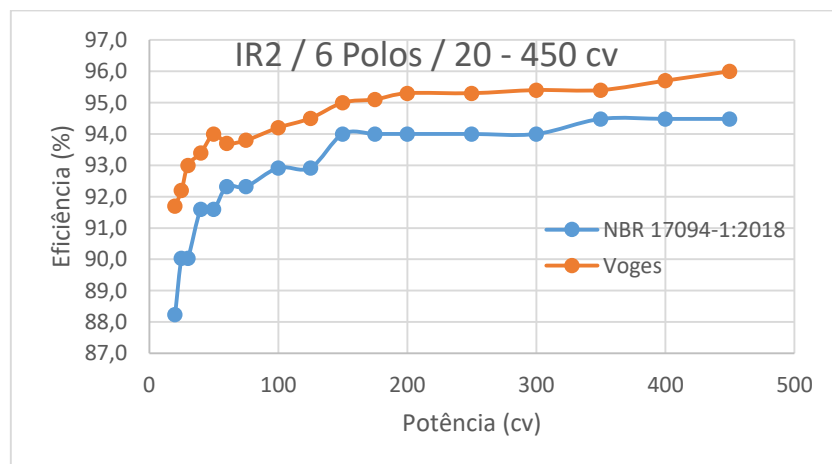
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.19 – Eficiência dos motores de indução de 6 polos da Voges, classe IR2, 0,16 a 15 cv



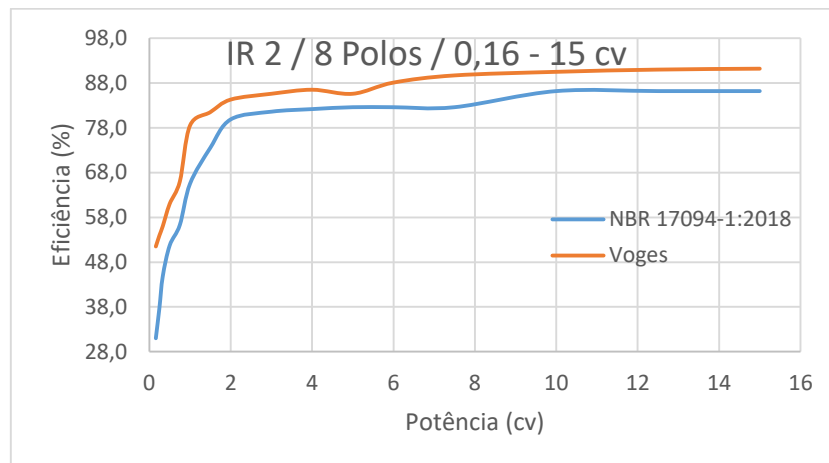
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.20 – Eficiência dos motores de indução de 6 polos da Voges, classe IR2, 20 a 450 cv



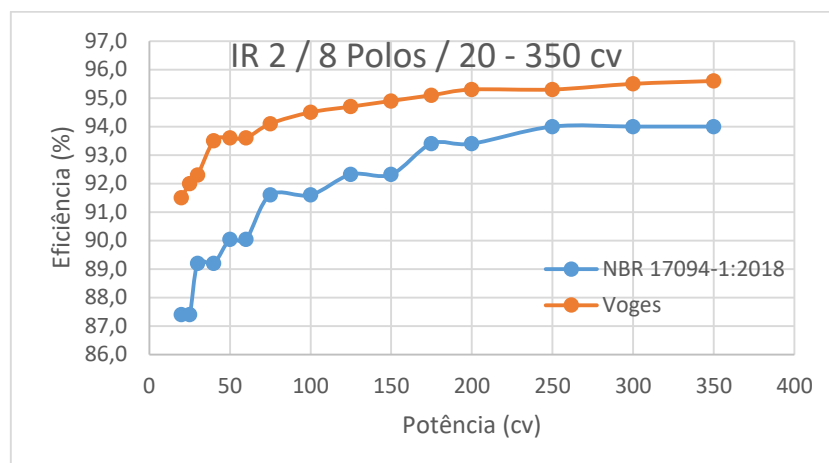
Fonte: O próprio autor.

Figura 5.21 – Eficiência dos motores de indução de 8 polos da Voges, classe IR2, 0,16 a 15 cv



Fonte: O próprio autor.

Figura 5.22 – Eficiência dos motores de indução de 8 polos da Voges, classe IR2, 20 a 350 cv



Fonte: O próprio autor.

5.5 Melhor solução em termos de eficiência

Considerando os motores de indução trifásicos analisados neste capítulo, foi verificado qual dos quatro fabricantes oferece a solução mais eficiente para cada uma das potências consideradas. As tabelas 5.8 e 5.9 contêm as informações de rendimento das máquinas, por potência e por fabricante, sendo que a opção que melhor aproveita a energia é mostrada em negrito.

As figuras 5.23 a 5.26 evidenciam quais empresas, dentre WEG, Siemens, Baldor e Voges, disponibilizam a maior quantidade de motores de indução que se caracterizam como a melhor solução no quesito eficiência. Em alguns casos, dois ou mais fabricantes oferecem um motor de determinada potência com o mesmo rendimento.

Da tabela 5.8 é possível concluir que dentre os motores de dois polos analisados, a maior parte dos mais eficientes é fabricada pela WEG. O rendimento da máquina de 7,5 cv da WEG e da Voges é igual e, desta forma, fatores como preço e garantia é que possivelmente guiarão o usuário no momento da aquisição.

Tabela 5.8 – Comparativo dos níveis de eficiência dos motores de indução de 2 e 4 polos, fabricados por WEG, Siemens, Baldor e Voges

Potência nominal		Número de polos									
kW	cv	2					4				
		NBR 17094	WEG	SIEMENS	BALDOR	VOGES	NBR 17094	WEG	SIEMENS	BALDOR	VOGES
0,12	0,16	59,5	61,0	72,0	-	58,0	64,0	64,0	66,0	-	60,0
0,18	0,25	64,0	65,0	72,0	75,8	60,0	68,0	68,0	66,0	68,5	64,0
0,25	0,33	68,0	68,0	74,5	79,5	71,0	70,0	70,0	66,0	70,9	65,0
0,37	0,5	72,0	72,0	72,0	71,6	73,0	72,0	72,0	68,0	68,4	71,0
0,55	0,75	74,0	74,0	71,5	77,7	75,0	75,5	75,5	67,5	69,0	72,0
0,75	1	80,0	80,5	80,0	80,1	80,0	80,5	80,5	80,5	81,0	80,5
1,1	1,5	82,5	82,6	82,5	83,4	83,0	81,5	81,6	81,5	82,7	82,0
1,5	2	83,5	83,7	83,5	83,5	83,5	84,0	84,2	84,0	84,0	84,0
2,2	3	85,0	85,5	85,0	85,0	85,1	85,0	85,1	85,0	85,4	85,0
3	4	85,0	87,5	85,0	85,0	86,5	86,0	86,5	86,0	87,0	86,3
3,7	5	87,5	87,6	87,5	87,5	87,5	87,5	88,0	87,5	87,5	87,5
4,4	6	88,0	88,5	88,0	88,0	88,0	88,5	88,5	88,5	88,5	88,5
5,5	7,5	88,5	88,7	88,5	88,5	88,7	89,5	90,0	89,5	89,5	89,5
7,5	10	89,5	89,6	89,5	89,5	89,5	89,5	91,0	89,5	90,0	91,0
9,2	12,5	89,5	90,2	89,5	89,5	89,5	90,0	91,0	90,0	90,0	91,4
11	15	90,2	90,5	90,2	90,2	90,5	91,0	91,7	91,0	91,0	91,7
15	20	90,2	90,8	90,2	91,8	90,2	91,0	92,4	91,0	92,0	92,4
18,5	25	91,0	91,5	91,0	92,2	91,0	92,4	92,8	92,4	92,4	92,4
22	30	91,0	91,5	91,0	92,2	91,3	92,4	93,0	92,4	92,9	92,4
30	40	91,7	92,4	91,7	92,9	92,0	93,0	93,4	93,0	93,5	93,0
37	50	92,4	93,0	92,4	93,2	92,4	93,0	93,6	93,0	93,9	93,0
45	60	93,0	93,5	93,0	93,3	93,0	93,6	94,1	93,6	94,0	93,8
55	75	93,0	93,8	93,0	93,7	93,2	94,1	94,4	94,1	94,2	94,1
75	100	93,6	94,3	93,6	94,5	93,8	94,5	94,6	94,5	94,7	94,5
90	125	94,5	94,6	94,5	94,5	94,5	94,5	94,9	94,5	94,8	95,0
110	150	94,5	94,8	94,5	94,5	94,5	95,0	95,2	95,1	95,0	95,0
132	175	94,7	95,0	94,7	94,7	94,7	95,0	95,3	95,1	95,0	95,0
150	200	95,0	95,2	95,0	95,0	95,0	95,0	95,5	95,0	95,0	95,3
185	250	95,4	95,6	95,4	95,4	95,4	95,0	95,7	95,1	95,5	95,5
220	300	94,5	95,8	95,4	94,8	95,5	95,5	95,9	96,0	95,6	95,6
260	350	95,0	95,9	-	95,1	95,5	95,5	96,0	-	95,7	95,7
300	400	-	95,9	-	95,2	95,6	95,5	96,1	96,0	95,7	95,9
330	450	-	96,0	-	95,3	95,7	95,8	96,2	-	95,8	96,0
370	500	-	96,2	-	95,3	-	95,8	96,3	-	95,8	96,1

Fonte: O próprio autor.

Com relação aos motores de quatro polos considerados neste estudo, a maioria daqueles mais eficientes também são oferecidos pela WEG. Mais uma vez, WEG e Voges fabricam algumas máquinas que apresentam mesmo rendimento: 10, 15, 20 e 125 cv. Com

relação ao motor de 6 cv, os quatro fabricantes disponibilizam máquinas de mesma eficiência.

Tabela 5.9 – Comparativo dos níveis de eficiência dos motores de indução de 2 e 4 polos, fabricados por WEG, Siemens, Baldor e Voges

Potência nominal		Número de polos									
kW	cv	6					8				
		NBR 17094	WEG	SIEMENS	BALDOR	VOGES	NBR 17094	WEG	SIEMENS	BALDOR	VOGES
0,12	0,16	50,5	50,5	52,0	-	56,0	40,0	51,0	55,5	-	51,5
0,18	0,25	55,0	55,0	60,5	55,0	53,0	46,0	56,0	55,0	-	54,0
0,25	0,33	59,5	59,5	65,0	62,3	55,0	52,0	59,0	58,0	-	56,0
0,37	0,5	64,0	64,0	67,0	67,2	69,0	58,0	65,0	67,0	-	61,0
0,55	0,75	68,0	68,0	72,5	68,5	71,0	62,0	66,0	71,5	-	66,0
0,75	1	80,0	80,5	80,0	80,0	80,5	70,0	70,0	70,0	-	78,5
1,1	1,5	77,0	77,0	77,0	78,7	81,0	77,0	78,0	77,0	-	81,5
1,5	2	83,0	83,9	83,0	83,5	83,9	82,5	83,5	82,5	-	84,3
2,2	3	83,0	83,9	83,0	84,1	83,8	84,0	84,5	84,0	-	85,6
3	4	85,0	86,5	85,0	85,0	86,3	84,5	85,1	84,5	-	86,5
3,7	5	87,5	87,7	87,5	87,5	87,7	85,5	85,6	85,5	-	85,6
4,4	6	87,5	88,0	87,5	87,5	88,5	85,5	87,0	85,5	-	88,1
5,5	7,5	88,0	88,5	88,0	88,0	89,5	85,5	87,5	85,5	-	89,7
7,5	10	88,5	88,5	88,5	88,5	90,2	88,5	89,5	88,5	-	90,5
9,2	12,5	88,5	89,5	88,5	90,3	90,6	88,5	90,0	89,0	-	91,0
11	15	90,2	91,0	90,2	90,2	91,0	88,5	90,4	88,9	-	91,2
15	20	90,2	91,3	90,2	90,2	91,7	89,5	90,5	89,6	-	91,5
18,5	25	91,7	92,4	91,7	92,1	92,2	89,5	91,0	89,5	-	92,0
22	30	91,7	93,0	91,7	92,6	93,0	91,0	91,7	91,0	-	92,3
30	40	93,0	93,4	93,0	93,0	93,4	91,0	92,2	91,0	-	93,5
37	50	93,0	93,6	93,0	93,6	94,0	91,7	92,6	91,8	-	93,6
45	60	93,6	93,8	93,6	93,7	93,7	91,7	92,6	92,0	-	93,6
55	75	93,6	94,1	93,7	93,8	93,8	93,0	93,5	93,0	-	94,1
75	100	94,1	94,4	94,2	94,1	94,2	93,0	93,7	93,2	-	94,5
90	125	94,1	94,7	94,2	94,1	94,5	93,6	94,2	93,6	-	94,7
110	150	95,0	95,1	95,0	95,0	95,0	93,6	94,5	93,8	-	94,9
132	175	95,0	95,3	95,0	95,1	95,1	94,5	95,0	-	-	95,1
150	200	95,0	95,4	95,0	95,2	95,3	94,5	95,2	-	-	95,3
185	250	95,0	95,5	95,0	95,6	95,3	95,0	95,3	-	-	95,3
220	300	95,0	95,6	-	95,5	95,4	95,0	95,5	-	-	95,5
260	350	95,4	95,7	-	95,7	95,4	95,0	95,5	-	-	95,6
300	400	95,4	95,9	-	95,6	95,7	-	95,5	-	-	-
330	450	95,4	96,0	-	95,7	96,0	-	95,8	-	-	-
370	500	-	96,0	-	95,7	-	-	-	-	-	-

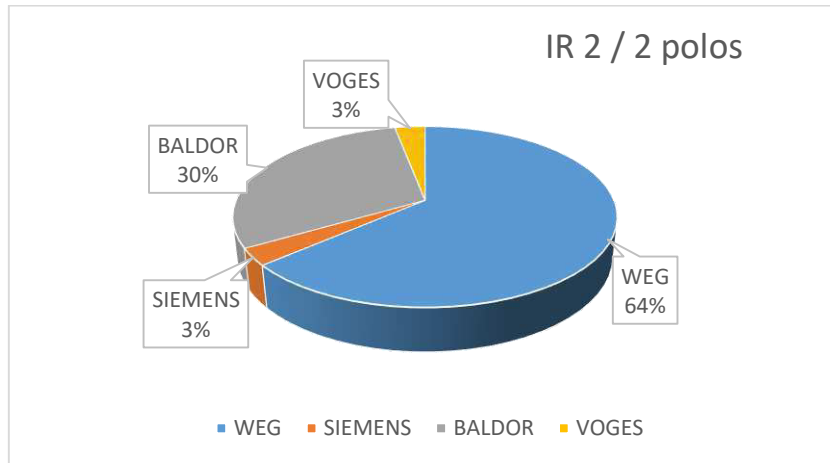
Fonte: O próprio autor.

A maioria dos motores de seis polos com maior eficiência, entre potências de 0,16 e 12,5 cv, são oferecidos pela Voges. Já entre potências de 15 e 500 cv, a WEG fabrica praticamente todas as melhores soluções.

Para motores de oito polos entre 1 e 350 cv de potência, a Voges apresenta as máquinas de maior rendimento, sendo igualada pela WEG para as potências de 5, 250 e 300 cv. Esta última é a única empresa que disponibiliza motores de oito polos de 400 e 450 cv. Como

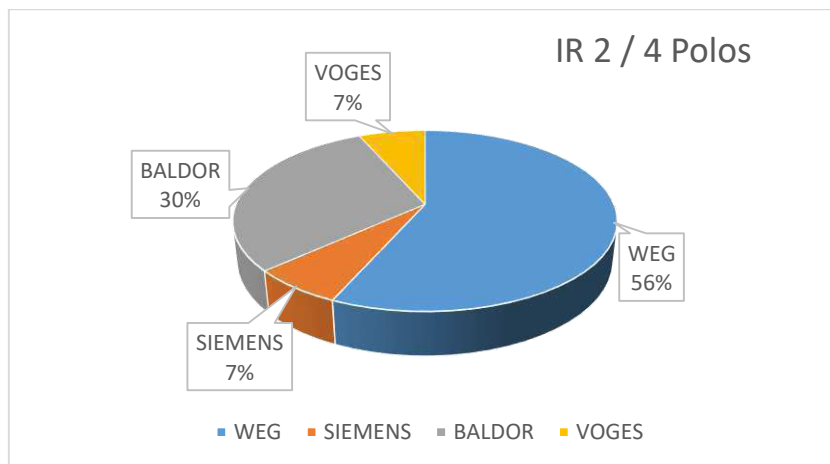
também pode ser constatado pela tabela 5.9, motores de indução de oito polos não são ofertados pela Baldor.

Figura 5.23 – Produção, por fabricante, dos mais eficientes motores de indução de dois polos



Fonte: O próprio autor.

Figura 5.24 – Produção, por fabricante, dos mais eficientes de motores de indução de quatro polos

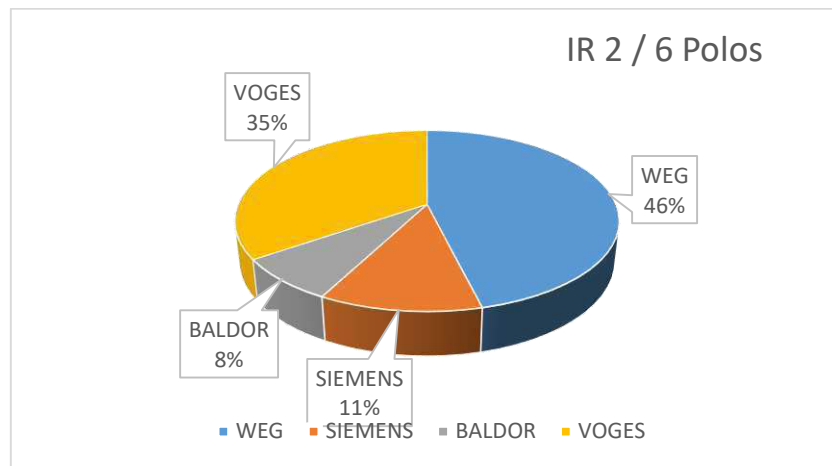


Fonte: O próprio autor.

Em todos os casos analisados, as duas empresas brasileiras somam pelo menos 67% de todas as soluções mais eficientes para o mercado brasileiro, chegando a 90%, no caso dos motores de oito polos.

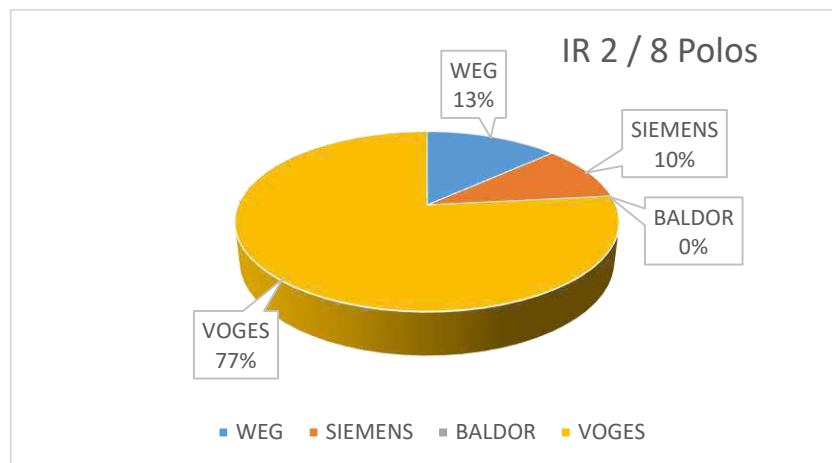
A partir do exposto, pode-se concluir que apesar da possibilidade de importar máquinas de indução, o consumidor no mercado brasileiro por optar seguramente por adquirir motores das fabricantes WEG e Voges, os quais (em sua maioria) apresentam rendimento superior ao regulamentado pela legislação do Brasil.

Figura 5.25 – Produção, por fabricante, dos mais eficientes motores de indução de seis polos



Fonte: O próprio autor.

Figura 5.26 – Produção, por fabricante, dos mais eficientes motores de indução de oito polos



Fonte: O próprio autor.

6 MOTORES DE ÍMÃS PERMANENTES COMO ALTERNATIVA

Como já citado no capítulo 3, os materiais utilizados na fabricação de um motor de indução são uma peça chave para elevar o rendimento destas máquinas. No entanto, alguns fenômenos, como a saturação do material magnético e as perdas por condução nos enrolamentos, são fatores limitantes para esta melhoria no aproveitamento de energia.

Com o objetivo de resolver estes problemas, foi iniciada a utilização de ímãs permanentes no rotor das máquinas elétricas rotativas e isto resultou no alcance de mais altos rendimentos. Conhecidas como motores de ímãs permanentes, elas apresentam alto produto energético e podem ser tanto de corrente alternada (síncronas) quanto de corrente contínua.

A frequência da rede de alimentação é o que determina a velocidade destas máquinas CA, as quais podem ser controladas com muita precisão e aplicadas em processos nos quais eram utilizados apenas motores CC (FITZGERALD, 2006). A maior taxa de torque por volume é obtida nos motores síncronos de ímãs permanentes e estes últimos podem ser encontrados em uma ampla faixa de características, podendo-se escolher as mais adequadas para o projeto (NASAR, 1987).

Quando se utilizam ímãs permanentes no rotor de motores elétricos, há uma implicação direta de redução de perdas, já que o mesmo não apresenta mais enrolamento de campo e então não haverá mais dissipação de energia com excitação de campo. Além disso, este tipo de rotor ocupa menos espaço que aqueles com enrolamento, o que pode implicar na fabricação de motores menores (NASAR, 1987).

No entanto, para os fins deste trabalho, serão consideradas máquinas elétricas rotativas com carcaças de dimensões equivalentes às dos motores de indução, já que a intercambiabilidade entre estas dispositivos é um dos fatores centrais deste capítulo.

Uma análise detalhada dos princípios de funcionamento dos motores de ímãs permanentes não fazem parte do escopo deste trabalho. Será realizada uma verificação das vantagens de substituir motores de indução por motores de ímã permanente, tanto em relação ao melhor aproveitamento de energia quanto a economia de recursos financeiros.

No capítulo anterior foi verificado que WEG e Voges são as fabricantes que fornecem a maior parte das melhores soluções em motores de indução. No entanto, esta última não produz motores de ímãs permanentes, mas a primeira fornece duas linhas de altíssima eficiência. Quanto a Siemens e a Baldor, não foi possível encontrar informações de rendimento destas máquinas, as quais ambas as companhias também produzem.

A título de exemplificação foi realizado um cálculo simples para mensurar a economia mensal e anual de energia, em kWh, e de dinheiro, em reais, da utilização de motores de ímãs permanentes frente ao uso de motores de indução classe IR2. Foi considerado que um cliente do grupo A4, atendido pela Enel Distribuição Ceará, optante pela modalidade tarifária horária verde, utiliza seus motores por oito horas a cada dia (fora de ponta) e que um mês é composto por trinta dias. A tarifa consultada em 07 de março de 2018 era de 0,38485 R\$/kWh, disponível em uma fatura cedida por uma empresa localizada em Fortaleza/CE.

6.1 Motores de ímãs permanentes da WEG

Conforme esclarecido no catálogo disponibilizados pela própria empresa, as linha de motores de ímãs permanentes da WEG são apenas parte de um sistema de acionamento comercializado, o qual contém ainda um inversor de frequência, o CFW11. A companhia fornece motores das linhas W22 Magnet IR4 Super Premium e IR5 Ultra Premium, os quais são os maiores níveis de eficiência disponibilizados atualmente (WEG, 2015).

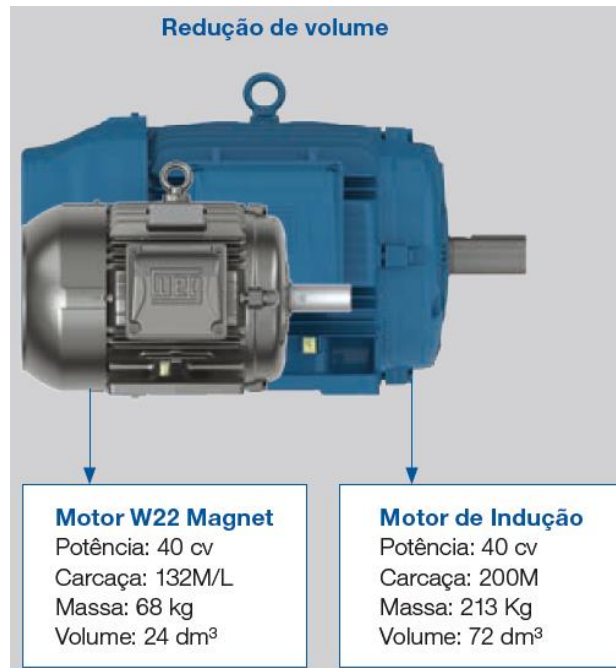
6.1.1 IR4 Super Premium

Esta linha apresenta uma relação de torque por volume maior que a dos motores de indução. Isto acontece porque, com a utilização dos ímãs, é obtida uma considerável redução da quantidade de energia dissipada. Conseqüentemente, a temperatura das máquinas em operação também cai e, com isso, é possível reduzir as dimensões da carcaça dos motores (WEG, 2015).

A figura 6.1 ilustra a redução no volume da máquinas da linha IR4 Super Premium, que pode chegar a 77%, caso comparadas com motores de indução de mesma potência nominal (WEG, 2015).

Com relação aos níveis de eficiência, estas informações podem ser consultadas nas tabelas 6.1 a 6.3, as quais também contém os níveis da rendimento estipulados pela legislação brasileira. É importante ressaltar a necessidade de verificar as dimensões das máquinas antes de adquiri-las, especialmente se o consumidor deseja realizar substituir um motor de indução.

Figura 6.1 – Comparativo entre um motor de indução e outro da linha IR4 Super Premium



Fonte: (WEG, 2015).

Tabela 6.1 – Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR4, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 3600 rpm

Potência nominal		Velocidade						
kW	cv ou hp	3600 rpm						
		NBR 17094	Perdas mensais (kWh)	W22 IR4	Perdas mensais (kWh)	Economia mensal (kWh)	Economia mensal (R\$)	Economia anual (R\$)
15	20	90,2	391,13	93,5	250,27	140,9	54,21	659,75
18,5	25	91,0	439,12	94,0	283,40	155,7	59,93	729,32
22	30	91,0	522,20	94,0	337,02	185,2	71,27	867,30
30	40	91,7	651,69	94,5	419,05	232,6	89,53	1.089,61
37	50	92,4	730,39	94,8	487,09	243,3	93,63	1.139,53
45	60	93,0	812,90	95,4	520,75	292,1	112,43	1.368,31
55	75	93,0	993,55	95,4	636,48	357,1	137,42	1.672,38
75	100	93,6	1.230,77	95,6	828,45	402,3	154,83	1.884,30
90	125	94,5	1.257,14	96,0	900,00	357,1	137,45	1.672,72
110	150	94,5	1.536,51	96,4	985,89	550,6	211,90	2.578,88
132	175	94,7	1.773,01	96,6	1.115,03	658,0	253,22	3.081,72
150	200	95,0	1.894,74	96,6	1.267,08	627,7	241,55	2.939,71
185	250	95,4	2.140,88	96,6	1.562,73	578,1	222,50	2.707,83
220	300	94,5	3.073,02	96,7	1.801,86	1.271,2	489,20	5.953,61
260	350	95,0	3.284,21	96,7	2.129,47	1.154,7	444,40	5.408,36
300	400	-	-	96,7	-	-	-	-
330	450	-	-	96,7	-	-	-	-

Fonte: O próprio autor.

Mais uma vez, na tabela 6.1, é possível verificar que a NBR 17094-1 não estabelece níveis mínimos de rendimento para máquinas de potências 400 e 450 cv, mas que as mesmas são oferecidas pela WEG (classe IR4). Diante disso, não foi possível realizar a análise da viabilidade de substituir motores de indução por motores de ímãs permanentes com estas potências e velocidade nominal de 3600 rpm.

Não foi possível encontrar os preços de venda dos motores IR4 Super Premium, portanto não foi possível calcular o tempo médio em que o investimento realizado em uma destas máquinas seria compensado pela economia no consumo energia elétrica.

Os valores a serem economizados são bastante consideráveis. No entanto, o ganho econômico não se traduz apenas em um consumo mais baixo, ou mais eficiente. A demanda contratada (em kW) por um cliente pode ser reduzida, já que os motores de ímãs permanentes demandam menos energia para uma dada potência nominal. Vale salientar que cada caso deve ser analisado individualmente, pois esta redução também depende da quantidade de máquinas a serem substituídas.

Tabela 6.2 – Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR4, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 1800 rpm

Potência nominal		Velocidade						
kW	cv ou hp	1800 rpm						
		NBR 17094	Perdas mensais (kWh)	W22 IR4	Perdas mensais (kWh)	Economia mensal (kWh)	Economia mensal (R\$)	Economia anual (R\$)
11	15	91,0	261,10	94,0	168,51	92,6	35,63	433,65
15	20	91,0	356,04	94,5	209,52	146,5	56,39	686,25
18,5	25	92,4	365,19	94,8	243,54	121,7	46,82	569,77
22	30	92,4	434,29	95,0	277,89	156,4	60,19	732,48
30	40	93,0	541,94	95,5	339,27	202,7	78,00	949,22
37	50	93,0	668,39	95,8	389,31	279,1	107,40	1.307,09
45	60	93,6	738,46	96,0	450,00	288,5	111,01	1.351,05
55	75	94,1	827,63	96,0	550,00	277,6	106,85	1.300,32
75	100	94,5	1.047,62	96,4	672,20	375,4	144,48	1.758,33
90	125	94,5	1.257,14	96,4	806,64	450,5	173,38	2.109,99
110	150	95,0	1.389,47	96,6	929,19	460,3	177,14	2.155,78
132	175	95,0	1.667,37	96,6	1.115,03	552,3	212,57	2.586,94
150	200	95,0	1.894,74	96,6	1.267,08	627,7	241,55	2.939,71
185	250	95,0	2.336,84	96,7	1.515,20	821,6	316,21	3.848,26
220	300	95,5	2.487,96	96,9	1.689,16	798,8	307,42	3.741,25
260	350	95,5	2.940,31	97,0	1.929,90	1.010,4	388,86	4.732,41
300	400	95,5	3.392,67	97,0	2.226,80	1.165,9	448,68	5.460,48
330	450	95,8	3.472,23	97,0	2.449,48	1.022,7	393,61	4.790,17

Fonte: O próprio autor.

Tabela 6.3 – Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR4, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 1200 rpm

Potência nominal		Velocidade						
kW	cv ou hp	1200 rpm						
		NBR 17094	Perdas mensais (kWh)	W22 IR4	Perdas mensais (kWh)	Economia mensal (kWh)	Economia mensal (R\$)	Economia anual (R\$)
7,5	10	88,5	233,90	92,4	148,05	85,8	33,04	402,07
9,2	12,5	88,5	286,92	92,4	181,61	105,3	40,53	493,21
11	15	90,2	286,83	93,0	198,71	88,1	33,91	412,72
15	20	90,2	391,13	93,0	270,97	120,2	46,24	562,80
18,5	25	91,7	401,88	94,1	278,38	123,5	47,53	578,39
22	30	91,7	477,91	94,1	331,05	146,9	56,52	687,81
30	40	93,0	541,94	95,0	378,95	163,0	62,73	763,38
37	50	93,0	668,39	95,0	467,37	201,0	77,36	941,50
45	60	93,6	738,46	95,4	520,75	217,7	83,78	1.019,66
55	75	93,6	902,56	95,4	636,48	266,1	102,40	1.246,25
75	100	94,1	1.128,59	95,9	769,55	359,0	138,17	1.681,59
90	125	94,1	1.354,30	95,9	923,46	430,8	165,81	2.017,90
110	150	95,0	1.389,47	96,2	1.042,83	346,6	133,41	1.623,56
132	175	95,0	1.667,37	96,2	1.251,39	416,0	160,09	1.948,27
150	200	95,0	1.894,74	96,2	1.422,04	472,7	181,92	2.213,95
185	250	95,0	2.336,84	96,2	1.753,85	583,0	224,37	2.730,53
220	300	95,0	2.778,95	96,5	1.915,03	863,9	332,48	4.046,28

Fonte: O próprio autor.

6.1.2 IR5 Ultra Premium

De acordo com a WEG (2015, p.5), estes motores apresentam o maior patamar de eficiência do mercado. Além disso, apresentam aproximadamente 20% menos perdas que os motores IR4 e possuem a mesma relação de carcaças dos motores de indução, para tornar mais fácil a substituição destes últimos.

Os níveis de rendimento podem ser verificados nas tabelas 6.4 a 6.6, também em comparação com os requisitos da legislação vigente no Brasil. A WEG oferece motores IR5 em três velocidades: 3600, 1800 e 1200 rpm, as mesmas dos motores IR4. A eficiência dos motores IR5 pode ser até 6% superior a dos motores classe IR2 (máquina de 15 cv – 1200 rpm).

Também não foi possível encontrar os preços de venda dos motores IR5 Ultra Premium, e assim como no caso dos motores IR4, não foi possível calcular o tempo médio em que o investimento de substituir motores de indução por motores de ímãs permanentes seria compensado.

Tabela 6.4 – Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR5, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 3600 rpm

Potência nominal		Velocidade						
kW	cv ou hp	3600 rpm						
		NBR 17094	Perdas mensais (kWh)	W22 IR4	Perdas mensais (kWh)	Economia mensal (kWh)	Economia mensal (R\$)	Economia anual (R\$)
7,5	10	89,5	211,17	93,8	118,98	92,2	35,48	431,81
9,2	12,5	89,5	259,04	94,0	140,94	118,1	45,45	553,15
11	15	90,2	286,83	94,5	153,65	133,2	51,25	623,76
15	20	90,2	391,13	94,7	201,48	189,7	72,99	888,26
18,5	25	91,0	439,12	95,0	233,68	205,4	79,06	962,19
22	30	91,0	522,20	95,4	254,59	267,6	102,99	1.253,37
30	40	91,7	651,69	95,6	331,38	320,3	123,27	1.500,21
37	50	92,4	730,39	95,8	389,31	341,1	131,26	1.597,48
45	60	93,0	812,90	96,0	450,00	362,9	139,66	1.699,70
55	75	93,0	993,55	96,2	521,41	472,1	181,70	2.211,30
75	100	93,6	1.230,77	96,5	652,85	577,9	222,41	2.706,76
90	125	94,5	1.257,14	96,7	737,13	520,0	200,13	2.435,57
110	150	94,5	1.536,51	97,0	816,49	720,0	277,10	3.372,27
132	175	94,7	1.773,01	97,0	979,79	793,2	305,27	3.715,12
150	200	95,0	1.894,74	97,0	1.113,40	781,3	300,70	3.659,48
185	250	95,4	2.140,88	97,2	1.279,01	861,9	331,69	4.036,67

Fonte: O próprio autor.

Tabela 6.5 – Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR5, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 1800 rpm

Potência nominal		Velocidade						
kW	cv ou hp	1800 rpm						
		NBR 17094	Perdas mensais (kWh)	W22 IR4	Perdas mensais (kWh)	Economia mensal (kWh)	Economia mensal (R\$)	Economia anual (R\$)
7,5	10	89,5	211,17	94,0	114,89	96,3	37,05	450,94
9,2	12,5	90,0	245,33	94,5	128,51	116,8	44,96	547,17
11	15	91,0	261,10	95,0	138,95	122,2	47,01	572,11
15	20	91,0	356,04	95,4	173,58	182,5	70,22	854,57
18,5	25	92,4	365,19	95,8	194,66	170,5	65,63	798,74
22	30	92,4	434,29	95,8	231,48	202,8	78,05	949,86
30	40	93,0	541,94	96,2	284,41	257,5	99,11	1.206,16
37	50	93,0	668,39	96,5	322,07	346,3	133,28	1.622,01
45	60	93,6	738,46	96,5	391,71	346,8	133,45	1.624,05
55	75	94,1	827,63	96,8	436,36	391,3	150,58	1.832,55
75	100	94,5	1.047,62	97,0	556,70	490,9	188,93	2.299,28
90	125	94,5	1.257,14	97,1	645,11	612,0	235,54	2.866,54
110	150	95,0	1.389,47	97,1	788,47	601,0	231,30	2.814,90
132	175	95,0	1.667,37	97,4	845,67	821,7	316,23	3.848,54
150	200	95,0	1.894,74	97,4	960,99	933,8	359,35	4.373,34
185	250	95,0	2.336,84	97,4	1.185,22	1.151,6	443,20	5.393,79

Fonte: O próprio autor.

Tabela 6.6 – Consumo e economia dos motores de ímãs permanentes, classe IR5, frente aos motores de indução, classe IR2, sendo todos de 1200 rpm

Potência nominal		Velocidade						
kW	cv ou hp	1200 rpm						
		NBR 17094	Perdas mensais (kWh)	W22 IR4	Perdas mensais (kWh)	Economia mensal (kWh)	Economia mensal (R\$)	Economia anual (R\$)
3,7	5	87,5	126,86	92,4	73,04	53,8	20,71	252,06
5,5	7,5	87,5	188,57	92,8	102,41	86,2	33,16	403,53
7,5	10	88,0	245,45	94,0	114,89	130,6	50,25	611,50
9,2	12,5	88,5	286,92	94,0	140,94	146,0	56,18	683,71
11	15	88,5	343,05	94,5	153,65	189,4	72,89	887,08
15	20	90,2	391,13	94,5	209,52	181,6	69,89	850,58
18,5	25	90,2	482,39	95,4	214,09	268,3	103,26	1.256,65
22	30	91,7	477,91	95,4	254,59	223,3	85,94	1.045,92
30	40	91,7	651,69	96,2	284,41	367,3	141,35	1.720,21
37	50	93,0	668,39	96,2	350,77	317,6	122,24	1.487,60
45	60	93,0	812,90	96,5	391,71	421,2	162,10	1.972,71
55	75	93,6	902,56	96,5	478,76	423,8	163,10	1.984,96
75	100	93,6	1.230,77	96,6	633,54	597,2	229,84	2.797,20
90	125	94,1	1.354,30	96,6	760,25	594,1	228,62	2.782,33
110	150	94,1	1.655,26	97,0	816,49	838,8	322,80	3.928,46
132	175	95,0	1.667,37	97,0	979,79	687,6	264,61	3.220,34

Fonte: O próprio autor.

Os valores a serem economizados são superiores àqueles encontrados no item 6.1.1. Da mesma forma, o ganho econômico não é limitado a um consumo mais baixo, ou mais eficiente. A demanda contratada (em kW) por um consumidor do grupo A4, por exemplo, pode ser reduzida ainda mais, já que os motores de ímãs permanentes de classe IR5 demandam menos energia que aqueles da classe IR4, para uma dada potência nominal.

6.1.3 Maior atratividade entre motores das classes IR4 E IR5

O valor economizado com a utilização das máquinas IR5 é consideravelmente superior àquele obtido com a aplicação de motores de classe IR4, apesar de que é esperado que o investimento com a compra seja maior. Destaca-se mais uma vez que não foi possível encontrar os preços das máquinas em questão.

De modo a facilitar a escolha dos consumidores quanto a aquisição de motores das classes IR4 e IR5, baseando-se nas tabelas 6.1 a 6.6, foram reunidas as informações de economia estimadas e disponibilizadas nas tabelas 6.7 a 6.9. Foram consideradas apenas as máquinas disponíveis em ambas as linhas, o que possibilita a comparação.

Tabela 6.7 – Vantagem financeira de utilizar motores de classe IR5, ao invés de IR4, para substituir motores de indução de classe IR2, todos de 3600 rpm

Potência nominal		Velocidade						
kW	cv ou hp	3600 rpm						
		IR4	Economia Mensal (R\$)	Economia Anual (R\$)	IR5	Economia Mensal (R\$)	Economia Anual (R\$)	Diferença anual (IR5 – IR4) (R\$)
15	20	93,5	54,21	659,75	94,7	72,99	888,26	228,51
18,5	25	94,0	59,93	729,32	95,0	79,06	962,19	232,87
22	30	94,0	71,27	867,30	95,4	102,99	1.253,37	386,07
30	40	94,5	89,53	1.089,61	95,6	123,27	1.500,21	410,60
37	50	94,8	93,63	1.139,53	95,8	131,26	1.597,48	457,95
45	60	95,4	112,43	1.368,31	96,0	139,66	1.699,70	331,39
55	75	95,4	137,42	1.672,38	96,2	181,70	2.211,30	538,92
75	100	95,6	154,83	1.884,30	96,5	222,41	2.706,76	822,45
90	125	96,0	137,45	1.672,72	96,7	200,13	2.435,57	762,84
110	150	96,4	211,90	2.578,88	97,0	277,10	3.372,27	793,39
132	175	96,6	253,22	3.081,72	97,0	305,27	3.715,12	633,40
150	200	96,6	241,55	2.939,71	97,0	300,70	3.659,48	719,77
185	250	96,6	222,50	2.707,83	97,2	331,69	4.036,67	1.328,84

Fonte: O próprio autor.

Tabela 6.8 – Vantagem financeira de utilizar motores de classe IR5, ao invés de IR4, para substituir motores de indução de classe IR2, todos de 1800 rpm

Potência nominal		Velocidade						
kW	cv ou hp	1800 rpm						
		IR4	Economia Mensal (R\$)	Economia Anual (R\$)	IR5	Economia Mensal (R\$)	Economia Anual (R\$)	Diferença anual (IR5 – IR4) (R\$)
11	15	94,0	35,63	433,65	95,0	47,01	572,11	138,46
15	20	94,5	56,39	686,25	95,4	70,22	854,57	168,32
18,5	25	94,8	46,82	569,77	95,8	65,63	798,74	228,98
22	30	95,0	60,19	732,48	95,8	78,05	949,86	217,38
30	40	95,5	78,00	949,22	96,2	99,11	1.206,16	256,94
37	50	95,8	107,40	1.307,09	96,5	133,28	1.622,01	314,92
45	60	96,0	111,01	1.351,05	96,5	133,45	1.624,05	273,01
55	75	96,0	106,85	1.300,32	96,8	150,58	1.832,55	532,23
75	100	96,4	144,48	1.758,33	97,0	188,93	2.299,28	540,95
90	125	96,4	173,38	2.109,99	97,1	235,54	2.866,54	756,55
110	150	96,6	177,14	2.155,78	97,1	231,30	2.814,90	659,11
132	175	96,6	212,57	2.586,94	97,4	316,23	3.848,54	1.261,60
150	200	96,6	241,55	2.939,71	97,4	359,35	4.373,34	1.433,63
185	250	96,7	316,21	3.848,26	97,4	443,20	5.393,79	1.545,53

Fonte: O próprio autor.

Tabela 6.9 – Vantagem financeira de utilizar motores de classe IR5, ao invés de IR4, para substituir motores de indução de classe IR2, todos de 1200 rpm

Potência nominal		Velocidade						
kW	cv ou hp	1200 rpm						
		IR4	Economia Mensal (R\$)	Economia Anual (R\$)	IR5	Economia Mensal (R\$)	Economia Anual (R\$)	Diferença anual (IR5 – IR4) (R\$)
7,5	10	92,4	33,04	402,07	94,0	50,25	611,50	209,43
9,2	12,5	92,4	40,53	493,21	94,0	56,18	683,71	190,50
11	15	93,0	33,91	412,72	94,5	72,89	887,08	474,36
15	20	93,0	46,24	562,80	94,5	69,89	850,58	287,78
18,5	25	94,1	47,53	578,39	95,4	103,26	1.256,65	678,26
22	30	94,1	56,52	687,81	95,4	85,94	1.045,92	358,11
30	40	95,0	62,73	763,38	96,2	141,35	1.720,21	956,84
37	50	95,0	77,36	941,50	96,2	122,24	1.487,60	546,11
45	60	95,4	83,78	1.019,66	96,5	162,10	1.972,71	953,05
55	75	95,4	102,40	1.246,25	96,5	163,10	1.984,96	738,71
75	100	95,9	138,17	1.681,59	96,6	229,84	2.797,20	1.115,61
90	125	95,9	165,81	2.017,90	96,6	228,62	2.782,33	764,43
110	150	96,2	133,41	1.623,56	97,0	322,80	3.928,46	2.304,90
132	175	96,2	160,09	1.948,27	97,0	264,61	3.220,34	1.272,07
150	200	96,2	181,92	2.213,95	97,0	300,70	3.659,48	1.445,53

Fonte: O próprio autor.

Os números em negrito nas tabelas 6.7 a 6.9 destacam a economia proveniente da utilização dos motores de classe IR5 frente aos de classe IR4, que pode chegar a pouco mais de 81 mil reais em um ano nas condições já especificadas no item 6.

É importante salientar mais uma vez que estes valores não são garantia de economia dada pela empresa e não se aplicam a todos os casos. Cada regime de trabalho levará a resultados diferentes e para verificar o tempo médio de compensação, é necessário consultar o preço de cada máquina com o fabricante.

7 PONTO ÓTIMO DE OPERAÇÃO DE MIT's

Investimentos em soluções de acionamentos baseadas em motores de ímãs permanentes são normalmente elevadas. A depender da quantidade de motores de indução a serem substituídos, esta troca pode se tornar economicamente inviável. Diante disto, torna-se muito atrativa a ideia de alcançar os maiores níveis de rendimento possíveis para os MIT's, mesmo que seja necessária a aquisição de inversores de frequência.

No sentido de otimizar o acionamento e a operação de máquinas de indução, foi desenvolvido na Universidade Federal do Ceará (UFC) o Programa de Apoio ao Projeto de Acionamentos Baseados em Motores de Indução Trifásicos (PAPAMIT). Neste software são inseridas as informações de placa dos motores, a partir das quais ele calcula os parâmetros da máquina, que foram apresentados na figura 2.13 (DAHER, 2009).

É possível ainda especificar a potência desejada no eixo da máquina e a velocidade de operação. Com estas diretrizes, o PAPAMIT fornece as condições para funcionamento ótimo do motor, ou seja, com a máxima eficiência. Todos os gráficos, da figura 7.1 a figura 7.14, foram obtidos por meio da ferramenta em questão.

Tensão de alimentação, frequência, escorregamento e torque máximo são apenas algumas das informações fornecidas pelo software supracitado. Além disso, é possível obter curvas de rendimento, de tensão, de escorregamento e de outras variáveis.

As tabelas 7.1 a 7.21 contém algumas informações referentes ao modo de operação de alguns motores de indução, considerando solicitações de 25, 50, 70 e 100% da potência nominal e rotações em 40, 50, 70 e 100% da velocidade nominal. Na análise foram incluídas sete máquinas: 0,16 cv (4 polos), 1,5 cv (2 polos), 4,0 cv (8 polos), 5,0 cv (4 polos), 10 cv (4 polos), 15 cv (4 polos) e 50 cv (4 polos).

Escorregamento, tensão aplicada, frequência, rendimento e torque máximo são as variáveis analisadas, tanto para as condições ótimas de operação quanto para situações de controle da razão tensão/frequência (V/F).

7.1 MIT de 0,16 cv – 4 polos

A tabela 7.1 contém as informações de placa deste motor que são mais relevantes para este estudo. A partir da análise da tabela 7.2, percebe-se que o escorregamento nesta máquina é sempre maior para a condição ótima de trabalho, independentemente da potência

mecânica desenvolvida, desde que opere com velocidade nominal. Diante disso, conforme esperado, pode-se verificar na mesma tabela que o torque máximo desenvolvido pela máquina é sempre menor nas condições ótimas, quando comparado com aquele produzido no funcionamento sob controle da razão tensão/frequência.

Das tabelas 7.2 e 7.3, pode-se constatar que as tensões aplicadas nos pontos ótimos de operação variam em um intervalo consideravelmente menor do que quando o motor opera controlado de modo escalar.

Vale destacar o comportamento praticamente constante do rendimento ótimo da máquina quando a mesma opera com velocidade constante e diferentes demandas mecânicas. Isto já não acontece quando a demanda é fixa e a velocidade é variável, mas em todos os casos abordados o rendimento na operação ótima é superior ao obtido em outras condições e, inclusive, supera a eficiência nominal em até 4,59%.

As figuras 7.1 e 7.2 ilustram, respectivamente, o comportamento da eficiência e da tensão do motor quando a demanda é igual a 30% da potência nominal.

Tabela 7.1 – Dados de placa do MIT de 0,16 cv – 4 polos

MIT - 0,16 cv - 4 Polos					
Potência nominal (W)	Velocidade nominal (rpm)	Velocidade do rotor (rpm)	Escorregamento nominal (%)	Rendimento Nominal (%)	Fator de potência
121,1	1800	1715	4,72	61,0	0,64

Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.2 – Parâmetros do MIT de 0,16 cv, 4 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas

Parâmetros	Velocidade: 1715 rpm							
	25% da potência nom.		50% da potência nom.		70% da potência nom.		100% da potência nom.	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	9,00	1,14	9,00	2,30	9,00	3,25	9,00	4,72
V (Volts)	85,34	212,0	120,7	214,5	142,8	216,7	170,7	220,0
f (Hertz)	62,82	57,82	62,82	58,51	62,82	59,09	62,82	60,00
η (%)	65,59	32,50	65,59	47,87	65,59	54,92	65,59	61,00
Tmax	0,43	2,94	0,86	2,96	1,20	2,99	1,72	3,02

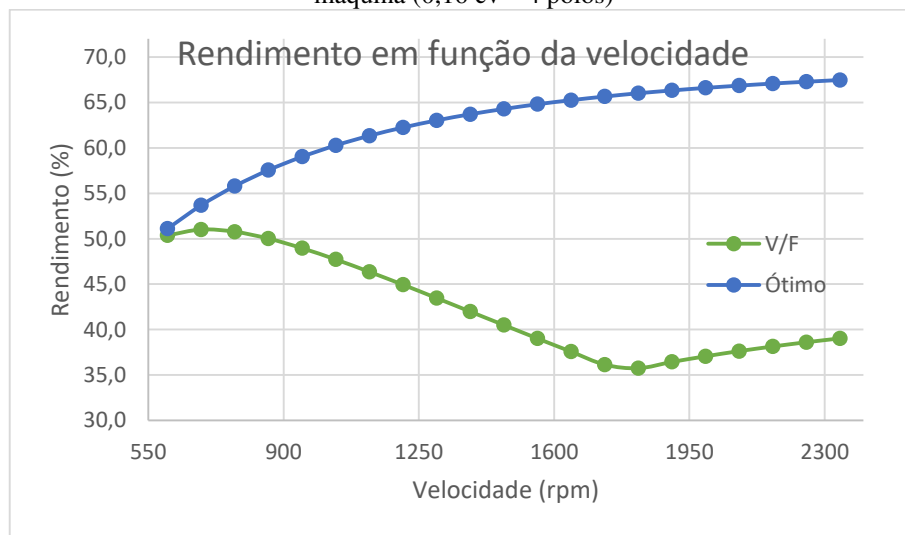
Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.3 – Parâmetros do MIT de 0,16 cv, 4 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades

Parâmetros	Demanda: 30% da potência nominal (36,33 W)							
	40% da vel. nom. (686 rpm)		50% da vel. nom. (858 rpm)		70% da vel. nom. (1201 rpm)		100% da vel. nom. (1715 rpm)	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	14,65	9,55	12,65	5,84	10,45	2,85	9,00	1,37
V (Volts)	80,72	92,69	83,87	111,4	88,85	151,1	93,48	212,5
f (Hertz)	26,79	25,28	32,74	30,37	44,71	41,21	62,82	57,96
η (%)	53,66	51,02	57,50	50,05	62,17	45,07	65,59	36,40
Tmax	1,02	1,43	0,89	1,70	0,70	2,23	0,52	2,94

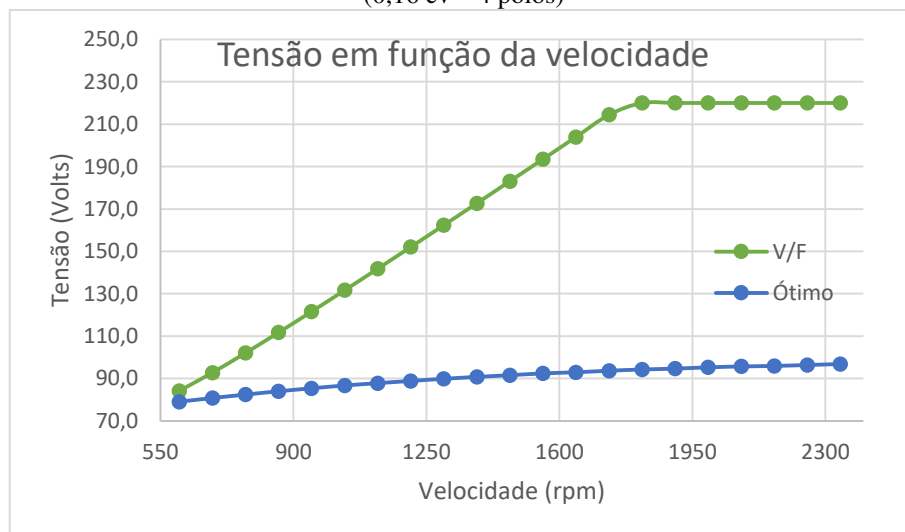
Fonte: O próprio autor.

Figura 7.1 – Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (0,16 cv – 4 polos)



Fonte: O próprio autor.

Figura 7.2 – Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (0,16 cv – 4 polos)



Fonte: O próprio autor.

7.2 MIT de 1,5 cv – 2 polos

As informações de placa deste motor mais relevantes para este trabalho são apresentadas na tabela 7.4. Semelhantemente ao que acontece no item 7.1, percebe-se com os dados da tabela 7.5 que o escorregamento da máquina em questão é sempre maior nas condições ótimas de trabalho, para qualquer potência mecânica solicitada, desde que opere com velocidade nominal. Conforme esperado, pode-se verificar na mesma tabela que o torque máximo desenvolvido pela máquina é sempre maior nas condições de controle da razão tensão/frequência.

Da tabela 7.5 é verificado que a tensão aplicada a este motor nos pontos ótimos de operação são sempre menores do que quando o mesmo opera controlado de modo escalar.

Vale destacar, a partir da análise das tabelas 7.5 e 7.6, que os níveis de eficiência alcançados em condições ótimas chegam a valores bastante superiores que aqueles apresentados na operação cujo controle atua sobre a tensão e sobre a frequência. Inclusive, o rendimento chega a ultrapassar em apenas 0,09% o valor nominal.

As figuras 7.3 e 7.4 ilustram, respectivamente, o comportamento da eficiência e da tensão do MIT de 1,5 cv quando a demanda é igual a 30% da potência nominal.

Tabela 7.4 – Dados de placa do MIT de 1,5 cv – 2 polos

MIT - 1,5 cv - 2 Polos					
Potência nominal (W)	Velocidade nominal (rpm)	Velocidade do rotor (rpm)	Escorregamento nominal (%)	Rendimento Nominal (%)	Fator de potência
1105,68	3600	3400	5,56	83,0	0,87

Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.5 – Parâmetros do MIT de 1,5 cv, 2 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas

Parâmetros	Velocidade: 3400 rpm							
	25% da potência nom.		50% da potência nom.		70% da potência nom.		100% da potência nom.	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	5,00	1,36	5,00	2,74	5,00	3,86	5,60	5,56
V (Volts)	115,1	210,6	162,8	213,6	192,6	216,1	219,3	220,0
f (Hertz)	59,65	57,45	59,65	58,26	59,65	58,94	60,03	60,00
η (%)	83,09	71,52	83,09	80,58	83,09	82,62	82,99	83,00
Tmax	3,99	14,10	7,98	14,21	11,17	14,30	14,34	14,45

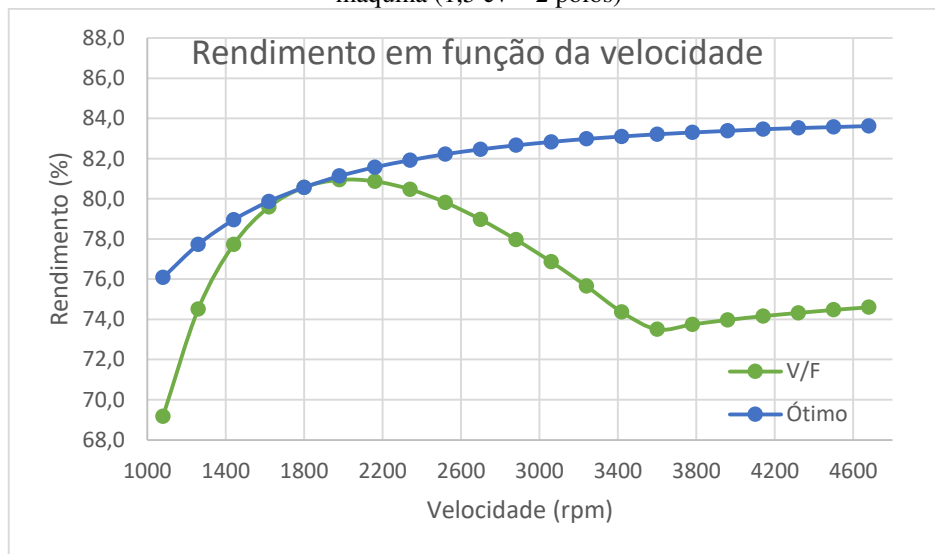
Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.6 – Parâmetros do MIT de 1,5 cv, 2 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades

Parâmetros	Demanda: 30% da potência nominal (331,7 W)							
	40% da vel. nom. (1360 rpm)		50% da vel. nom. (1700 rpm)		70% da vel. nom. (2380 rpm)		100% da vel. nom. (3400 rpm)	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	6,75	10,59	6,05	6,69	5,40	3,36	5,00	1,64
V (Volts)	110,9	92,95	116,1	111,3	121,9	150,5	126,1	211,2
f (Hertz)	24,31	25,35	30,16	30,36	41,93	41,05	59,65	57,61
η (%)	78,45	76,49	80,20	80,12	81,99	80,34	83,09	74,50
Tmax	11,67	7,81	9,96	9,09	7,27	11,39	4,79	14,12

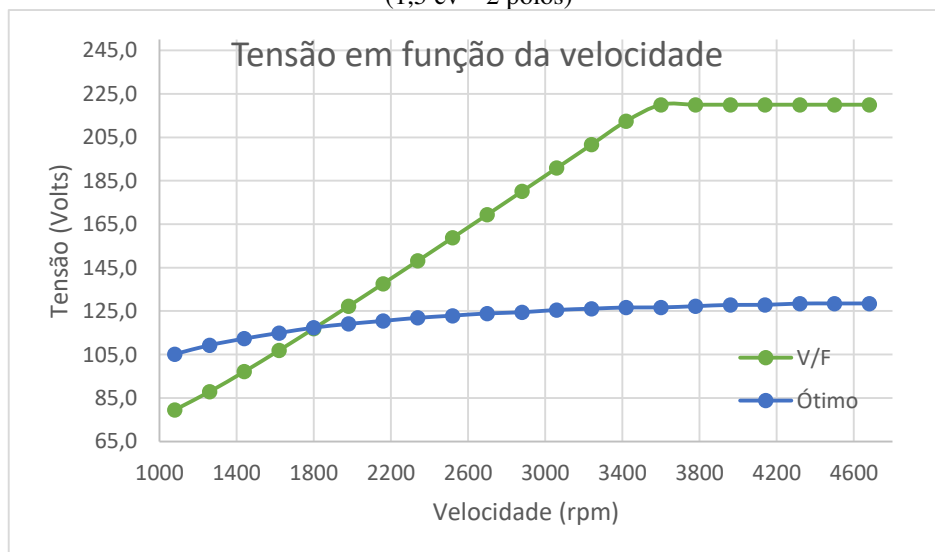
Fonte: O próprio autor.

Figura 7.3 – Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (1,5 cv – 2 polos)



Fonte: O próprio autor.

Figura 7.4 – Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (1,5 cv – 2 polos)



Fonte: O próprio autor.

7.3 MIT de 4,0 cv – 8 polos

Os dados de placa deste MIT são apresentados na tabela 7.7, seguindo o mesmo padrão dos itens 7.1 e 7.2. Este é o único motor de 8 polos considerado neste capítulo. Com relação ao escorregamento ótimo desta máquina, em todos os casos analisados, o mesmo é maior que aquele obtido com o controle da razão V/F, mesmo quando a máquina opera com diferentes velocidades e demandas. Por conta disso, conforme já citado, o torque máximo extraído do motor é menor nos pontos de operação ótima. Estas informações podem ser confirmadas a partir da análise do conteúdo da tabela 7.8.

O rendimento nominal é de 81,3%, mas este valor é superado em até 0,99%, como mostram os valores contidos nas tabelas 7.8 e 7.9. É interessante salientar o comportamento praticamente constante da eficiência ótima da máquina quando a mesma opera com velocidade fixa e diferentes demandas mecânicas. Isto já não acontece quando a demanda é fixa e a velocidade é variável, mas em todos os casos abordados o rendimento na operação ótima é superior ao obtido nas outras condições.

Pode-se também constatar que as tensões aplicadas nos pontos ótimos de operação variam em um intervalo consideravelmente menor do que quando o motor opera controlado de modo escalar, mas apenas para as condições de funcionamento com demanda fixa.

As figuras 7.5 e 7.6 ilustram, respectivamente, o comportamento do rendimento e da tensão do motor quando a potência mecânica desenvolvida é igual a 30% da potência nominal.

Tabela 7.7 – Dados de placa do MIT de 4,0 cv – 8 polos

MIT - 4,0 cv - 8 Polos					
Potência nominal (W)	Velocidade nominal (rpm)	Velocidade do rotor (rpm)	Escorregamento nominal (%)	Rendimento Nominal (%)	Fator de potência
2943,89	900	870	3,33	81,3	0,72

Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.8 – Parâmetros do MIT de 4,0 cv, 8 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas

Parâmetros	Velocidade: 870 rpm							
	25% da potência nom.		50% da potência nom.		70% da potência nom.		100% da potência nom.	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	4,80	0,82	4,80	1,64	4,80	2,31	4,80	3,33
V (Volts)	93,80	214,4	132,6	216,2	157,0	217,7	187,6	220,0
f (Hertz)	60,92	58,48	60,92	58,97	60,92	59,37	60,92	60,00
η (%)	82,29	60,74	82,29	74,01	82,29	78,39	82,29	81,30
Tmax	25,86	144,8	51,71	145,2	72,40	145,5	103,4	146,0

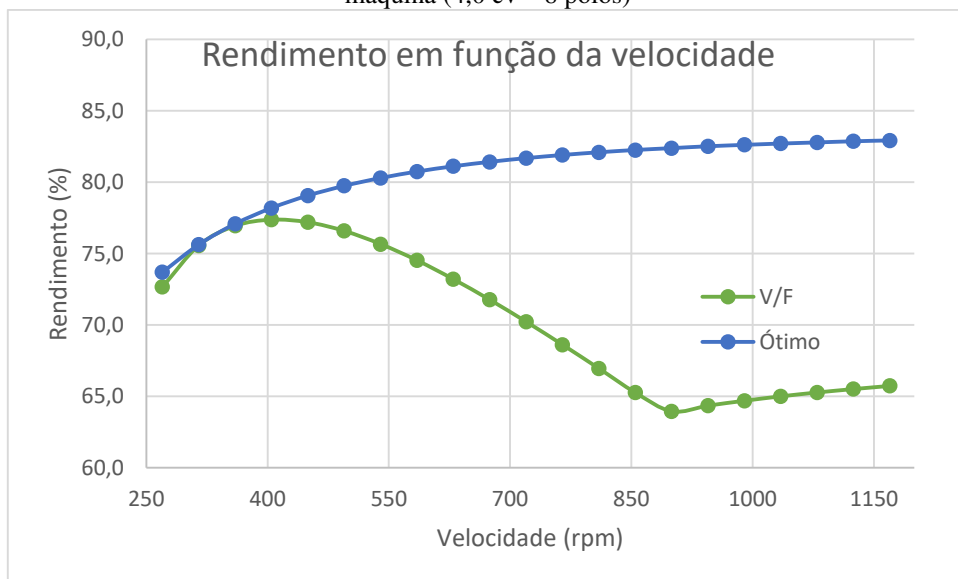
Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.9 – Parâmetros do MIT de 4,0 cv, 8 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades

Parâmetros	Demanda: 30% da potência nominal (883,17 W)							
	40% da vel. nom. (348 rpm)		50% da vel. nom. (435 rpm)		70% da vel. nom. (609 rpm)		100% da vel. nom. (870 rpm)	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	6,80	6,35	6,05	4,00	5,30	2,02	4,80	0,98
V (Volts)	88,31	90,83	92,70	110,8	98,16	151,9	102,7	214,8
f (Hertz)	24,89	24,77	30,87	30,21	42,87	41,44	60,92	58,57
η (%)	76,73	76,69	78,79	77,31	80,95	73,83	82,29	64,69
Tmax	91,34	97,28	74,19	109,3	50,44	127,5	31,03	144,9

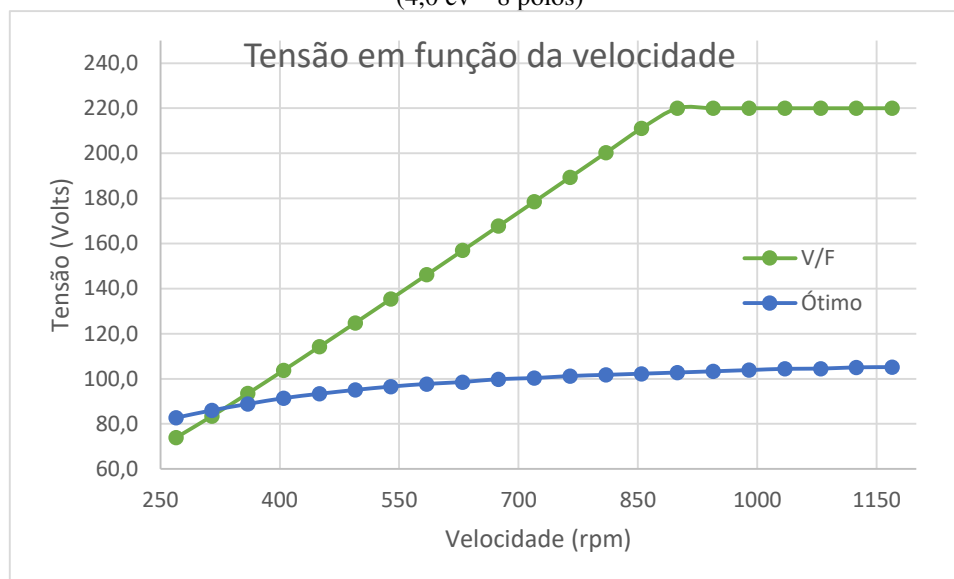
Fonte: O próprio autor.

Figura 7.5 – Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (4,0 cv – 8 polos)



Fonte: O próprio autor.

Figura 7.6 – Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (4,0 cv – 8 polos)



Fonte: O próprio autor.

7.4 MIT de 5,0 cv – 4 polos

A tabela 7.10 contém os dados nominais deste motor e as tabelas 7.11 e 7.12 registram os parâmetros da máquina para as dadas condições de trabalho.

O escorregamento deste MIT é menor quando o mesmo opera com velocidade nominal e com controle da razão V/F, mesmo que com diferentes demandas. Uma das consequências diretas disto, como já citado, é um menor torque máximo extraído do motor nos pontos de operação ótima. Estas informações podem ser confirmadas a partir da análise do conteúdo da tabela 7.11.

Assim como acontece com o MIT de 4,0 cv tratado no item 7.3, quando a demanda do MIT de 5,0 cv é igual a sua potência nominal e o mesmo opera com 40, 50 ou 70% de sua velocidade nominal, o torque máximo é maior nas condições ótimas de funcionamento. Já na velocidade nominal, o torque desenvolvido com o controle escalar é superior, conforme mostrado na tabela 7.12.

O rendimento nominal é de 87,5%, podendo chegar a 87,65% (ver tabela 7.12). Destaca-se também o valor praticamente fixo da eficiência ótima da máquina quando a mesma opera com velocidade constante e diferentes demandas de potência mecânica. Nos casos em que a demanda é fixa e a velocidade é variável isto não ocorre, mas em todos os casos considerados o rendimento na operação ótima é superior ao obtido nas outras condições.

As tensões aplicadas nos pontos ótimos de operação apresentam uma variação de aproximadamente 100 volts, enquanto que o intervalo vai de 103,8 a 220 volts quando o motor

opera controlado de modo escalar.

As figuras 7.7 e 7.8 ilustram, respectivamente, o comportamento do rendimento e da tensão do motor quando a potência mecânica desenvolvida e a velocidade do mesmo são iguais aos valores de placa.

Tabela 7.10 – Dados de placa do MIT de 5,0 cv – 4 polos

MIT - 5 cv - 4 Polos					
Potência nominal (W)	Velocidade nominal (rpm)	Velocidade do rotor (rpm)	Escorregamento nominal (%)	Rendimento Nominal (%)	Fator de potência
3696,00	1800	1765	1,94	87,5	0,80

Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.11 – Parâmetros do MIT de 5,0 cv, 4 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas

Parâmetros	Velocidade: 1765 rpm							
	25% da potência nom.		50% da potência nom.		70% da potência nom.		100% da potência nom.	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	2,30	0,47	2,30	0,95	2,30	1,34	2,30	1,94
V (Volts)	102,0	216,7	144,3	217,8	170,7	218,6	204,1	220,0
f (Hertz)	60,22	59,11	60,22	59,40	60,22	59,63	60,22	60,00
η (%)	87,65	73,77	87,65	83,41	87,65	86,09	87,65	87,50
Tmax	18,85	87,70	37,71	87,85	52,79	87,98	75,41	88,18

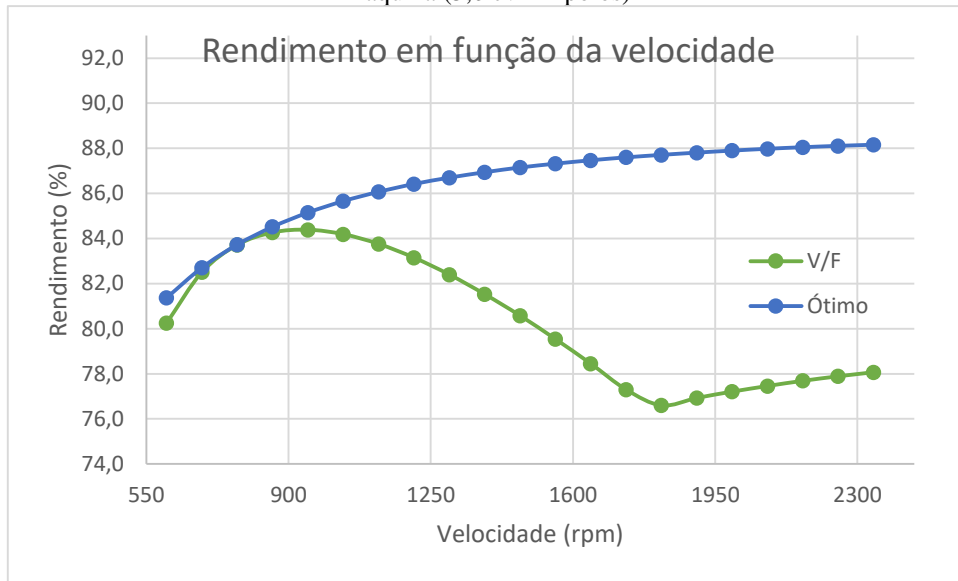
Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.12 – Parâmetros do MIT de 5,0 cv, 4 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades

Parâmetros	Demanda: 30% da potência nominal (1.108,8 W)							
	40% da vel. nom. (706 rpm)		50% da vel. nom. (883 rpm)		70% da vel. nom. (1236 rpm)		100% da vel. nom. (1765 rpm)	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	5,05	1,49	4,80	0,95	4,55	0,93	4,40	0,93
V (Volts)	100,3	175,2	102,8	217,9	105,8	220,0	108,7	220,0
f (Hertz)	49,57	47,78	61,83	59,43	86,33	83,18	123,1	118,8
η (%)	81,60	70,71	82,33	64,20	83,00	66,00	83,34	67,26
Tmax	41,70	135,0	30,27	145,6	17,93	82,80	9,92	43,41

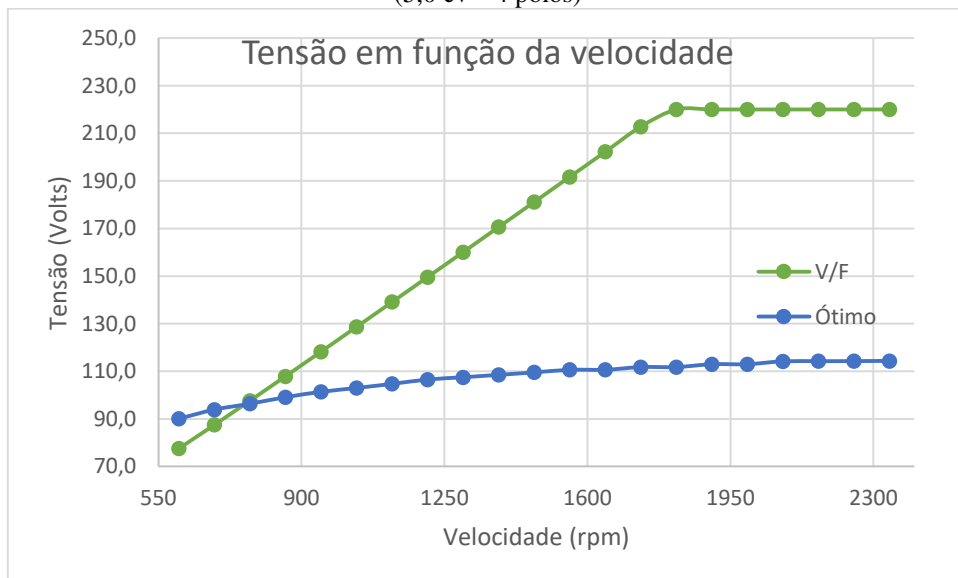
Fonte: O próprio autor.

Figura 7.7 – Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (5,0 cv – 4 polos)



Fonte: O próprio autor.

Figura 7.8 – Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (5,0 cv – 4 polos)



Fonte: O próprio autor.

7.5 MIT de 10,0 cv – 4 polos

Os dados nominais deste motor de 10 cv são apresentados na tabela 7.13. Já as tabelas 7.14 e 7.15 estão registrados os parâmetros da máquina para as dadas condições de trabalho.

O escorregamento deste MIT é maior quando o mesmo opera com velocidade nominal nos pontos ótimos, mesmo que com diferentes demandas. Em decorrência disto, como

já citado, um menor torque máximo é extraído do motor nestas condições de operação. Estas informações podem ser confirmadas a partir da análise do conteúdo da tabela 7.14.

Assim como acontece com os MIT's tratados nos itens 7.3 e 7.4, quando o motor de 10,0 cv opera com frações de 50, 50 e 70% de sua velocidade nominal e demanda igual a sua potência nominal, o torque máximo é maior nas condições ótimas de funcionamento. Já na velocidade 1760 rpm, o toque desenvolvido com o controle escalar é superior, conforme mostrado na tabela 7.15.

Em três das oito situações analisadas o rendimento alcançado superou levemente o rendimento nominal da máquina. A eficiência que consta na placa do motor é de 89,0%, tendo chegado a 89,03% (ver tabela 7.14). É interessante notar também o nível praticamente constante da eficiência ótima da máquina, quando a mesma opera com velocidade constante e diferentes demandas de potência mecânica. Em todos os casos considerados o rendimento na operação ótima é superior ou equivalente ao obtido nas outras condições.

As tensões aplicadas a máquina, quando a mesma opera nos pontos ótimos, chegam a apresentar uma variação de aproximadamente 180 volts (tabela 7.14). Quando o funcionamento é baseado no controle da razão V/F, este intervalo de variação pode ir de 186,8 a 380,0 volts, como pode ser constatado na tabela 7.15.

O comportamento do rendimento e da tensão do motor, quando a potência mecânica desenvolvida e a velocidade de funcionamento são iguais aos valores de placa, são representados nas figuras 7.9 e 7.10.

Tabela 7.13 – Dados de placa do MIT de 10,0 cv – 4 polos

MIT - 10 cv - 4 Polos					
Potência nominal (W)	Velocidade nominal (rpm)	Velocidade do rotor (rpm)	Escorregamento nominal (%)	Rendimento Nominal (%)	Fator de potência
7469,59	1800	1760	2,22	89,0	0,83

Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.14 – Parâmetros do MIT de 10,0 cv, 4 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas

Parâmetros	Velocidade: 1760 rpm							
	25% da potência nom.		50% da potência nom.		70% da potência nom.		100% da potência nom.	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	2,05	0,53	2,05	1,08	2,05	1,53	2,25	2,22
V (Volts)	197,0	373,5	278,6	375,6	329,6	377,3	377,9	380,0
f (Hertz)	59,89	58,98	59,89	59,31	59,89	59,58	60,02	60,00
η (%)	89,03	79,91	89,03	87,02	89,03	88,61	88,99	89,00
Tmax	43,97	162,1	87,95	162,4	123,1	162,7	161,3	163,1

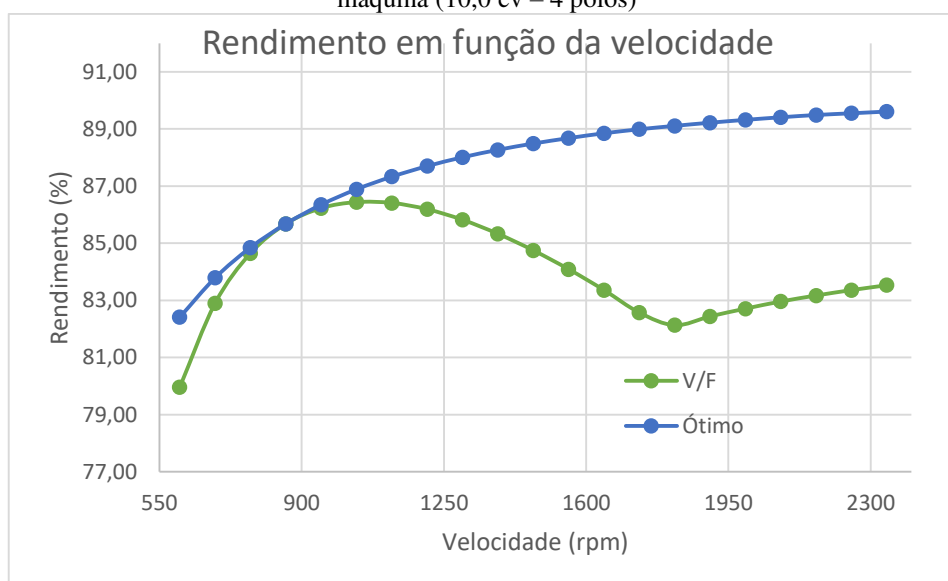
Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.15 – Parâmetros do MIT de 10,0 cv, 4 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades

Parâmetros	Demanda: 30% da potência nominal (2.240,88 W)							
	40% da vel. nom. (704 rpm)		50% da vel. nom. (880 rpm)		70% da vel. nom. (1232 rpm)		100% da vel. nom. (1760 rpm)	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	3,15	4,35	2,75	2,68	2,30	1,33	2,05	0,64
V (Volts)	178,0	155,4	188,8	190,9	204,6	263,6	215,8	373,9
f (Hertz)	24,23	24,53	30,16	30,14	42,03	41,62	59,89	59,04
η (%)	84,02	83,32	85,84	85,84	87,79	86,10	89,03	82,29
Tmax	133,7	100,3	112,7	115,3	82,35	138,7	52,77	162,2

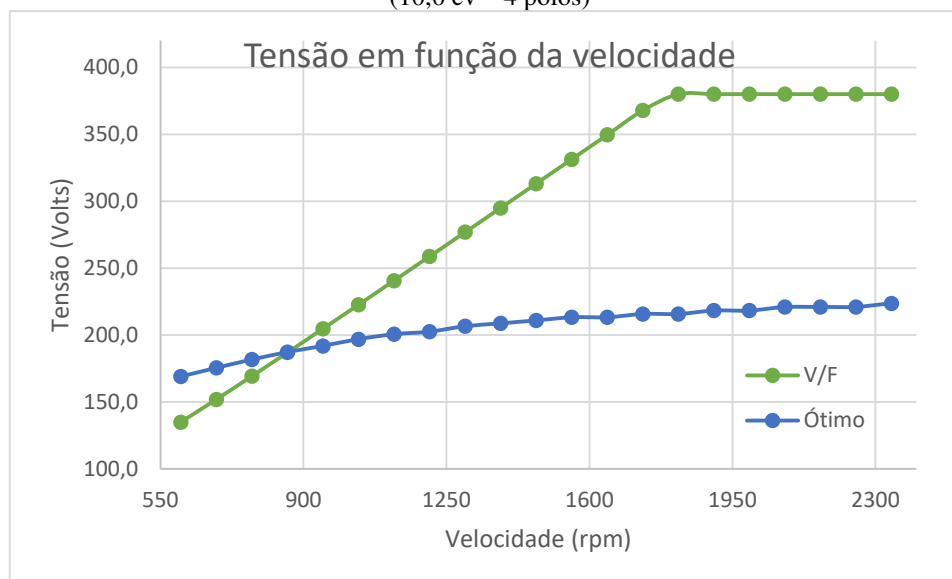
Fonte: O próprio autor.

Figura 7.9 – Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (10,0 cv – 4 polos)



Fonte: O próprio autor.

Figura 7.10 – Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (10,0 cv – 4 polos)



Fonte: O próprio autor.

7.6 MIT de 15,0 cv – 4 polos

Os dados nominais deste MIT de 15 cv estão contidos na tabela 7.16. Os parâmetros da máquina para as condições de trabalho analisadas estão registrados nas tabelas 7.17 e 7.18.

Quando o este motor opera com velocidade nominal nos pontos ótimos, mesmo que com diferentes demandas, seu escorregamento é maior do que quando opera sob controle de tensão e frequência. Em decorrência disto, como já citado, um menor torque máximo é extraído do motor nas primeiras condições de operação citadas. Estas informações podem ser confirmadas a partir da análise dos dados da tabela 7.174.

Caso este motor de 15,0 cv opere com frações de 50, 50 e 70% de sua velocidade nominal e demanda igual a sua potência nominal, o maior torque máximo é obtido nas condições ótimas de funcionamento. Verificando a tabela 7.18, constatou-se que na velocidade 1760 rpm o torque desenvolvido com o controle escalar é superior àquele produzido no ponto ótimo correspondente.

O rendimento alcançado superou levemente o rendimento nominal da máquina em cinco das oito situações analisadas. A eficiência que consta na placa do motor é de 87,0% e chegou a 87,40% (ver tabelas 7.17 e 7.18). Vale destacar o comportamento quase invariante da eficiência ótima da máquina, quando a mesma opera com velocidade constante e diferentes demandas de potência mecânica. O rendimento na operação ótima é superior ao obtido nas outras condições em todos os casos considerados.

Quando este motor trabalha nos pontos ótimos as tensões aplicadas chegam a variar

entre 97,79 e 195,6 volts (tabela 7.17). Quando o funcionamento é baseado no controle da razão V/F, este intervalo de variação pode ir de 104,9 a 220,0 volts, como pode ser constatado na tabela 7.18.

As figuras 7.11 e 7.12 ilustram o comportamento do rendimento e da tensão do motor, quando a potência mecânica desenvolvida e a velocidade de funcionamento são iguais aos valores de placa.

Tabela 7.16 – Dados de placa do MIT de 15,0 cv – 4 polos

MIT - 15 cv - 4 Polos					
Potência nominal (W)	Velocidade nominal (rpm)	Velocidade do rotor (rpm)	Escorregamento nominal (%)	Rendimento Nominal (%)	Fator de potência
10785,14	1800	1755	2,50	87,0	0,83

Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.17 – Parâmetros do MIT de 15,0 cv, 4 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas

Parâmetros	Velocidade: 1755 rpm							
	25% da potência nom.		50% da potência nom.		70% da potência nom.		100% da potência nom.	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	3,25	0,61	3,25	1,23	3,25	1,73	3,25	2,50
V (Volts)	97,79	215,8	138,3	217,2	163,6	218,3	195,6	220,0
f (Hertz)	60,47	58,86	60,47	59,23	60,47	59,53	60,47	60,00
η (%)	87,40	71,68	87,40	82,10	87,40	85,17	87,40	87,00
Tmax	49,40	252,4	98,79	252,7	138,3	253,0	197,6	253,5

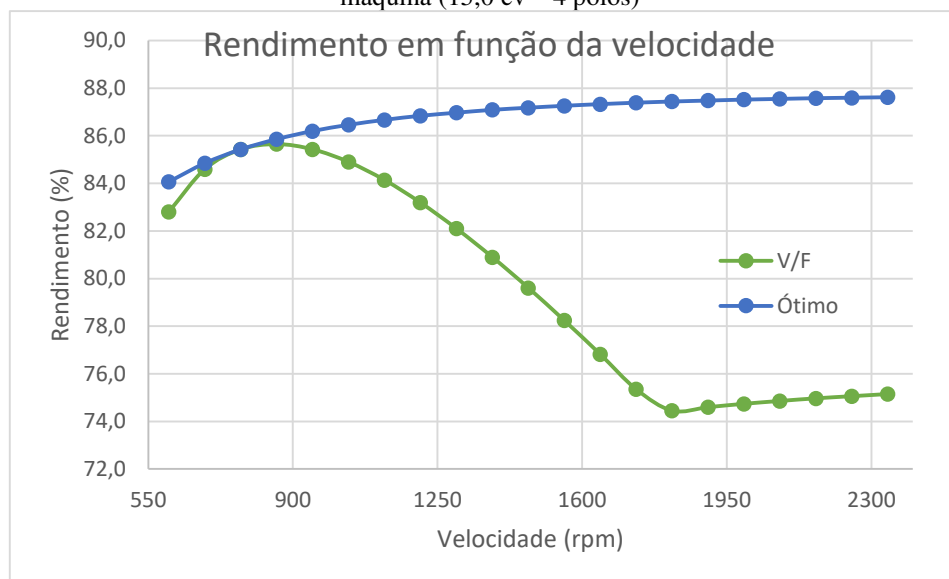
Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.18 – Parâmetros do MIT de 15,0 cv, 4 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades

Parâmetros	Demanda: 30% da potência nominal (3.235,5 W)							
	40% da vel. nom. (702 rpm)		50% da vel. nom. (878 rpm)		70% da vel. nom. (1229 rpm)		100% da vel. nom. (1755 rpm)	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	4,05	4,74	3,75	2,99	3,45	1,51	3,25	0,73
V (Volts)	96,50	90,07	99,92	110,6	103,9	152,5	107,1	216,1
f (Hertz)	24,39	24,57	30,41	30,17	42,43	41,59	60,47	58,93
η (%)	84,97	84,80	85,94	85,63	86,87	82,95	87,40	74,94
Tmax	215,4	185,7	164,4	204,1	103,1	229,7	59,28	252,5

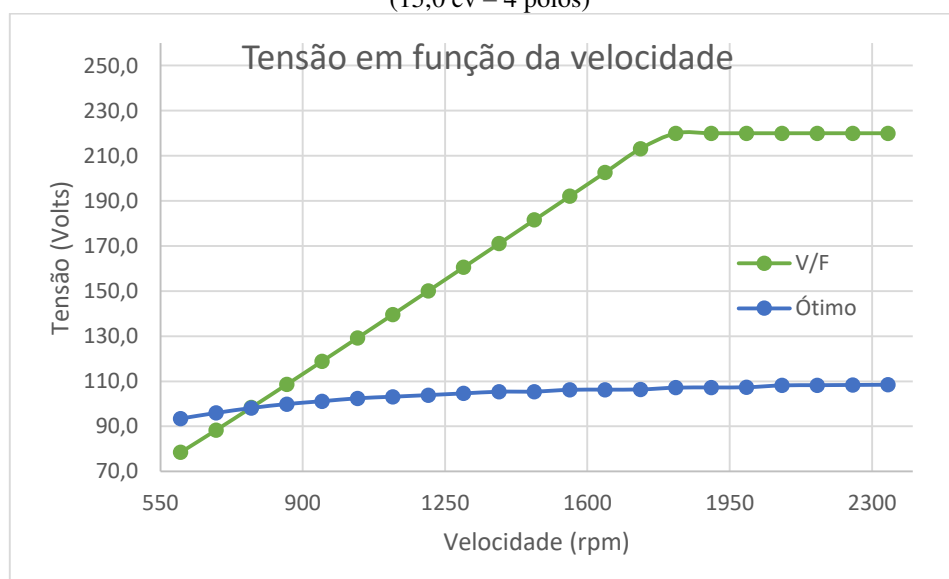
Fonte: O próprio autor.

Figura 7.11 – Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (15,0 cv – 4 polos)



Fonte: O próprio autor.

Figura 7.12 – Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (15,0 cv – 4 polos)



Fonte: O próprio autor.

7.7 MIT de 50,0 cv – 4 polos

Seguindo o mesmo padrão dos motores já analisados, alguns dados nominais deste MIT de 50 cv estão contidos na tabela 7.19. Os parâmetros desta máquina para as condições de trabalho analisadas estão registrados nas tabelas 7.20 e 7.21.

A partir da análise da tabela 7.20, percebe-se que o escorregamento nesta máquina é sempre maior para a condição ótima de trabalho, independentemente da potência mecânica

desenvolvida, desde que opere com velocidade nominal. Como consequência direta deste fato, pode-se verificar na mesma tabela que o torque máximo desenvolvido pelo motor é sempre menor nas condições ótimas, quando comparado com aquele obtido em funcionamento sob controle da razão tensão/frequência.

Das tabelas 7.20 e 7.21, pode-se constatar que as tensões aplicadas, nas condições de operação em que a razão V/F é controlada, variam em um intervalo pouco maior do que quando o motor opera nos pontos ótimos.

Vale destacar o comportamento praticamente constante do rendimento ótimo da máquina quando a mesma opera com velocidade fixa e diferentes demandas mecânicas. Isto já não acontece quando a demanda é fixa e a velocidade é variável, mas em todos os casos abordados o rendimento na operação ótima é superior ao obtido em outras condições e, inclusive, chega a superar a eficiência nominal de forma muito discreta

As figuras 7.13 e 7.14 ilustram, respectivamente, o comportamento da eficiência e da tensão do motor quando a demanda e a velocidade do mesmo são iguais aos valores de placa.

Tabela 7.19 – Dados de placa do MIT de 50,0 cv – 4 polos

MIT - 50 cv - 4 Polos					
Potência nominal (W)	Velocidade nominal (rpm)	Velocidade do rotor (rpm)	Escorregamento nominal (%)	Rendimento Nominal (%)	Fator de potência
37181,46	1800	1775	1,39	94,6	0,87

Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.20 – Parâmetros do MIT de 50,0 cv, 4 polos, operando com velocidade fixa e diferentes demandas

Parâmetros	Velocidade: 1775 rpm							
	25% da potência nom.		50% da potência nom.		70% da potência nom.		100% da potência nom.	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	1,45	0,34	1,45	0,68	1,45	0,96	1,45	1,39
V (Volts)	130,2	262,8	184,1	263,7	217,8	264,4	260,3	265,6
f (Hertz)	60,04	59,37	60,04	59,57	60,04	59,74	60,04	60,00
η (%)	94,61	88,66	94,61	93,12	94,61	94,17	94,61	94,60
Tmax	180,2	750,6	360,5	750,8	504,6	751,0	720,9	751,3

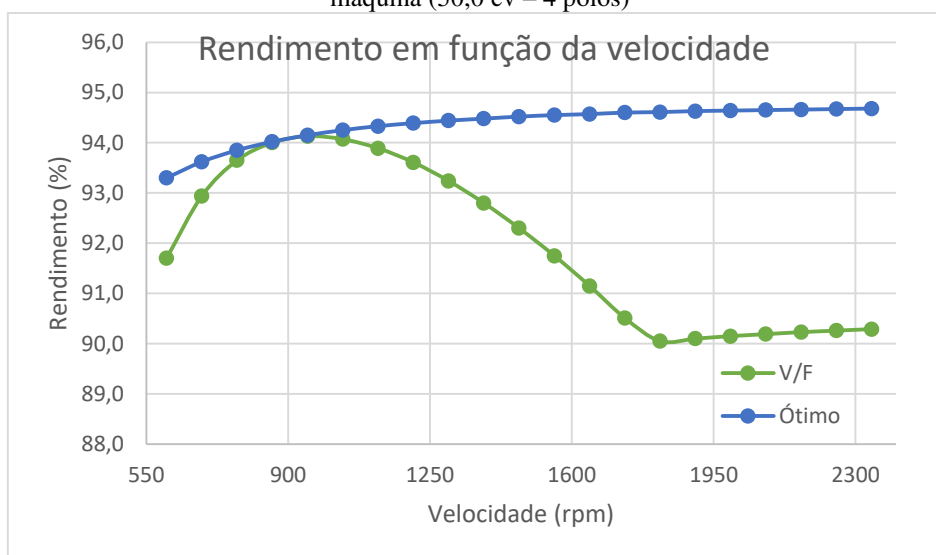
Fonte: O próprio autor.

Tabela 7.21 – Parâmetros do MIT de 50,0 cv, 4 polos, operando com demanda fixa e diferentes velocidades

Parâmetros	Demanda: 30% da potência nominal (11.154,4 W)							
	40% da vel. nom. (710 rpm)		50% da vel. nom. (888 rpm)		70% da vel. nom. (1243 rpm)		100% da vel. nom. (1775 rpm)	
	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F	Ponto ótimo	V/F
s (%)	1,70	2,60	1,60	1,65	1,50	0,84	1,45	0,41
V (Volts)	131,2	107,6	135,2	133,2	139,7	185	142,6	263,0
f (Hertz)	24,08	24,30	30,08	30,10	42,06	41,78	60,04	59,41
η (%)	93,69	93,17	94,06	94,06	94,41	93,47	94,61	90,17
T_{max}	1001	662,0	710,9	689,7	407,7	723,6	216,3	750,6

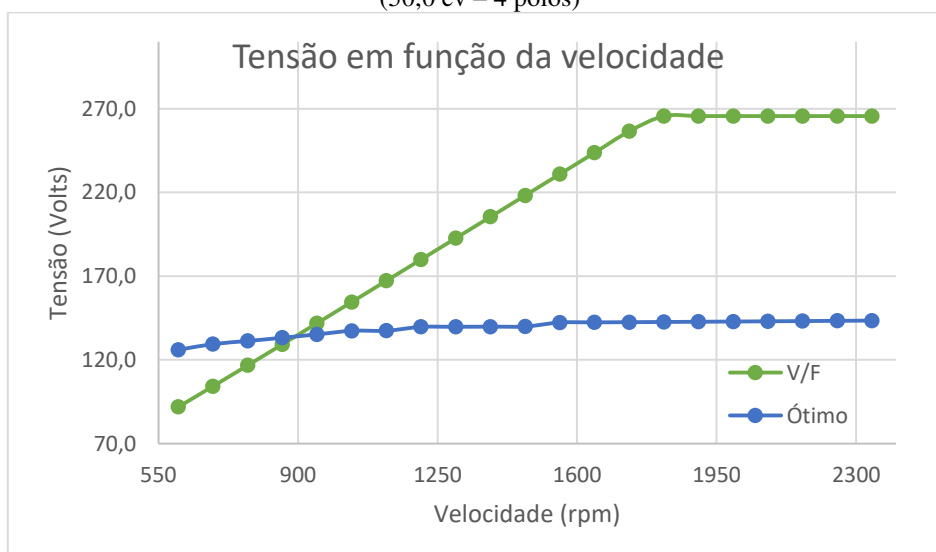
Fonte: O próprio autor.

Figura 7.13 – Rendimento em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (50,0 cv – 4 polos)



Fonte: O próprio autor.

Figura 7.14 – Tensão em função da velocidade para uma demanda igual a 30% da potência nominal da máquina (50,0 cv – 4 polos)



Fonte: O próprio autor.

8. CONCLUSÃO

Conhecer o processo no qual um motor de indução será aplicado é essencial para uma especificação adequada. No entanto, além da potência nominal, da velocidade de operação e do fator de potência, o rendimento é um fator determinante. Isto não apenas pela redução de custos com eletricidade, mas por exigência da legislação brasileira.

Inúmeras indústrias ainda utilizam máquinas de indução que não atendem aos requisitos da Portaria Ministerial Nº 553 de 08 de dezembro de 2005. No sentido de substituir estes dispositivos, este trabalho pode ser útil na orientação das pessoas responsáveis pela seleção de novos motores.

Além disso, entender as diferenças entre as principais normas internacionais pode ser decisivo para uma aquisição bem sucedida. As normas IEC 60034-30 e NEMA MG 1 estandardizam diferentes dimensões de carcaças para máquinas de indução. Esta discussão não foi o foco deste trabalho, mas foi abordada devido sua importância, já que no processo de reposição de um motor pode não haver flexibilidade quanto às dimensões do mesmo.

Com a análise das linhas comerciais foi constatado que o mercado brasileiro está bem suprido de MIT's que atendem às exigências da legislação e que, com destaque, a empresa WEG tem desenvolvido produtos que seguem diretrizes internacionais, representando muito bem o Brasil neste setor.

Considerando o funcionamento das máquinas em questão, sabe-se que o rendimento nominal não é alcançado em todos os pontos de operação. No sentido de sempre obter a eficiência máxima, as simulações propostas foram bem sucedidas, fornecendo níveis de tensão a serem aplicados, torque desenvolvido, escorregamento ótimo e outras informações relevantes para este fim.

As vantagens da utilização de motores de ímãs permanentes também foram elucidadas de forma satisfatória, especialmente a economia com o consumo de energia elétrica quando comparados com os MIT's. Em estudos de caso será possível verificar o tempo de retorno do investimento, ou seja, a permuta das máquinas, e comparar também os gastos com a manutenção de cada uma.

8.1 Sugestões de trabalhos futuros

Este trabalho foi elaborado em um momento de transição da atual legislação brasileira sobre as máquinas de indução, a qual estará vigente até 28 de junho de 2019. A partir

de então serão válidas as diretrizes da Portaria Interministerial Nº 1 de 29 de junho de 2017. Sugere-se, diante disto, então uma nova análise dos catálogos dos fabricantes relacionados neste estudo para comprovar a evolução, em termos de eficiência, das novas máquinas oferecidas.

Sugere-se a elaboração de um trabalho prático com motores de indução trifásicos para comparar os níveis de rendimento ótimo obtidos por meio das simulações com aqueles verificados quando as máquinas trabalham nas condições ótimas.

Além disso, é sugerida uma revisão da padronização da eficiência dos MIT's fabricados para aplicações específicas.

REFERÊNCIAS

- ABB. **Motores de indução trifásicos:** baixa tensão. Osasco: 2018. Disponível em: <http://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=BRCC05_12&LanguageCode=pt&DocumentPartId=&Action=Launch>. Acesso em: 26 mai. 2018.
- ALEIXO, A. S.; *et al.* **Ensaio a vazio e de rotor bloqueado de um motor de indução com e sem tratamento HVOF.** 2014. 27f. Trabalho de conclusão de curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, São José dos Campos.
- ALMEIDA, A. T. DE; FERREIRA, F. J. T. E.; FONG, J. **Standards for efficiency of electric motors:** Permanent magnets synchronous motor technology. *IEEE industry applications magazine*, p. 12-19, Fev. 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/224194916_Standards_for_Efficiency_of_Electric_Motors>. Acesso em: 12 mai. 2018.
- ALMEIDA, A. T. DE; FERREIRA, F. J. T. E.; GE, B. Beyond induction motors – Technology trends to move up efficiency. **IEEE transactions on industry applications**, vol. 50, n. 30, jun. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/270742633_Beyond_Induction_Motors-Technology_Trends_to_Move_Up_Efficiency>. Acesso em: 20 abr. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17094:** Máquinas elétricas girantes – Parte 1: Motores de indução trifásicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- BALDOR Electric Company is now ABB. **ABB**, Zurich, 27 February 2018. Disponível em: <<https://new.abb.com/news/detail/3710/baldor-electric-company-is-now-abb>>. Acesso em: 26 mai. 2018.
- BALDOR. **Standard product catalog.** Fort Smith: Baldor, ABB, 2017. Disponível em: <<https://www.baldor.com/mvc/DownloadCenter/Files/CA501>>. Acesso em: 26 mai. 2018.
- BOLDEA, I.; NASAR, S. A. **The induction machine handbook.** 1 ed. New York: CRC Press, 2002.
- BRUNNER, C. U.; WAIDE, P.; JAKOB, M. **Harmonized Standards for Motors and Systems.** In: 7th International Conference on Energy Efficiency in Motor Driven Systems, 2011, Alexandria: 4E Electric Motor Systems Annex EMSA, Operating Agent.
- CEMEP. **Industry group low voltage motors.** 2018. Disponível em: <<https://cemep.eu/industries/lv-motor/industry>>. Acesso em: 20 mai. 2018.
- Consumo anual de energia elétrica por classe (nacional).** Empresa Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-\(nacional\)](http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-(nacional))>. Acesso em: 31 mar. 2018.

DAHER, S. **Motores elétricos: Características gerais e padronização**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, 2018. Notas de aula.

DAHER, S. **Um sistema baseado em gerador de indução trifásico para aproveitamento da energia eólica**. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

DIAS, J. L. **História da normalização brasileira**. 1 ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/images/pdf/historia-abnt.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

DOPPELBAUER, M. **The invention of the electric motor 1800 – 1854**. Elektrotechnisches Institut, Karlsruhe Institute of Technology. Disponível em: <<https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>>. Acesso em: 24 mar. 2018.

EDISON TECH CENTER. **The electric motor**. Disponível em: <<http://www.edisontechcenter.org/electricmotors.html>>. Acesso em: 24 mar. 2018.

FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. 6 ed. Bookman, 2006. Cap. 6

GRUPO VOGES. **Motores elétricos trifásicos industriais VTop**. Caxias do Sul: 2010. Disponível em: <http://www.voges.com.br/_arquivos/motores/motor_trifasico_linha_vtop.pdf>. Acesso em: 31 mai. 2018.

GRUPO VOGES. **Sobre o grupo**. 2018. Disponível em: <<http://www.voges.com.br/?section=institucional>>. Acesso em: 31 mai. 2018.

HUGHES, A. **Electric motors and drives: Fundamentals, types and applications**. 3 ed. Oxford: Elsevier, 2006. Cap. 5.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034-30: Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code)**, Ed. 1, Nov. 2008.

Jacobi's Motor: The first real electric motor of 1834. Elektrotechnisches Institut, Karlsruhe Institute of Technology. Disponível em: <<https://www.eti.kit.edu/english/1382.php>>. Acesso em: 30 mar. 2018.

KNIGHT, A. **Induction machines: Standards and legislation**. University of Calgary, Schulich School of Engineering, 2018a. Disponível em: <http://people.ucalgary.ca/~aknigh/electrical_machines/induction/i_standard.html>. Acesso em: 28 abr. 2018.

KNIGHT, A. **Induction machines: Induction generator (cage rotor)**. University of Calgary, Schulich School of Engineering, 2018b. Disponível em: <http://people.ucalgary.ca/~aknigh/electrical_machines/induction/i_gen.html>. Acesso em: 26 jun. 2018.

KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 4 ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1982. Cap. 9.

LEWOTSKY, K. **The latest motor efficiency rule hits june 1, 2016 – Now what?**. Motor Control & Motor Association, 2016. Disponível em: <https://www.motioncontrolonline.org/content-detail.cfm/Motion-Control-Technical-Features/The-Latest-Motor-Efficiency-Rule-Hits-June-1-2016-Now-What/content_id/1690>. Disponível em: 21 mai. 2018.

MIKAMI, H.; IDE, K.; *et al.* Historical evolution of motor technology. **Hitachi review**, v.60, n.01, 2011.

MME estabelece novas regras de eficiência para motores elétricos e ventiladores de teto. Ministério de Minas e Energia, Assessoria de Comunicação Social, 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/mme-estabelece-novas-regras-de-eficiencia-para-e-motores-eletricos-e-ventiladores-de-teto;jsessionid=804642534DDEEA3BA80F817A35A0BF4DB.srv155>. Acesso em: 22 mai. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Consultoria Jurídica. **Portaria Interministerial Nº 553, de 08 de dezembro de 2005**. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139097/Portaria_Interministerial_nx_553_2005.pdf/010f203c-195e-4e12-b31d-6a1f00e226e0>. Acesso em: 22 mai. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Gabinete do Ministro. **Portaria Interministerial Nº 1, de 29 de junho de 2017**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/Portaria+Interministerial+n+012017.pdf/943cf542-c207-4a8f-88ce-ff8223d949ad>>. Acesso em: 22 mai. 2018.

MIRCEVSKI, S; *et al.* Development of the induction motor from Tesla until today. **Electronics**, vol. 11, n. 1-2, p. 21, dec. 2007. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.301.2061&rep=rep1&type=pdf#page=22>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

NASAR, S. A. **Handbook of electric machines**. New York: McGraw-Hill, 1987.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. **About NEMA Standards**. 2018. Disponível em: <<https://www.nema.org/Standards/About-Standards/pages/default.aspx>>. Acesso em: 21 mai. 2018.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. **MG 1-2009: Motors and generators**. Rosslyn, 2009.

PATUSCO, J. A. M.; BANDEIRA, D. de O.; *et al.* **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2016**. Secretaria de planejamento e desenvolvimento energético, Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0>>. Acesso em: 31 mar. 2018.

PARRA, C. M. L.; ECHAVARRIA, J. L. R. Normas de eficiência energética de motores de inducción, ¿está preparada latinoamérica?. **Tecno Lógicas**, Medellín, n. 30, p. 117-147, jun. 2013.

POMILIO, J. A. **Eletrônica de potência**. Campinas: Universidade Federal de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Departamento de Sistemas e Energia, 2006. Cap. 1.

SALVADOR, B. Siemens – Novas classes de eficiência para motores de baixa tensão trifásicos (IE). **Revista o electricista**, Porto, 2010, v. 31, p. 74-76. Disponível em: <<https://issuu.com/avawise/docs/oelectricista31>>. Acesso em: 20 mai. 2018.

SARAIVA, C; MALAQUIAS, I.; VALENTE, M. A. O electromagnetismo nos manuais de física. **Revista ensino da física**, Coimbra, 2007, v. 30, p. 40, out. 2007. Disponível em: <https://nautilus.fis.uc.pt/gazeta/revistas/30_2/vol30_2_Ens_Fisica.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2018.

SENS, M. Avanços tecnológicos nos motores elétricos. **Weg em revista**, Jaraguá do Sul, n. 08, p. 11-13, fev. 2001.

SIEMENS. **Sobre a Siemens no Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://www.siemens.com/br/pt/home/a-empresa/sobre-a-siemens.html>>. Acesso em: 26 mai. 2018.

STEPHAN, R. M. **Acionamento, comando e controle de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, 2008. Cap. 6.

WEG. **Regulamentações globais de eficiência para motores elétricos de baixa tensão**. Jaraguá do Sul, WEG, 2017. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h62/hb8/WEG-regulamenta-es-globais-de-eficiencia-para-motores-eletricos-de-baixa-tensao-50065222-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2018.

WEG. **Isto é WEG**. Jaraguá do Sul, 2018a. Disponível em: <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/this-is-weg>>. Acesso em: 22 mai. 2018.

WEG. **W22**: Motor elétrico trifásico. Jaraguá do Sul, 2018b. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h11/h34/WEG-w22-motor-eletrico-trifasico-50023622-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2018.

WEG. **W22 Magnet**: Drive system. Jaraguá do Sul, 2015. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-magnet-drive-system-50020762-brochure-english.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2018.

WHELAN, M; *et al.* **Thomas Davenport**: Inventor of the DC electric motor. Edison Tech Center, 2018. Disponível em: <<http://www.edisontechcenter.org/DavenportThomas.html>>. Acesso em: 26 jun. 2018.