



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

CÁSSIO TERSANDRO DE CASTRO ANDRADE

**UMA ABORDAGEM DETERMINÍSTICA COM ANÁLISE DE INCERTEZA PARA A
VIABILIDADE DE PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA:
ESTUDO DE CASO DE MOTORES ELÉTRICOS**

FORTALEZA

2017

CÁSSIO TERSANDRO DE CASTRO ANDRADE

UMA ABORDAGEM DETERMINÍSTICA COM ANÁLISE DE INCERTEZA PARA A
VIABILIDADE DE PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA:
ESTUDO DE CASO DE MOTORES ELÉTRICOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.

FORTALEZA
2017

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)

A566a Andrade, Cássio Tersandro de Castro.

Uma Abordagem Determinística com Análise de Incerteza para a Viabilidade de Programas de Eficiência Energética : Estudo de Caso de Motores Elétricos / Cássio Tersandro de Castro Andrade. – 2017.

192 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.

1. Eficiência energética. 2. Viabilidade econômica. 3. Regulamentação. 4. LCC. 5. Motores de indução. I. Título.

CDD 621.3

CÁSSIO TERSANDRO DE CASTRO ANDRADE

UMA ABORDAGEM DETERMINÍSTICA COM ANÁLISE DE INCERTEZA PARA A
VIABILIDADE DE PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA:
ESTUDO DE CASO DE MOTORES ELÉTRICOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em: 4/12/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Maria Emilia de Lima Tostes
Universidade Federal do Pará (UFPA)

Profa. Dra. Ruth Pastora Saraiva Leao
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Otacílio da Mota Almeida
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Prof. Dr. Fernando José Teixeira E. Ferreira
Universidade de Coimbra (UC)

Prof. Dr. Iqbal Husain
North Carolina State University (NCSU)

Prof. Dr. Emmanuel Agamloh
North Carolina State University (NCSU)

A Deus.

Aos meus pais, Raimundo e Jesus, a minha
amada esposa Fabíola e a minha adorável filha,
Sofia.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ricardo Thé, pela confiança, força e determinação em todos os momentos do trabalho.

Ao Prof. Emmanuel Agamloh, pela amizade, apoio e orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Maria Emília, Otacílio Almeida, Fernando Ferreira, Iqbal Husain, Fernando Antunes e Ruth Pastora, pela valiosa colaboração.

“...porque poucos, de fato, hão de admitir a realidade – que Deus criou o homem à Sua imagem – e por isso todos os homens da terra são iguais.”

Nikola Tesla

“o homem encontra Deus em tudo, está em contato com ele em tudo e através de tudo”

Sto. Papa João Paulo II

RESUMO

O aumento da eficiência energética de equipamentos de uso final tem sido um objetivo de formuladores de políticas públicas, consumidores, fabricantes, pesquisadores e, desde a crise energética dos anos setenta, de toda a sociedade. Esse objetivo deve ser alcançado com viabilidade econômica, ou seja, os benefícios gerados durante a vida útil do equipamento devem superar os investimentos e custos associados à obtenção da melhoria de performance energética. Esta tese analisa os parâmetros associados a projetos de eficiência energética e propõe uma nova abordagem para a determinação da viabilidade econômica destes projetos, considerando a incerteza associada aos parâmetros de entrada e a sua influência no resultado final. Na análise apresentada são considerados os custos associados à vida útil do equipamento, denominados *Life Cycle Costs* (LCC), e os parâmetros técnicos (eficiência, carregamento, horas de operação) e econômicos (custo da energia, custos ambientais, taxas de desconto e de escalabilidade do custo da energia) associados a estes custos. O método apresentado para a determinação da viabilidade econômica dos projetos de eficiência se baseia em uma análise determinística com análise da incerteza dos parâmetros. Este método foi implementado em um aplicativo para dispositivos móveis, com o objetivo de facilitar o acesso dos resultados da análise de viabilidade econômica a todos os agentes envolvidos no processo de melhoria da eficiência. O aplicativo foi customizado para a análise da viabilidade econômica do aumento de eficiência de motores de indução trifásicos. Por fim, são apresentados os resultados desta abordagem para o projeto, em curso no Brasil, de aumento de eficiência de motores elétricos de indução trifásicos por meio do programa de índices mínimos de eficiência.

Palavras-chave: eficiência energética; viabilidade econômica; regulamentação; LCC; motores de indução, .

ABSTRACT

The increase in end-use equipment's energy efficiency has been a goal for policy makers, consumers, manufacturers, researchers and, since the 1970s energy crisis of the, the whole society. This objective must be achieved with cost-effectiveness; the benefits generated during the equipment's life cycle must exceed the investments and costs associated with this improvement in energy performance. This thesis analyzes the parameters associated with end-use equipments energy efficiency and proposes a new approach to establish the cost-effectiveness of the initiatives to improve it, assessing the uncertainty associated with these parameters and their influence on the final result. The equipment's life cycle costs (LCC) analysis includes the associated technical (efficiency, loading, hours of operation) and economic parameters (energy cost, environmental costs, discount and escalation rates). The method presented is based on a deterministic approach with uncertainty analysis. This method was implemented as a software (app) for android mobile devices in order to allow the access to all of the agents involved in the energy efficiency market. The app was customized for the cost-effectiveness analysis of three-phase induction motors efficiency improvement. The results of this approach are presented for the ongoing minimum efficiency standards performance program in Brazil and also for other situations related to three-phase induction motors.

Keywords: Energy efficiency; Cost-effectiveness methods; MEPS; LCC; Induction motors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Etapas do processo de conversão de energia desde o recurso natural até o uso final.....	25
Figura 2	Evolução da demanda média anual de energia per capita no período 1900-1970 com projeção para o ano 2000.....	26
Figura 3	Evolução na demanda média anual de energia per capita (1971-2015).....	26
Figura 4	Consumo total de energia no Brasil e no mundo.....	27
Figura 5	Evolução do consumo de energia elétrica per capita	28
Figura 6	Políticas de eficiência energética e suas áreas de influência.....	29
Figura 7	Etapas principais no processo de desenvolvimento de programas de etiquetagem e de padrões de equipamentos de uso final.....	31
Figura 8	Principais etapas da análise e definição de programas de padrões.....	32
Figura 9	Cenários do PNEF para o consumo total de eletricidade no Brasil durante o período 2005-2006 e o consumo medido (real) em TWh até 2016.....	33
Figura 10	Entidades brasileiras relacionadas à área de eficiência energética.....	34
Figura 11	Distribuição do consumo de eletricidade no Brasil por uso final	35
Figura 12	Balanco de energia em um sistema termodinâmico.....	40
Figura 13	Processos de conversão de energia.....	41
Figura 14	Distribuição do consumo total de energia no mundo por tipo de combustível.....	42
Figura 15	Geração de eletricidade mundial por tipo de combustível.....	42
Figura 16	Processo de construção de indicadores de eficiência.....	43
Figura 17	Pirâmide de Níveis de Agregação de indicadores de eficiência energética.....	44
Figura 18	Pirâmide de consumo energético por uso final para uma residência.....	45
Figura 19	Indicador físico-termodinâmico aplicado ao transporte de passageiros..	49
Figura 20	Marco regulatório da CGIEE.....	52
Figura 21	MEPS para motores de indução de 4 pólos.....	54
Figura 22	MEPS para transformadores de distribuição com refrigeração a óleo.....	59
Figura 23	Topologia da bancada de ensaios para medição de eficiência de motores elétricos.....	64

Figura 24	Detalhe da bancada de ensaios com a tela de proteção.....	64
Figura 25	Bancada de ensaios de motores elétricos sem a tela de proteção.....	65
Figura 26	Curtos associados à vida útil de um equipamento.....	72
Figura 27	Preço de energia elétrica em diversas partes do mundo.....	76
Figura 28	Preço de Gás Natural em diversas partes do mundo.....	77
Figura 29	Preço de derivados de Petróleo em diversas partes do mundo.....	78
Figura 30	Tarifas de Eletricidade para os setores residencial e industrial válida em diferentes Estados do Brasil.....	78
Figura 31	Evolução da tarifa média de eletricidade para o setor industrial e da taxa de inflação durante o período 1996 -2016.....	79
Figura 32	Distribuição dos custos de LCC em um sistema de bombeamento industrial de médio porte e em um motor elétrico de 15 cv.....	81
Figura 33	Idade atual de motores em operação em 10 diferentes empresas da Suíça.....	88
Figura 34	Dados comparativos entre os valores de vida útil de motores definidos pela IEEE e o resultado de uma amostra feita nos EUA.....	88
Figura 35	Evolução do preço de um motor de indução de 10cv de acordo com a evolução dos índices MEPS.....	92
Figura 36	Métodos para a análise da viabilidade de projetos de eficiência por perspectiva dos participantes.....	95
Figura 37	Definição dos limites de viabilidade econômica para a aplicação do Método NS em um projeto de melhoria de eficiência energética.....	103
Figura 38	Efeito da variação da taxa de desconto (d), taxa de escalada do custo da energia (e), vida útil do motor (n) e custo de energia (C) na curva de viabilidade de um projeto de substituição de motores.....	103
Figura 39	Tela principal do aplicativo Análise de Viabilidade com os resultados de uma análise de uma melhoria de eficiência em um motor de indução de 15cv.....	104
Figura 40	Tela para inclusão das características de operação do equipamento (carregamento, em %, e horas de operação/ano, em h).....	105
Figura 41	Tela explicativa do parâmetro de entrada escalabilidade do preço da Energia (e)	105
Figura 42	Tabela padronizada com níveis de eficiência NEMA Premium para	

	motores de indução.....	106
Figura 43	Tela da análise de sensibilidade após a alternativa no valor do parâmetro de eficiência.....	107
Figura 44	Barra de alteração do parâmetro de entrada Preço da Energia.....	107
Figura 45	Simulação da Incerteza no valor da Eficiência na viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 pólos, do nível IRI para o nível IR2....	110
Figura 46	Simulação da Incerteza no valor da Taxa de Desconto na viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 pólos, do nível IRI para o nível IR2...	110
Figura 47	Simulação da Incerteza no valor da Taxa de Escalada da tarifa de eletricidade na viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 pólos, do nível IRI para o nível IR2.....	111
Figura 48	Simulação da Incerteza no valor da tarifa de eletricidade sobre a viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 pólos, do nível IRI para o nível IR2.....	112
Figura 49	Simulação da Incerteza na vida útil do equipamento sobre a viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 pólos, do nível IRI para o nível IR2.....	113
Figura 50	Simulação da Incerteza do efeito rebote sobre a viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 pólos, do nível IRI para o nível IR2...	114
Figura 51	Evolução da tecnologia do motor de indução trifásico.....	117
Figura 52	Perdas em carga nominal de motores de 10 cv/4 pólos/60 Hz.....	118
Figura 53	Perdas em carga nominal de motores de 15 cv/4 pólos/60 Hz para diferentes níveis MEPS.....	120
Figura 54	Distribuição da produção brasileira de motores elétricos por tipo de motor.....	121
Figura 55	Mercado brasileiro de motores elétricos.....	121
Figura 56	Distribuição das vendas anuais de motores elétricos integrais por faixa de potência.....	122
Figura 57	Eficiência a carga nominal para motores de indução trifásicos e PM/4 pólos/60Hz (Mercado brasileiro).....	125
Figura 58	Valores médios de operação para motores de indução.....	126
Figura 59	Limites de viabilidade para o aumento da eficiência de um motor de indução trifásico de baixa tensão/1,5cv/60 Hz do nível IR2 para IR3.	129

Inclui pontos de operação médios para a Indústria dos EUA, UE e Brasil

Figura 60	Limites de viabilidade para o aumento da eficiência de um motor de indução trifásico de baixa tensão/ 15cv /60 Hz do nível IR2 para IR3. Inclui pontos de operação médios para a Indústria dos EUA, UE e Brasil	130
Figura 61	Limites de viabilidade para o aumento da eficiência de um motor de indução trifásico de baixa tensão/ 50cv /60 Hz do nível IR2 para IR3. Inclui pontos de operação médios para a Indústria dos EUA, UE e Brasil	131
Figura 62	Limites de viabilidade para o aumento da eficiência de um motor de indução trifásico de baixa tensão/ 150cv /60 Hz do nível IR2 para IR3. Inclui pontos de operação médios para a Indústria dos EUA, UE e Brasil.....	131
Figura 63	Comparação do Custo da Energia Economizada para a transição dos níveis IR1 para IR2 com a transição dos níveis IR2 para IR3 no Brasil....	132
Figura 64	Comparação do Custo da Energia Economizada para a transição de níveis MEPS de motores elétricos (IR1 para IR2 e IR2 para IR3) com custos de geração de eletricidade de diversas fontes primárias.....	133
Figura 65	Diagrama do Período de Estudo de um projeto de substituição de um motor em operação.....	135
Figura 66	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 1,5 cv/4 pólos/60 Hz em operação (t_s de 2 a 8 anos) por um Motor IR2.....	137
Figura 67	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 1,5 cv/4 pólos/60 Hz em operação (t_s de 2 a 8 anos) por um Motor IR3.....	138
Figura 68	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 15 cv/4 pólos/60 Hz em operação (t_s de 8 a 15 anos) por um Motor IR3.....	138
Figura 69	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 150 cv/4 pólos/60 Hz em operação (t_s de 2 a 8 anos) por um IR3.....	139
Figura 70	Custos da Energia Economizada para a substituição de motores de indução 4 pólos/60 Hz em operação.....	140
Figura 71	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 1,5 cv/4 pólos/60 Hz em operação ($t_s = 2$ anos) por um Motor IR2 com várias faixas de desconto.....	141

Figura 72	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 1,5 cv/4 pólos/60 Hz em operação ($t_s = 2$ anos) por um Motor IR3 com várias faixas de desconto.....	141
Figura 73	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 15 cv/4 pólos/60 Hz em operação ($t_s = 2$ anos) por um Motor IR3 com várias faixas de desconto.....	142
Figura 74	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 150 cv/4 pólos/60 Hz em operação ($t_s = 2$ anos) por um Motor IR3 com várias faixas de desconto.....	143
Figura 75	Custos da Energia Economizada para a substituição de motores de indução 4 pólos/60 Hz em operação com incentivos.....	143
Figura 76	Curvas de Viabilidade para diferentes preços para a aquisição de um motor Superpremium de 1,5 cv/4 pólos/60 Hz quando comparado a um motor IR3/Premium.....	145
Figura 77	Curvas de Viabilidade para diferentes preços para a aquisição de um motor Superpremium de 15 cv/4 pólos/60 Hz quando comparado a um motor IR3/Premium.....	145
Figura 78	Curvas de Viabilidade para diferentes preços para a aquisição de um motor Superpremium de 50 cv/4 pólos/60 Hz quando comparado a um motor IR3/Premium.....	146
Figura 79	Curvas de Viabilidade para diferentes preços para a aquisição de um motor Superpremium de 150 cv/4 pólos/60 Hz quando comparado a um motor IR3/Premium.....	146
Figura 80	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 1,5 cv/4 pólos/60 Hz por um Motor IR3 com e sem a inclusão do Custo Ambiental no LCC.....	149
Figura 81	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 15 cv/4 pólos/60 Hz por um Motor IR3 com e sem a inclusão do Custo Ambiental no LCC.....	149
Figura 82	Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 150 cv/4 pólos/60 Hz por um Motor IR2 com e sem a inclusão do Custo Ambiental no LCC.....	150
Figura A.1	Curvas de Eficiência a partir dos Métodos Direto e Indireto.....	173

Figura A.2	Curva do Fator de Potência.....	174
Figura A.3	Distribuição de Perdas a Plena Carga do motor de indução de $\frac{1}{2}$ cv.....	174
Figura A.4	Curvas de eficiência a partir dos Métodos Direto com e sem Inversor de Frequência.....	175
Figura A.5	Resultados da medição da eficiência do MIT de $\frac{1}{2}$ cv/4 pólos/60 Hz.....	180

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Índices Mínimo para condicionadores de ar de janela.....	58
Tabela 2.2	Resumo dos MPES aprovados no Brasil.....	60
Tabela 3.1	Tempo médio de operação de motores elétricos.....	73
Tabela 3.2	Análise estatística da variação regional das tarifas de eletricidade no Brasil e das tarifas de eletricidade, Gás Natural e derivados do petróleo no mundo.....	77
Tabela 3.3	Dados de Taxa de Escalada de tarifas de energia do Brasil e dos EUA..	80
Tabela 3.4	Valores típicos de MTBF para equipamentos	82
Tabela 3.5	Impactos ambientais durante a vida útil de motores elétricos operando 4.000 h/anos.....	84
Tabela 3.6	Preços Projetados para as Emissões de Dióxido de Carbono Equivalente por Cenário Político.....	85
Tabela 3.7	Taxas de desconto sociais em prática em diversos países do mundo.....	87
Tabela 3.8	Taxas de desconto individuais em prática em diversos países do mundo	87
Tabela 3.9	Incertezas dos Parâmetros da LCC relacionados a motores elétricos.....	89
Tabela 4.1	Resumo do efeito da Incerteza dos parâmetros de entrada na Viabilidade de um projeto de substituição de MIT.....	114
Tabela 5.1	Análise do consumo de motores elétricos por Setor no Brasil.....	123
Tabela 5.2	Característica de uso energético médio de motores elétricos no Brasil....	124
Tabela 5.3	População estimada e uso energético de motores elétricos no Brasil em 2013.....	124
Tabela 5.4	Distribuição do estoque de motores elétricos por faixa de potência.....	127
Tabela 5.5	Distribuição do estoque de motores elétricos por número de pólos.....	127
Tabela 5.6	Comparação dos aumentos de eficiência e do preço dos motores de indução para a transição MEPS de IR1 para IR2 e de IR2 para IR3.....	133
Tabela 5.7	Economia total de eletricidade para a transição de níveis MEPS de motores elétricos de IR2 para IR3 no Brasil.....	134
Tabela 5.8	Impactos ambientais (Gases de Efeito Estufa) durante a vida do motor (Fabricação, Manutenção, Uso e Descarte).....	147
Tabela A.1	Temperatura especificada para cálculos de eficiência quando a temperatura não é medida na carga nominal da máquina.....	169

Tabela A.2	Dados do Fabricante do motor de indução.....	173
Tabela A.3	Dados do Fabricante Motor PM.....	175
Tabela B.1	Evolução das tarifas de eletricidade industrial dos últimos 20 anos no Brasil comparadas com a taxa de inflação.....	182
Tabela B.2	Análise Estatística da taxa Anual da eletricidade industrial (1996- 2015).....	183

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ABINEE</i>	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>AIRR</i>	Taxa Interna de Retorno Ajustada
<i>ANEEL</i>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>Ao</i>	Valor uniforme de fluxo de caixa
<i>BEN</i>	Balanço Energético Nacional
<i>BNDES</i>	Banco Nacional do Desenvolvimento Social
<i>C</i>	Tarifa da Energia
<i>CA</i>	Corrente alternada
<i>CC</i>	Corrente contínua
<i>C_E</i>	Custos de Energia
<i>C_{Env}</i>	Custos Ambientais
<i>CGIEE</i>	Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética
<i>CI</i>	Custo Iniciais
<i>C_{In}</i>	Custos de Instalação
<i>CNPq</i>	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
<i>C_{O&M}</i>	Custos de Operação e Manutenção
<i>CONPET</i>	Programa Nacional para o Uso Racional de Petróleo e Derivados de Gás
<i>C_p</i>	Consumo padrão
<i>CR</i>	Coefficiente de Refrigeração
<i>Cr</i>	Média do consumo real
<i>C_{Rep}</i>	Custos de substituição
<i>C_{Res}</i>	Custos Residuais
<i>C_t</i>	Consumo de combustível
<i>d</i>	Taxa de desconto
<i>DOE</i>	Departamento de Energia (Department of Energy)
<i>e</i>	Taxa da escalada da energia
<i>Epact</i>	Energy Policy Act
<i>EUA</i>	Estados Unidos da América
<i>FINEM</i>	Financiamento e Empreendimento

<i>FR</i>	Taxa de Falha (Failure Rate)
FREEDM	Future Renewable Electric Energy Delivery and Management System
<i>Ft</i>	Valor do fluxo de caixa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
GNV	Gás Natural Veicular
<i>H</i>	Horas Anuais de Operação
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>Ic</i>	Consumo do forno
<i>IE</i>	Índice de Eficiência (Efficiency Index)
<i>IEC</i>	International Electrotechnical Commission
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>INMETRO</i>	Instituto Nacional de Metrologia
<i>IR</i>	Índice de Rendimento
<i>L</i>	Carregamento (Load)
<i>LAMOTRIZ</i>	Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes
<i>LCC</i>	Life Cycle Cost (Custos do Ciclo de Vida)
<i>Manut</i>	Manutenção
<i>MCT</i>	Ministério de Ciência e Tecnologia
<i>MDIC</i>	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
<i>MEEuP</i>	Metodologia para Design Ecológico de Produtos de uso energético
<i>MEPS</i>	Minimum Efficiency Performance Standards
<i>MIT</i>	Motor de Indução Trifásico
<i>MME</i>	Ministério de Minas e Energia
<i>MTBF</i>	Tempo Médio Entre Falhas (Mean Time Between Failures)
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>NC</i>	North Carolina
<i>NCSU</i>	North Carolina State University
<i>NEMA</i>	National Electrical Manufacturers Association
<i>NPV</i>	Valor Presente Líquido (Net Present Value)
<i>NS</i>	Poupança Líquida (Net Savings)

O&M	Operação e Manutenção
p	parâmetro do elemento de expansão
P	Potência
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
<i>PAC</i>	Custo do Administrador do Programa
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PEE	Programas de Eficiência Energética
PIB	Produto Interno Bruto
PM	Ímã Permanente
PNEF	Plano Nacional de Eficiência Energética
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de energia Elétrica
PV	Valor Presente (Present Value)
Queim	Queimador
<i>RCB</i>	Relação Custo Benefício
<i>RIM</i>	Impacto na Tarifa de Energia (Ratepayer Energy Impact)
<i>SCT</i>	Custo para o Total da Sociedade
<i>TRC</i>	Custo Total do Programa
UE	União Europeia
VA	Volume Ajustado
VC	Volume dos demais compartimentos
VR	Volume do Refrigerador

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
BTU/h	Unidade Térmica Britânica por hora (British Thermal Unit/hour)
CO ₂	Dióxido de Carbono
cv	cavalo-vapor
E	Energia
EH	Eficiência Entálpica
g	grama
GCV	valor Calorífico Bruto (gross calorific value)
h	hora
H	Variação entálpica
J	Joule
kcal	Kilo caloria
km/l	Quilômetro por litro
kWh/mês	Kilowatthora por mês
lúmens/W	lúmens por Watt
M	Trabalho Mecânico
m ²	metro quadrado
m ² dd	metro quadrado grau dia
MJ/km	Mega joule por quilômetro
Mtoe	Mega Tonelada de óleo equivalente
Ni	níquel
P	Potência
pkm	passageiro quilômetro
PO ₄	Óxido Potássico
Q	Variação Adiabática
SO ₂	Óxido Sulfoso
T	temperatura
USD	Dólar Americano
W	Watt
Wh	Watt-Hora
η	Eficiência
λ	Fator de Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	24
1.1	Considerações iniciais.....	24
1.2	Políticas para o aumento da eficiência.....	28
1.3	Políticas brasileiras.....	31
1.4	Análise da viabilidade econômica e incerteza.....	35
1.5	Justificativa, objetivos e estrutura da tese.....	37
2	INDICADORES DE EFICIÊNCIA	39
2.1	Introdução.....	39
2.2	Indicadores de Eficiência.....	42
2.2.1	<i>Tipos de Indicadores</i>	45
2.2.1.1	<i>Indicadores Termodinâmicos.....</i>	46
2.2.1.2	<i>Indicadores Físico-termodinâmicos</i>	48
2.2.1.3	<i>Indicadores Econômico-termodinâmicos.....</i>	49
2.2.1.4	<i>Indicadores Econômicos.....</i>	50
2.3	Indicadores de eficiência de equipamentos de uso final	50
2.3.1	<i>Motores de Indução Trifásicos</i>	52
2.3.2	<i>Iluminação</i>	53
2.3.3	<i>Refrigeradores e Freezers.....</i>	54
2.3.4	<i>Fogões e Fornos a Gás</i>	56
2.3.4.1	<i>Mesa de Cocção</i>	56
2.3.4.2	<i>Forno</i>	56
2.3.5	<i>Condicionadores de Ar</i>	57
2.3.6	<i>Aquecedores de Água a Gás</i>	58
2.3.7	<i>Transformadores.....</i>	58
2.3.8	<i>Veículos Automotivos</i>	59
2.4	Medição de Indicadores de eficiência	61
2.4.1	<i>Medição da eficiência de Motores Elétricos de Indução.....</i>	61
2.4.1.1	<i>Bancada de ensaios</i>	63
2.5	Incerteza na Medição de Eficiência	65
2.5.1	<i>Incerteza nas medições</i>	65
2.5.2	<i>Medição da Incerteza nas Medições</i>	67
2.5.2.1	<i>Medição da Incerteza na Medição da Eficiência de Motores</i>	68

	<i>Elétricos</i>	
2.6	Considerações Finais	69
2.6.1	<i>Realizações</i>	70
2.6.2	<i>Agradecimentos</i>	70
3	CUSTO DO CICLO DE VIDA.....	71
3.1	Introdução.....	71
3.1.1	<i>Valor Presente</i>	73
3.2	Custos de Energia	74
3.2.1	<i>Tarifas de Energia.....</i>	75
3.2.2	<i>Taxa de Escalada do Custo da Energia</i>	79
3.3	Custos Iniciais/Investimentos.....	80
3.4	Custos de Operação, Manutenção e Reparos.....	81
3.5	Custo Residual.....	83
3.6	Custos Ambientais.....	83
3.7	Taxa de Desconto.....	85
3.8	Incerteza.....	87
3.9	Considerações Finais.....	89
3.9.1	<i>Realizações.....</i>	90
4	VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	91
4.1	Introdução	91
4.2	Analisando a Viabilidade Econômica.....	94
4.2.1	<i>Retorno simples.....</i>	96
4.2.2	<i>Retorno Descontado.....</i>	96
4.2.3	<i>Custo do Ciclo de Vida – LCC.....</i>	96
4.2.4	<i>Poupança Líquida - Net Savings.....</i>	97
4.2.5	<i>Relação Custo-Benefício (RCB).....</i>	98
4.2.6	<i>Taxa Interna de Retorno Ajustada (Adjusted Internal Return Rate/AIRR).....</i>	98
4.2.7	<i>Custo de Energia Economizada.....</i>	99
4.3	Análise da Viabilidade.....	100
4.3.1	<i>Aplicativo para o Cálculo da Viabilidade.....</i>	101
4.4	Análise da Incerteza	107

4.4.1	<i>Incerteza na Eficiência.....</i>	109
4.4.2	<i>Incerteza na Taxa de Desconto (d).....</i>	109
4.4.3	<i>Incerteza na Taxa de Escalada da Energia (e)</i>	111
4.4.4	<i>Incerteza na Tarifa de Energia (C)</i>	111
4.4.5	<i>Incerteza na vida Útil do Equipamento (n).....</i>	112
4.4.6	<i>Incerteza do Efeito Rebote.....</i>	112
4.5	Considerações Finais	114
4.5.1	<i>Realizações.....</i>	115
5	ESTUDO DE CASO – MOTORES ELÉTRICOS.....	116
5.1	Introdução.....	116
5.1.1	<i>Do Motor Padrão (IR1) para o Alto Rendimento (IR2).....</i>	117
5.1.2	<i>Do Motor de alto rendimento (IR2) para o Premium (IR3)</i>	118
5.1.3	<i>.Do Premium para o Superpremium (IR3)</i>	119
5.2	Mercado de Motores Elétricos no Brasil.....	120
5.2.1	<i>Níveis de Eficiência no Mercado.....</i>	124
5.3	Parâmetros de Referência.....	125
5.3.1	<i>Características de operação.....</i>	125
5.3.2	<i>Distribuição da população de motores.....</i>	126
5.3.3	<i>Parâmetros técnicos econômicos.....</i>	127
5.4	Simulações.....	128
5.4.1	<i>Incremento dos níveis MEPS no Brasil (IR2 para IR3).....</i>	128
5.4.1.1	<i>Motores de pequena potência</i>	129
5.4.1.2	<i>Motores de média potência.....</i>	130
5.4.1.3	<i>Motores de grande potência</i>	130
5.4.1.4	<i>Custos da Energia Economizada.....</i>	132
5.4.1.5	<i>Economia Prevista para Plano Nacional de Eficiência Energética- PNEF.....</i>	134
5.4.2	Viabilidade para Substituição de Motores em Operação.....	134
5.4.2.1	<i>Motores de pequena potência.....</i>	136
5.4.2.2	<i>Motores de média potência.....</i>	137
5.4.2.3	<i>Motores de grande potência.....</i>	138
5.4.2.4	<i>Efeito dos programas de incentivo à substituição de motores.....</i>	139
5.4.3	Perspectivas para o Motor Superpremium.....	144

5.4.4	<i>Efeito dos Custos Ambientais</i>	147
5.5	Considerações Finais	150
5.5.1	<i>Realizações</i>	151
6	CONCLUSÕES	152
6.1	Recomendações para Trabalhos Futuros	155
	REFERÊNCIAS	157
	APÊNDICE A	168
A.1	Descrição dos Equipamentos da Bancada de Testes	168
A.2	Descrição do Ensaio para Cálculo da Eficiência de Motores Elétricos	169
1	<i>Método Direto</i>	169
2	<i>Método Indireto com Perdas Segregadas</i>	171
A.3	Resultados dos Testes de Eficiência	173
1	<i>Teste com um Motor de Indução – IM</i>	173
2	<i>Teste com um Motor a Imã Permanente-PM</i>	175
A.4	Análise da Incerteza na Medição	176
1	<i>Descrição geral</i>	176
2	<i>Equipamentos</i>	176
3	<i>Cálculo da Incerteza na medição da eficiência</i>	177
	APÊNDICE B	181
B.1	Taxa de Escalada da Energia	181
1	<i>Descrição Geral</i>	181
2	<i>Cálculo da Taxa de Escalada da Energia</i>	181
3	<i>Taxa da Escalada da Eletricidade Industrial no Brasil</i>	182
	APÊNDICE C	184
C.1	Descrição do Aplicativo	184
1	<i>Descrição Geral</i>	184
2	<i>Como Utilizar o Aplicativo Curva de Viabilidade</i>	185
	APÊNDICE D	188
D.1	Preços para Rebobinamentos de Motores	188
D.2	Preços e Eficiências para Motores de Indução Trifásicos	189
D.3	Níveis de Eficiência IE4/Superpremium/60 Hz	192

1 INTRODUÇÃO

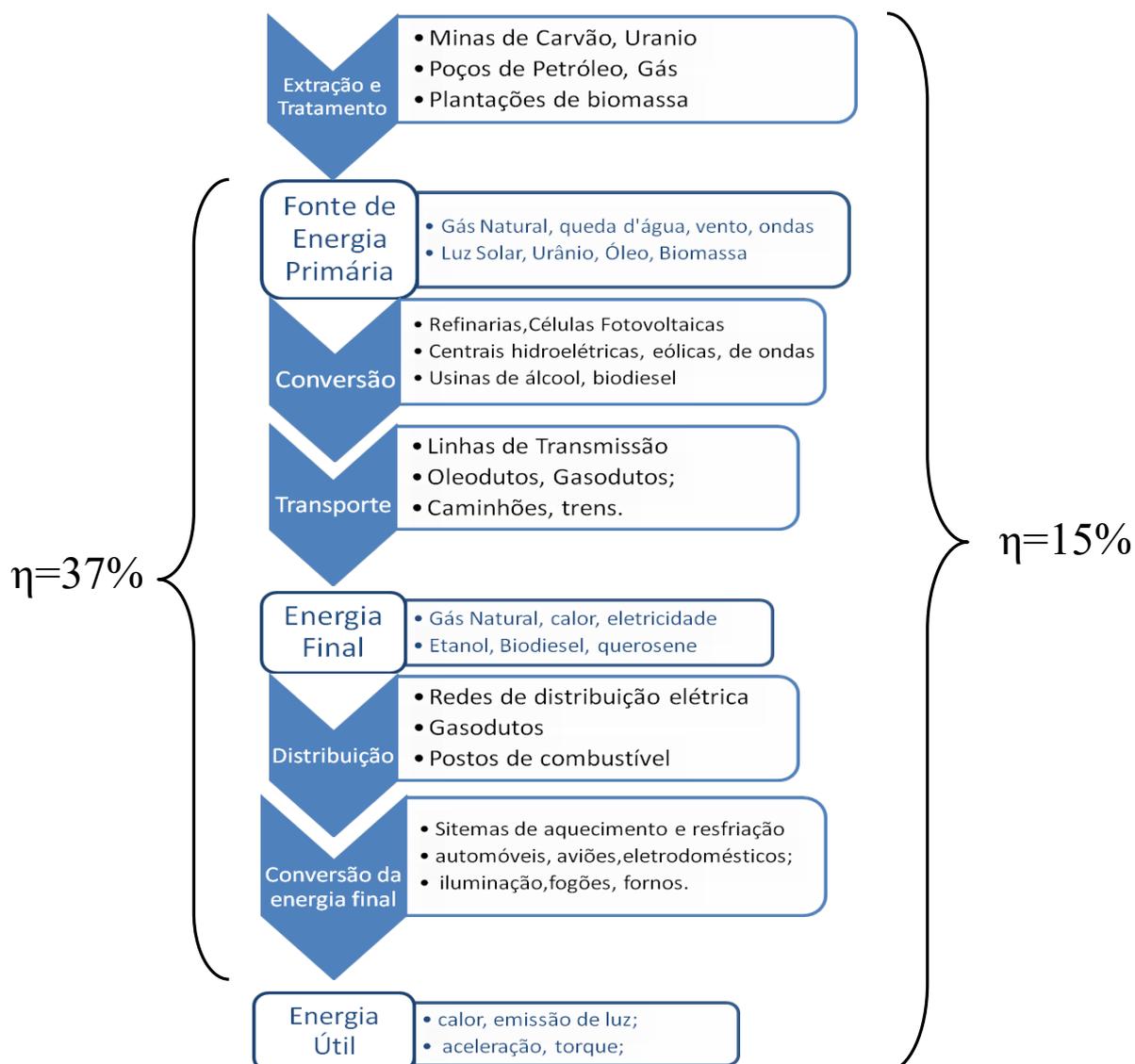
1.1 Considerações Iniciais

O termo eficiência tem se popularizado nas últimas décadas como consequência das crescentes preocupações ambientais e com a perspectiva de esgotamento dos recursos naturais utilizados para a produção de energia. No dicionário, eficiência é definida como a “virtude ou característica (de uma pessoa, um dispositivo, um método, um empreendimento etc.) conseguir o melhor rendimento com o mínimo de erros e/ou de dispêndio de energia, tempo, dinheiro ou meios” (CALDAS AULETE; SANTOS VALENTE, 2017). Trazendo a definição para a área energética, a eficiência de um equipamento, processo, planta industrial, ou para ser mais genérico, de um sistema, é dada pela relação entre a energia convertida em trabalho útil e a quantidade de energia primária ou final consumida para este fim. Como trabalho útil entende-se como aquele efetivamente convertido em bens ou serviços energéticos (calor, refrigeração, iluminação, mobilidade e outros) necessários para adaptar as condições de vida no planeta ao ser humano. Sob esta ótica, pode ser definida uma eficiência energética global, que relaciona toda a energia primária retirada da natureza para a produção destes bens e serviços com a sua efetiva transformação em trabalho útil, e o valor obtido para esta eficiência global é estimado em 37% (WORLD ENERGY ASSESSMENT, 2004). Isso significa que quase 2/3 da energia retirada da natureza é perdida, principalmente na forma de calor a baixas e médias temperaturas. E este número ignora a exergia (capacidade máxima de produzir trabalho até atingir o ponto de equilíbrio térmico (SHUKUYA; HAMMACHE, 2002)) da fonte primária de energia, o que nos levaria a uma eficiência global inferior a 15%. Para acrescentar um pouco mais de dramaticidade a esta informação, verifica-se que este dado foi calculado para os países industrializados, que estão mais avançados em tecnologia e que utilizam seus recursos de forma mais racional (WORLD ENERGY ASSESSMENT, 2004). A Figura 1 retrata as etapas de conversão de energia desde a fonte primária até o uso final e as respectivas eficiências médias globais.

A crise energética ocorrida no início da década de 1970 levou a preocupação com eficiência energética à população em geral, na medida em que ocasionou o aumento de preços dos combustíveis, o risco de desabastecimento e apareceu como a causa principal da redução dos índices de desenvolvimento em todo o mundo (SADORSKY, 2010). Desde então, os

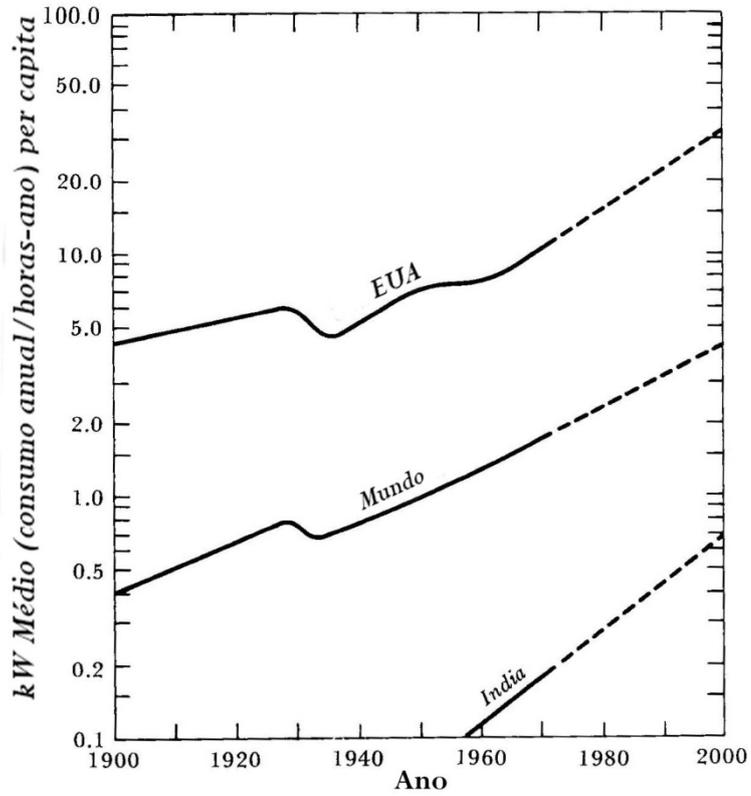
esforços para uma melhoria da utilização dos recursos naturais se transformaram em uma responsabilidade global. Essa mudança de paradigma pode ser visualizada nas Figuras 2 e 3. A primeira, com dados coletados até a década de 70 (KRENZ, 1984), retrata um aumento na demanda mundial por energia de 142% durante o período 1930-1970 (retratada pela demanda média anual per capita), e projeta um crescimento similar até o final do século. Já a Figura 3, que retrata a evolução real desta demanda per capita durante o período 1971- 2014, revela os efeitos do ganho de eficiência após a crise de 1970: mesmo diante de um crescimento populacional similar ao do período retratado na Figura 2 (cerca de 80%), a demanda média de energia per capita ficou quase estabilizado, com um aumento de apenas 9,6% no mesmo período.

Figura 1 – Etapas do processo de conversão de energia desde o recurso natural até o uso final.



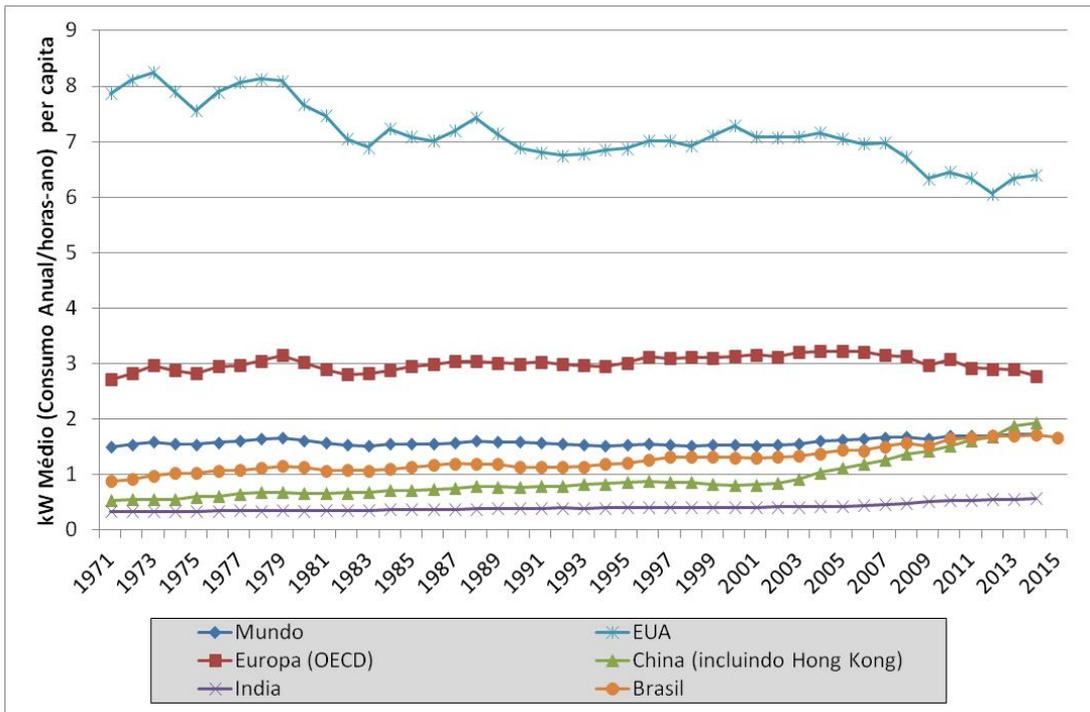
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 2 – Evolução da demanda média anual de energia per capita no período 1900-1970 com projeção para o ano 2000.



Fonte: (KRENZ, 1984)

Figura 3 – Evolução na demanda média anual de energia per capita (1971-2015).

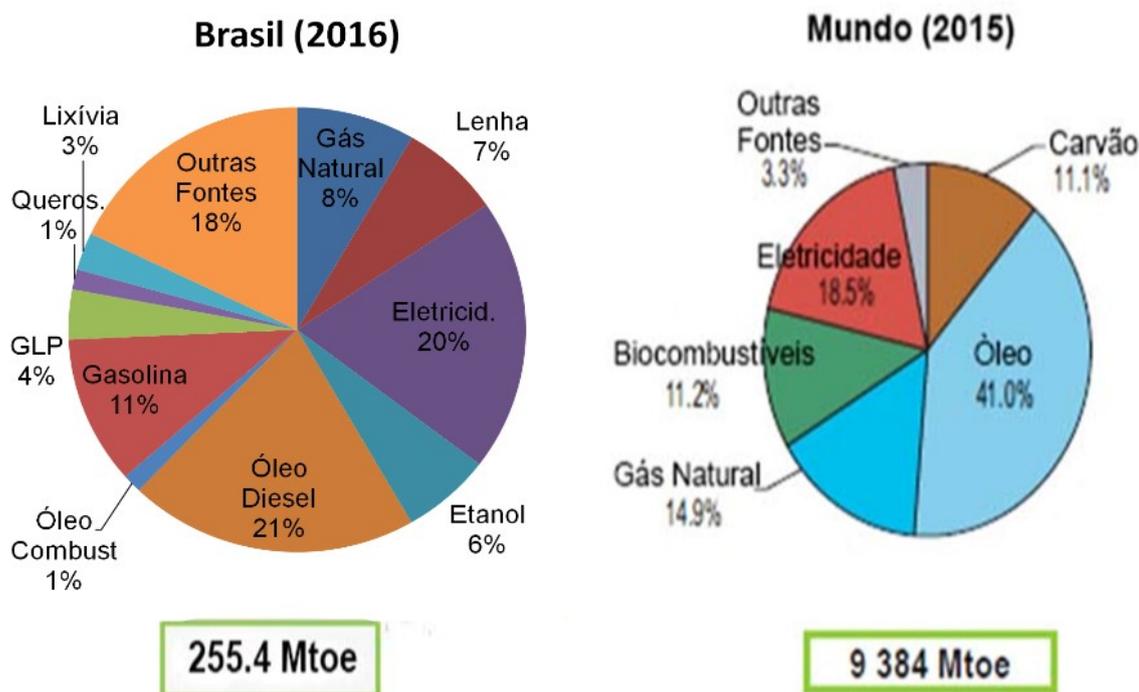


. Fonte: elaborado pelo autor a partir de (IEA, 2017a).

A estabilização na demanda média anual per capita aconteceu principalmente nos países desenvolvidos, que são mais industrializados e consomem muito mais energia do que os demais, e de onde partiram as principais iniciativas de melhoria na eficiência energética (CARDOSO, 2012).

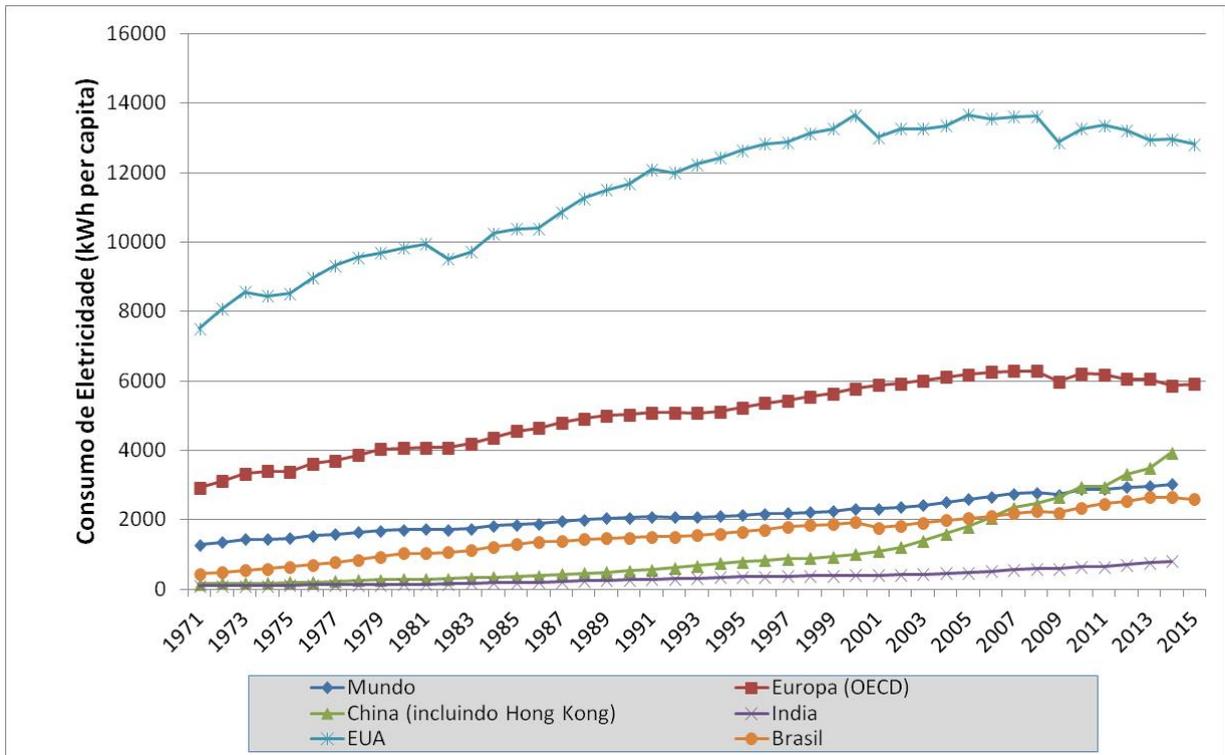
A distribuição do consumo total de energia no Brasil e no mundo está representada na Figura 4, onde pode ser verificado que a dependência de combustíveis fósseis ainda é grande (cerca de 2/3 do consumo total mundial) (IEA, 2017b) e que o consumo de eletricidade representa cerca de 18% do total. No entanto, há uma demanda crescente para este tipo de energia (Figura 5). Enquanto o consumo de energia per capita total está estabilizado na maioria dos países industrializados desde a década de 1970, o consumo de eletricidade per capita está crescendo em todos os lugares: a taxa mundial aumentou 112,5% desde então; nos Estados Unidos houve um aumento um pouco inferior, 71%; nos países em desenvolvimento o aumento das taxas de consumo de eletricidade per capita foi ainda mais significativo (Brasil, 380%, Índia, 502%, e China, com incríveis 1.580% de crescimento nas últimas quatro décadas). Estes números mostram uma crescente dependência do uso de eletricidade e confirmam os esforços destinados a melhorar a eficiência nesta área.

Figura 4 – Consumo total de energia no Brasil e no mundo.



Fontes:(IEA, 2017b) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2016).

Figura 5 – Evolução do consumo de energia elétrica per capita.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de (IEA, 2017a).

1.2 Políticas para o aumento da eficiência

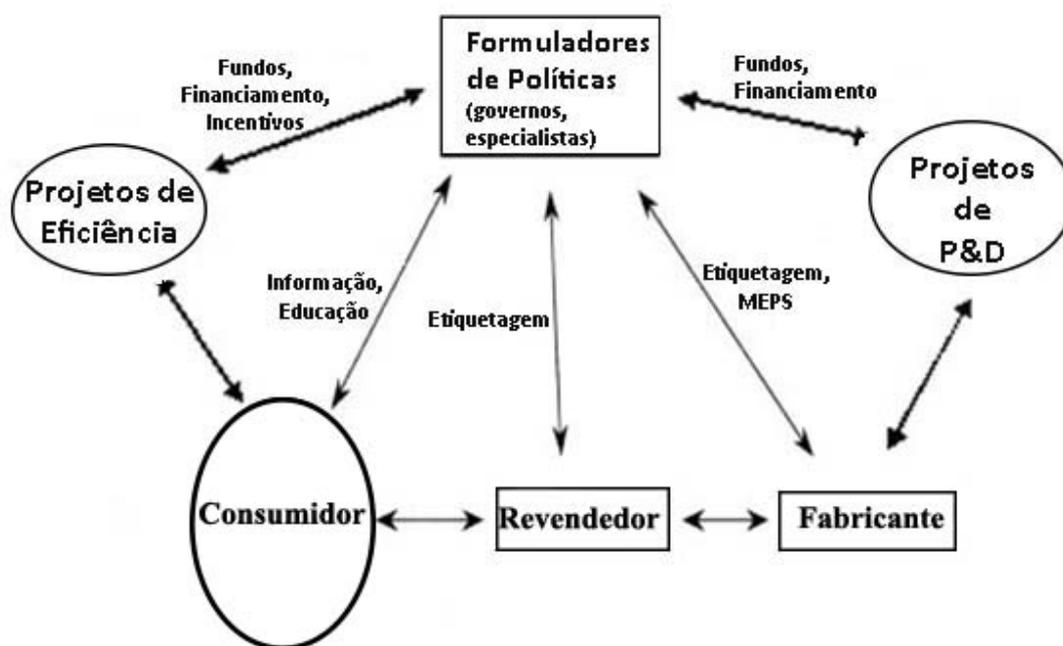
As políticas para melhorar a eficiência tem uma vasta área de atuação, já que a energia tem várias fontes (combustíveis fósseis, nuclear, hídrica, solar, eólica e outros), passa por diferentes fases antes de seu uso final (produção, transporte, distribuição), e é utilizada em diferentes setores (comércio, indústria, agricultura, habitação, transporte) e para fins diversos (aquecimento e refrigeração, iluminação, eletrodomésticos, sistemas motorizados, etc.). As políticas também têm finalidades diferentes (aumentar a eficiência energética, reduzir as emissões de gases de efeito estufa) (WIEL; MCMAHON, 2005), mas têm em comum o fato de que os esforços para a implementação destas políticas estão sendo conduzidas por governos através de regulações nacionais.

Essas políticas têm o objetivo de influenciar os agentes de mercado (consumidores, revendedores e fabricantes) para a produção, comercialização e consumo de produtos mais eficientes (VINE et al., 2001). A Figura 6 mostra como esses agentes interagem sob a influência das políticas. Existem várias iniciativas para induzir a melhoria da eficiência de equipamentos e a percepção dos consumidores sobre a importância da eficiência:

programas educacionais, investimento em projetos de eficiência e de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), programas de etiquetagem e regulamentações de índices mínimos de eficiência (MEPS), e outros.

Programas de Etiquetagem são usados para informar aos consumidores sobre o desempenho energético de produtos. Esses programas podem utilizar dois tipos de abordagem: as etiquetas de endosso ou selos de aprovação/desempenho, que indicam ao consumidor que o produto está entre os modelos mais eficientes disponíveis no mercado; e as etiquetas comparativas, que indicam o uso relativo de energia do produto quando comparado aos outros produtos disponíveis. A maneira como é feita a comparação subdivide as etiquetas comparativas em etiquetas de categoria (usam um ranking comparativo do tipo escada), etiquetas contínuas (usam um gráfico de barras ou escalar para indicar o consumo de energia de cada produto), e etiquetas de informação (apresentam dados de desempenho energético do produto sem ferramentas comparativas) (WIEL; MCMAHON, 2003).

Figura 6 – Políticas de eficiência energética e suas áreas de influência



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de (VINE et al., 2001)

Os programas de padrões de eficiência são procedimentos e regulamentos que prescrevem o desempenho energético dos produtos manufaturados, e que, na maioria dos casos, proíbem a venda de produtos com eficiência abaixo de um padrão mínimo. Os padrões de eficiência podem ser prescritivos (requisitos para um recurso específico ou dispositivo a ser instalado em todos os novos produtos); regulamentações com padrões mínimos de eficiência energética - MEPS, da sigla em inglês de *Minimum Efficiency Performance*

Standards (que definem o desempenho energético que os fabricantes devem atingir em cada produto, mas não a tecnologia ou detalhes de design do produto); ou padrões de eficiência média por classe de produto – *Class-average Standards* (especificando a eficiência média de um produto fabricado, permitindo que cada fabricante possa selecionar o nível de eficiência para cada modelo, de modo a que a média global seja alcançada).

As etiquetas e padrões podem ser de adesão obrigatória ou voluntária (programas de etiquetagem de endosso/selos de desempenho são inerentemente voluntários) e esta decisão é apenas um dos aspectos do processo de implantação destes programas. O objetivo final é afetar os agentes de mercado no sentido de produzir, comercializar e consumir produtos mais eficientes.

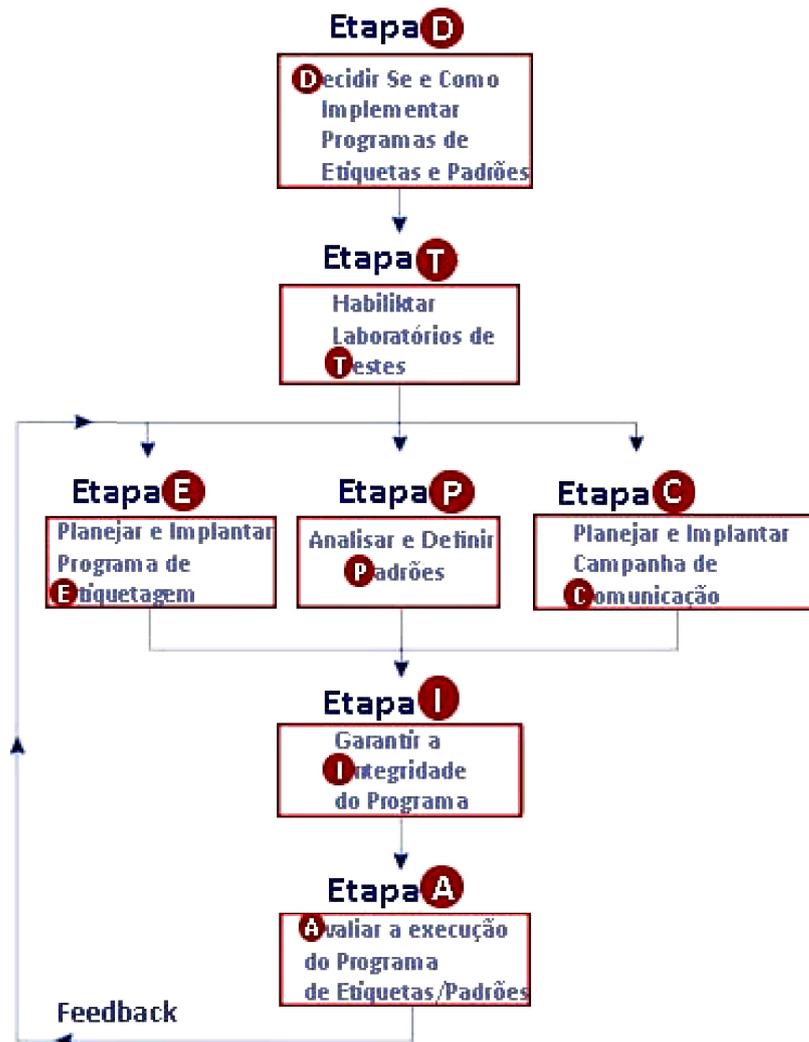
Projetos de eficiência e de pesquisa e desenvolvimento (P&D) têm abordagens distintas para estimular a utilização e a produção de equipamentos de uso final eficientes. Projetos de eficiência atuam no lado dos consumidores com o objetivo de facilitar aquisição de equipamentos e aprimorar os procedimentos para reduzir o consumo de energia, e são implementados através de iniciativas educacionais, auditorias energéticas, programas de gerenciamento de consumo, programas de descontos, incentivos à cogeração e ao acesso a energias renováveis, entre outros. Projetos de P&D incentivam os pesquisadores a dirigir os seus esforços para a procura de tecnologias mais eficientes. Os recursos financeiros para apoiar estas iniciativas vêm de fundos governamentais, privados, ou mesmo de legislações que estimulam o financiamento destes projetos por partes de empresas do setor de energia (TAYLOR et al., 2008).

Os programas de etiquetagem e de padrões são utilizados no mundo inteiro como políticas de eficiência energética para equipamentos de uso final e tem apresentado bons resultados (NADEL, 2015). Apenas nos EUA, anualmente, o programa de selo de desempenho denominado Energy Star reduziu o consumo total de eletricidade em cerca de 5% em 2014, que responde por 360 terawatt-hora (TWh)(EPA, 2014). E esses números devem chegar a 14% do consumo total de eletricidade nos EUA em 2035 (MEYERS, STEPHEN; WILLIAMS, ALISON; CHAN, 2013).

As etapas típicas de implantação desses programas são mostradas na Figura 7. As etapas do processo de implantação de programas de etiquetagem e de padrões são conduzidas por entidades governamentais e envolvem todos os agentes apresentados na Figura 6 em um processo que inclui a habilitação de laboratórios de certificação e testes (Etapa T) e a divulgação dos programas através de campanhas de comunicações (Etapa C). O processo de análise e definição dos padrões de referência para o desempenho energético dos produtos se

dá na Etapa P, detalhada na Figura 8, que se inicia com a consulta às partes interessadas (Passo P-1) e onde são realizadas as análises técnicas (Passos P-4 e P-5) e calculados os impactos da implantação destes programas (Passo P-6). O objeto de estudo desta tese se situa nesta etapa do processo de definição de etiquetas e padrões.

Figura 7 – Etapas principais no processo de desenvolvimento de programas de etiquetagem e de padrões de equipamentos de uso final.



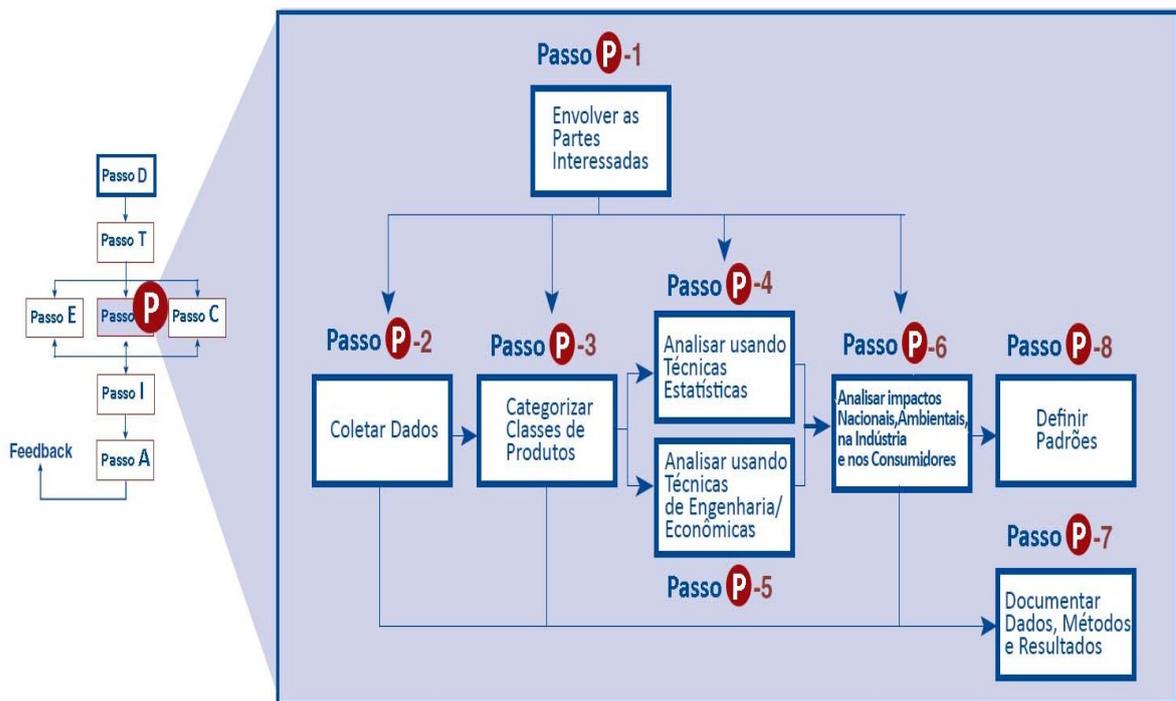
Fonte: (WIEL; MCMAHON, 2005)

1.3 Políticas Brasileiras

O Brasil tem metas ambiciosas para redução de consumo de energia através de programas de eficiência energética. O Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEF) (MME, 2011) definiu que 11,57% do consumo total de eletricidade do país deve ser economizado a partir de iniciativas de eficiência energética em 2030. Este relatório complementa o Plano Nacional de Energia 2030 (ENERGIA, 2007) que analisa o perfil de

consumo energético do país e estima os cenários para 2030. A análise baseia-se em diferentes perspectivas políticas e econômicas nacionais e internacionais e seus efeitos sobre o consumo de energia. O relatório considera quatro cenários (Crista da Onda, Surfando na Marola, Pedalinho e Náufrago) e seus efeitos no crescimento anual médio do Produto Interno Bruto (PIB) durante o período 2005-2030 (5,1%, 4,1%, 3,2% e 2,2%, respectivamente). A Figura 9 mostra os impactos desses cenários sobre o consumo total de energia elétrica no Brasil durante esse período e os resultados medidos até 2016. Na figura, verifica-se que o consumo de eletricidade medida se aproxima, na média, ao cenário Surfando na Marola, porém nos últimos anos, a queda na evolução do PIB brasileiro afetou o consumo de eletricidade, que se aproximou do estimado para o cenário Pedalinho.

Figura 8 – Principais passos da etapa de análise e definição de programas de padrões.

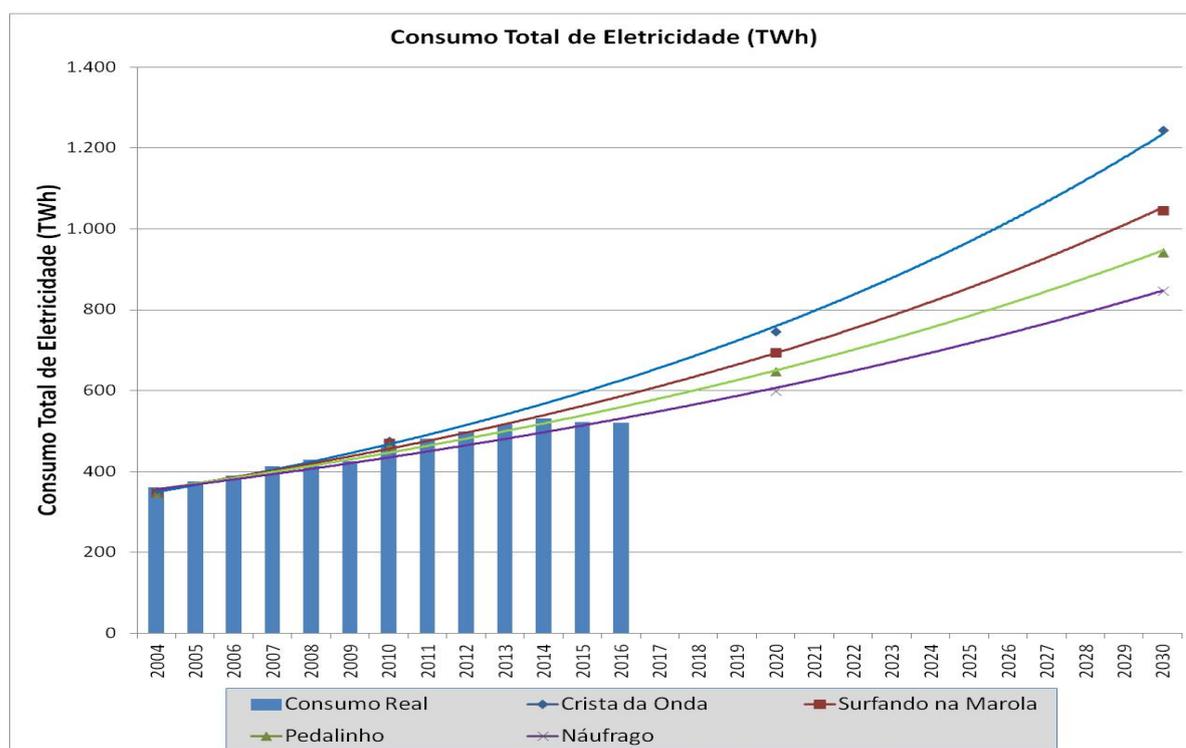


Fonte: (WIEL e MACMAHON, 2005)

No cenário Surfando na Marola, 11,75% do consumo total de eletricidade no Brasil será equivalente a 110,6 TWh em 2030 (consumo total de eletricidade estimado em 1045,6 TWh). Porém, a redução devido a programas de eficiência energética, denominadas no PNEF como **iniciativas induzidas**, corresponde a uma parte desta meta (5,3% do consumo total de eletricidade, ou 49,9 TWh), enquanto o restante deve ser alcançado através das chamadas **iniciativas autônomas**. Até agora, a economia dos programas de eficiência

energética implementados sob a responsabilidade do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica/PROCEL representam 2,5% (11,68 TWh) do consumo total de eletricidade do ano de 2015 (PROCEL/ELETROBRÁS, 2015).

Figura 9 – Cenários do PNEF para o consumo total de eletricidade no Brasil durante o período 2005-2030 e o consumo medido (real) em TWh até 2016.

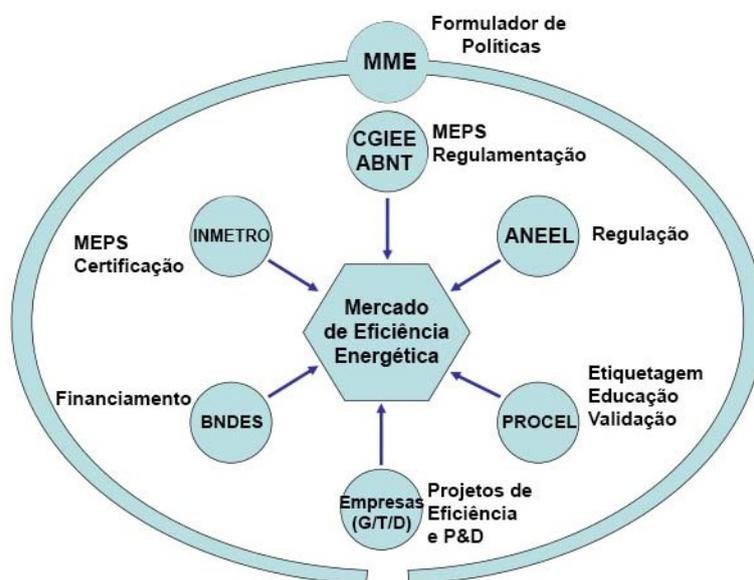


Fonte: (MME, 2011), (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2016)

A Figura 10 ilustra as principais entidades que têm a responsabilidade de gerir as políticas de eficiência energética no Brasil. A lei brasileira de eficiência energética (MME, 2014) foi aprovada em 2001 e delegou ao Ministério de Minas e Energia (MME) a coordenação de todas as atividades relacionadas a Programas de eficiência energética no país. O Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE), ligado ao MME, é formado por representantes de órgãos governamentais relacionados ao setor de energia e por especialistas na área de energia e tem o objetivo de definir: limites de eficiência para equipamentos de uso final; maneiras de monitorar a eficiência do equipamento; e métodos para avaliar os resultados destes regulamentos. O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) (PROCEL/ELETROBRÁS, 2015) possui um programa de etiquetagem de endosso/selo de desempenho (selo PROCEL) e apoia muitas iniciativas de eficiência energética, como o site PROCELInfo (PROCEL/ELETROBRÁS, 2014). O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) é

responsável pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) (INMETRO, 2014), que coordena um programa de etiquetagem comparativa, certifica os laboratórios de testes e conduz os programas de avaliação dos Programas de Padronização de Índices Mínimos de Eficiência de Equipamentos (MEPS). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável pela regulamentação dos Programas de Eficiência Energética (PEE) e dos programas de P&D, que são financiados pelas concessionárias do setor elétrico por força da lei criada durante a desregulamentação do setor elétrico (Lei No.9.991/2000) (ANEEL, 2014a).

Figura 10 – Entidades brasileiras relacionadas à área de eficiência energética.



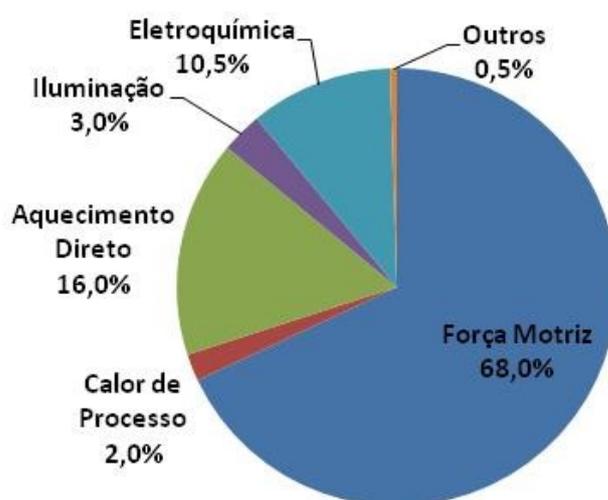
Fonte: elaborado pelo autor.

Existem outras entidades que pertencem a esta cadeia de atividades na área de eficiência energética, tais como o Programa Nacional para o Uso Racional de Petróleo e Derivados de Gás (CONPET), que possui um programa de selo de desempenho relacionado a produtos derivativos de combustíveis fósseis.

Um dos principais programas de eficiência energética implantados no Brasil é a regulamentação de Padrões Mínimos de Eficiência Energética (MEPS), que tem como órgão responsável o Comitê Gestor de Indicadores de Eficiência Energética – CGIEE, que implementa a Etapa P do fluxograma apresentado na Figura 7 e detalhado na Figura 8. A garantia da integridade do programa (Etapa I) e a avaliação da execução do programa (Etapa A) são de responsabilidade do Instituto Nacional de Metrologia – INMETRO (ASSUMPÇÃO, 2002a). O programa MEPS foi iniciado em 2002 com um regulamento de

índices mínimos de eficiência para motores elétricos fabricados e comercializados no Brasil, e desde então vários equipamentos foram submetidos à regulamentação MEPS (NOGUEIRA et al., 2015). Os motores elétricos (motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo) foram selecionados para ser o primeiro equipamento a ter MEPS obrigatório devido à alta participação no consumo total de eletricidade no Brasil do uso final em força motriz (Figura 11) e também ao predomínio de sua utilização na indústria (68% do consumo industrial) (SOARES et al., 2013). No mundo, o consumo de motores elétricos chega a 60% do consumo total de eletricidade (IEA, 2017b). O mercado mundial de motores elétricos é estimado em cerca de 300 milhões de unidades em operação no mundo, representando um consumo de 7,600 TWh/ano (o que representa um custo energético de aproximadamente 1 trilhão de dólares); as vendas de motores são estimadas em cerca de 30 milhões de unidades por ano; e um mercado de serviços de reparo que atende 90 milhões de unidades/ano (BRUNNER; WERLE, 2013). Os números brasileiros são obviamente menores (30 milhões de motores em operação, vendas anuais de 2 milhões de unidades de motores integrais e um mercado estimado em 50 bilhões de dólares) (ANDRADE; PONTES, 2017), mas justificam os esforços que estão sendo feitos para aumentar a sua eficiência.

Figura 11 - Distribuição do consumo de eletricidade no Brasil por uso final.



Fonte: (ENERGIA, 2007)

1.4 Análise de Viabilidade Econômica e Incerteza

A melhoria da eficiência de equipamentos se faz pela redução de perdas através de melhorias no design, no material e nas técnicas de produção. Esta melhoria da eficiência afeta os custos do equipamento durante o seu ciclo de vida (LCC) (FULLER; PETERSEN, 1995): os custos de energia são reduzidos, o custo de produção/aquisição do equipamento (custo de

investimento) aumenta, e os custos de operação e manutenção (O&M) e de reparos também são afetados. Os aumentos nos custos devem ser compensados com o aumento dos benefícios (economia de energia), caso contrário, a melhoria da eficiência não é viável. Avaliar os impactos de programas de eficiência energética é um passo essencial para os formuladores de políticas durante a definição de MEPS (passo P-6, Figura 8) e uma ferramenta fundamental para ajudar os agentes de mercado (consumidores, fabricantes e revendedores) (WIEL; MCMAHON, 2005) na decisão de investir ou não em eficiência energética (VINE; DU PONT; WAIDE, 2001). Também reforça a importância dos programas de eficiência energética e ajuda essas iniciativas a competir com uma ampla gama de outras opções de investimento em energia.

Durante o passo P-6 do processo de definição de MEPS, é realizada uma análise dos impactos destes índices mínimos de eficiência em diferentes setores da sociedade (fabricantes, consumidores, distribuidoras de energia, além de impactos nacionais e ambientais) e os métodos utilizados para estas análises diferem de acordo com o setor analisado (CPUC, 2001): para consumidores analisa-se a relação custo-benefício da aquisição de equipamentos mais eficientes; para os fabricantes, há que se analisar o efeito dos MEPS nos custos de produção e nas vendas; quanto aos impactos nacionais ou regionais (distribuidoras de energia), são analisadas as reduções de energia e demanda com a redução do consumo; e para os impactos ambientais, as reduções de emissões de gases e poluentes na atmosfera a partir destas reduções de energia gerada e consumida são estimados.

Todos estes métodos de análise de impacto utilizam dados e parâmetros que apresentam imprecisões em maior e menor grau. A incerteza dos parâmetros técnicos e econômicos envolvidos na análise de viabilidade econômica e outras imperfeições nos resultados esperados, como o “rebound effect” (efeito rebote) (SORRELL, 2007), podem obscurecer os benefícios esperados (KNITTEL; GREENSTONE; DE LA PENA, 2014). Estes efeitos devem ser avaliados durante a análise de viabilidade econômica desses programas. Corum e O’Neal (1982) afirmam que as imperfeições do mercado e a incerteza afetam a disposição dos consumidores em investir em eficiência energética, revelando que os preços da energia, as taxas de escalada de energia e as taxas de desconto são os principais fatores de incerteza. Hope (1981) desenvolveu uma abordagem probabilística para avaliar a relação custo-benefício do investimento em várias tecnologias de geração a partir de energias renováveis, a fim de considerar o efeito da incerteza nos resultados. Greene, Evans e Hiestand (2013b) apresentaram uma abordagem probabilística no cálculo de custo-efetividade e o efeito de rebote foi analisado por Xuewei, Moreno-Cruz e Crittender (2015). Bortoni, Nogueira e

Cardoso (2013) apresentaram um modelo determinístico para estimar a economia elétrica anual com o aumento da eficiência em motores de indução trifásicos no Brasil; entretanto, não consideraram a incerteza dos parâmetros.

1.5 Justificativa, objetivos e estrutura da tese

A análise viabilidade de programas e projetos de eficiência energética não é apenas um passo fundamental para a aprovação destas iniciativas, mas ela define se a iniciativa está de fato promovendo a eficiência energética. A não viabilidade implica que os benefícios gerados (redução de consumo energético) não são superiores aos custos associados (investimentos em novos materiais, tecnologias, etc.). Essa análise, entretanto, não possui a precisão necessária para a responsabilidade associada, daí a necessidade de se pesquisar os métodos utilizados para esta análise e os efeitos da incerteza dos parâmetros utilizados nos resultados obtidos, com o objetivo de trazer maior credibilidade para estas iniciativas e dar maior segurança para os agentes envolvidos (consumidores, fabricantes, comerciantes, concessionários e a sociedade como um todo). Este trabalho se propõe a analisar os parâmetros técnicos e econômicos utilizados na análise da viabilidade de programas e projetos de eficiência energética e apresentar um método que incorpore a incerteza destes parâmetros e seu efeito no resultado final, e, por fim, aplicar este método na análise da viabilidade do programa brasileiro de MEPS para motores de indução trifásicos. Uma ferramenta para análise da viabilidade de projetos de eficiência é apresentada e com ela são simuladas várias situações de aumento da eficiência do motor de indução.

O desenvolvimento da tese segue o seguinte roteiro:

O Capítulo 2 apresenta o conceito de eficiência energética, os métodos existentes para sua determinação, e sua aplicação nos principais equipamentos de uso final. Apresenta ainda os detalhes de uma bancada de medição de eficiência de motores elétricos que foi implementada na North Carolina State University (FREEDM Center) durante o Doutorado e a incerteza associada às medições realizadas e sua influência no cálculo da eficiência.

O Capítulo 3 apresenta os demais parâmetros utilizados no cálculo da viabilidade de programas e projetos de eficiência energética e que são utilizados para definir os custos e benefícios durante todo o ciclo de vida do projeto/programa (Life Cycle Costs/LCC), a saber: custos de energia; custos de manutenção e operação; custos ambientais; investimentos; taxas de desconto; taxas de escalabilidade. A incerteza associada a cada um desses parâmetros é investigada.

O Capítulo 4 investiga os métodos utilizados para o cálculo da viabilidade das iniciativas para a melhoria da eficiência de equipamentos e apresenta um método determinístico que permite a incorporação da incerteza dos parâmetros e a determinação de sua influência no resultado final. Um aplicativo gráfico do método escolhido foi desenvolvido e é apresentado simulando o efeito da incerteza de cada um dos parâmetros envolvidos no cálculo da viabilidade de projetos de eficiência.

O Capítulo 5 apresenta o estudo de caso do programa MEPS brasileiro para motores de indução trifásico, investigando as características de operação e o mercado brasileiro de motores elétricos e, com base nestes dados, apresenta simulações de análise de viabilidade para várias situações de substituição de motores elétricos por modelos mais eficientes.

O Capítulo 6 conclui a tese apresentando os destaques das contribuições deste trabalho.

2 INDICADORES DE EFICIÊNCIA

A Engenharia é a arte da utilização de recursos naturais para atender às necessidades humanas. A noção de escassez ou limitações desses recursos faz parte da natureza do engenheiro desde que, nos primeiros arroubos de consciência, o homem primitivo viu a necessidade de se proteger da vida na natureza. A busca pela utilização racional dos recursos naturais tem sido o indutor para o aparecimento de novas tecnologias. O motor a combustão, sensação do início do século XX, convertendo em trabalho útil apenas 30% da energia consumida, foi uma evolução admirável à máquina a vapor (século XVIII, com eficiência $\leq 10\%$). O motor elétrico, com sua eficiência média próximo dos 90%, foi um avanço tecnológico extraordinário e intensificou a utilização de máquinas motrizes no setor produtivo e doméstico a partir da metade do século XX. Em pouco mais de um século, a eficiência das máquinas motrizes subiu de menos de 10% para cerca de 90%, explicitando o compromisso da engenharia com a utilização racional dos recursos naturais.

Este capítulo introduz o conceito de eficiência energética e de seus principais indicadores, apresenta o estágio atual do programa de padrões mínimos de eficiência (MEPS) brasileiro para equipamentos de uso final, e investiga a incerteza das medições de eficiência através do detalhamento do método de medição da eficiência de motores de indução trifásicos.

2.1 Introdução

Eficiência está relacionada a energia e perdas, na medida em que define o quanto da energia utilizada para a realização de um determinado objetivo está efetivamente sendo utilizada para este fim e o quanto está sendo desperdiçado, dissipado, perdido. As formas de medir eficiência são várias, dependendo da abrangência do processo que está sendo analisado (um equipamento, uma planta industrial, uma região, um país, etc.) e da natureza da análise (econômica, física, termodinâmica). Na sua forma mais comum, eficiência é definida pela seguinte relação (PATTERSON, 1996).

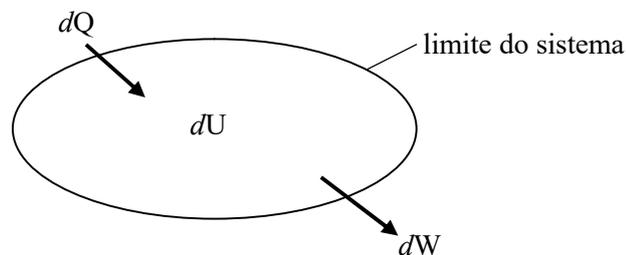
$$Eficiência = \frac{Saída\ de\ energia\ útil\ do\ processo}{Entrada\ de\ energia\ do\ Processo} \quad (2.1)$$

Aqui cabe uma rápida definição de energia, que em termos gerais é a maneira como se exerce uma força, força esta que, para o propósito deste trabalho, é aquela que tem o objetivo de gerar trabalho útil.

Para entender o conceito de energia, faz-se necessário definir um sistema como uma porção de matéria e/ou espaço delimitado para ser analisado, e saber que um sistema contém energia de várias formas: calorífica, cinética, elétrica, eletromagnética, mecânica, potencial, química, radiante. Além disso, é preciso definir os tipos de sistemas, que são classificados em isolado, fechado e aberto, de acordo com a troca de massa e energia com o exterior: o primeiro, sem nenhuma troca; o segundo, permitindo apenas troca de energia; e o último, permitindo troca de energia e matéria (WITTE; SCHMIDT; BROWN, 1988).

Dito isso, e considerando que a primeira lei da termodinâmica estabelece que a energia é conservada durante várias mudanças no estado da matéria, energia pode ser definida como a “propriedade de um sistema, fechado ou aberto, que lhe permite realizar trabalho e produzir calor”. A Figura 12 ilustra esta definição mostrando um sistema fechado que está recebendo um diferencial de calor (dQ) e produzindo um diferencial de trabalho (dW), o que provoca uma alteração diferencial na sua energia interna (dU).

Figura 12 – Balanço de energia em um sistema termodinâmico



Fonte: elaborado pelo autor

A primeira lei da termodinâmica define que a energia é conservada no balanço final desta troca de trabalho e calor. No entanto, a primeira lei se refere apenas a um equilíbrio geral de energia (igualdade entre entradas e saídas) de um sistema, conforme apresentado na Expressão (2.2), sem estabelecer parâmetros para os tipos de processos que podem ocorrer no interior desse sistema.

$$dU = dQ - dW \quad (2.2)$$

Para a análise de dispositivos de conversão de energia, faz-se necessário recorrer à segunda lei da termodinâmica que, em sua forma mais elementar, estabelece que é impossível converter calor em trabalho sem nenhum efeito adicional; alguma perda, ou dispêndio de

calor, necessariamente ocorre nesse processo. Em outras palavras, a segunda lei estabelece que no processo de conversão de calor em trabalho, a eficiência nunca poderá ser 100%, pois sempre haverá perdas.

A Figura 13 apresenta um resumo dos processos de conversão energética existentes no momento e suas respectivas tecnologias. A conversão se dá entre energias nas formas eletromagnética (radiação incidente solar/térmica), química, nuclear, térmica (combustíveis fósseis), cinética/mecânica, e elétrica.

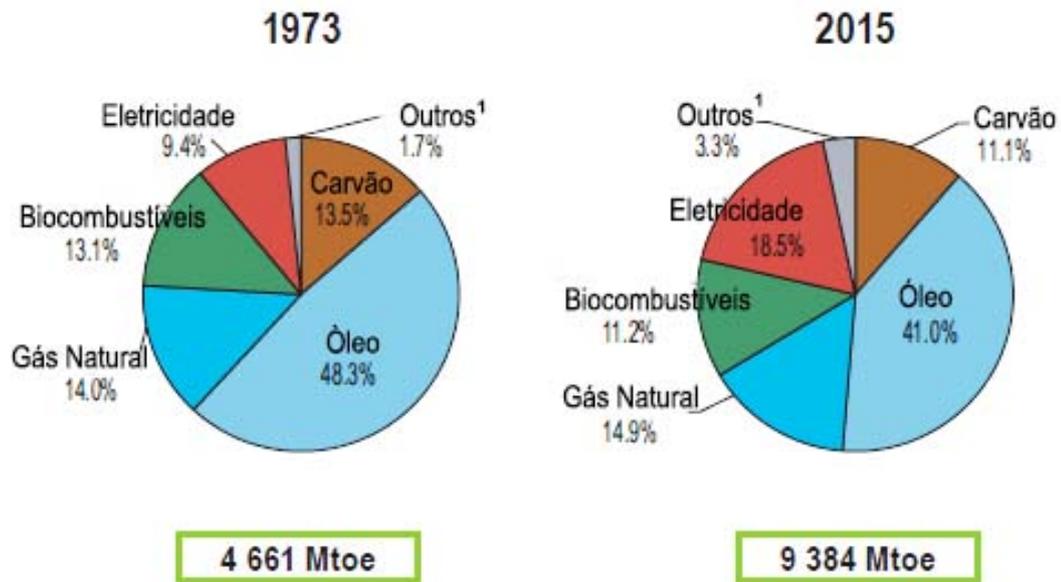
Apesar do grande número de processos e de tecnologias para conversão de energia, o uso final predominante se restringe a: energia usada diretamente para geração de calor (conversão de energia química em térmica); e energia usada para produzir trabalho (força motriz, gerada pela conversão de energia elétrica ou térmica em energia cinética/mecânica). Esta informação pode ser melhor visualizada na Figura 14, que apresenta a distribuição do consumo total de energia no mundo por tipo de combustível, onde as fontes térmicas (Óleo, Gás Natural e Carvão) representam 66,5% do total, com pouca variação desde 1973 (75,8% do total). E pode ser corroborada pelo aumento da eletricidade na participação no consumo total (de 9,4% em 1973 para 18,5% em 2015), que é gerada principalmente a partir de fontes térmicas, como demonstrado na Figura 15, e que é utilizada principalmente para produzir força motriz e calor (Figura 11).

Figura 13 – Processos de conversão de energia

	EM → DE	Eletro- magnética	Química	Nuclear	Térmica	Cinética/ Mecânica	Elétrica
Eletro- magnética			Luminescência química (vaga-lumes)	Reações Gama Fonte de Co^{60} Bomba A	Radiação térmica (ferro em brasa)	Carga em movimento acelerado (ciclotron) Fosforescência	Radiação eletromagnética Transmissor de TV Eletroluminescência
Química	Fotossínteses (plantas) Fotoquímica (filme fotográfico)		Catálise por radiação (planta de hidrazina) Ionização (câmara de neblina)		Ebulição (água/vapor) Dissociação	Dissociação por radiações	Eletrólise (produção de alumínio)
Nuclear	Radiação gama-nêutron ($Be^9 + \gamma - Be^8 + n$)	Desconhecida			Desconhecida	Desconhecida	Desconhecida
Térmica	Absorção de energia solar (aquecedor solar)	Combustão (fogo)	Fissão (elemento de combustível) Fusão			Atrito (sapatas dos freios)	Aquecimento do resistor (forno elétrico)
Cinética/ Mecânica	Radiômetro (pilha solar)	Músculos	Radioatividade (partículas alfa) Bomba A		Expansão térmica (turbinas) Combustão interna (motores)		Motores Elétricos Motores de eletrostrição (emissor de sonar)
Elétrica	Fotoeletricidade (fotômetros) Antena de rádio (pilha solar)	Pilha eletroquímica Baterias	Bateria nuclear		Termoeletricidade Termiônica Termomagnetismo Ferroeletricidade	Magnetohidrodinâmica (MHD) Gerador convencional	

Fonte:(NETTO, 1999)

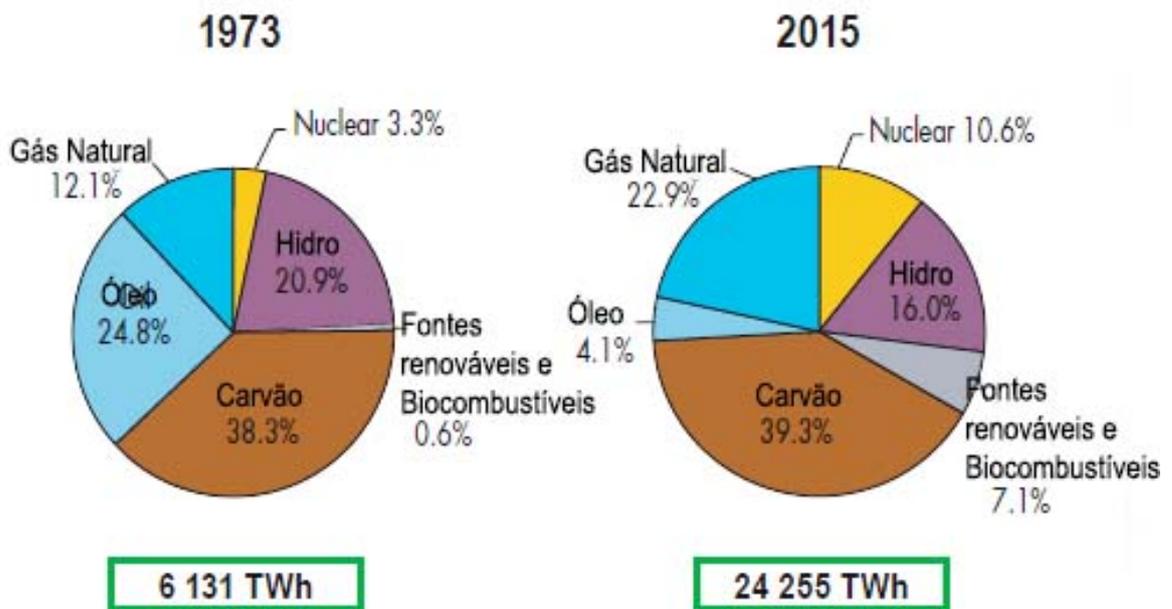
Figura 14 - Distribuição do consumo total de energia no mundo por tipo de combustível



Fonte: (IEA, 2017b)

¹Outros incluem geotérmica, solar, eólica, solar, etc.

Figura 15 – Geração de eletricidade mundial por tipo de combustível.



Fonte: (IEA, 2017b).

2.2 Indicadores de Eficiência

Os indicadores de eficiência energética são ferramentas importantes para analisar as interações entre a atividade econômica e humana, o consumo de energia e as emissões de dióxido de carbono (CO²) e ainda revelam aos formuladores de políticas onde as economias

de energia podem ser feitas. Além de fornecerem informações sobre as tendências no consumo de energia, os indicadores de eficiência energética também podem ser usados para ajudar a modelar e prever a demanda futura de energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014).

A Expressão (2.1) é uma representação genérica de eficiência energética, já que não existe uma medida quantitativa inequívoca para tal (PATTERSON, 1996), pois ela varia de acordo com a abrangência do sistema com que se trabalha. Definida a abrangência do sistema a ser analisado, o processo de definição de indicadores passa por quatro etapas, representadas na Figura 16.

Figura 16 – Processo de construção de indicadores de eficiência



Fonte: elaborado pelo autor com base em (PÉREZ-LOMBARD et al., 2012)

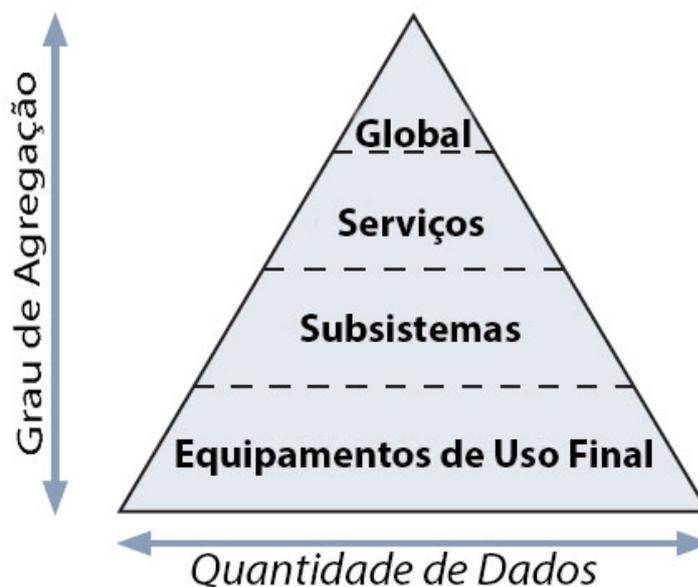
O objetivo principal do uso de energia é prover um serviço, que pode envolver diferentes atividades (transporte, iluminação, refrigeração, etc.) e a definição da qualidade deste serviço se apresenta como um limite para este objetivo. O ponto ideal de conforto para os ocupantes de um edifício a ser refrigerado, a iluminação adequada para um ambiente, a tonelagem a ser transportada, estes são exemplos qualitativos que devem ser definidos inicialmente para a definição posterior dos indicadores de eficiência energética. A qualidade do serviço também é chamada de Nível de Atividade.

Os Níveis de Agregação retratam uma hierarquia de abrangência do universo analisado que é representado de forma piramidal, da maior (topo da pirâmide) abrangência para o nível mais detalhado (menor abrangência, na base da pirâmide). Cada setor possui o(s) seu(s) indicador(es) de eficiência. A Figura 17 representa uma visão genérica dos níveis de agregação, passando de um nível global até o equipamento de uso final.

Esta hierarquia é importante porque mostra como as melhorias alcançadas no nível mais baixo (resultado da aplicação de programas MEPS em equipamentos, de progressos tecnológicos, reformas estruturais, ou até de mudanças de comportamento), podem ser vinculadas a uma hierarquia superior, explicitando uma cadeia de efeitos. A abrangência

da pirâmide dos Níveis de Agregação depende da complexidade e da dimensão do sistema sob análise, pode abarcar desde o consumo total de energia do planeta (TANAKA, 2008), passando pelo cenário conjunto dos setores residencial, industrial e de transportes (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014), ou analisando o caso específico do setor residencial (HAAS, 1997), até chegar a detalhes de sistemas de refrigeração e aquecimento (PÉREZ-LOMBARD et al., 2012).

Figura 17 - Pirâmide de Níveis de Agregação de indicadores de eficiência energética.



Fonte: elaborado pelo autor com base em (PÉREZ-LOMBARD et al., 2012)

Para a definição do indicador de uso de energia se faz necessário estabelecer a posição em que o sistema sob análise está na cadeia de transformação de energia (vide Figura 1), estipular quais os tipos de energia (eletricidade, gás natural, óleo, carvão, etc.) estão sendo utilizados nos limites do sistema analisado, e caracterizar o fluxo de energia em análise. Exemplificando, se o sistema estabelecido é uma residência, teremos uma unidade de uso final de energia (GJ), que concentra as opções de uso de energia na forma de eletricidade (kWh), gás (kJ) e, em alguns casos, carvão e óleo diesel. Os indicadores de uso de energia se referem a aquecimento e refrigeração (HVAC) de ambientes, aquecimento para o preparo de alimentos, além de aquecimento de água, iluminação, eletrodomésticos, etc. A Figura 18 ilustra os indicadores de uso de energia para uma residência, assim como os indicadores de demanda.

Os indicadores de demanda estabelecem em que base será feita a medição do uso de energia. Para um sistema de refrigeração e aquecimento, pode-se utilizar área refrigerada

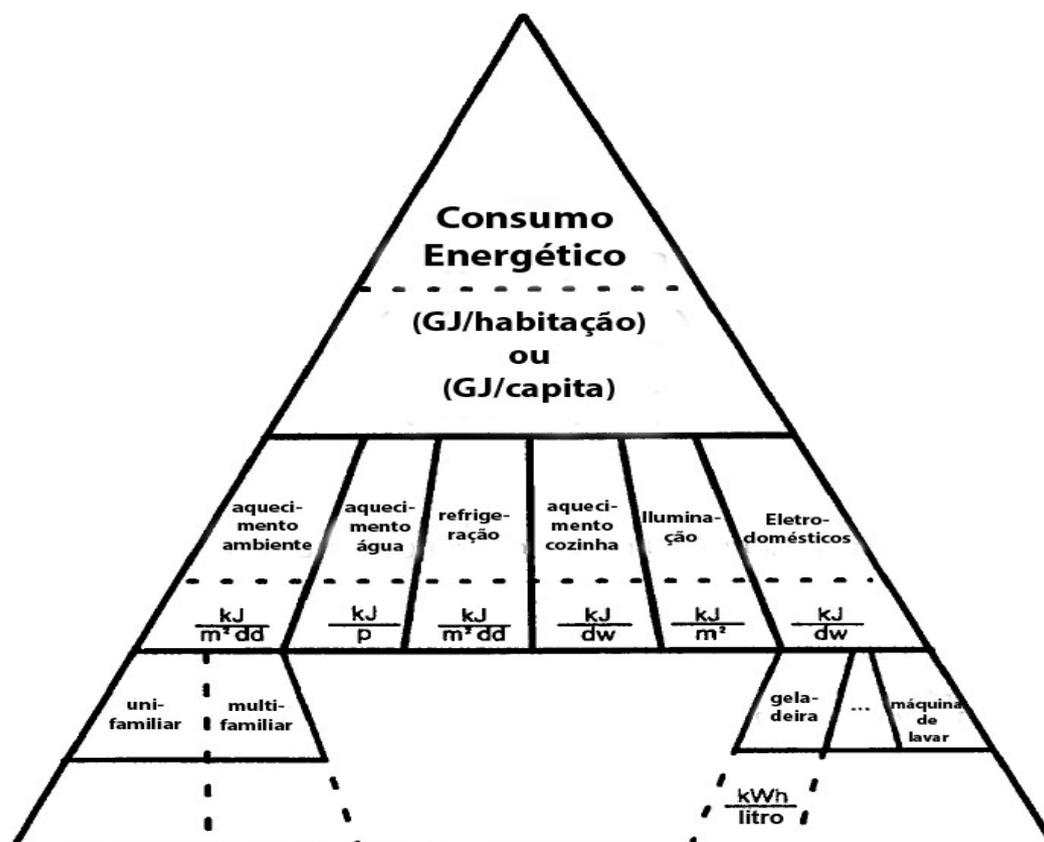
(m^2), energia térmica (m^2 grau dia – m^2dd). Para um nível mais elevado da pirâmide, pode-se utilizar o consumo de energia por habitação ou per capita.

2.2.1 – Tipos de Indicadores

Estabelecidos o nível de qualidade de serviço, o nível de agregação, e os indicadores de uso de energia e de demanda, define-se o tipo de indicador de eficiência adequado. Existem quatro grupos de indicadores de eficiência energética, a saber:

- Termodinâmicos: inteiramente relacionados à ciência termodinâmica (1a. e 2a. lei da termodinâmica);
- Físico-termodinâmicos: indicadores híbridos, onde a energia de entrada é medida em unidades termodinâmicas, mas a de saída é medida em unidades físicas (por exemplo, toneladas de produto ou passageiros quilômetros);
- Econômico-termodinâmicos: indicadores híbridos, diferem do anterior porque a saída é um serviço medido em preços de mercado;
- Econômicos: tanto a energia de entrada como o serviço produzido são medidos monetariamente.

Figura 18 – Pirâmide de consumo energético por uso final para uma residência



Fonte: (HAAS, 1997).

2.2.1.1 Indicadores Termodinâmicos

Como dito anteriormente, a primeira lei da termodinâmica estabelece que a energia é conservada durante os vários tipos mudança no estado da matéria (Expressão 2.2), porém, sem estabelecer parâmetros para os tipos de processos que podem ocorrer no interior deste sistema (qualidade da energia). A Segunda Lei estabelece que é impossível converter calor em trabalho sem nenhum efeito adicional, alguma perda, ou dispêndio de calor necessariamente ocorre neste processo e, diante disso, a qualidade da energia utilizada no processo pode ser diferenciada. A eficiência de um sistema termodinâmico é dada pela expressão (2.3).

$$\eta = \frac{\text{energia entregue na forma de trabalho}}{\text{energia absorvida pelo sistema}} \quad (2.3)$$

As medições em sistemas termodinâmicos são adequadas para indicadores de eficiência por serem funções do estado processo, ou seja, apresentam uma medição única para um determinado ambiente do processo (temperatura, pressão, magnetização, fórmula química, etc.), e as alterações físicas resultantes de alguma dinâmica no processo alteram as funções de estado, que podem novamente ser medidas nesta nova condição, obtendo-se a energia requerida.

➤ *Eficiência da Primeira Lei*

Para um sistema em regime permanente, onde ocorre uma transformação adiabática ($\Delta Q=0$), a eficiência ($\eta_{\Delta H}$) pode ser medida em função da variação entálpica do processo (ΔH), dada pela expressão (2.4).

$$\eta_{\Delta H} = \frac{\Delta H_{saída}}{\Delta H_{entrada}} \quad (2.4)$$

O principal problema deste indicador é que ele utiliza o mesmo critério para avaliar uma fonte de energia de alta qualidade e uma de baixa qualidade, ou seja, uma unidade de eletricidade tem o mesmo valor que uma unidade de energia solar, e, por esta razão não é adequado para utilização nos níveis mais altos da pirâmide de Níveis de Agregação, onde diferentes formas de uso energético (de qualidades diferentes) são agregados. Esta deficiência pode ser corrigida pela utilização de fatores de qualidade da energia, que compensem as diferenças de qualidade de energia durante os processos de conversão (CULLEN; ALLWOOD, 2010a).

➤ *Eficiência da Segunda Lei*

Com base na Segunda Lei da Termodinâmica, algumas relações de eficiência térmica podem ser utilizadas para nivelar as unidades de diferentes qualidades de energia. A utilização do potencial de trabalho de um processo (máxima quantidade de trabalho que um processo pode gerar) é uma solução. A Exergia do processo, definida como “O trabalho que está disponível em um gás, fluido ou massa como resultado de uma condição de não-equilíbrio quando comparada com uma condição de referência”(AHERN, 1980), também pode ser utilizada para medir a qualidade de energia da entrada do processo. No entanto, “trabalho” pode não ser a única saída de energia requerida, já que existe uma demanda pelo uso final de energia na forma de calor. Além disso, ainda existem diversas formas de trabalho (químico, elétrico, mecânico, etc.) que devem ser nivelados para medir a qualidade da energia.

Uma abordagem que pode solucionar estas limitações é a utilização de uma referência “ideal” de energia mínima requerida para executar um processo. A eficiência da Segunda Lei de um processo (η_ρ) é dada pela relação entre a eficiência entálpica real ($E_{\Delta H(\text{real})}$) do processo e a eficiência entálpica ideal do processo ($E_{\Delta H(\text{ideal})}$) (Expressão (2.5)).

$$\eta_\rho = \frac{E_{\Delta H(\text{real})}}{E_{\Delta H(\text{ideal})}} \quad (2.5)$$

Para calcular a eficiência entálpica ideal, utiliza-se a fórmula de Kelvin de conversão de trabalho em calor e que, aplicada ao ciclo de Carnot, representa o máximo de eficiência de uma máquina termodinâmica (KRENZ, 1984). Na expressão (2.6), a diferença de temperatura entre a fonte de calor inicial (t_1) e final do processo (t_2), normalmente a temperatura ambiente, representam o limite máximo da eficiência do processo de conversão de calor (ΔH) em trabalho mecânico (M).

$$M = \Delta H[(t_1 - t_2)/t_1] \quad (2.6)$$

A Fórmula de Kelvin está associada à conversão de calor em trabalho mecânico e apresenta a limitação de não incluir outros processos (químico, transferência de calor, refrigeração, etc.). No entanto, existem adaptações para esta fórmula que podem ser utilizadas, como a teoria de Betz adaptada para a determinação da eficiência máxima de turbinas eólicas (SLESSER, 1982). Outra deficiência está na impossibilidade prática

de se atingir esta eficiência “ideal”, já que ela pressupõe a perfeita reversibilidade do processo, o que, na prática, requer a existência de processos infinitamente lentos. Porém, existem estudos (WU, 1988) (ANDRESEN, B; BERRY, R. S.; SALMON, 1977) que desenvolvem métodos de otimização que superam este pressuposto da perfeita reversibilidade usado no cálculo da eficiência energética “ideal”.

Outra limitação deste indicador aparece nos casos de entradas de energia indireta, como nos casos de cogeração, onde o calor resultante de um processo é utilizado para gerar energia que eventualmente pode ser reinserida no processo. Daí o problema da qualidade de energia reaparece e a necessidade de equivalência entre as diferentes entradas de energia deve ser de alguma forma estabelecido.

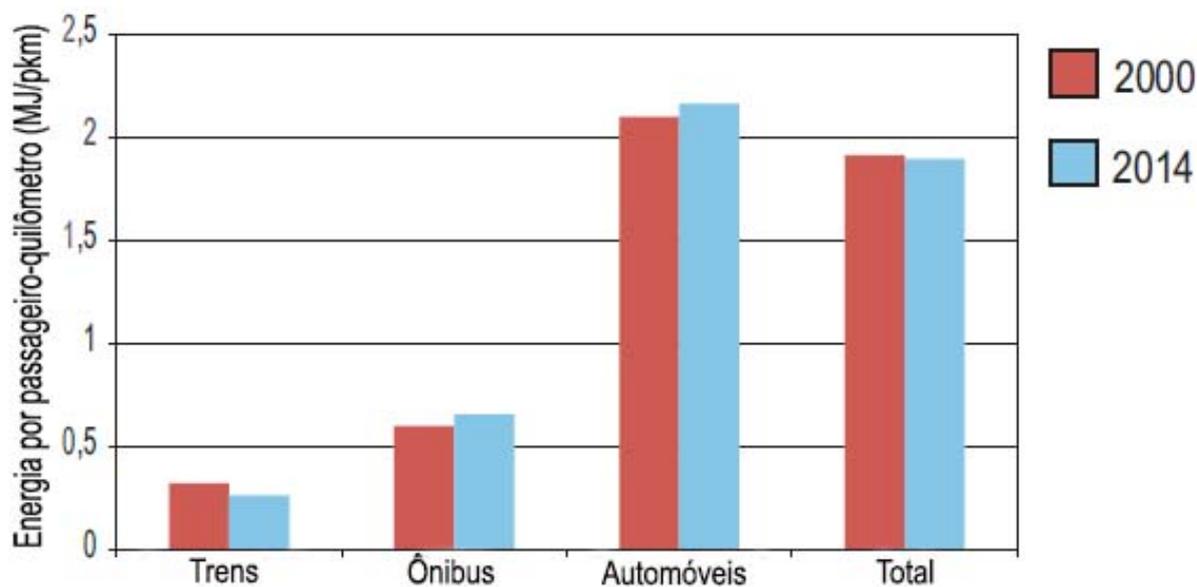
2.2.1.2 Indicadores Físico-termodinâmicos

Os indicadores termodinâmicos, apesar de bem representarem a eficiência de processos e equipamentos, não evidenciam o serviço objeto do processo, o que dificulta a compreensão por parte dos consumidores. Os indicadores físico-termodinâmicos se aproximam das necessidades dos consumidores ao relacionar o serviço produzido (saída) à entrada de energia. Cada serviço requer um indicador apropriado. A expressão (2.7) representa um indicador de eficiência para o transporte de cargas ($\eta_{TRANSPORTE}$) que relaciona a quantidade de carga transportada (tonelada-quilômetro) com a energia dispendida no transporte (ΔH).

$$\eta_{TRANSPORTE} = \frac{\text{Saída (toneladas quilômetros)}}{\text{Energia de entrada } (\Delta H)} \quad (2.7)$$

Para o setor industrial, o indicador físico varia de acordo com a atividade exercida (tonelada de alumínio, trigo, tijolos, etc.), e medidas volumétricas também podem ser utilizadas (litros de leite, metros cúbicos de madeira, etc.). Para os setores residenciais e comerciais normalmente é utilizado o indicador energia de entrada/m² (Figura 18). A expressão (2.6) também pode ser utilizada de forma invertida (energia de entrada/toneladas-quilômetros) para o transporte de carga, enquanto que, para o transporte de passageiros, pode ser utilizado o indicador energia de entrada/passageiro-quilômetro (Figura 19) ou energia de entrada/veículo-quilômetro, embora este último tenha sido contestado (COLLINS, 1992), pois o objetivo do transporte de passageiros não é transportar o veículo.

Figura 19 – Indicador físico-termodinâmico aplicado ao transporte de passageiros.



Fonte: (IEA, 2017b)

2.2.1.3 Indicadores Econômico-termodinâmicos

Estes indicadores podem ser aplicados em Níveis de Agregação relacionados a uma atividade econômica, já que a saída do processo é medida em termos de valores monetários (\$). Existem dois principais tipos de indicadores econômico-termodinâmicos:

➤ *Uso energético/PIB e uso energético setorial/saída*

São indicadores utilizados para os níveis setoriais e nacionais. A relação uso energético/PIB é um indicador nacional e pode definir a “eficiência da nação”. No entanto, esta denominação não é adequada como indicador de eficiência energética, porque este indicador pode ser influenciado por outros fatores, tais como: aumento da produtividade do trabalhador, mudanças no perfil das fontes energéticas e/ou no perfil setorial da economia. A equivalência entre nações com base neste indicador também pode ser prejudicada, já que a conversão de moedas pela taxa de câmbio não leva em consideração o poder de compra da população do país. Existem métodos que adaptam o PIB à paridade pelo poder de compra ((REISTER; NATIONAL; RIDGE, 1987).

O indicador setorial de energia de entrada/saída (\$) tem as mesmas limitações do indicador nacional e podem considerar apenas as fontes de energia usadas para operar os equipamentos (óleo, eletricidade, energia solar), denominado uso energético direto, ou incluir as fontes indiretas de energia (por exemplo: fertilizantes e pesticidas em uma fazenda), caracterizando o uso energético total.

➤ *Uso Energético/produktividade*

Este indicador é o recíproco do uso energético/PIB, pois é dado pela divisão do PIB pelo consumo nacional de energia (E). Também pode ser utilizado no nível setorial. Analisado em conjunto com os indicadores de produtividade laboral e de capital, este indicador pode definir as relações entre as variações de consumo energético e as demais, dirimindo as dúvidas levantadas com o indicador recíproco, que não media as influências destes fatores na eficiência energética nacional.

Para o consumidor final, um indicador econômico-termodinâmico sugerido é o “custo da energia economizada” (investimento(\$)/energia economizada), que tem a vantagem de informar diretamente ao consumidor quanto em dinheiro está sendo economizado a partir de melhorias na eficiência energética. Um indicador deste tipo foi desenvolvido para este trabalho e está detalhado no Capítulo 5 (ANDRADE; PONTES, 2017).

2.2.1.4 Indicadores Econômicos

Para estes indicadores, a eficiência energética é medida inteiramente em termos monetários. Entende-se que a relação uso energético (\$)/PIB é mais precisa para refletir a produtividade da economia do que o indicador econômico-termodinâmico anterior. Este indicador resolve o problema da qualidade da energia para diferentes formas de energia ao adotar um “preço ideal” para a unidade de energia, já levando em consideração os diferentes custos de produção e transformação para diferentes formas de energia. O único problema é que este “preço ideal” apresenta instabilidades em função do tempo, ao contrário das medidas termodinâmicas, que são constantes. O indicador puramente econômico mais utilizado é apresentado na expressão (2.8).

$$\eta_{Nacional} = \text{consumo nacional de energia}(\$/\text{saída nacional} (\$ PIB) \quad (2.8)$$

Este indicador pode ser adaptado para o uso setorial, mas não é indicado para o monitoramento da eficiência energética.

2.3 Indicadores de eficiência de equipamentos de uso final

A ênfase deste trabalho está nos níveis mais baixos da pirâmide dos Níveis de Agregação, mais especificamente nos equipamentos de uso final, e o programa que tem como

objeto este Nível e define indicadores mínimos de eficiência para estes equipamentos é o programa de padrões MEPS – *Minimum Efficiency Performance Standards* (MEYERS; MCMAHON; ATKINSON, 2008). No Brasil, o CGIEE tem a tarefa específica de definir os MEPS (ANDRADE; PONTES, 2009) a serem aplicados em uma gama de equipamentos fabricados e comercializados no Brasil. Para alcançar este objetivo, o CGIEE implementa a etapa P do fluxograma apresentado na Figura 8. Para tal, a equipe do CGIEE estuda a experiência internacional na aplicação destes programas de padronização e etiquetagem, avalia os laboratórios de ensaio existentes no país, realiza uma pesquisa de mercado sobre os principais consumidores de energia de máquinas e equipamentos elétricos, calcula as implicações comerciais da adoção dos indicadores de eficiência e define quais equipamentos devem ser objetos de regulamentação, além de um conjunto de metas para os fabricantes (ASSUMPÇÃO, 2002b).

Após estas etapas, uma regulamentação é elaborada para cada equipamento, seguindo uma ordem também definida pelo CGIEE e que leva em consideração o potencial de economia de energia do equipamento. A elaboração da regulamentação segue as seguintes fases de implantação:

1. Estabelecimento de índices de eficiência para adesão voluntária através de programas de etiquetagem;
2. Trabalho em conjunto com os fabricantes para determinação destes índices com base em valores técnico e economicamente viáveis;
3. Elaboração da versão inicial da regulamentação para análise jurídica
4. Consulta Pública com ampla divulgação e aquisição de contribuições via internet;
5. Audiência Pública;
6. Promulgação da regulamentação na forma de Decreto Presidencial.

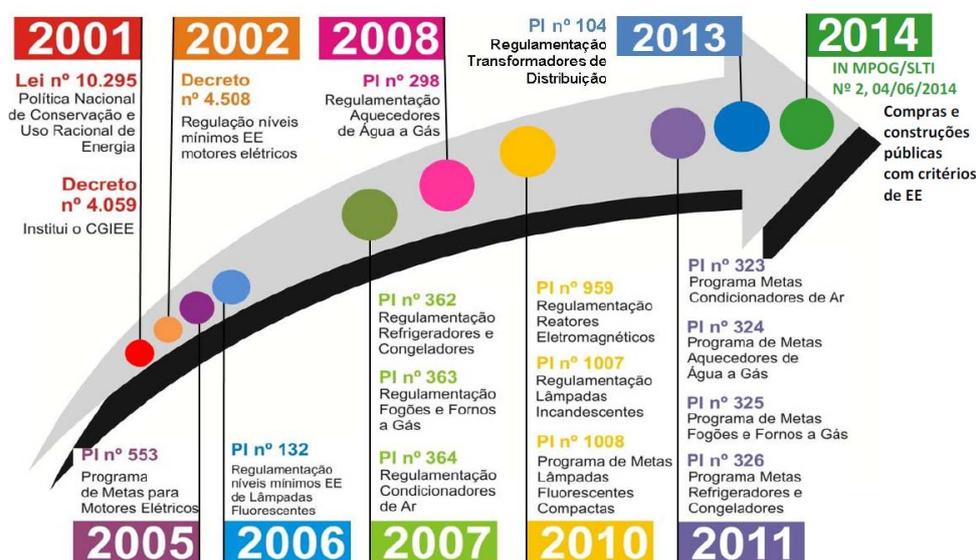
Para dar início à elaboração das regulamentações específicas para cada equipamento consumidor de energia, o CGIEE selecionou o motor elétrico de indução trifásico. A escolha deste equipamento ocorreu devido ao significativo potencial de consumo de energia que representa na matriz energética de consumo – cerca de 30% do consumo total do país e cerca de 62% do consumo do setor industrial (SOARES et al., 2013). Já no final do ano de 2002, foi aprovada a regulamentação dos índices mínimos de eficiência para motores fabricados e comercializados e em 2004 uma nova lei foi aprovada aumentando estes índices. Nos últimos anos (2007-2014) (Figura 20) foram aprovadas as regulamentações referentes a

lâmpadas, refrigeradores, fornos e fogões a gás, condicionadores, e aquecedores de água (CGIEE/MME, 2014).

2.3.1. Motores de Indução Trifásicos

Este processo já havia sido iniciado em um período anterior à promulgação da lei de eficiência Energética, daí a rapidez da implementação da regulamentação, que ocorreu no final do ano de 2002 (Decreto 4508/2002) (MME, 2014) e já teve regulamentada uma segunda fase que aumenta os índices mínimos de eficiência estabelecidos neste decreto (Portaria Interm. MME 553/2005). Esta agilidade foi possível porque desde 1992, o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO (INMETRO, 2014) e o Programa Nacional de Conservação de Energia – PROCEL/Eletróbrás (PROCEL/ELETRÓBRÁS, 2015) vêm implementando um sistema voluntário de etiquetagem informativa através do Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE.

Figura 20 – Marco regulatório da CGIEE



Fonte: (CGIEE/MME, 2014)

O indicador de eficiência de um motor de indução trifásico é do tipo Termodinâmico da Primeira Lei e é dado pela razão entre a potência entregue no eixo da máquina ($P_{saída}$) na forma de torque mecânico em condição de carga nominal e a potência elétrica absorvida nos bornes do motor ($P_{entrada}$) (Expressão (2.9)). O método de ensaio para a obtenção deste valor também é estabelecido na regulamentação e obedece aos critérios

definidos na norma NBR 5383 -1 /2001 da ABNT - Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1 - Motores de Indução Trifásicos – Ensaios (ABNT, 2002).

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

A promulgação do Decreto 4508/2002 tornou obrigatória a adesão aos índices de eficiência mínimos para os motores fabricados e comercializados no país a partir de agosto de 2003. E ainda estabeleceu avaliação de conformidade dos motores e dos laboratórios, assim como as formas de fiscalização e as penalidades ao não cumprimento das disposições estabelecidas na Regulamentação. Foram definidas duas tabelas com índices mínimos de eficiência obrigatórios, um denominado Padrão e outro denominado Alto Rendimento. Os índices do motor de Alto rendimento são compatíveis com aqueles definidos no padrão EAct (EUA) e IE2 (Europa).

Esta regulamentação foi alterada no final do ano de 2005 através da Portaria Interministerial MME-MCT-MDIC No. 553/2005, que restringiu as especificações de eficiência mínima para a tabela referente ao motor de alto rendimento e estabeleceu a sua adesão obrigatória a partir de julho de 2010. Porém, devido a uma grande quantidade de motores do tipo Padrão ainda disponíveis em estoque, esta decisão teve que ser adiada até o ano de 2012. Atualmente, os motores fabricados e comercializados no Brasil devem obedecer aos índices mínimos do Alto Rendimento. Atualmente, a nomenclatura dos índices foi alterada e o índice obrigatório é o IR2 (Alto Rendimento) e já foram definidos os índices de eficiência IR3 (ABNT, 2013), compatíveis com os índices Premium (EUA) e IE3 (Europa), mas ainda não há previsão para sua regulamentação obrigatória. A Figura 21 apresenta estes índices incluindo o Superpremium/IE4, em fase de estudo.

2.3.2. Iluminação

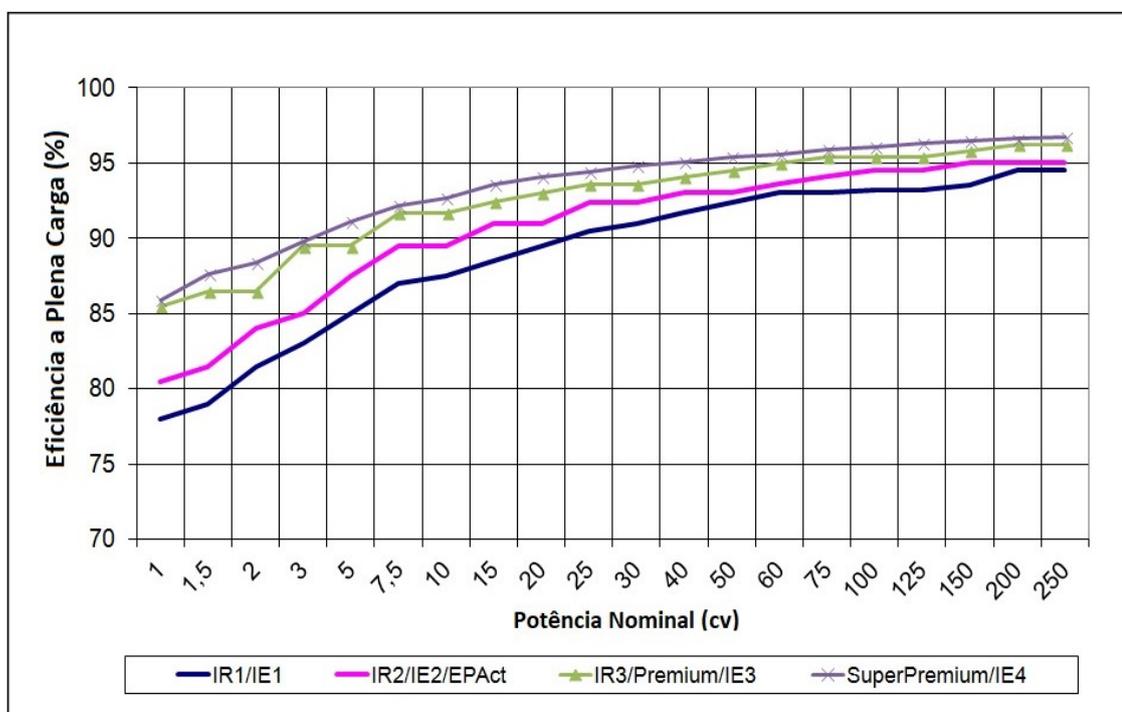
Os MEPS para lâmpadas incandescentes foram definidos através da Lei 1007/2010 (MME, 2014), para lâmpadas fluorescente através da Lei 0132/2006 e para lâmpadas fluorescentes compactas através da Lei 1008/2010. A eficiência de uma lâmpada é definida como a relação entre os lúmens medidos e a energia elétrica consumida. Após 100 horas de operação, uma lâmpada fluorescente deve ter uma eficiência entre 43 e 57 lumens/W (lâmpada com potência de 8-25 W), uma lâmpada fluorescente compacta deve ter uma eficiência entre 47 e 60 lumens/W (potência de 6 a 25 W). Depois de 2.000 horas de

operação, as lâmpadas devem manter pelo menos 80% da eficiência definida para 100 horas de operação.

A lâmpada incandescente foi regulamentada de forma diferente, com um aumento progressivo dos níveis mínimos de eficiência obrigatórios, que mudaram duas vezes para cada potência durante o período entre 2012 e 2016, quando estas lâmpadas foram proibidas de serem comercializadas no mercado brasileiro.

Os regulamentos também definem os métodos de medição e os laboratórios qualificados para estas medições. Os primeiros MEPS obrigatórios para lâmpadas estão válidos desde janeiro de 2007.

Figura 21 – MEPS para motores de indução de 4 polos



Fontes: elaborado pelo autor com base em (ALMEIDA; FERREIRA, 2014), (ANDRADE, 2009) e (SOARES et al., 2013)

2.3.3. Refrigeradores e Freezers

A Portaria Interministerial MME-MCT-MDIC No. 362/2007 estabeleceu níveis máximos de consumo para refrigeradores e congeladores a serem obedecidos obrigatoriamente por equipamentos fabricados e comercializados no país a partir de maio de 2008. Seguindo o padrão destas regulamentações, também estabeleceu os critérios de avaliação de conformidade e de laboratórios, assim como as penalidades e as formas de fiscalização do cumprimento da legislação. Também definiu a obrigatoriedade da indicação do consumo mensal do equipamento em sua etiqueta de identificação. A Portaria

Interministerial MME-MCT-MDIC No. 326/2011 atualizou a anterior incluindo frigobares e refrigeradores *frost-free*, e aumentou os índices mínimos da anterior, estipulando o final de 2013 como prazo para o comércio atacadista e varejista iniciar a disponibilização dos produtos mais eficientes.

O indicador de eficiência (I_e) é dado pela relação entre o consumo declarado (C) e o consumo padrão (C_p), de acordo com a expressão (2.10), e os índices mínimos permitidos variam de 1,113 (frigobar) a 1,174 (refrigerador *frost-free*). O Cálculo do consumo padrão (C_p) para cada equipamento depende da categoria definida para o refrigerador (simples, combinado ou combinado *frost free*) e congelador (vertical, vertical *frost free* ou horizontal), do tipo de elemento utilizado para a expansão das espumas isoladoras (R141b ou Ciclopentano), do volume de cada compartimento e da temperatura nestes compartimentos (f). O Cálculo do Volume Ajustado (VA) do equipamento é dado pela expressão (2.11).

$$I_e = C/C_p \quad (2.10)$$

$$VA = m[V_R + \sum(fV_C)] \quad (2.11)$$

Onde V_R é o volume do refrigerador, V_C o volume dos demais compartimentos, o valor de f é tabelado de acordo com a temperatura máxima de cada compartimento ou seção e m é 1,2 para tecnologia *frost free* e 1,0 para os demais casos. A partir deste Volume Ajustado, obtém-se o consumo padrão (C_p) para cada tipo de equipamento a partir da expressão (2.12).

$$C_p = p_1VA + p_2 \quad (2.12)$$

Os fatores p_1 e p_2 são os parâmetros relativos a cada categoria e cada elemento de expansão das espumas isoladoras. O parâmetro p_1 varia de 0,0178 (Congelador vertical *frost free*) a 0,0346 (frigobar), e parâmetro p_2 varia de 7,4862 (refrigerador combinado *frost free*) a 58,712 (Congelador vertical *frost free*).

Exemplificando, um refrigerador com capacidade de armazenamento interna de 300 litros deve ter um Nível Máximo de Consumo de 30 kWh/mês, enquanto um congelador vertical *frost free* com a mesma capacidade de armazenamento deve consumir no máximo 82 kWh/mês.

2.3.4. Fogões e Fornos a Gás

Neste item as ações resultantes da Lei de Eficiência Energética se voltam para outra fonte de energia, o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e o Gás Natural (GN), por meio da Portaria Interministerial MME-MCT-MDIC No. 363/2007 que define índices mínimos de eficiência energética a serem obedecidos obrigatoriamente por todos os fogões e fornos a gás fabricados e comercializados no país a partir de maio de 2008. A Portaria Interministerial MME-MCT-MDIC No. 325/2011 atualizou a anterior aumentando os índices mínimos para produtos comercializados a partir do final de 2013.

Os índices mínimos de eficiência compreendem a mesa de cocção e o forno e possuem valores e métodos de ensaio diferentes.

2.3.4.1. Mesa de Cocção

O rendimento de um queimador (η_{Queim}) da mesa de cocção é dado pela relação entre a quantidade de energia térmica (U_{Queim}) efetivamente absorvida pelo conteúdo de um recipiente padrão sobre o queimador preenchido com uma determinada massa de água durante o intervalo de tempo necessário para que a temperatura da água se eleve de 20°C para 90°C, e a quantidade de energia térmica ($U_{\text{Gás}}$) disponível pela combustão completa do gás em função de seu poder calorífico (Expressão (2.13)).

$$\eta_{\text{Queim}} = \frac{U_{\text{Queim}}}{U_{\text{Gás}}} \times 100 \quad (2.13)$$

O índice mínimo de eficiência energética da mesa de cocção (η_{Mesa}) é calculado a partir da média aritmética dos j queimadores cuja potência nominal seja igual ou superior a 1,16 kW (1.000 kcal/h) (Expressão (2.14)).

$$\eta_{\text{Mesa}} = \frac{\sum_j \eta_{\text{Queim}}}{j} \geq 57\% \quad (2.14)$$

2.3.4.2. Forno

O índice de consumo do forno (I_C) é dado pela relação entre o valor de seu consumo de manutenção (C_{Manut}), que é medida pela quantidade de gás por unidade de tempo que, na combustão no queimador do forno, é necessária para manter, no centro geométrico do forno vazio, a elevação de 210°C acima da temperatura ambiente, e o valor máximo desse

consumo ($C_{Máx}$), calculado segundo a norma de ensaio (item 3.2 - NBR 13723-2/99) para um forno de mesmo volume (Expressão (2.15)).

$$I_C = \frac{C_{Manut}}{C_{Máx}} \times 100 \quad (2.15)$$

O índice de eficiência energética do forno (I_E) é dado pelo complemento percentual do índice de consumo do forno (I_C) (Expressão (2.16)).

$$I_E = 100\% - I_C \geq 37 \quad (2.16)$$

2.3.5. Condicionadores de Ar

A Portaria Interministerial MME-MCT-MDIC No. 364/2007 estabeleceu índices mínimos de eficiência energética obrigatórios para Condicionadores de Ar Monobloco, de janela ou parede, de corpo único ou tipo split system hi-wall de parede, de uma única unidade evaporadora para uma única unidade condensadora, de fabricação nacional ou importados, para comercialização e/ou uso no Brasil a partir de maio de 2008. A Portaria Interministerial MME-MCT-MDIC No. 323/2011 aumentou estes índices e incluiu os equipamentos “Split” Piso-Teto e “Split” Cassete com obrigatoriedade de comercialização a partir do final de 2013 (final de 2014 para os equipamentos incluídos).

O índice de eficiência energética para os condicionadores é dado pela relação entre capacidade total de refrigeração (convertida em watts) e a potência elétrica demandada (expressa em Watts), denominado Coeficiente de Eficiência Energética (EER – *Energy Efficiency Ratio*). Deve notar-se que o EER fornece uma relação superior a 1,0; isso acontece porque estamos lidando com uma bomba de calor, cujo desempenho é medido por uma relação entre uma dimensão termodinâmica (BTU/h convertida para W) e uma dimensão elétrica (W), que é superior a 1,0 e aumenta com o desempenho da bomba de calor (KRENZ, 1984). Para sistemas de aquecimento, utiliza-se o indicador COP (*Coefficient of Performance*), que é similar ao EER. Os métodos de ensaio estão definidos nas Normas NBR-5858 e NBR-5882. A Tabela 2.1 relaciona a capacidade de refrigeração para condicionadores de ar de janela ou parede com os índices mínimos de eficiência energética por faixa de potência.

Os Condicionadores de ar tipo split possuem índices mínimos de eficiência superiores aos do tipo janela; para aparelhos com capacidade de refrigeração até 36.000 BTU/h (10.548 W), o Coeficiente de Eficiência Energética é de 2,6.

Tabela 2.1 – Índices mínimos para condicionadores de ar de janela

Capacidade de Refrigeração - CR		EER
BTU/h	W	W/W
$CR \leq 9.000$	$CR \leq 2.637$	2,68
$9.000 < CR < 14.000$	$2.637 < CR < 4.102$	2,78
$14.000 \leq CR < 20.000$	$4.102 \leq CR < 5.860$	2,45
$20.000 \leq CR$	$5.860 \leq CR$	2,3

Fonte: elaborado pelo autor

2.3.6. Aquecedores de Água a Gás

Mais um equipamento que utiliza GLP e GN tem seus índices de eficiência energética definidos e tornados obrigatórios pela Portaria Interministerial MME-MCT-MDIC No. 298/2008 que foi complementada na Portaria Interministerial MME-MCT-MDIC No. 324/2011. A partir do final de 2013 todos os aparelhos que utilizam gás para aquecimento de água, do tipo instantâneo ou de acumulação, fabricados ou comercializados no país deverão obedecer aos índices apresentados da Tabela 2.2.

Os procedimentos para o cálculo dos índices de eficiência para aquecedores de água são similares aos da mesa de cocção do fogão a gás. O rendimento do aquecedor é calculado de modo similar ao rendimento do queimador da mesa de cocção (Expressão 2.1) e o índice de eficiência energética do aquecedor é a média aritmética de três medições do rendimento de um mesmo aparelho.

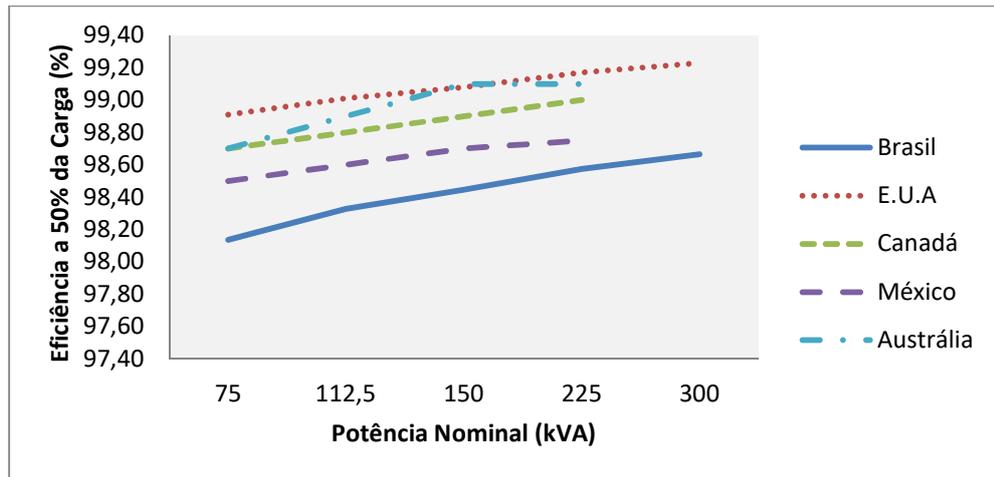
2.3.7. Transformadores

A Portaria Interministerial nº 104/2013 definiu a regulamentação específica e o programa de metas de transformadores de distribuição em líquido isolante. Os transformadores que devem obedecer ao regimento dessa portaria são monofásicos de tensões primárias de 15, 24,2 e 36,2 kV e potências de 5 a 100 kVA e transformadores trifásicos de tensão primária 15, 24,2 e 36,2 kV e potências de 15 a 300 kVA (típicos transformadores de distribuição). Estes índices mínimos são válidos para transformadores comercializados no Brasil a partir do final de 2014.

A eficiência de um transformador é calculada de forma similar ao do motor de indução; ou seja, é a razão entre a saída e a entrada de energia elétrica. A legislação,

entretanto, define as perdas máximas em vazio (W), as perdas máximas totais na derivação nominal (W) e as perdas máximas totais na derivação crítica (W). Os MEPS aprovados no Brasil ainda são conservadores quando comparados com as normas internacionais. A Figura 22 ilustra esta comparação.

Figura 22 - MEPS para Transformadores de distribuição com refrigeração a óleo.



Fonte: elaborado pelo autor a partir de (CEC - CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2010).

Como pode ser visto, os Estados Unidos têm as normas com melhor desempenho, seguido por Austrália e Canadá.

2.3.8. Veículos Automotivos

O INMETRO aprovou em 2008 (Portaria n.º 391) uma Regulamentação para Avaliação de Conformidade da Etiquetagem para veículos leves de passageiros e veículos comerciais leves com motores de ciclo Otto. O presente regulamento define as regras de etiquetagem que esses veículos leves devem obedecer. A autonomia do veículo em $km/litro$ de consumo de combustível (Ct) é um dos itens que deve ser apresentado no manual do veículo e deve ser medido como uma média do consumo real (Cr) em áreas urbanas e em rodovias, de acordo com as expressões (2.17) e (2.18):

$$Cr_{urbano} = \frac{1}{0,0076712 + \frac{1,18053}{Ct(\frac{km}{l})}} \quad (2.17)$$

$$Cr_{rodovia} = \frac{1}{0,0032389 + \frac{1,3466}{Ct(\frac{km}{l})}} \quad (2.18)$$

A eficiência energética do veículo é baseada nestes consumos medidos e na densidade energética do combustível utilizada (medida em MJ/l para os combustíveis líquidos, e em MJ/Nm³ GNV). A partir destes dados calcula-se a eficiência energética em MJ/km. Os números aprovados para etiquetagem variam de 1,6 a 1,92 MJ/km, para um veículo de passageiros subcompacto, e de 1,93 a 2,17 MJ/km para um veículo de carga derivado de veículo de passageiro. Estas medidas são apenas para fins de etiquetagem voluntária, mas o CGIEE está estudando as definições de MEPS obrigatórios.

Também foram definidos outros regulamentos de etiquetagem voluntária, como para o consumo no modo stand-by para aparelhos de TV digital (Portaria INMETRO n. ° 85/2009), com valores de consumo de energia variando de 1,0 a 7,8 W para a potência no modo stand-by para TVs de plasma, LCD e aparelhos de projeção.

Tabela 2.2 – Resumo dos MEPS aprovados no Brasil

Equipamento	Tipo	MEPS	Obrigatório
Motor de Indução Trifásico	Padrão	77 – 94,5 %	2003
	Alto Rendimento	80 - 95,4 %	2012
Iluminação	Fluorescente	43 – 57 lúmens/W	2007
	Fluorescente Compacta	47 – 60 lúmens/W	2011
Aquecedor de Água a Gás	Instantâneo	76 %	2013
	Acumulação	72 %	2013
Refrigeradores	Frigobares	14,4-17,5 kWh/mês	2013
	Combinado	39 – 58 kWh/mês	2013
	Frost-free	40 – 85 kWh/mês	2013
Congelador	Vertical/Horiz	30 – 85 kWh/mês	2013
	Frost-free	40 – 82 kWh/mês	2013
Fogões e Fornos a Gás	Mesa de Cocção	57 %	2013
	Forno	37 %	2013
Condicionadores de Ar	Janela	2,3-2,78	2013
	Split	2,6	2013
Transformadores de Distribuição		98,14 - 98,67%	2014
Veículos Automotivos Leves		1,6 – 2,17 MJ/Km	Não definido

Fonte: elaborado pelo autor

2.4 Medição de indicadores de eficiência

As descrições dos indicadores de eficiência apresentados nos itens anteriores anteciparam um grau de dificuldade na sua medição. O método para medição da eficiência de equipamentos de uso final estabelecidos na normatização dos MEPS brasileiros é invasivo e requer a utilização de laboratórios especializados, daí a necessidade da certificação destes laboratórios em etapas anteriores à regulamentação dos MEPS (Item 2.3). Este trabalho apresenta um estudo de caso da viabilidade do aumento da eficiência de motores de indução trifásicos e, com o objetivo de analisar o grau de incerteza da medição do indicador de eficiência energética e sua influência no resultado final da análise, neste item será descrito a forma de cálculo do indicador deste equipamento, assim como os detalhes de uma bancada de testes implementada durante o desenvolvimento desta tese.

2.4.1 Medição da eficiência de motores elétricos de indução

A expressão para o cálculo da eficiência do motor elétrico de indução relaciona as potências de entrada e de saída de uma máquina (Expressão (2.9)). O cálculo deste indicador com alta precisão requer a realização de ensaios que requerem o desacoplamento da máquina de sua carga para a medição das grandezas necessárias ao cálculo da eficiência. Existe uma variedade de métodos para a medição da eficiência de motores elétricos disponíveis tanto no mercado, como em fase experimental no meio acadêmico ((AOULKADI; BINDER, 2008; EL-IBIARY, 2003; FERREIRA; DE ALMEIDA, 2008; KUECK et al., 1996; LU; HABETLER; HARLEY, 2006; LU et al., 2007; SAKTHIVEL; BHUVANESWARI; SUBRAMANIAN, 2010)). Estes métodos são divididos de acordo com a abordagem da forma do cálculo da eficiência, a saber:

➤ Métodos das Perdas Segregadas: Calculam a eficiência a partir do somatório de cada um dos tipos de perdas existentes na máquina. Destes métodos, o de maior precisão requer a medição direta do torque da máquina para a determinação das perdas suplementares. Os procedimentos necessariamente são invasivos e necessitam de testes com a máquina fora de operação (ANDRADE, 2009);

➤ Métodos do Circuito Equivalente: A partir de um circuito equivalente da máquina e da medição de alguns parâmetros, calculam-se os valores dos demais elementos de circuito representativos das perdas e, a partir deles, a eficiência da máquina. Apresentam maior dificuldade no cálculo das perdas suplementares pela sua difícil representação em elementos de circuito elétrico, porém, o avanço dos métodos

numéricos de determinação de sistemas não lineares tem melhorado a precisão destes métodos, além de ser o que apresenta a maior quantidade de trabalhos acadêmicos (LU et al., 2007);

➤ **Métodos do Escorregamento:** Menos invasivo e mais simples que os demais, estes métodos relacionam o escorregamento da máquina com a potência de saída para a obtenção da eficiência. Dependem de valores de placa da máquina e aí reside uma de suas fontes de erro.

➤ **Métodos da Corrente/Outros:** Neste item são agrupados os métodos que utilizam apenas a corrente de entrada para o cálculo da eficiência e outros métodos menos convencionais para este cálculo. Também apresentam pouca precisão e invasão ao processo e, como o anterior, utilizam os dados de placa da máquina.

A Norma Brasileira (ABNT, 2002) adota o Método de Perdas Segredadas com medição direta, denominado Variação do Método 2, para testes em motores e geradores de indução polifásicos, que é similar ao método E da norma americana da IEEE 112 (IEEE MACHINERY COMMITTEE, 2004) e ao padrão europeu IEC 60034-2-1 (IEC, 2014). Este método é considerado um dos mais precisos métodos de cálculo de eficiência de motores de indução, com precisão dentro da faixa de $\pm 1\%$ de erro (KUECK et al., 1996).

As perdas são calculadas individualmente e somadas para o cálculo das perdas totais ($\sum PERDAS$) e da eficiência (η) da máquina de acordo com a expressão (2.18).

$$\eta = \frac{P_{SAÍDA}}{P_{ENTRADA}} = \frac{P_{ENTRADA} - \sum PERDAS}{P_{ENTRADA}} = 1 - \frac{\sum PERDAS}{P_{ENTRADA}} \quad (2.18)$$

As perdas do motor de indução são as seguintes:

Perdas Resistivas: Associadas aos elementos condutores da máquina, estas perdas estão presentes tanto no rotor como no estator, variam com o quadrado da corrente de carga, e são diretamente proporcionais à resistência do material condutor (seção transversal do enrolamento do estator e da barra do rotor). Também dependem da temperatura, da área da seção e do material do condutor;

Perdas Magnéticas: Dependem da magnitude do campo magnético que circula no circuito magnético do rotor e do estator, que basicamente depende da tensão e do número de voltas das espiras de cada fase no estator. Estas perdas, portanto, se mantêm praticamente constante com a carga e são influenciadas pela qualidade do material

ferromagnético, pelas dimensões das laminações do núcleo e pela frequência de alimentação;

Perdas Mecânicas: Presentes apenas na parte móvel da máquina (rotor) são as perdas causadas pelo atrito existente entre as partes fixas e móveis da máquina e pela potência utilizada na ventilação;

Perdas Suplementares: Associadas às imperfeições construtivas da máquina, são as mais complexas e as mais difíceis de determinar. Possuem componentes de alta frequência e de frequência fundamental e, por estarem distribuídas pela máquina, são definidas, por exclusão, como aquelas que não estão contempladas nas definições anteriores. Variam com a carga.

De acordo com a Norma Brasileira, os seguintes ensaios devem ser realizados com o motor para a determinação das perdas acima e a determinação da eficiência:

1. Ensaio para determinação da resistência do enrolamento do estator a frio.
2. Ensaio de elevação de temperatura.
3. Ensaio com carga.
4. Ensaio a vazio.

Com o objetivo de implementar estes ensaios e conhecer a metodologia do cálculo da eficiência de motores de indução, foi necessária a construção de uma bancada de testes apta a realizar todos os ensaios estabelecidos nas normas. A bancada de ensaios foi implementada nas instalações do laboratório do FREEDM Systems (NCSU, 2017) na North Carolina State University (NCSU), na cidade de Raleigh, NC.

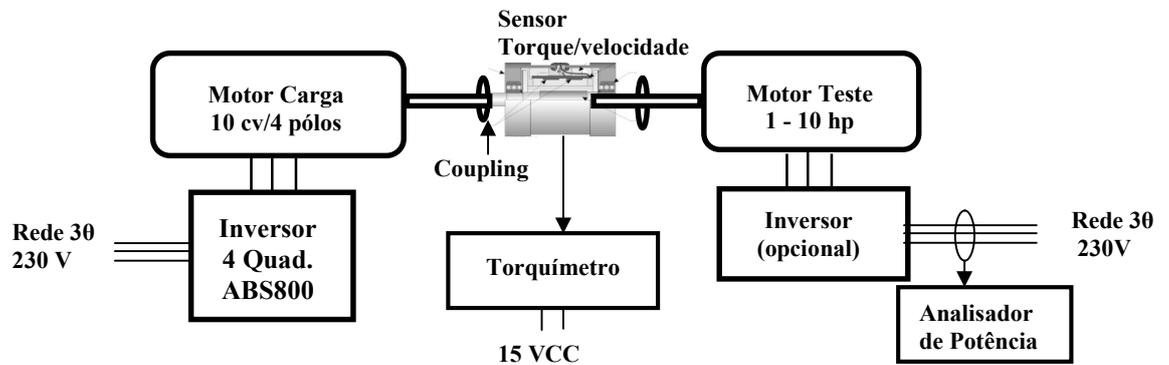
2.4.1.1 Bancada de ensaios

A Figura 23 apresenta a topologia básica da bancada. Ela foi equipada com um motor de indução trifásico de gaiola esquilo de 4 polos controlado por um Conversor de 4 quadrantes. O conversor é usado para o controle direto do torque e/ou velocidade do motor e o conjunto opera como uma carga variável. Entre este conjunto e o motor a ser testado, um sensor de torque de alta precisão é acoplado. Os dados de velocidade e torque são coletados através de um sistema de aquisição de dados. Nas Figuras 24 e 25 são apresentadas fotos da bancada implementada nas instalações do laboratório do FREEDM Systems/NCSU.

A bancada foi desenvolvida e implementada durante o período de 1 (um) ano de Doutorado-sanduíche na NCSU (Ago/2012 a Jul/2013) e foi baseada na experiência do Prof. Emmanuel Agamloh (Advanced Energy) (AGAMLOH; DAE-WON; JOO-YOUNG, 2011) e em outras publicações (FERREIRA, FERNANDO J. T. E.; DE ALMEIDA e QUINTINO,

ANDRÉ; ABRANTES, 2011). A Bancada tem capacidade para testes em motores elétricos de $\frac{1}{2}$ cv até 10 cv e teve um custo de implementação aproximado de U\$ 15.000,00 (quinze mil dólares). Além dos ensaios mencionados, também foi realizado o teste de medição direta de torque (Método A do Padrão da IEEE 112b e Método A da ABNT/NBR 5381-1) com fins de conhecimento e também para testar a tecnologia do Motor de Imã Permanente (cuja eficiência só pode ser medida por este método). Foram realizadas medições em motor de indução trifásico de $\frac{1}{2}$ cv e em um Motor de Imã Permanente com Partida Direta de 10 cv. A descrição detalhada dos equipamentos da bancada, dos procedimentos dos testes realizados e os resultados obtidos estão nos Apêndices A.1 e A.2 e A.3, respectivamente.

Figura 23: Topologia da bancada de ensaios para medição de eficiência de motores elétricos



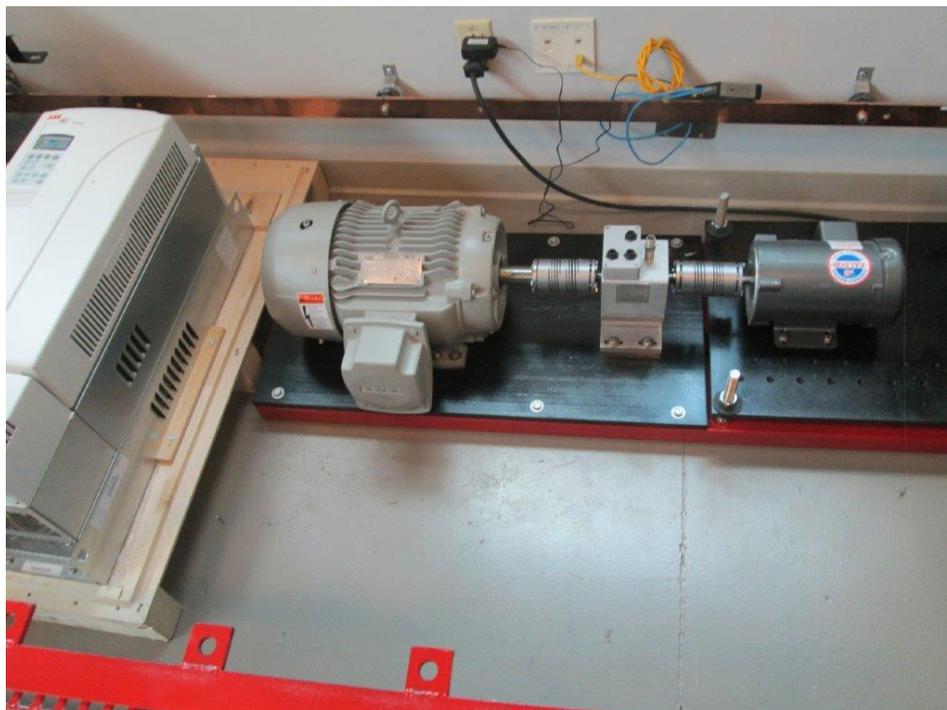
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 24 – Detalhe da bancada de ensaios com a tela de proteção



Fonte: Foto tirada pelo autor em (NCSU, 2017)

Figura 25 – Bancada de ensaios de motores elétricos sem a tela de proteção



Fonte: Foto tirada pelo autor em (NCSU, 2017)

2.5 Incerteza na Medição de Eficiência

A bancada de ensaios descrita no item anterior implementa o método mais preciso para a determinação de eficiência de motores elétricos (KUECK et al., 1996), no entanto os resultados obtidos apresentam erros que influenciam na análise da viabilidade de projeto de aumento de eficiência. Este item apresenta o conceito de incerteza nas medições e como esta incerteza se mostra na determinação da eficiência de motores de indução trifásicos.

2.5.1 Incerteza nas Medições

O termo incerteza está diretamente relacionado a medições de grandezas físicas. A definição de erro, como a “diferença entre um valor observado e calculado e o valor real”(AULETE, 2015), quando aplicado à medição já leva a “inevitável incerteza que está presente em todas as medições” (BEVINGTON, PHILIP R.; ROBINSO, 2003). A medição de eficiência energética, como visto no item anterior, depende do resultado das medições de vários equipamentos e cada uma delas acrescenta um erro no resultado final. Esta incerteza deve ser considerada quando da avaliação dos processos.

Os tipos de erros nas medições de grandezas físicas são classificados como:

➤ *Erros Sistemáticos*: Erros que se situam de forma consistente em um dos “lados” da medição correta, ou são erros positivo (a maior), ou erros negativos (a menor). Possuem duas fontes principais – distúrbios no sistema durante a medição ou alterações no ambiente. Também podem ser causados por instrumentos descalibrados ou por um cabeamento malfeito.

➤ *Erros Aleatórios*: Também conhecidos como erros de precisão, são causados por perturbações imprevisíveis que se refletem em erros positivos e negativos em quantidades aproximadamente iguais. Instrumentos analógicos conduzem a este tipo de erros, que ocorrem muitas vezes como consequência da leitura feita pelo observador ao interpolar valores entre pontos de escala; o ruído elétrico também é uma fonte de erros aleatórios, assim como variações súbitas no ambiente da medição.

Os instrumentos de medição apresentam as seguintes características estáticas que representam o percentual de incerteza dos resultados:

➤ *Exatidão*: indica quão próximo do valor real a medição instrumental está. Na prática, o termo Inexatidão ou Incerteza na Medição é mais utilizado (MORRIS, ALAN S.; LANGARI, 2012) e é, normalmente, referido como uma percentagem do final-de-escala da leitura.

➤ *Precisão*: Descreve o quão imune o instrumento é para os erros aleatórios, ou seja, se um grande número de leituras de uma mesma quantidade for feita por um instrumento de alta precisão, o espalhamento das leituras deve ser pequeno. Não deve ser confundido com exatidão. Uma baixa exatidão pode ser obtida por um instrumento de alta precisão, desde que ele esteja descalibrado.

➤ *Tolerância*: Define o máximo erro aceitável para um determinado valor. Não pode ser confundido com exatidão, pois não se trata de uma característica estática de um instrumento, e sim um desvio máximo permitido para um valor de um componente fabricado. Em alguns manuais de instrumentos, a exatidão é citada como tolerância;

➤ *Sensibilidade*: Mede as mudanças dos resultados do instrumento quando a quantidade que está sendo medida varia de um certo valor.

Existem outras características estáticas dos instrumentos, tais como resolução, sensibilidade a distúrbios, efeitos de histerese e linearidade.

2.5.2 Medição da incerteza nas medições

A metodologia para o cálculo da incerteza das medições possui padrões internacionais (ANSI/ASME STANDARDS., 1985; ASME, 2005; ISO, 1994) e nacionais (JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY, 2008) e tem sido tema de estudos desde o século passado (TOPPING, 1957).

O cálculo da incerteza passa pela determinação dos erros das medições, sejam eles sistemáticos ou aleatórios. Os erros sistemáticos podem ser minimizados através da aplicação de técnicas tanto na fabricação dos instrumentos (fabricação usando componentes com baixo coeficiente de temperatura), como na sua utilização (calibração em laboratórios certificados, filtragem de sinais, realimentação da alto-ganho, etc.).

Os erros sistemáticos provenientes de condições ambientais podem ser calculados considerando uma condição média do ambiente (temperatura, por exemplo) e determinando um erro de medição baseado no máximo desvio possível desta condição. Os erros de *calibração* podem ser estimados com base no erro máximo determinado no momento anterior à recalibração. Os erros provenientes de perturbações nos sistemas a serem medidos, tais como variações abruptas de carga, podem ser obtidos a partir da pior situação possível durante a medição. Todos estes erros devem ser expressos na forma de variação percentual ($\pm x\%$)(MORRIS, ALAN S.; LANGARI, 2012).

Os erros sistemáticos ($\pm x_1\%$, $\pm x_2\%$, ..., $\pm x_n\%$) são cumulativos e sua ação sobre o resultado final deve ser calculada de acordo com a expressão (2.19):

$$erro = \pm \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2} \quad (2.19)$$

Convém salientar que as informações de inexatidão ou incerteza nas medições fornecidas nos manuais de fabricantes é a melhor estimativa de desempenho do instrumento quando ele é novo e usado em condições específicas, e recalibrado com a frequência recomendada.

Os erros aleatórios ($\pm y\%$) podem ser determinados e excluídos através da realização de repetidas medições e da aplicação de métodos estatísticos, como a aplicação de médias, medianas, desvio padrão e variâncias, e até métodos mais sofisticados como o Distribuições Gaussianas, Método dos Mínimos Quadrados, Técnica de Monte Carlo ((BEVINGTON, PHILIP R.; ROBINSO, 2003; TAYLOR, 1997).

O efeito combinado dos erros sistemáticos ($\pm x\%$) e aleatórios ($\pm y\%$) é calculado como o máximo erro possível ($\pm e\%$) através da expressão (2.20):

$$e = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (2.20)$$

Quando o resultado desejado provém de medições de diferentes equipamentos e estes valores medidos passam por operações aritméticas, o erro resultante é dado pelas expressões (2.21) e (2.22).

Quando a operação é uma adição ou subtração de medições w e z , onde os máximos erros são $\pm aw$ e $\pm bz$, respectivamente, o erro total da operação ($\pm e\%$) é:

$$e = \sqrt{(aw)^2 + (bz)^2} \quad (2.21)$$

No caso de uma multiplicação ou divisão das medições anteriores, o erro total da operação é dado por:

$$e = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.22)$$

Quando são realizadas medições distintas em um mesmo elemento (por exemplo, comprimento dos lados de um cubo), os erros de cada medição são simplesmente adicionados para qualquer operação aritmética entre eles.

2.5.2.1 Incerteza na Medição da Eficiência de Motores Elétricos

Os métodos padronizados para a determinação da eficiência de motores elétricos já incorporam as recomendações para redução de erros de medição. A Norma Brasileira NBR 5383-1 (ABNT, 2002) estabelece procedimentos para as medições com o objetivo de reduzir a incidência de erros sistemáticos e aleatórios e determina que os instrumentos utilizados devem ter sido calibrados nos últimos 12 meses e que devem apresentar limites de erros não superiores a $\pm 0,5\%$ no fundo de escala ($\pm 0,2\%$ no fundo de escala para Método de Perdas Segregadas – Variação do Método 2).

Os dados de leitura das resistências são ajustados para a temperatura de operação da máquina, reduzindo o erro sistemático relacionado à temperatura. Outras recomendações para a realização de medições, como a repetição de medições e a exclusão daquelas que estão fora do desvio padrão (redução de erro aleatório no caso do cálculo das perdas suplementares).

O Apêndice A.4 apresenta uma metodologia para o cálculo da incerteza associada à medição da eficiência de motores de indução, com base nas características dos instrumentos utilizados na bancada de ensaios. Esta metodologia utilizada é do tipo determinística e se

baseia na experiência das medições realizadas na bancada, no entanto, para se realizar uma análise da incerteza na medição da eficiência, faz-se necessário a implantação de uma metodologia probabilística baseada em uma amostra de medições que englobem todas as faixas de potência de motores e até diferentes tipos de equipamentos, como o estudo conduzido por Doppelbauer (AGAMLOH, 2009; DOPPELBAUER, 2015). O objetivo da implantação da bancada foi dominar a tecnologia de medição de eficiência de motores de indução e estabelecer a dimensão da incerteza associada a esta medição. Os resultados obtidos na análise de incerteza aqui realizada apontaram para erros de medição na ordem de $\pm 0,6\%$, no entanto, estudos com um universo amostral adequado (KUECK et al., 1996) apontam para uma incerteza na medição de $\pm 1,0\%$.

2.6 Considerações Finais

Este capítulo estabeleceu o processo de definição, a utilização regulatória, o cálculo e, por fim, a incerteza de indicadores de eficiência, com ênfase no estudo de caso deste trabalho, os motores elétricos de indução trifásicos. A principal contribuição se deu na ênfase da incerteza do cálculo do indicador, que foi determinada a partir da construção de uma bancada de ensaios apta a implementar os métodos mais precisos de determinação da eficiência de motores de indução trifásicos e da análise dos erros associados à medição das grandezas envolvidas. A descrição dos tipos de indicadores de eficiência e a apresentação do programa, em curso no Brasil, de definição de índices mínimos obrigatórios de eficiência (MEPS) para equipamentos de uso final estabeleceu a importância destes indicadores no contexto de utilização racional de recursos naturais. E, no início do capítulo, a contextualização do indicador de eficiência como o parâmetro que identifica como a energia está sendo utilizada para suprir as necessidades humanas no planeta mostrou a importância de sua identificação e determinação.

No próximo capítulo serão apresentados os demais parâmetros relacionados à análise de projetos de eficiência energética. Os custos do ciclo de vida (*Life Cycle Costs – LCC*) do equipamento/processo que será submetido a um aumento de eficiência serão detalhados e a incerteza associada a cada um deles será estimada para uma posterior análise de sua influência sobre o resultado da viabilidade da melhoria da eficiência.

2.6.1 Realizações

O Capítulo 2 inclui um artigo publicado em Congresso e uma participação no programa Ciência Sem Fronteiras:

- AGAMLOH, E. B.; ANDRADE, C. T.; HUSAIN, I. **Assessment of prospects of prescribing super-premium efficiency levels with induction motor technology**. Proceedings of the 8o. International Conference EEMODS'2013. Rio de Janeiro, outubro de 2013;
- Doutorado-Sanduíche do autor no FREEDM Systems Center da North Carolina State University (NCSU), em Raleigh/NC, no período de agosto/2012 a julho/2013, quando foi elaborada e implantada uma Bancada de Ensaio para a determinação da eficiência de motores elétricos (1/2cv – 10cv).

2.6.2 Agradecimentos

Agradecimentos especiais aos Profs. Ph.D. Iqbal Husain e Ph.D, Emmanuel Agamloh, que me orientaram durante minha permanência no Freedom Systems Center.

A Bancada de testes aqui apresentada foi implementada através da participação do Doutorando no Programa Ciência Sem Fronteiras (CNPq) com uma bolsa de Doutorado-Sanduíche na North Carolina State University (NCSU), na cidade de Raleigh, NC, EUA.

3 CUSTOS DO CICLO DE VIDA

A eficiência energética está inserida no mercado de energia, e, como tal está associada a fatores econômicos. Deste mercado fazem parte, como atores principais, produtores e consumidores, e como atores secundários, reguladores, pesquisadores, ambientalistas, etc. (vide Figura 6). A influência dos reguladores tem crescido nas últimas décadas devido a importância do tema e do envolvimento maior dos governos na definição de legislações relacionadas a eficiência energética. A interferência regulatória que vem ocorrendo no mercado de energia nas últimas décadas não é do tipo que obstrua as forças de mercado, já que os próprios representantes deste mercado fazem parte das decisões regulatórias e tem poder sobre elas. A questão passa a ser se esta evolução induzida da eficiência está tendo efetividade, no sentido do equilíbrio de custos e benefícios gerados (WIEL; MCMAHON, 2003). Para entender esta efetividade, é preciso entender os custos e benefícios associados à melhoria da eficiência energética associados à vida útil do processo/equipamento sob análise (LCC – *Life Cycle Costs*) (FULLER; PETERSEN, 1995).

Este capítulo analisa os custos relacionados à vida útil do equipamento e todos os parâmetros utilizados para a determinação destes custos. A incerteza associada a estes parâmetros também é analisada, considerando a sua influência no resultado final da análise de viabilidade de projetos para a melhoria da eficiência.

Neste e nos capítulos posteriores se fará referência ao aumento de eficiência de equipamentos de uso final, no entanto, toda a análise aqui apresentada também poderá ser referenciada à melhoria de eficiência de qualquer um dos níveis de agregação (processos, plantas, setores, etc.).

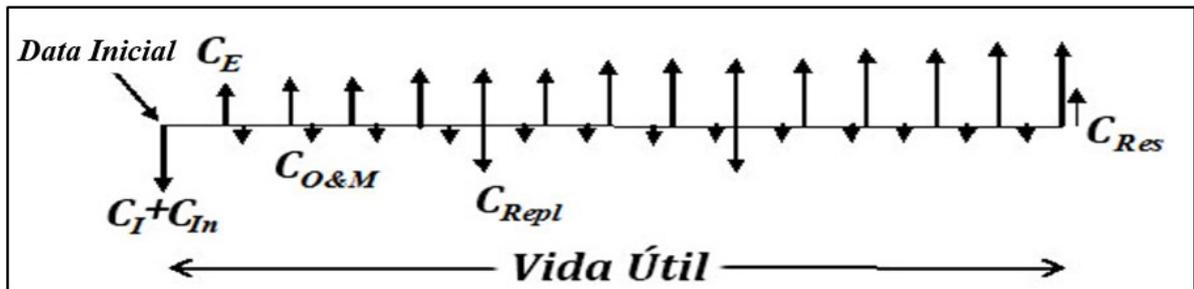
3.1 Introdução

O Custo do Ciclo de Vida (LCC) é o custo total de aquisição, operação, manutenção e, eventualmente, descarte de um equipamento/processo, durante um período de estudo (normalmente associado à vida útil do equipamento) (HYDRAULIC INSTITUTE; EUROPUMP; OFFICE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES - US DEPARTMENT OF ENERGY, 2001). A Expressão (3.1) mostra os custos relacionados ao LCC do equipamento, enquanto a Figura 26 mostra a sua distribuição em uma linha de tempo. As direções das setas na Figura 26 diferenciam custos (setas para baixo) e benefícios (setas para cima), os últimos

representados como redução de custos decorrentes do aumento da eficiência, e os primeiros como custos aumentados ou mantidos (investimentos, manutenção e operação, etc.).

$$LCC=C_I+C_{In}+C_E+C_{O\&M}+C_{Rep}+C_{Env}+C_{Res} \quad (3.1)$$

Figura 26– Custos associados à vida útil de um equipamento.



Fonte: elaborado pelo autor.

Em que:

C_I – Custo de compra do equipamento e de seus respectivos equipamentos auxiliares (no caso de motores elétricos, de equipamentos de proteção e controle);

C_{In} - Custos de instalação e comissionamento, e ainda podem incluir o custo de engenharia (projeto, design), testes e inspeções, e eventuais treinamentos;

$C_{O\&M}$ – Custos associados a operação (fração do homem-hora dedicado à operação da máquina), manutenção rotineiras e reparos previstos.

C_{Rep} – Custos de Reposição: Ocorre quando se repõe uma peça importante de um determinado equipamento (ex. pás de um ventilador). Pode ser associado aos custos de operação e manutenção ($C_{O\&M}$). No caso de um motor elétrico, o principal item deste custo é o rebobinamento.

C_{Res} – Custos Residuais: No caso de descarte do equipamento após o fim de sua vida útil, ou mesmo após a sua substituição, pode haver um fluxo de caixa relacionado com a venda do equipamento ou com o desmonte e descarte de componentes.

C_{Env} – Custo Ambiental: Podem estar associados a impostos e taxas ambientais que são criadas para induzir a minimização dos impactos ao meio ambiente, mas também podem estar associados a contaminações provocados pelo equipamento sob análise; ou ainda, ao impacto ambiental da produção do material utilizado na fabricação do equipamento associado à emissão de gases poluentes. Trata-se de um custo de difícil conversão monetária.

C_E – Custos de Energia: Representam os custos previstos para suprir o uso energético do equipamento. Este é um dos itens principais na análise investimentos, já que

chega a ser responsável pela maior fatia do LCC (no caso de motores a participação do custo da energia chega a 96% do LCC) (DE ALMEIDA et al., 2008).

Período de Estudo – Apresentado na Figura 26 como Vida Útil, representa o intervalo de tempo em que os custos e benefícios relacionados ao equipamento avaliado ocorrem. No caso de projetos envolvendo a substituição de equipamentos, este período corresponde ao tempo de vida útil do mesmo. A Tabela 3.1 apresenta os tempos médios de vida útil para motores de indução. Apesar destes tempos

Tabela 3.1 – Tempo médio de operação de motores elétricos

<i>Vida Útil Média</i> (anos)	<i>Potência Nominal do Motor (kW)</i>			
	0,75 – 1,1	1,1 - 11	11 - 110	110 - 370
	10	12	15	20

Fonte: (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, 2004)

Data Inicial - Todos os custos despendidos durante a vida útil do equipamento devem ser referenciados para um instante de tempo definido para que as comparações entre custos e benefícios sejam feitas sobre a mesma base monetária. Este instante de tempo é a Data Inicial, e os custos associados a ela são referidos como Valor Presente.

3.1.1 Valor Presente

O Valor Presente é uma atualização dos valores monetários do LCC para uma data única (Data Inicial), o que permite a comparação adequada de custos e benefícios associados à melhoria de eficiência. A melhoria da eficiência se faz através de um investimento inicial ($C_I + C_{In}$), que deve ser recompensado ao longo do tempo a uma taxa que torne este investimento atrativo ao investidor. O Valor Presente é calculado com a utilização da taxa de desconto (d), que é uma taxa de remuneração de capital (HARRISON, 2010). Assim, os fluxos de caixas (custos e benefícios) dispendidos no decorrer do período de estudo são convertidos para o valor presente considerando-se a ação desta taxa.

A expressão de Valor Presente (PV) depende da forma como o fluxo de caixa é realizado (FULLER; PETERSEN, 1995). Para o caso de um valor único de caixa (F_t) que ocorre no final do ano t , como é o caso do Custo Residual (C_{Res}) representado na Figura 26, a expressão do valor presente (PV) é dada pela expressão (3.2).

$$PV = \frac{F_t}{(1 + d)^t} \quad (3.2)$$

A aplicação da taxa de desconto torna indiferente para o investidor o momento em que o fluxo de caixa acontece, ou seja, o investidor tanto pode receber um valor antecipadamente ou ter um pagamento postergado, que não fará diferença se os mesmos forem atualizados usando a taxa de desconto. Outra característica importante é que a mesma representa o valor real dos custos, sem incluir a taxa de inflação.

A expressão do Valor Presente para um fluxo de caixa que se desenrola em uma sequência de valores iguais (A_0) no decorrer do tempo com intervalo regulares de 1 a n é dada pela expressão (3.3). No LCC, este tipo de fluxo está representado pelos custos de operação e manutenção ($C_{O\&M}$).

$$PV = A_0 \sum_{t=1}^n \frac{1}{(1+d)^t} = A_0 \frac{(1+d)^n - 1}{d(1+d)^n} \quad (3.3)$$

Quando o fluxo de caixa se repete periodicamente, mas muda ano a ano a uma taxa constante de escalada (e), como os custos de energia (C_E), a expressão do Valor Presente é dada por:

$$PV = A_0 \sum_{t=1}^n \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t = A_0 \frac{(1+e)}{(d-e)} \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^n \right] \quad (3.4)$$

A taxa de escalada (e) representa o quanto o custo de um item sobe acima da inflação durante o período de estudo do projeto. Note que as expressões anteriores consideravam que os valores associados aos itens analisados são atualizados apenas com base na taxa de desconto (d), que representa um ganho real, sem incluir a taxa de inflação. A expressão (3.4) acrescenta uma nova taxa (e), que atualiza os custos que apresentam um comportamento descolado da inflação, como os custos de energia.

3.2 Custos de Energia

Os Custos de Energia estão associados a duas grandezas, a quantidade de energia requerida para operar o equipamento sob análise, e o preço (tarifa) unitário desta energia. A primeira grandeza deve ser calculada com base nas características de operação e especificações técnicas do equipamento, equações de estimativas de consumo ou em simulações computacionais (CULLEN; ALLWOOD, 2010b). Cada tipo de energia (eletricidade, gás, óleo, etc.) apresenta um método próprio de cálculo da energia consumida, mas a expressão básica passa pela determinação da potência demandada pelo equipamento

para operação (P) e pela quantidade de horas em funcionamento (H) durante o período considerado (dia, mês ou ano). A energia, em conjunto com as tarifas de energia (C , em \$/unidade de energia), definem o Custo da Energia. A expressão (3.5) representa o cálculo do Custo de Energia (C_E).

$$C_E = PHC \quad (3.5)$$

No caso de um motor elétrico, a expressão (3.6) representa o cálculo da energia consumida (E , em kWh), que se baseia na Potência nominal do motor (P_{nom} , em kW), na medição ou estimativa de carregamento (L , em p.u.), e na eficiência para este carregamento ($\eta(L)$), além do cálculo da quantidade de horas de operação do equipamento por ano (H).

$$E = \frac{P_{nom}LH}{\eta(L)} \quad (3.6)$$

3.2.1 Tarifas de Energia

A Tarifa de energia pode ser obtida localmente, diretamente da fatura de energia paga ao distribuidor, quando se tratar da análise de um equipamento instalado em uma planta industrial, comercial ou residencial, ou pode ser estimado com base em médias regionais ou nacionais, quando a análise se der nos Níveis de Agregação mais elevados (KARANFIL, FATIH; LI, 2015). No caso específico da eletricidade, podem ser consideradas ainda as tarifas de energia e demanda, que podem ter valores diferenciados para períodos do dia (tarifas horárias), ou épocas do ano (tarifas sazonais) (ANEEL, 2014b).

O custo médio da tarifa varia de um país para o outro e até por classe de consumidor, como pode ser observado nas Figuras 27 a 29. As Figuras mostram os valores médios de tarifa de energia para os três principais insumos energéticos utilizados por equipamentos (energia elétrica, gás natural e diesel/gasolina). Nelas podemos observar que a energia está se transformando em uma *commoditie* internacional, com os preços variando pouco de um país para outro, salvo exceções. As maiores variações estão no preço da Gasolina Premium, que em muitos países é um preço subsidiado e em outros é taxado em excesso (IEA, 2017b). A energia elétrica para indústrias também sofre grandes variações, provavelmente pelos mesmos motivos, assim como o gás natural para residências.

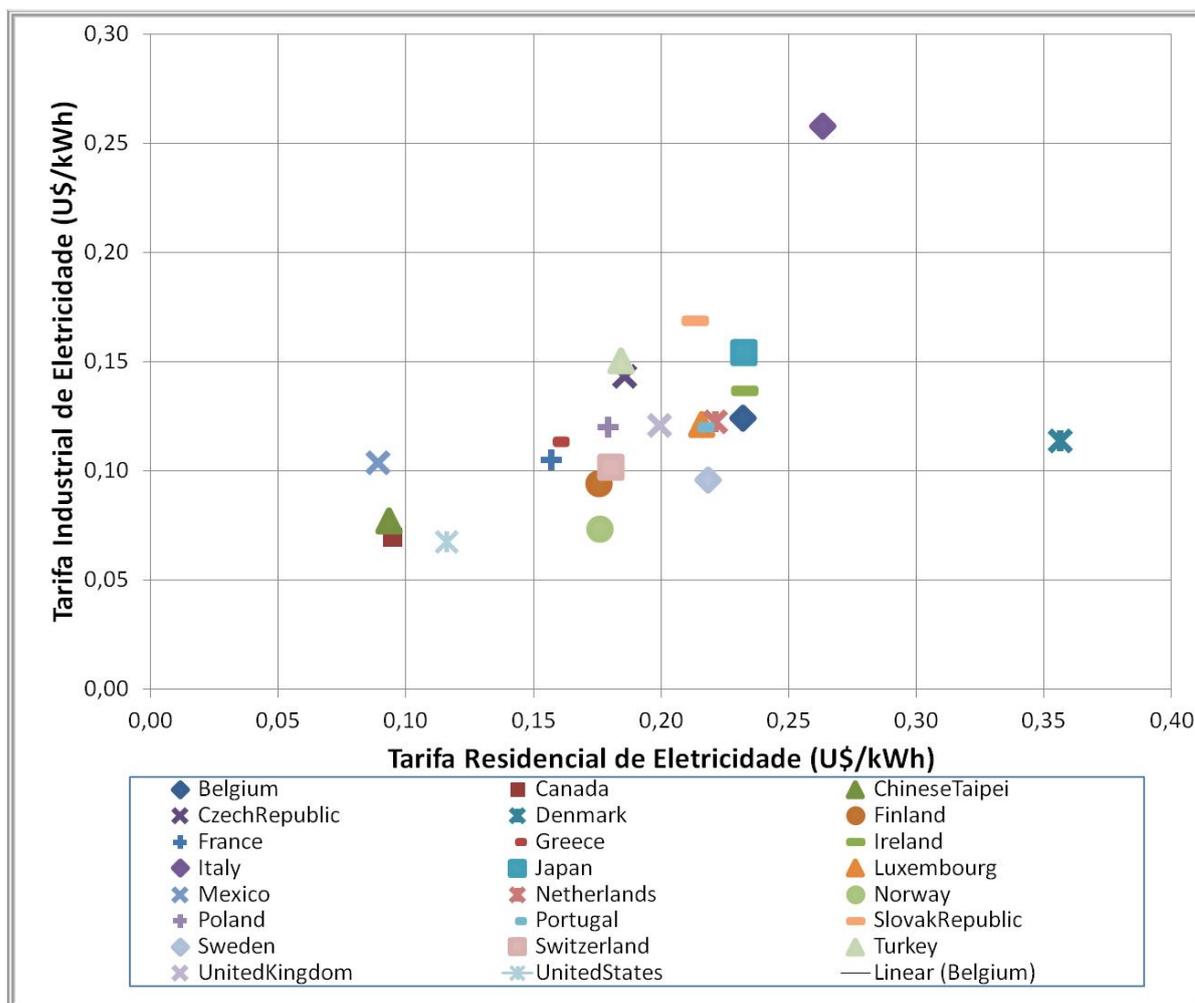
A variação da tarifa de energia também ocorre regionalmente dentro de um mesmo país. A Figura 30 apresenta as variações da tarifa de eletricidade para os setores industrial e residencial em diferentes estados do Brasil. A Tabela 3.2 apresenta uma análise

estatística das tarifas de eletricidade, gás natural e derivados do petróleo apresentadas nas Figuras 27 a 30.

A Tabela 3.2 mostra que as tarifas brasileiras de eletricidade estão alinhadas com o mercado internacional, um pouco abaixo no caso do setor residencial, principalmente devido aos subsídios aos consumidores de menor renda (SLOUGH; URPELAINEN; YANG, 2015). Os desvios Médio e Padrão das tarifas energéticas mundiais também apontam para uma convergência.

Obtido o valor da tarifa do combustível utilizado (C), o custo anual da energia (E) é calculado com a aplicação da expressão (3.4). Este custo deve ser atualizado conforme a expressão de Valor Presente Líquido (PV) apresentada na Expressão (3.5), que leva em consideração o aumento do custo da energia durante o período de estudo através da taxa de escalada (e).

Figura 27 – Preço de energia elétrica em diversas partes do mundo.



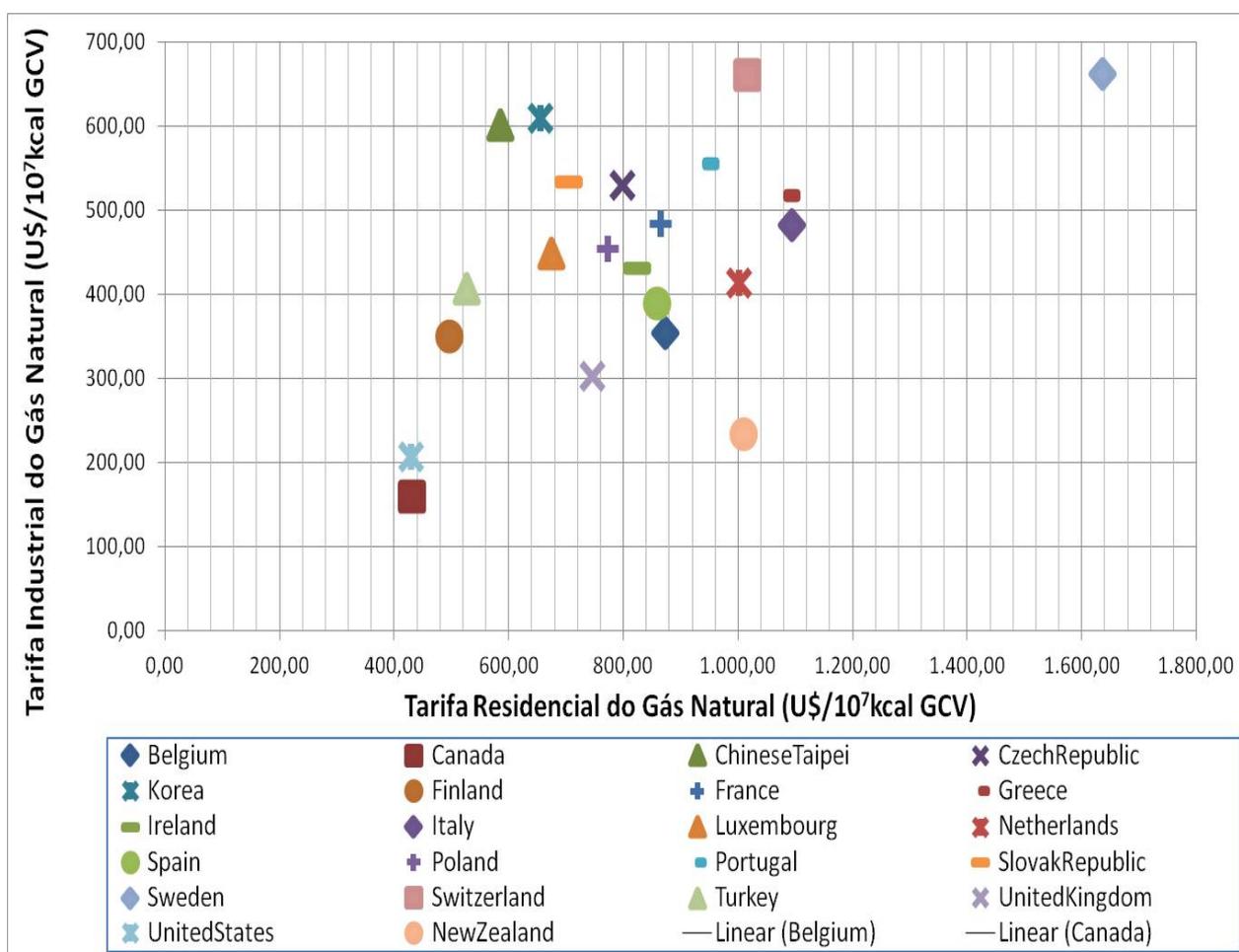
Fonte: elaborado pelo autor com base em (IEA, 2017a).

Tabela 3.2 – Análise estatística da variação regional das tarifas de eletricidade no Brasil e das tarifas de eletricidade, Gás Natural e derivados do petróleo no mundo

Tarifas de Energia	Nível de Agregação	Valor Médio	Desvio Médio	Desvio Padrão
Eletricidade Indústria (US\$/kWh)	Nacional (Brasil)	0,1097	13,96%	18,05%
Eletricidade Indústria (US\$/kWh)	Internacional	0,1202	21,84%	33,51%
Eletricidade Residencial (US\$/kWh)	Nacional (Brasil)	0,13704	8,65%	11,21%
Eletricidade Residencial (US\$/kWh)	Internacional	0,1938	25,26%	33,99%
Diesel Automotivo (US/l)	Internacional	1,4356	15,33%	21,14%
Gasolina Premium (US/l)	Internacional	1,8294	16,25%	22,36%
Gás Natural Indústria (US/107kcalGCV)	Internacional	445,38	24,51%	31,25%
Gás Natural Residencial (US/107kcalGCV)	Internacional	834,706	26,44%	35,45%

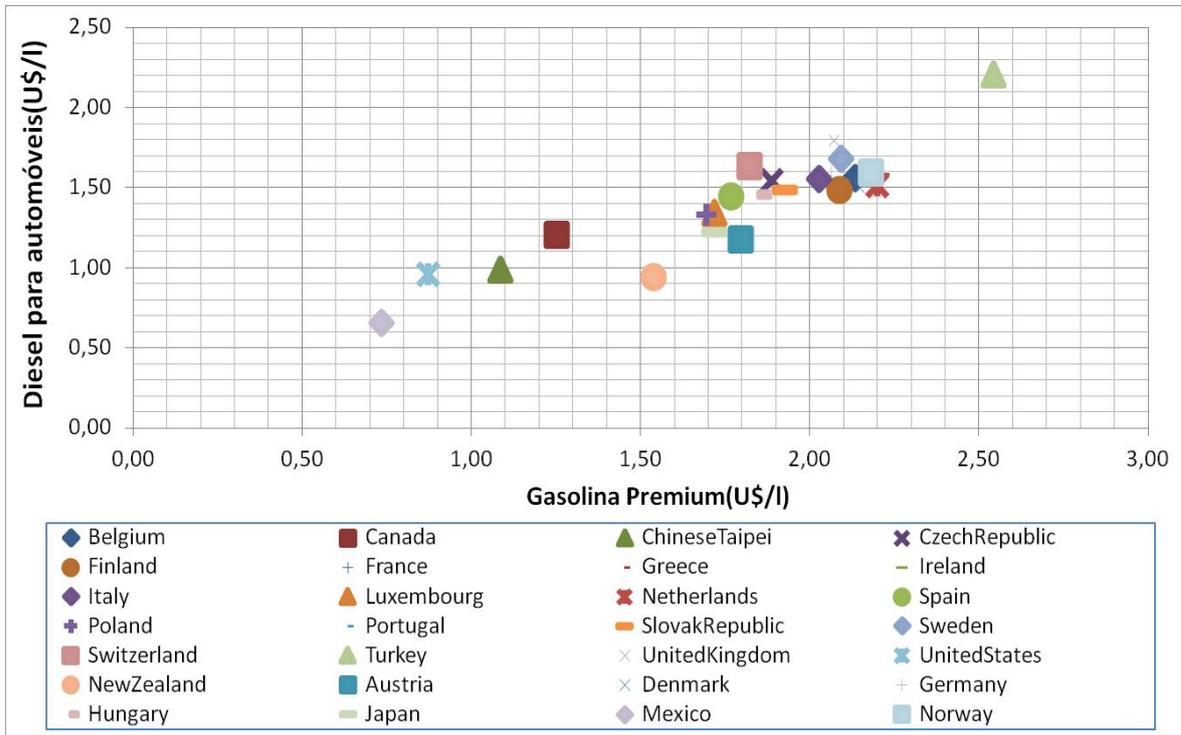
Fonte: elaborado pelo autor de (ANEEL, 2015a) (IEA, 2017b).

Figura 28 – Preço de Gás Natural em diversas partes do mundo



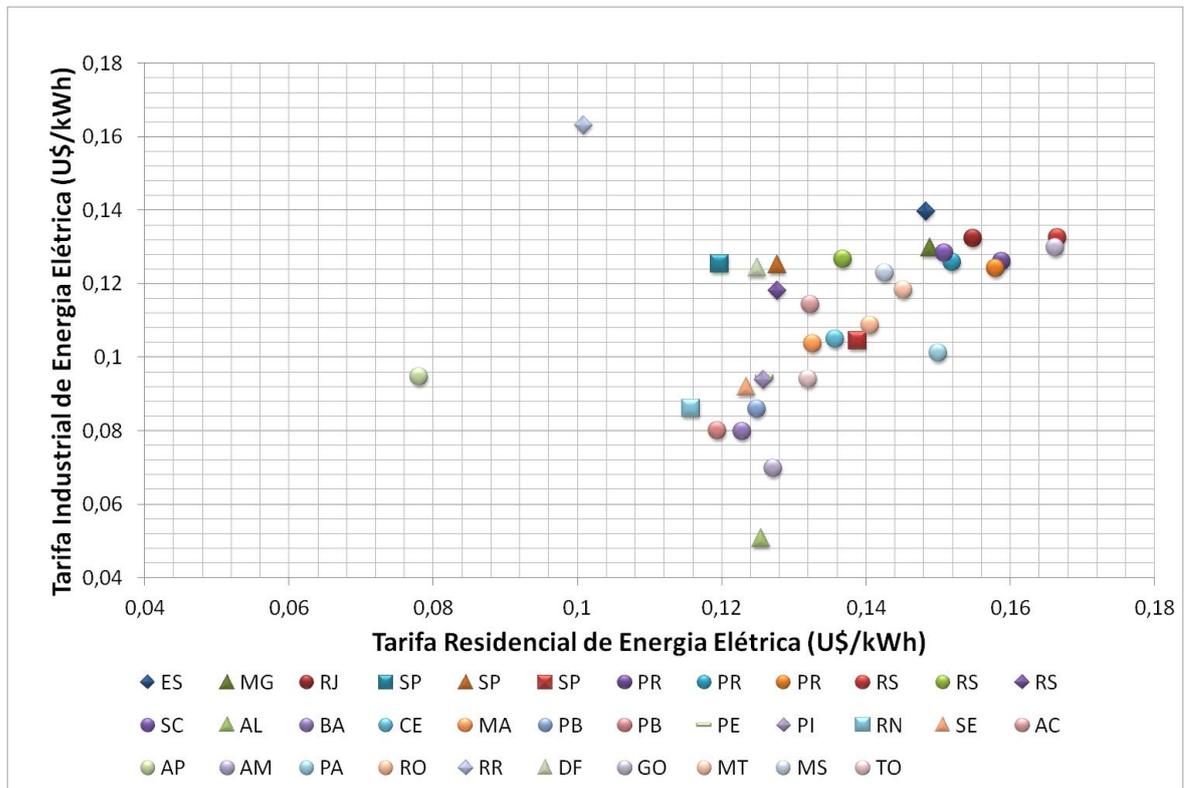
Fonte: elaborado pelo autor com base em (IEA, 2017a).

Figura 29 – Preço de derivados de Petróleo em diversas partes do mundo



Fonte: elaborado pelo autor com base em (IEA, 2017a)..

Figura 30 – Tarifas de Eletricidade para os setores residencial e industrial válida em diferentes Estados do Brasil

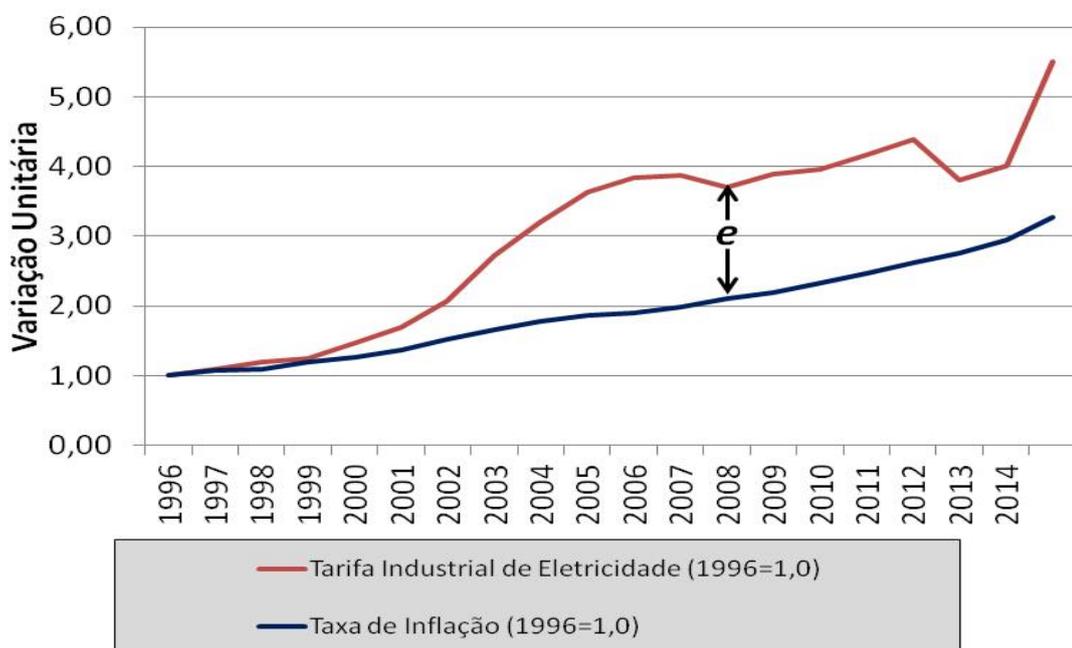


Fonte: elaborado pelo autor com base em (Outubro, 2015) (ANEEL, 2015a).

3.2.2 Taxa de Escalada do Custo da Energia

Os custos relacionados à energia apresentam um comportamento diferenciado dos demais custos do LCC, como consequência da variação dos preços das tarifas de forma desassociada da taxa de inflação, obedecendo, entre outros fatores, à variação dos preços das *commodities* do setor de energia (óleo, gás) (PROGRAMME, 2000). No caso específico da eletricidade, além desses fatores, a variação do preço da tarifa depende do tipo de geração (hidro, térmico, eólico, etc.), da disponibilidade de recursos primários e até da dependência de importação de energia (XUEWEI; MORENO-CRUZ; CRITTENDEN, 2015). Diante deste comportamento, faz-se necessário a correção deste custo durante o ciclo de vida útil com base em uma taxa própria: a taxa de escalada de energia (e). A Figura 31 mostra a evolução da tarifa média da eletricidade industrial no Brasil durante as duas últimas décadas e a taxa de inflação nacional correspondente. O parâmetro que representa esta variação acima da inflação é a taxa de escalada (e) da eletricidade.

Figura 31 – Evolução da tarifa média de eletricidade para o setor industrial e da taxa de inflação durante o período 1996-2016



Fonte: elaborado pelo autor com base em (ANEEL, 2015a) (IPEA, 2016)

Nos Estados Unidos, o Departamento de Energia (DOE) publica anualmente um relatório (LAVAPPA; KNEIFEL, 2016a) para dar suporte às análises de LCC de programas de eficiência energética, contendo as estimativas de taxa de escalada para diferentes tipos de energia (Eletricidade, Óleo Destilado e Residual, Gás Natural, Carvão, etc.), para diferentes setores (Residencial, Comercial, Industrial e Transportes) e até para diferentes regiões do país.

As taxas de escalada apresentadas são estimativas para os próximos 40 anos de aumento do custo da energia excluindo a inflação. O DOE também disponibiliza um aplicativo que permite o cálculo da taxa de escalada específica para um determinado projeto de aumento de eficiência, permitindo até a distribuição percentual de diferentes fontes de energia utilizada e a expectativa futura de diferentes cenários para as políticas ambientais (TECHNOLOGY, 2017). A Tabela 3.3 mostra a análise estatística da taxa de escalada da tarifa de energia elétrica do setor Industrial no Brasil nos últimos 20 anos, assim como algumas das taxas referendadas nos Estados Unidos pela DOE para análise de LCC de projetos de melhoria de eficiência nos setores público para os próximos 40 anos.

O Apêndice B.1 detalha o cálculo da taxa de escalada da energia e apresenta a metodologia utilizada para determinar a taxa de escalada da tarifa da eletricidade industrial do Brasil apresentada na Tabela 3.3 e que será utilizada neste trabalho.

Tabela 3.3 – Dados de Taxa de Escalada de tarifas de energia do Brasil e dos EUA

Tipos de Energia	Taxa de Escalada (e, em %)					
	2016 a 2021	2021 a 2026	2026 a 2031	2031 a 2036	2036 a 2041	2041 a 2046
Eletricidade – Indústria (Brasil)	3.24	3.24	3.24	3.24	3.24	3.24
Eletricidade – Indústria (EUA)	0.9	0.5	0.5	-0.5	-0.2	-0.2
Eletricidade – Residencial (EUA)	1.0	0.5	0.2	-0.4	-0.3	-0.2
Óleo Destilado – Indústria (EUA)	7.7	2.3	1.9	2.3	2.1	2.1
Gás Natural – Indústria (EUA)	8.5	2.0	0.0	-0.4	-0.2	0.0
Carvão – Indústria (EUA)	0.5	0.2	-0.1	0.3	1.6	0.7
Gasolina – Transportes (EUA)	5.5	1.5	1.4	1.8	1.9	2.0

Fonte: elaborado pelo autor com base em (ANEEL, 2015a)(LAVAPPA; KNEIFEL, 2016b)

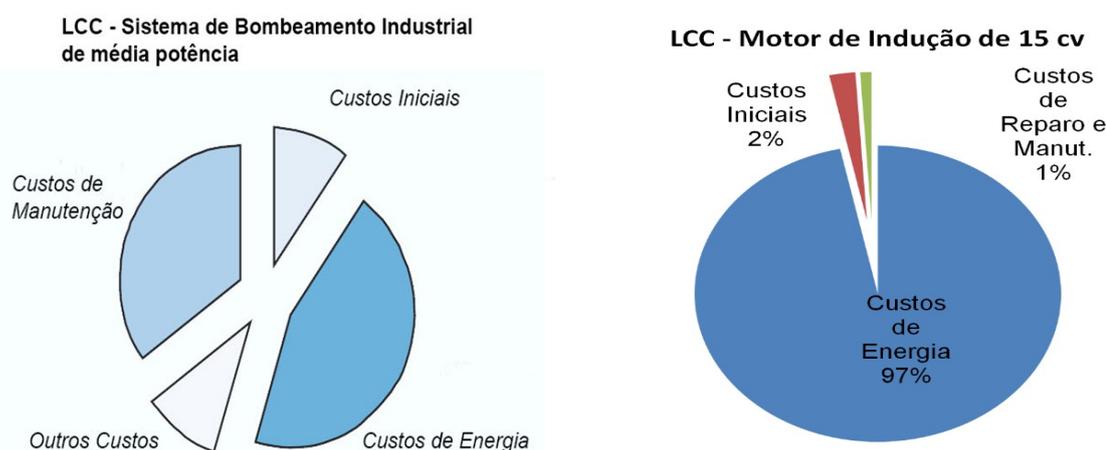
Os dados da Tabela 3.3 mostram o rigor das análises de LCC feito nos EUA e são um alerta para um problema de definição de critérios que ocorre no Brasil. Também mostra um desnível nos aumentos das tarifas ocorridos nos últimos 20 anos no Brasil quando comparados às previsões dos EUA para os próximos 40 anos, que apresenta perspectivas até de aumentos de tarifa abaixo das taxas de inflação, Os derivados do petróleo também se destacam com números elevados de aumento acima da inflação para os próximos 40 anos.

3.3 Custos Iniciais/Investimentos

Estes custos, representados na Figura 26 por C_I e C_{In} , apresentam um grau de dificuldade de apuração reduzido porque ocorrem relativamente próximos à Data Inicial

(Figura 26). Podem ser obtidos por meio de cotações de preços de equipamentos e custos de instalação. O Apêndice C.2 apresenta uma lista de preços de mercado de motores elétricos de diferentes índices de eficiência. Além dos custos de aquisição, os Investimentos Iniciais também podem incluir custos de engenharia (projetos, comissionamentos, questões regulatórias), de treinamento, testes e inspeções, equipamentos auxiliares, e até reforços de fundações (HYDRAULIC INSTITUTE; EUROPUMP; OFFICE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES - US DEPARTMENT OF ENERGY, 2001). A Figura 32 mostra a proporção dos Custos Iniciais em relação ao LCC de um sistema de bombeamento e de um motor elétrico.

Figura 32 – Distribuição dos custos de LCC em um sistema de bombeamento industrial de médio porte e em um motor elétrico de 15 cv.



Fonte: (HYDRAULIC INSTITUTE; EUROPUMP; OFFICE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES - US DEPARTMENT OF ENERGY, 2001)(KULTERER; WERLE, 2011)

3.4 Custos de Operação, Manutenção e Reparos

Estes custos apresentam um grau de dificuldade maior para determinação porque acontecem durante a vida útil do equipamento e dependem da qualidade do gerenciamento da manutenção e operação do processo em que está inserido. Existem esforços para padronizar os custos de manutenção e reparo, especialmente para instalações prediais (COMPANY, 2017), porém na maioria dos casos estes custos devem ser estimados ou baseados em cotações de firmas especializadas.

O Custo de Reparo com reposição de partes do equipamento (C_{Repl}) é tratado separadamente do custo de manutenção e reparo ($C_{M\&R}$) na análise do LCC (Figura 26) por apresentar características próprias a cada equipamento em análise. As Falhas que requerem

reposição de partes do equipamento estão associadas à confiabilidade do equipamento e possuem indicadores próprios, como o Tempo Médio Entre Falhas (*MTBF - Mean Time Between Failures*), que indica a quantidade de falhas esperadas por milhões (10^6 h) de horas durante a vida útil do equipamento (STANLEY, 2011). Este indicador, em conjunto com a estimativa da vida útil do equipamento, estabelece a quantidade de falhas esperadas para o equipamento durante o período de estudo. A expressão (3.7) apresenta o cálculo do *MTBF*.

$$MTBF = \frac{1}{FR_1 + FR_2 + FR_3 + \dots + FR_n} \quad (3.7)$$

Onde *FR* é a taxa de falha de cada um dos *n* componentes do equipamento (*Failure Rate*). Para o caso específico de motores elétricos, existem análises estatísticas indicando a percentagem de falhas dos componentes (DE ALMEIDA et al., 2008)(BONNETT; YUNG, 2008), assim como modelos matemáticos para o cálculo do *MTBF* (WILSON; SMITH, 1977). A Tabela 3.4 apresenta valores de *MTBF* para diversos equipamentos:

Tabela 3.4 – Valores Típicos de *MTBF* para equipamentos.

<i>Equipamento</i>	<i>MTBF</i> (Falhas/ 10^6 h)	
	Mínimo	Máximo
Conjunto Motor/Gerador	6,90	14,08
Motor de Indução ¹	2,73	20,6
Gerador de Turbina a Gás	33,33	200,00
Transformador de Alta tensão	0,08	5,59
Compressor	15,15	29,41
Aquecedor	32,26	55,56
Condensador	5,00	38,46
Bomba d'água	6,99	32,26

¹ Operando 4.000 h/ano.

Fonte: elaborado pelo autor com base em (SRC, 2017) (IEEE, 2007)

Os dados acima atestam a confiabilidade dos transformadores de alta tensão e do motor elétrico e confirmam que os motores elétricos são reparados entre 2 e 4 vezes durante sua vida útil. Os componentes que são responsáveis pela maior percentagem de falhas em motores elétricos são os rolamentos (69-80%), os enrolamentos de estator e rotor (10-28%) e

as partes mecânicas (3-14%)(BONNETT; YUNG, 2008). O Apêndice D.1 apresenta uma relação com o custo do serviço de rebobinamento do motor (falhas nos enrolamentos) por potência do motor.

3.5 Custo Residual

O custo do descarte do equipamento ao final de sua vida útil possui duas vertentes distintas: quando o equipamento é revendido para reaproveitamento dos componentes ou para reaproveitamento por parte do próprio fabricante, obtendo-se aí um benefício final; ou quando o equipamento possui componentes danosos ao meio-ambiente, e que requerem o comprometimento com requisitos legais de descarte do produto, aí gerando um custo adicional (BENAITEAU, J-Y.; RIOUT, J.; DUCHAZEAUBENEIX, 2009). Estes custos normalmente não são considerados na análise do LCC por apresentarem valores similares entre as diferentes propostas para o aumento da eficiência.

O descarte do equipamento é objeto da regulamentação europeia EcoDesign (PARLIAMENT;, 2009), que estabelece requisitos para produtos de uso energético. As características destes produtos desde a sua fabricação até o descarte no final da vida útil devem ser relacionadas em uma planilha denominada MEEuP (Metodologia para Design Ecológico de Produtos de uso energético) (RENÉ; ELBURG, 2016). Aplicando esta planilha no descarte de motores elétricos, obtém-se que 5% do material descartado tem como destino final os aterros sanitários, enquanto que 90% do material plástico é incinerado e os 10% restantes são reciclados; quantos aos metais e vidros, 95% são reciclados (DE ALMEIDA et al., 2008).

3.6 Custos Ambientais

Apesar de ser objeto de controvérsias quanto à conversão monetária do resultado dos poluentes emitidos por equipamentos de uso energético, o cálculo da quantidade da emissão de poluentes já está consolidado. Além da metodologia citada no item anterior definida no âmbito da União Europeia, o Governo do Canadá desenvolveu uma planilha de cálculo com o mesmo objetivo (NATURAL RESOURCES CANADA, 2017), e o governo americano já definiu custos para a emissão de dióxido de carbono (LAVAPPA; KNEIFEL, 2016) caso a lei ambiental (111TH CONGRESS, 2009) seja aprovada.

Em cálculos de custo ambiental, o motor elétrico não é considerado um “dispositivo de uso final”, e sim um “conversor de energia” e, diante disso, os custos

ambientais estão associados ao impacto da produção do material utilizado na sua fabricação (aço, material ferromagnético, plástico), da energia utilizada durante a operação da máquina e das emissões de gases poluentes associadas a estes itens.

A Tabela 3.5 apresenta os resultados da utilização da metodologia Europeia para o cálculo de poluentes emitidos durante o ciclo de vida de motores elétricos de pequeno, médio e grande porte (1,5cv, 15cv e 150cv).

A Tabela 3.6 apresenta o modelo americano para projeção dos Preços Médios para Emissão de Dióxido de Carbono Equivalente (U\$/ kg CO₂ eq.) considerando os cenários de Preço Default (para o caso de não haver alterações na Lei proposta e assumindo que todos os demais países também adotem políticas restritivas de emissão de carbono), de Preço Baixo (assumindo que os países em desenvolvimento não restrinjam as emissões de carbono nos próximos 40 anos), e de Preço Alto (assumindo que as compensações de carbono não sejam permitidas e que hajam restrições para o aumento da capacidade nuclear e de biomassa). Neste último caso, os preços do Carbono tendem a aumentar pela limitação das formas menos onerosas de geração de energia com o objetivo de reduzir as emissões de carbono.

Tabela 3.5 – Impactos ambientais durante a vida útil de motores elétricos operando 4.000 h/ano

<i>Tipo de Emissão</i>	<i>(Unidade)</i>	<i>Potência Nominal do Motor</i>		
		1,5 cv	15 cv	150 cv
Emissões no Ar				
Gases de Efeito Estufa, em GWP100	(kg CO ₂ eq.)	4.888	26.191	177.315
Emissão na Camada de Ozônio	(mg R-11 eq)	-	-	-
Agentes Acidificantes, AP	(g SO ₂ eq.)	29.113	157.926	1.076.158
Componentes Orgânicos Voláteis, VOC	(g)	44	247	1.655
Poluentes Orgânicos Persistentes, POP	(ng i-Teq.)	1.005	5.642	39.789
Metais Pesados, HM	(mg Ni eq.)	2.320	13.311	92.683
Hidrocarbonetos Policíclicos-Aromáticos, PAHs	(mg Ni eq.)	263	1.566	10.707
Matéria Particular, PM	(g)	869	7.066	40.009
Emissões na Água				
Metais Pesados, HM	(mg Hg/20)	920	5.105	35.780
Eutrofização, EP	(g PO ₄)	13	69	446
Poluentes Orgânicos Persistentes, POP	(ng i-Teq.)	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor com base em (DE ALMEIDA et al., 2008)

Tabela 3.6 – Preços Projetados para as Emissões de Dióxido de Carbono
Equivalente por Cenário Político

Ano	<i>Cenários da Política do Carbono (U\$/ kg CO₂ eq.)</i>		
	Preço Default	Preço Baixo	Preço Alto
2016	0.02	0.01	0.07
2020	0.03	0.02	0.08
2030	0.04	0.03	0.14
2040	0.07	0.05	0.22

Fonte: elaborado pelo autor com base em (LAVAPPA; KNEIFEL, 2016b)

3.7 Taxa de Desconto

A Taxa de Desconto (d) reflete o custo do capital investido e a esperada taxa de retorno de investimento. É uma peça fundamental na análise de oportunidade de investimento e é usada na análise do LCC da melhoria de eficiência de equipamentos porque os benefícios esperados ocorrem em um intervalo de tempo que pode ultrapassar 20 anos. A Taxa de Desconto permite a conversão de benefícios futuros para o valor presente. A Taxa de Desconto tem o mesmo objetivo que a Taxa de Interesse (i), sendo que esta última é definida diretamente pelo mercado (THORNTON, 1980), enquanto a primeira pode ser afetada por outros fatores (políticas de governo, custos de oportunidade, preferências futuras) (STEINBACH; STANIASZEK, 2015a).

Neste trabalho utilizamos a taxa de desconto *real*, que se diferencia da taxa de desconto *nominal*, por não incluir a taxa de inflação, trabalhando com valores monetários constantes (real), e não correntes (nominal). Importante salientar que ambas as taxas, quando aplicadas a valores futuros, apresentam o mesmo valor presente (*net present value*).

As taxas de desconto para projetos de eficiência energética podem ser classificadas em duas categorias, a saber:

➤ *Taxas de Desconto Individuais.*

Aplicadas em modelos de decisão em investimento por parte de consumidores individuais, estas taxas são definidas com base no custo de capital de mercado, no risco esperado do investimento, nos custos de oportunidade e na visão futura do investidor. São diferenciadas por classe de consumidores: residenciais, comerciais e industriais.

Para os consumidores residenciais, que possuem menos poder na definição do acesso ao crédito, as taxas de desconto são influenciadas diretamente pelo custo

de capital oferecido pelo mercado, e podem ter valores diferenciados de acordo com a situação econômica do interessado.

Para os consumidores comerciais e industriais os valores considerados são superiores àqueles dos consumidores residenciais e isto induz a um conseqüente aumento do risco do investimento, o que eleva as taxas de desconto oferecidas. A faixa de taxa de desconto para os consumidores residenciais em países desenvolvidos se situa entre 3% e 6%, enquanto para os consumidores industriais e comerciais esta faixa aumenta para entre 6% e 15%.

➤ *Taxas de Desconto Sociais:*

Estas taxas refletem as perspectivas da sociedade em relação aos projetos relacionados a energia. São utilizadas por agências governamentais para analisar cenários energéticos e auxiliar na definição de políticas. Refletem uma perspectiva livre de riscos e por isso apresentam valores inferiores às taxas de desconto individuais e apresentam uma previsão de declínio a longo prazo. Na União Europeia, os valores da taxa de desconto social variam entre 1% e 7%.

No Brasil, assim como na maioria dos países em desenvolvimento, as taxas de desconto são mais elevadas, mesmo considerando que o custo de oportunidade é maior, ou seja, que existe uma maior necessidade/expectativa para investimentos. As taxas de juros definidas pelas autoridades governamentais são elevadas, como conseqüência de uma expectativa de inflação também elevada e também por ser utilizada como uma ferramenta para controlar outros fatores econômicos (“Evolução da Taxa de Juros Real de Equilíbrio no Brasil”, 2012). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável pelos Projetos de Eficiência Energética estabelece, para estes projetos, uma taxa de desconto de 12% (ANEEL, 2008).

A Tabela 3.7 apresenta um levantamento das taxas de desconto sociais em prática em diversos países para projetos relacionados a sistemas de uso energético.

As Taxas de Desconto Individuais apresentam um grau de variação maior em cada país e os dados são de difícil obtenção. No Brasil, bancos e agências governamentais e privadas oferecem taxas de juros diferenciadas para projetos de eficiência (ESPOSITO, A, 2015). A Tabela 3.8 apresenta alguns destas taxas em prática.

Tabela 3.7 – Taxas de desconto sociais em prática em diversos países do mundo

<i>País</i>	<i>Agência</i>	<i>Taxa de Desconto</i>
Brasil	ANEEL	12%
Índia		12%
Paquistão		12%
Nova Zelândia	Treasury and Finance Ministry	8%
Canadá	Treasury Board	8%
China		8%
União Europeia	European Comission	5%
França	Comissariat General Du Plan	4%
Reino Unido	HM Treasury	3,5%
Alemanha	Federal Finance Ministry	3%
Estados Unidos	Enviromental Protection Agency	2% - 3%

Fonte: elaborado pelo autor com base em (ANEEL, 2008) (LAVAPPA; KNEIFEL, 2016b) (HARRISON, 2010).

Tabela 3.8 - Taxas de desconto individuais em prática em diversos países do mundo.

<i>País</i>	<i>Instituição/Programa</i>	<i>Setor</i>	<i>Taxa de Desconto</i>
Brasil	BNDES/FINEM	Empresas	9,1 – 13,6%
		Unidades Federativas	9,7%
União Europeia	PRIMES	Setor Industrial	9%
		Setor Terciário	12%
		Setor Residencial	17,5%
Alemanha	Oeko-Institute	Todos	3,5%
	BDI – Federation of German Industries		4% - 9%
Estados Unidos		Setor Residencial e Comercial	3% - 7%

Fonte: elaborado pelo autor com base em (STEINBACH; STANIASZEK, 2015b) (ROSENQUIST et al., 2006)(BNDES, 2017)

3.8 Incerteza

Todos os parâmetros relacionados aos custos LCC apresentam incertezas. A incerteza da vida útil do equipamento talvez seja a de mais difícil determinação. No caso de motores de indução, existe a padronização apresentada na Tabela 3.1, porém, a confiabilidade deste equipamento faz com que os usuários ultrapassem estes períodos com frequência, dificultando até a renovação do estoque e o conseqüente aumento da eficiência global de equipamentos. Estudos realizados com uma amostra de 4.142 motores de 10 diferentes empresas (TIEBEN, R.; WERLE, R.; BRUNNER, 2015) mostraram que 56% da amostra

estavam operando com quase o dobro de sua vida útil esperada. A Figura 33 mostra estes resultados. Nela podemos observar motores com quase 60 anos de operação.

Uma pesquisa mais abrangente realizada nos Estados Unidos (NADEL et al., 2002), mostra que os números padronizados pelo IEEE (Tabela 3.1) são conservadores. A Figura 34 mostra uma comparação entre os valores coletados nesta pesquisa, incluindo os limites máximos e mínimos da vida útil de motores levantados, e os dados estabelecidos pelo IEEE.

Figura 33 – Idade atual de motores em operação em 10 diferentes empresas da Suíça

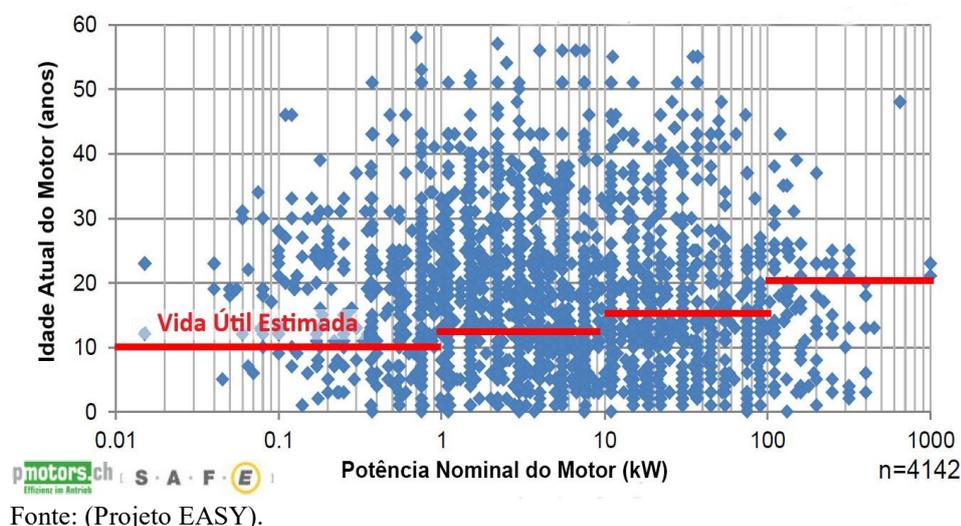
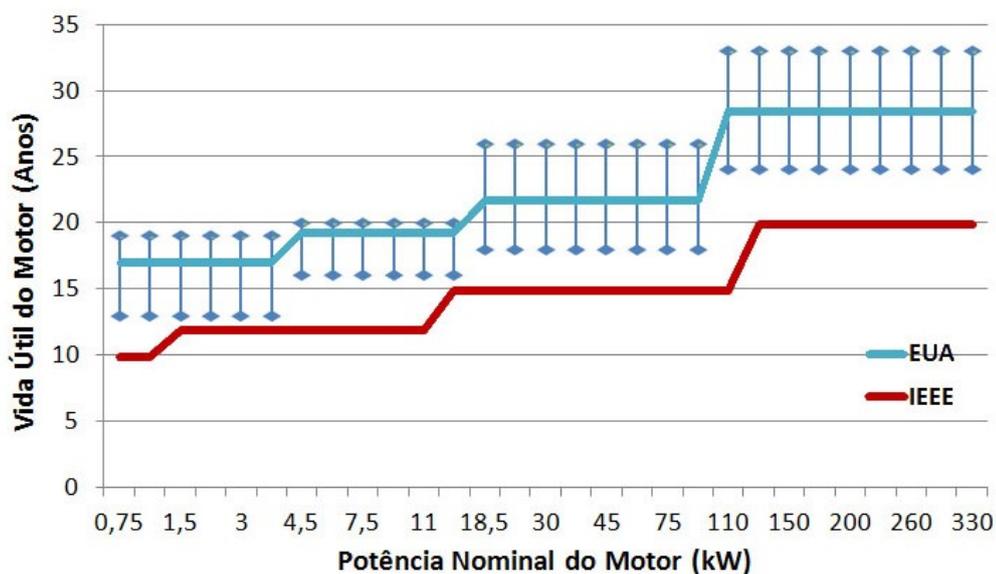


Figura 34 – Dados comparativos entre os valores de vida útil de motores definidos pela IEEE e o resultado de uma amostra feita nos EUA



Fonte: elaborado pelo autor com base em (IEEE MACHINERY COMMITTEE, 2004)(NADEL et al., 2002)

A Tabela 3.9 resume as incertezas dos principais parâmetros da análise do LCC relacionados ao estudo de caso deste trabalho, os motores elétricos.

Tabela 3.9 – Incertezas dos Parâmetros da LCC relacionados a motores elétricos

Parâmetro do LCC	Valor Médio	Desvio Médio	Desvio Padrão
Tarifa de Eletricidade Ind/Brasil(C)	0,1097 US\$/kWh	13,96%	18,05%
Tarifa de Eletricidade Res/Brasil(C)	0,13704 US\$/kWh	8,65%	11,21%
Taxa de Escalada Eletr. Ind./Brasil (e)⁴	3,24%	7,57%	9,9%
Taxa de Escalada Eletr. Ind./Brasil (e)⁴	3,24%	7,57%	9,9%
Taxa de Desconto Social/Brasil(d)	12%	-	-
Taxa de Desconto Individual/Brasil(d)	11,76%	2,42%	3,07%
MTBF Motores de Indução	14,25 Falhas/10 ⁹ h	-	-
Vida Útil de Motores	18,76 anos	25,33%	31,92%

Fonte: elaborado pelo autor

3.9 Considerações Finais

Este capítulo apresentou e detalhou todos os custos associados à vida útil de um equipamento de uso energético final, introduziu os primeiros conceitos econômicos associados à análise da viabilidade do aumento de eficiência, e estabeleceu a incerteza associada a cada um dos parâmetros desta análise. A principal contribuição se deu na introdução do conceito de taxa de escalada da energia (*e*), taxa esta que é pouco utilizada na análise da viabilidade de projetos de eficiência energética de equipamentos de uso final (nos EUA é usada em contratos de melhoria de eficiência de prédios públicos federais e em contratos com distribuidoras de energia (TECHNOLOGY, 2017)); e ainda na apresentação de um valor desta taxa para a tarifa de eletricidade no Brasil com base no histórico dos últimos 20 anos de reajuste tarifário. A se destacar a importância dada nos EUA para a determinação apropriada dos parâmetros relacionados ao LCC de projetos de eficiência energética, a ponto de se prever, para os próximos 40 anos, as taxas de desconto e as taxas de escalada da energia para várias fontes de energia e a influência de possíveis cenários de políticas ambientais,.

A análise da incerteza dos parâmetros do LCC comprovou a importância deste conceito sobre a análise de projetos de eficiência energética tanto nos indicadores técnicos

como nos indicadores econômicos. O dado apresentado sobre a ocorrência de falhas em equipamentos mostra que os indicadores relacionados a este tema estão bem documentados, no entanto, a informação sobre a vida útil dos equipamentos aparece como um ponto a ser melhorado nos levantamentos amostrais.

No próximo capítulo, os parâmetros e custos até aqui apresentados serão inseridos nos métodos para o cálculo da viabilidade de projetos de eficiência energética, incluindo a apresentação de um aplicativo gráfico com a implementação do método selecionado e das primeiras simulações da análise da influência da incerteza dos parâmetros de entrada sobre o resultado final.

3.9.1 Realizações

Foi organizado um evento internacional com o objetivo de promover o tema de eficiência energética no estado do Ceará e permitir o contato dos profissionais locais com os trabalhos desenvolvidos na área. O evento foi denominado I Fórum Internacional de Eficiência Energética em Motores Elétricos e foi realizado em Fortaleza em fevereiro de 2011. O seguinte trabalho foi apresentado:

- Como Calcular Eficiência e Custos de Operação, Cássio Andrade, ARCE/UFC.

4 VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Segundo Sutherland (SUTHERLAND, 1994), a eficiência energética não deve ser considerado um fim a ser alcançado a qualquer custo, mas sim um meio para uma eficiente alocação de recursos energéticos. Diante desta perspectiva, a eficiência energética se torna uma ferramenta das forças que atuam no mercado com o objetivo de usar os meios de produção da maneira que melhor satisfaça as necessidades humanas (MISES, 1940).

Esta ferramenta, entretanto, apresenta sinais de mau funcionamento com a constatação da existência da “lacuna da eficiência energética” (*energy-efficiency gap*) (JAFFE, ADAM B.; STAVINS, 1994), também definida como paradoxo da energia (*energy paradox*). Estas lacunas se revelam quando análises de engenharia frequentemente encontram grandes potenciais para melhorias da eficiência energética em produtos existentes no mercado, potenciais estes que, teoricamente, não deveriam existir em um mercado operando efetivamente. Uma das explicações para a existência destas lacunas é que existem “barreiras” no mercado que impedem a difusão de tecnologias mais eficientes na velocidade esperada. De qualquer modo, a existência destas lacunas é a justificativa para as intervenções no mercado via políticas públicas para a indução do aumento da eficiência de equipamentos (GREENE; EVANS; HIESTAND, 2013a); estas intervenções, entretanto, devem considerar viabilidade econômica como um balizador essencial destas intervenções, sob o risco de se perder o tênue equilíbrio de necessidades vs. bens e serviços ofertados.

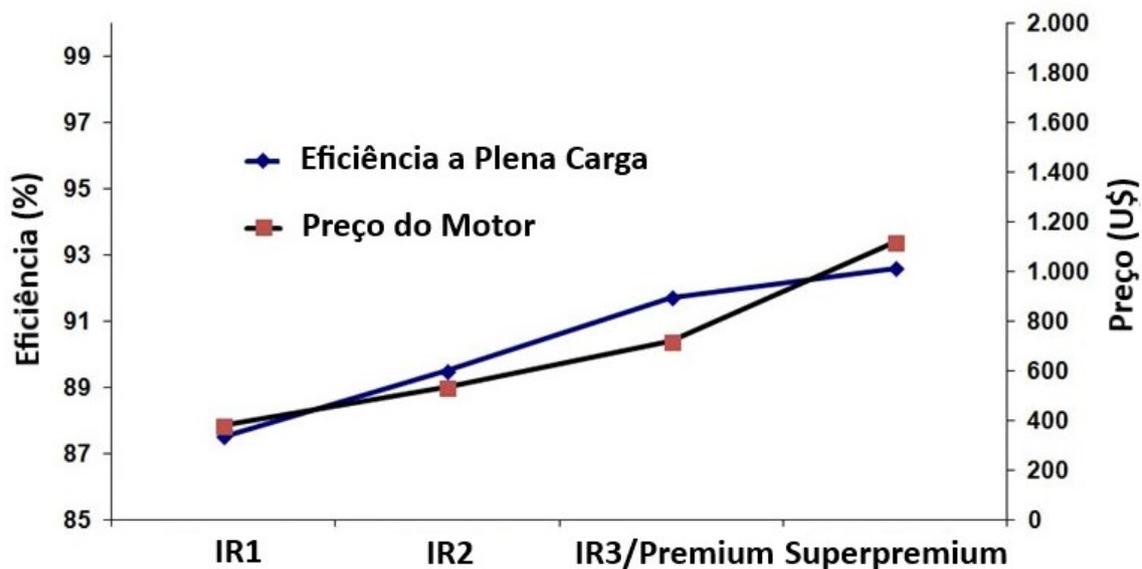
Este capítulo faz uma introdução sobre o perfil de consumidores de produtos eficientes, ressaltando as suas expectativas quanto ao aspecto financeiro. Depois apresenta os métodos existentes para a análise financeira de projetos de eficiência energética e, por fim, apresenta uma ferramenta, na forma de um aplicativo para dispositivos móveis, para analisar a viabilidade do aumento de eficiência de equipamento considerando a incerteza dos fatores técnicos e econômicos envolvidos.

4.1 Introdução

O aumento da eficiência vem acompanhado do aumento de custos de produção e do consequente preço final dos equipamentos; este fato está ilustrado na Figura 35 (evolução

de eficiência e custo de aquisição de um motor de indução trifásico de 10 cv). Este aumento deve ser compensado ao longo do tempo com os benefícios resultantes do aumento de eficiência. O consumidor final, porém, está relutante quanto à percepção destas vantagens (WERLE et al., 2011). O caso das lâmpadas fluorescentes é emblemático (MCMAHON et al., 2000): trata-se de uma melhoria significativa de eficiência em relação às lâmpadas incandescentes, porém a sua aceitação pelo mercado consumidor foi mais lenta que o esperado (ROSENQUIST et al., 2006), ao ponto da necessidade da intervenção do agente público proibindo a fabricação e comercialização das lâmpadas incandescentes (MME, 2014). A mesma dificuldade de penetração no mercado ocorre com materiais isolantes melhorados, eletrodomésticos, etc. Este comportamento do mercado (já definido como paradoxo da energia, ou lacuna da eficiência energética) tem sido objeto de estudo nas últimas décadas, principalmente voltados à compreensão do comportamento do consumidor.

Figura 35 – Evolução do preço de um motor de indução trifásico de 10 cv/4 polos/60 Hz de acordo com a evolução dos índices MEPS.



Fonte: elaborado pelo autor

Os estudos tentam definir perfis de consumidores relacionados à eficiência energética (BRANDON; LEWIS, 1999; SÜTTERLIN; BRUNNER; SIEGRIST, 2011; ZHANG; SIEBERS; AICKELIN, 2012), analisam as atitudes e expectativas em relação ao consumo energético (DECICCO et al., 2015; GREENE; EVANS; HIESTAND, 2013a; HANIMANN; VINTERB??CK; MARK-HERBERT, 2015), e tentam descobrir as causas do paradoxo de energia e propor soluções para o aumento da eficiência energética de produtos e equipamentos (HOPE, 1981; JAFFE, ADAM B.; STAVINS, 1994; KNITTEL;

GREENSTONE; DE LA PENA, 2014; SORRELL, 2007; SPREI; KARLSSON, 2013; XUEWEI; MORENO-CRUZ; CRITTENDEN, 2015).

Dentre os resultados obtidos, destaca-se a classificação de consumidores quanto ao seu comportamento diante do tema eficiência energética (SÜTTERLIN; BRUNNER; SIEGRIST, 2011), a saber:

➤ Economizador de Energia Idealista (15,6%): Dispostos a aceitar restrições de comportamento relativos ao uso de energia, aceitam plenamente as políticas regulatórias e não consideram os esforços financeiros como um obstáculo para a adoção de medidas de contenção de consumo energético;

➤ Economizador de Energia Desinteressado (26,4%): Apesar de demonstrarem interesse em fazer sacrifícios para a redução de consumo e a aceitar as políticas regulatórias, este consumidor apresenta comportamento inconsequente quanto às medidas de restrição de consumo dentro do seu domínio (casa);

➤ Economizador de Energia Parcimonioso (14%): Apesar de sofrerem pressões sociais para se engajarem em esforços de economia de energia, este consumidor desaprova políticas regulatórias associadas a esforços financeiros adicionais;

➤ Consumidor de Energia Materialista (25,1%): Só alteram seu comportamento quanto ao consumo de energia se for financeiramente vantajoso, e por isso não aprovam políticas com consequências financeiras. Apesar disso, adotam medidas de eficiência energética no seu domínio;

➤ Consumidor de Energia Indiferente (5,3%): Seu comportamento é mais orientado por conforto e conveniência pessoal do que por considerações financeiras. Desaprovam políticas regulatórias e não consideram as consequências do seu comportamento perante o resto da sociedade;

➤ Consumidor de Energia Consciente (13,6%): Sentem a pressão social por economia de energia e acreditam que seus esforços podem fazer a diferença, mas não se comprometem em iniciativas de redução de energia por não se sentirem obrigados a evitar o desperdício de energia.

O resultado deste estudo comprova o que já havia sido percebido em estudos anteriores (BRANDON; LEWIS, 1999), de que a informação, principalmente sobre a viabilidade econômica de iniciativas de eficiência energética, é o principal motor do comportamento do consumidor em prol da economia de energia.

Os estudos sobre as falhas de mercado (“barreiras”) que geram as lacunas de eficiência energética, além de levantarem a hipótese da lenta taxa de difusão de novas

tecnologias no mercado (SHARON; LEVIN; MEISEL, 1987), concluem que a principal causa é a inadequada provisão de informações sobre eficiência energética, com destaque para as informações financeiras (JAFFE, ADAM B.; STAVINS, 1994; KNITTEL; GREENSTONE; DE LA PENA, 2014).

Outro fator que confunde o consumidor quanto aos resultados esperados com o investimento em eficiência energética é o denominado efeito rebote (“rebound effect”), que atesta que as mudanças tecnológicas que aumentam a eficiência energética induzem a um aumento da atividade econômica, o que aumenta o consumo setorial, mascarando parcialmente os efeitos de redução esperado (XUEWEI; MORENO-CRUZ; CRITTENDEN, 2015). Este efeito rebote afeta os resultados esperados em média entre 10-30% (OIKONOMOU et al., 2009). Convém ressaltar que o efeito rebote não afeta os resultados de equipamentos individuais, mas sim de resultados setoriais, que agregam diferentes medidas em equipamentos e processos. Este efeito pode ser incluído como incerteza nas simulações de viabilidade econômica.

O método escolhido para a análise da viabilidade econômica deve ter a capacidade de avaliar os efeitos de todas as incertezas dos parâmetros de entrada e ainda atender às demandas dos consumidores quanto à clareza das informações utilizadas.

4.2 Analisando a Viabilidade Econômica

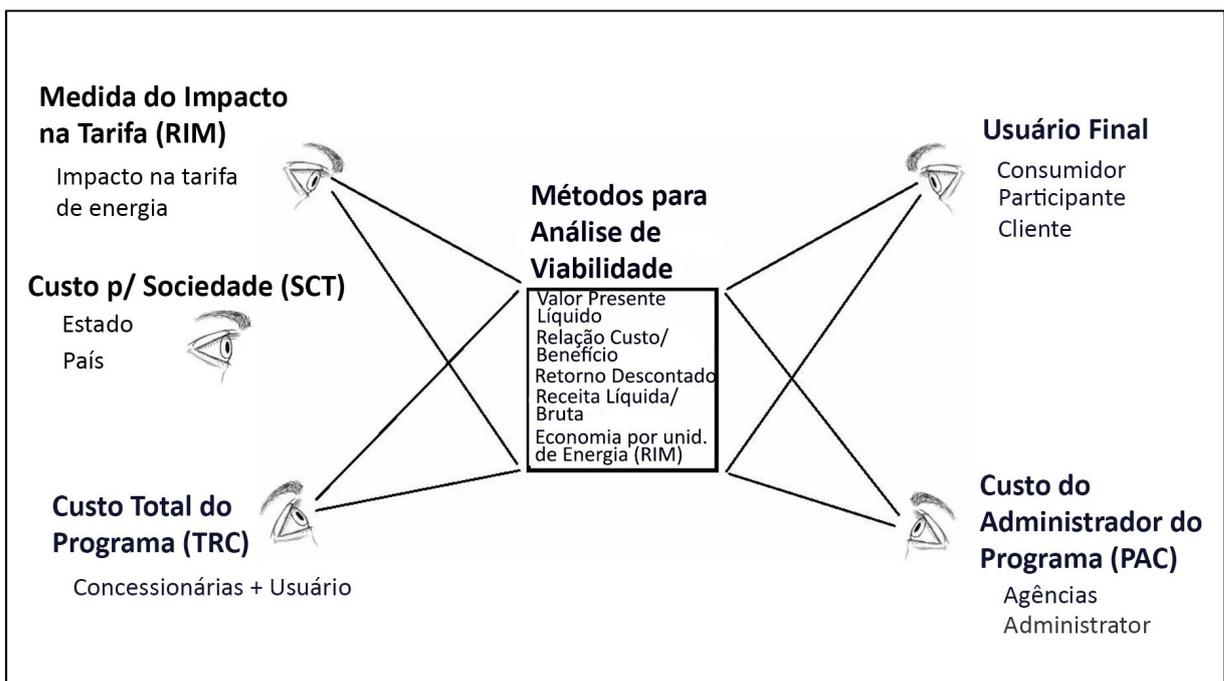
Analisar a viabilidade econômica das iniciativas de eficiência energética é fundamental para identificar se os recursos energéticos serão utilizados de maneira eficaz. Definir a relação custo-benefício ajuda os programas de eficiência energética a competir com uma ampla gama de outras opções de investimentos em energia (NATIONAL ACTION PLAN FOR ENERGY EFFICIENCY, 2008).

Os métodos para a determinação de viabilidade econômica avaliam os custos e os benefícios do investimento em termos monetários, o que facilita a assimilação dos resultados esperados por parte dos agentes participantes do programa de eficiência energética. Com base nesta premissa, o estado da Califórnia (CPUC, 2001) estabeleceu uma prática padrão para avaliar economicamente programas e projetos de eficiência energética. Ele definiu os principais métodos para a determinação da viabilidade econômica destas iniciativas sob cinco grandes perspectivas: o usuário final, a medida do impacto sobre o consumidor (impacto na tarifa) (RIM), o custo total do programa (TRC), o custo do administrador do programa (PAC) e o custo para a sociedade (SCT). Estas perspectivas representam o impacto de um programa

ou projeto de eficiência energética sobre todos os envolvidos, direta ou indiretamente, desde o usuário final até a sociedade como um todo. Os métodos de cálculo da viabilidade devem analisar a eficácia destes programas e oferecer indicadores econômicos que revelem esta viabilidade perante outras opções de investimento em energia. A Figura 36 retrata estas perspectivas e os métodos financeiro que as atendem.

A Figura 36 revela que o método financeiro básico que atende todas as principais perspectivas é o Valor Presente Líquido (VPL). A implantação deste método, em conjunto com uma definição de um indicador econômico-termodinâmico que relacione os benefícios financeiros durante o ciclo de vida do projeto por unidade de energia (utilizado para estimar o impacto sobre a tarifa) cobre todas as perspectivas dos diferentes agentes envolvidos.

Figura 36 – Métodos para a análise da viabilidade de projetos de eficiência energética por perspectiva dos participantes.



Fonte: elaborado pelo autor com base em (CPUC, 2001).

Já existem vários métodos para determinar viabilidade de investimentos que podem ser adaptados à avaliação de projetos de eficiência energética (BORDEAUX-RÊGO, RICARDO; PAULO, GORET PEREIRA; ALMEIDA SPRITZER, 2008)(FULLER; PETERSEN, 1995). Estes métodos variam em função da complexidade e da precisão dos custos analisados.

Os métodos aqui apresentados são determinísticos; a abordagem probabilística ((GREENE; EVANS; HIESTAND, 2013b; HOPE, 1981) requer a existência de uma universo

de dados representativos ao universo analisado e, como a proposta deste trabalho é analisar casos específicos de projetos de eficiência, associados a equipamentos de uso final, fez-se a opção por métodos determinísticos.

4.2.1 Retorno simples

Um dos mais utilizados na análise de projetos de eficiência, o retorno simples ignora as variações nos custos com o tempo, e considera o tempo de retorno do capital investido comparando-o com a economia obtida (calculada de forma simples). O valor aplicado é comparado, período a período (geralmente anual ou mensal), aos benefícios líquidos gerados, para que se obtenha o tempo de recuperação do investimento inicial. Os custos e benefícios, assim como os valores residuais, que ocorram após a data da recuperação do investimento inicial não são considerados. No caso de equipamentos, considera-se a economia obtida com a aquisição ou substituição do equipamento com os caixas líquidos gerados no tempo e divide-se o valor do investimento anual por este valor para se obter o período de retorno do investimento. A expressão (4.1) representa o cálculo do Retorno Simples de investimento em eficiência energética. Para a substituição de motores elétricos, considera-se viável economicamente os investimento que possui um retorno simples entre 2 e 4 anos (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2017),.

$$\text{Retorno Simples} = \frac{\text{Investimento}(\$)}{\text{Economia gerada}(\$)/\text{ano}} \quad (4.1)$$

4.2.2 Retorno Descontado

Este método considera os fluxos de caixa do projeto no decurso do tempo, usando a expressão do Valor Presente (PV) (expressão (3.2)), descontando-se todos os elementos do fluxo de caixa a uma taxa de desconto definida (d). A expressão de viabilidade é similar ao do Retorno Simples, com a diferença que a economia gerada (\$)/ano é atualizada para o Valor Presente. Possui a desvantagem de ignorar os custos e benefícios que ocorram após o período de retorno e eventuais incrementos nos custos de Operação, Manutenção e Reparo ($C_{O\&M}$ e C_{Repl}) podem inverter a viabilidade do investimento.

4.2.3 Custo do Ciclo de Vida - LCC

A Análise do Ciclo do Custo de Vida (LCC) inclui todos os custos associados a um equipamento durante a sua vida útil (vide expressão (3.1)), e é utilizado para avaliar duas

ou mais alternativas mutuamente exclusivas. O LCC de cada uma das alternativas é levantado e a opção mais viável economicamente é aquela que possui o menor LCC. Para este cálculo é necessário obter todos os custos estimados (C_t) para a opção analisada ano a ano (t), durante todo o período de estudo (N), além da taxa de desconto (d) a ser utilizada para atualizar todos estes valores para o Valor Presente (PV). A expressão (4.2) apresenta a fórmula de cálculo do LCC.

$$LCC = \sum_{t=0}^N \frac{C_t}{(1+d)^t} \quad (4.2)$$

Como se vê, os custos do LCC são atualizados pela taxa de desconto (d), mas também, se for o caso, pode-se utilizar a taxa de escalada (e) para custos que apresentem variações não uniformes ao longo do tempo, como o custo de energia, acrescentando-se à expressão (4.2), o cálculo deste custo através da Expressão (3.4).

4.2.4 Poupança Líquida (*Net Savings*)

Também conhecido como Valor Presente Líquido (VPL), é utilizado para os casos em que os benefícios do projeto ocorrem na forma de reduções futuras em custos operacionais (como nos casos de redução de consumo de energia), e calcula a quantia líquida que um determinado projeto irá economizar em relação a um projeto base, em valores presentes. Pode ser expresso da seguinte forma.

$$NS = LCC_{casobase} - LCC_{alternativo} \quad (4.3)$$

Também pode ser expresso de uma forma mais complexa, em que calcula as economias geradas com o projeto alternativo ao longo do tempo (S_t) com os investimentos adicionais deste projeto em relação ao caso base (ΔI_t). A expressão (4.4) apresenta este cálculo.

$$NS = \sum_{t=0}^N \frac{S_t}{(1+d)^t} - \sum_{t=0}^N \frac{\Delta I_t}{(1+d)^t} \quad (4.4)$$

Quando o valor resultante de NS for positivo, o projeto alternativo é viável economicamente.

4.2.5 Relação Custo-Benefício (RCB)

Também relaciona um projeto alternativo com um caso base, mede o desempenho econômico do primeiro relacionando o aumento do investimento (ΔI_t) com as reduções de custos esperadas (S_t), em valores atuais. O projeto alternativo é justificado economicamente quando o RCB é menor que 1. Não pode ser utilizado para comparar projetos mutuamente exclusivos, já que um projeto que tem um valor de RCB menor que outro, em relação ao mesmo caso base, não necessariamente será a escolha mais eficiente. Uma alternativa que propõe um isolante de uma camada para uma janela pode ter um menor RCB que outra que propõe um isolante de dupla camada, mas a primeira opção não será necessariamente a mais eficiente. A opção com menor LCC é que seria a mais adequada. A expressão (4.5) apresenta o cálculo do RCB.

$$RCB = \frac{\sum_{t=0}^N \frac{\Delta I_t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=0}^N \frac{S_t}{(1+d)^t}} \quad (4.5)$$

4.2.6 Taxa Interna de Retorno Ajustada (*Adjusted Internal Return Rate/AIRR*)

A Taxa Interna de Retorno (*Internal Return Rate/IRR*) é um valor limite que torna a Poupança Líquida (NS) do projeto nulo, ou seja, com esta taxa, aplicada como substituto à taxa de desconto nos cálculos NS, a diferença entre os investimentos e as reduções de custos esperadas do projeto se anula. Trata-se de uma referência a ser utilizada para definir a aceitação ou não de um projeto, ou seja, define um limite além do qual o projeto torna-se inviável financeiramente. A Taxa Interna de Retorno Ajustada (AIRR) é comparada com a taxa de retorno mínima utilizada no projeto, que normalmente é a Taxa de Desconto (d). Se o valor da AIRR for superior a d , o projeto é viável. Possui as mesmas características já exemplificadas para a RCB, ou seja, não deve ser utilizada para selecionar entre projetos mutuamente exclusivos. A expressão (4.6) apresenta o cálculo deste indicador que requer o cálculo inicial do RCB (expressão (4.5)).

$$AIRR = (1+d) \left(\frac{1}{RCB} \right)^{\frac{1}{N}} - 1 \quad (4.6)$$

4.2.7 Custo da Energia Economizada

Este método, em conjunto com um dos demais métodos já apresentados, cobre as perspectivas de todos os participantes nos projetos de eficiência energética (Figura 36). Trata-se de um indicador econômico-termodinâmico que foi denominado, para fins deste trabalho, de Custo da Energia Economizada, cujo cálculo está representado na expressão (4.7) para equipamentos que consomem eletricidade, mas pode ser adaptado para qualquer tipo de equipamento de consumo energético. Este método já foi sugerido em artigos (ANG, 2006) e possui uma representação similar em (CPUC, 2001) com a denominação de Impacto na Receita do Ciclo de Vida (*Lifecycle Revenue Impact – LRI RIM*).

Este método, ao relacionar investimentos, em valores monetários, com a energia economizada, em MWh (no caso de eletricidade), estabelece um parâmetro para projetos de eficiência energética que permite a comparação com outros tipos de investimentos relacionados a energia. O Custo da Energia Economizada (U\$/MWh) é dado pela relação entre o investimento aplicado para a melhoria da eficiência (ΔI , U\$) e a redução de energia (ΔMWh , MWh) estimada para o ciclo de vida do projeto. A expressão (4.7) apresenta o cálculo deste indicador de viabilidade. As expressões (4.9) e (4.10) apresentam o cálculo da redução de energia (ΔMWh) e do acréscimo de investimento (ΔI) associados à melhoria da eficiência energética.

$$\text{Custo da Energia Economizada} = \frac{\Delta I}{\Delta MWh} \quad (4.7)$$

Apresentados os métodos utilizados para a avaliação da viabilidade econômica de projetos, resta definir aquele que melhor se enquadra nos projetos de eficiência energética de equipamentos/processos. Excetuando-se o método de Retorno Simples, todos os demais atendem às especificações de valor presente (PV). A utilização do LCC como base para o cálculo da viabilidade econômica destes projetos tem sido o método adotado por organismos oficiais de financiamento (KNITTEL; GREENSTONE; DE LA PENA, 2014), enquanto alguns órgãos normatizadores (ANEEL, 2008) utilizam o RCB, o que exclui o método do Retorno Descontado. O método NS (Net Savings/Poupança líquida), também conhecido como Valor Presente Líquido (*Net Present Value/NPV* (CPUC, 2001)), possui a característica de agregar as utilidades do LCC e permitir simplificações na análise da viabilidade, já que parte da diferença dos LCCs de duas ou mais alternativas, o que exclui a necessidade de determinar os custos similares nas alternativas analisadas ($C_{O\&M}$, C_{Repl} , C_{Res}).

O Método NS, em conjunto com o Custo da Energia Economizada, perfazem as necessidades de todas as perspectivas dos envolvidos nos projetos de eficiência energética quanto à análise de viabilidade. Diante disso, estes métodos foram selecionados para compor a análise proposta neste trabalho.

4.3 Análise da Viabilidade

O Método NS, ao excluir os custos similares entre duas alternativas de eficiência energética, restringe os cálculos a uma comparação entre os custos diferenciados, a saber: os custos de energia, que sofrerão uma redução com a implantação da proposta com maior eficiência (ΔE , expressão (4.9)); e os investimentos iniciais, que são normalmente incrementados (ΔI , expressão (4.10)) com a aplicação da solução mais eficiente. A expressão (4.8) resume o cálculo final do método NS.

$$NS = \sum_{t=1}^n \Delta E \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - \sum_{t=0}^N \frac{\Delta I}{(1+d)^t} \quad (4.8)$$

Onde:

$$\Delta E = C\Delta MWh = CP_{nom}LH \left(\frac{1}{\eta_{maior(L)} - \eta_{menor(L)}} \right) \quad (4.9)$$

$$\Delta I = I(\eta_{maior}) - I(\eta_{menor}) \quad (4.10)$$

Da expressão (4.8): se $NS > 0$, o projeto é viável economicamente,
 $NS < 0$, o projeto é inviável economicamente, e
 $NS = 0$ é o limite para a viabilidade do projeto.

Neste ponto, convém recordar que um dos objetivos deste trabalho é o prover o consumidor final com informação para auxiliá-lo na sua decisão de investir em eficiência energética; também são alvos desta análise, reguladores, fabricantes e os demais atores do mercado de eficiência energética. Dito isto, o método escolhido para a análise da viabilidade deste investimento deve permitir a compreensão e a interação dos usuários com as informações disponibilizadas.

Diante disso, as características de operação do equipamento (horas anuais de operação e carregamento) foram escolhidas como eixos da representação gráfica dos resultados do método NS já que o custo da energia (expressão (3.5)), benefício maior do aumento de eficiência depende diretamente destas características. A Figura 37 mostra esta representação gráfica do Método NS na análise da viabilidade econômica de um projeto de eficiência energética. A linha em destaque no gráfico, denominada Limite da Viabilidade,

representa o resultado da expressão (4.8) para os valores de carregamento e horas de operação do projeto em que $NS=0$. Os limites acima da curva são aqueles em que $NS > 0$ (situações de operação do equipamento em que os benefícios do aumento de eficiência superam os investimentos) e os valores abaixo da curva são aqueles em que $NS < 0$, (condições de operação do equipamento em que economia de energia será inferior ao investimento e, portanto, o aumento de eficiência proposto não é viável economicamente).

A representação gráfica agrupa as principais especificações técnicas de um projeto de substituição de equipamentos (carregamento e número de horas trabalhadas no ano) e o resultado da viabilidade econômica representada no formato de uma linha limite.

Essa representação também permite mostrar o impacto da imprecisão dos valores utilizados na análise (incerteza). A Figura 38 mostra o impacto no Limite da Viabilidade quando alguns dos parâmetros de entrada variam. Na Figura 38, que simula a aplicação do método NS no processo de substituição de um motor de indução trifásico de 10cv por um modelo mais eficiente, pode-se visualizar o efeito da variação percentual (+20%) sobre o Limite de Viabilidade Inicial dos seguintes parâmetros: taxa de desconto(d), taxa de escalada da eletricidade (e), Tarifa de eletricidade (C), Vida útil do equipamento (n) e eficiência do novo equipamento (η). Pode-se verificar na Figura que a alteração de alguns parâmetros aumenta a área de viabilidade (desloca o Limite de Viabilidade para baixo), enquanto outros, como a taxa de desconto (d) reduzem a área de viabilidade (desloca o Limite de Viabilidade para cima). Esta abordagem torna possível implementar os métodos determinísticos de análise de incerteza (análise de sensibilidade e de breakeven), detalhados no item 4.4.

Definidos o método e a forma de representação gráfica do mesmo, e dando prosseguimento ao objetivo de disponibilizar informação aos agentes envolvidos no processo de eficiência energética, foi desenvolvido um aplicativo para dispositivos móveis com base nesta metodologia.

4.3.1. Aplicativo para o Cálculo da Viabilidade

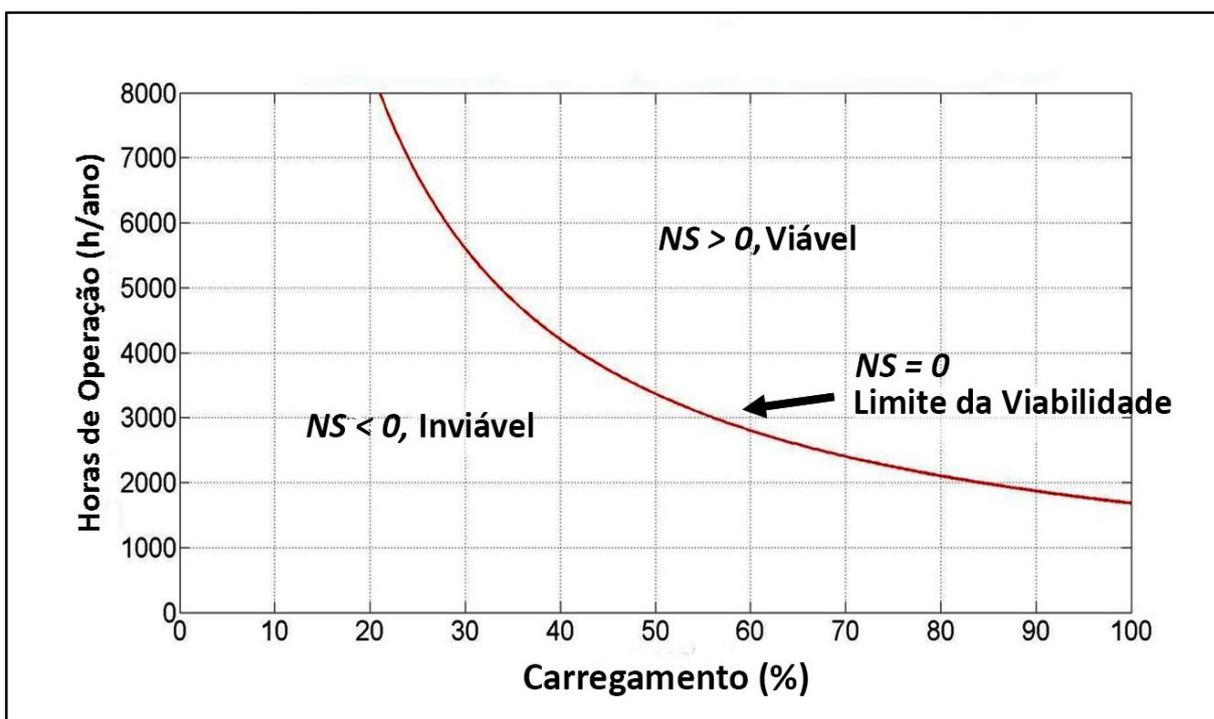
Curva de Viabilidade é um aplicativo desenvolvido na plataforma Android para ser uma ferramenta gráfica para a avaliação econômica de projetos que envolvem melhorias na eficiência energética. As principais vantagens desta abordagem são: proporcionar para o consumidor em geral uma solução para a análise da viabilidade econômica de projetos de eficiência energética ligando características técnicas e financeiras; e permitir uma exibição gráfica para a incerteza dos parâmetros de entrada (Análise de Incerteza). Esta versão do

aplicativo apresenta uma das facilidades desta ferramenta que é verificar a viabilidade econômica da melhoria da eficiência energética de um projeto/equipamento em comparação com outra opção (com menor eficiência e menor investimento inicial). O aplicativo foi personalizado inicialmente para analisar a decisão de comprar um novo motor elétrico, mas também pode ser usado para comparar dois projetos de eficiência de qualquer modalidade de uso energético. Futuras versões do aplicativo incluirão análises considerando a substituição de equipamentos em operação, projetos de retrofiting e programas de desconto (rebate programs) para a melhoria da eficiência energética. O aplicativo foi desenvolvido para as línguas Português e Inglês, automaticamente acionadas de acordo com o país do aparelho do usuário (Brasil – Português; Demais Países – Inglês).

A Figura 39 mostra a tela de abertura do aplicativo, onde os parâmetros de entrada foram previamente preenchidos com dados de um motor de indução de 15 cv (11 kW). Os parâmetros necessários para a execução do aplicativo são: eficiência do equipamento (maior e menor), potência nominal, custo de investimento (maior e menor), taxa de desconto, taxa de escalada da energia e tarifa da energia. Um clique no botão CURVA DE VIABILIDADE (VIABILITY CURVE) (canto inferior esquerdo da Figura 39) gera uma curva baseada no método NS (expressão (4.8)) e no gráfico da Figura 37, mostrando a área de operação da máquina em que a substituição é economicamente viável (acima da curva) e a área onde a substituição não é viável (abaixo da curva). A caixa PONTO DE OPERAÇÃO (OPERATING POINT) (canto inferior esquerdo da Figura 39) permite a entrada da característica de operação do equipamento em análise (carregamento (%) e horas de operação/ano (h)) (Figura 40). A tela exibirá um ponto vermelho representando o ponto de operação da máquina, enquanto o resultado da análise da viabilidade e o resultado do cálculo do Custo da Energia Economizada (Expressão (4.7)), em US\$/MWh, aparecem no canto superior direito da tela (vide Figura 39).

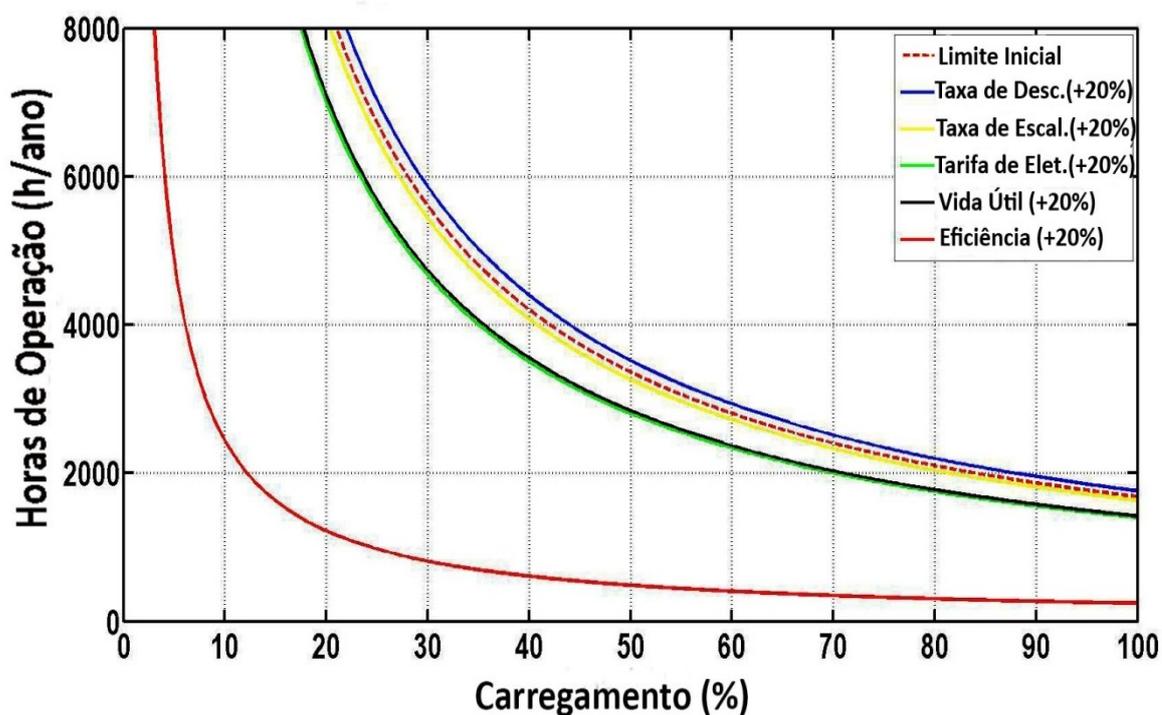
O aplicativo contém textos explicativos para cada parâmetro de entrada, acessados a partir de um clique no ponto de interrogação (?) ao lado de cada caixa de entrada (vide lado esquerdo da Figura 39 e caixa de texto na Figura 41). Ao se pressionar e segurar (press and hold) sobre cada uma das caixas de parâmetros, abrem-se tabelas padronizadas com valores normatizados que podem ser selecionados para preenchimento automático da caixa (exemplo na Figura 42). O Apêndice C.1 apresenta uma descrição do aplicativo e texto explicativo de como utilizá-lo. Estes textos também estão contidos na opção Ajuda (Help) do aplicativo.

Figura 37 – Definição dos limites de viabilidade econômica para a aplicação do Método NS em um projeto de melhoria de eficiência energética



Fonte: elaborado pelo autor

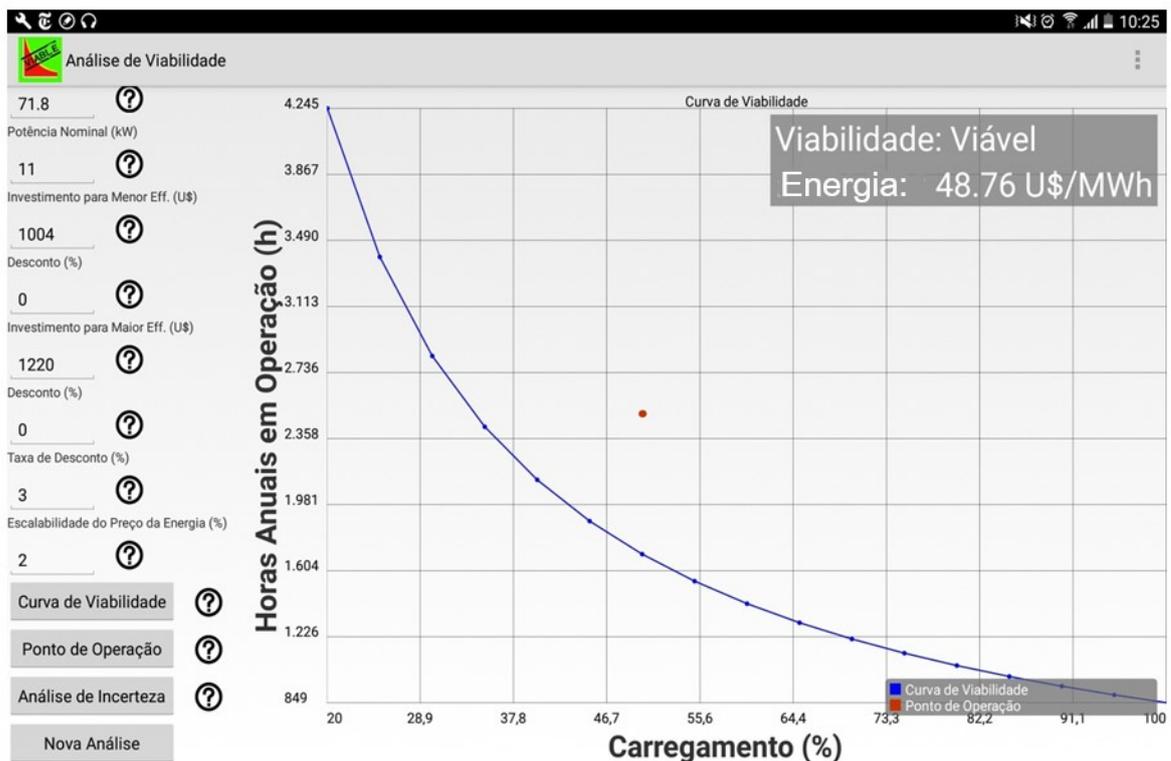
Figura 38 – Efeito da variação da taxa de desconto (d), taxa de escalada do custo da energia (e), vida útil do motor (n) e custo de energia (C) na curva de viabilidade de um projeto de substituição de motores.



Fonte: elaborado pelo autor.

A Análise de Incerteza é feita com um clique na caixa ANÁLISE DE INCERTEZA (UNCERTAINTY ANALYSIS) (abaixo do botão Operating Point, canto inferior esquerdo da Figura 39) e uma nova tela aparece com a mesma curva de viabilidade da tela anterior, porém, permitindo que o valor de cada parâmetro possa ser alterado (Figura 43). O efeito da alteração do parâmetro na análise é exibido graficamente em uma nova curva de viabilidade, que aparece em conjunto com a curva original, como pode ser visualizado na Figura 43. No canto superior direito da Figura 43 pode-se verificar que o parâmetro alterado resultou na perda da condição de viabilidade do projeto sob análise. O novo valor do Custo da Energia Economizada resultante da alteração do parâmetro também é visualizado no canto superior direito da tela.

Figura 39 - Tela principal do aplicativo Análise de Viabilidade com os resultados de uma análise de uma melhoria de eficiência em um motor de indução de 15 cv.



Fonte: (ANDRADE, 2015)

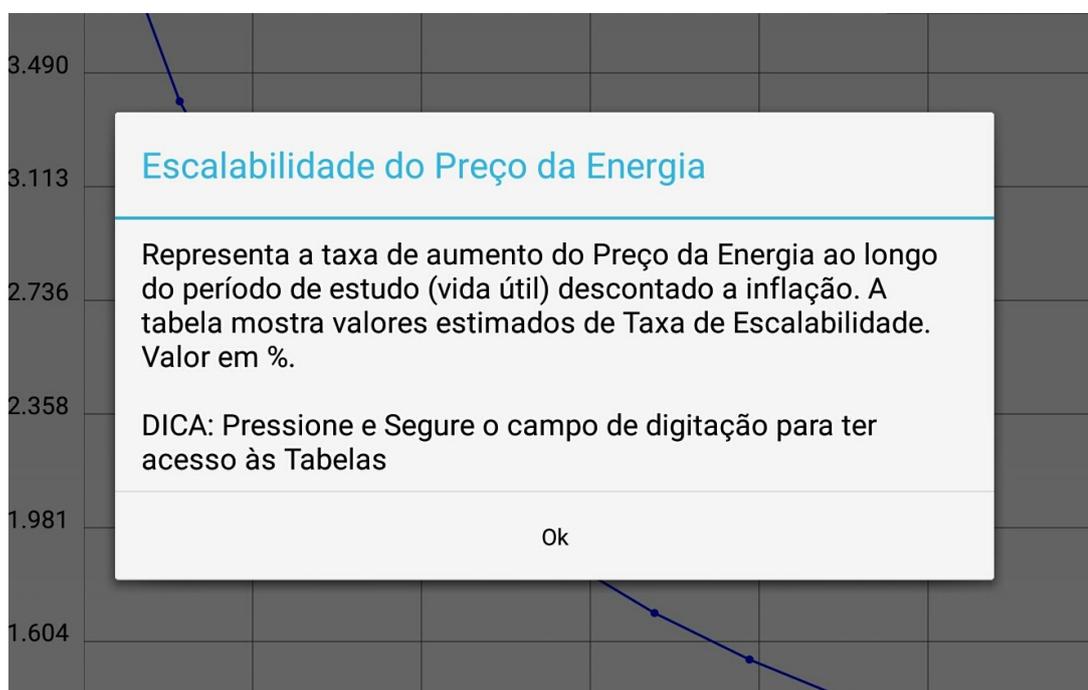
Figura 40 – Tela para inclusão das características de operação do equipamento (carregamento, em %, e horas de operação/ano, em h).



A screenshot of a software interface showing a dialog box for entering equipment operation characteristics. The dialog box is white with a thin border and is centered on a dark gray background. It contains two input fields: the first is labeled 'Carregamento (%)' and has the value '50' entered; the second is labeled 'Horas de Operação (h/ano):' and has the value '2500' entered. Below the input fields is a single 'OK' button.

Fonte: (ANDRADE, 2015)

Figura 41 – Tela explicativa do parâmetro de entrada escalabilidade do preço da Energia (e)



A screenshot of a software interface showing a dialog box titled 'Escalabilidade do Preço da Energia'. The dialog box is white with a thin border and is centered on a dark gray background. The title is in blue. The main text explains that the parameter represents the rate of increase in the price of energy over the study period (useful life) discounted for inflation, and that a table shows estimated values. Below the text is a 'DICA' (tip) that says 'Pressione e Segure o campo de digitação para ter acesso às Tabelas'. At the bottom of the dialog box is an 'Ok' button. The background of the software interface shows a grid with numerical values on the left side: 3.490, 3.113, 2.736, 2.358, 1.981, and 1.604.

Fonte: (ANDRADE, 2015)

Figura 42 – Tabela padronizada com níveis de eficiência NEMA Premium para motores de indução

ABNT IR3 Premium Efficiency 60 Hz					
Potência	2 Pole	4 Pole	6 Pole	8 Pole	
0.75	77	83.5	82.5	75.5	
1.1	84	86.5	87.5	78.5	
1.5	85.5	86.5	88.5	84	
2.2	86.5	89.5	89.5	85.5	
3	88.5	89.5	89.5	86.5	
3.7	88.5	89.5	89.5	86.5	
4.4	88.5	89.5	89.5	86.5	
5.5	89.5	91.7	91	86.5	
7.5	90.2	91.7	91	89.5	
9.2	91	92.4	91.7	89.5	
11	91	92.4	91.7	89.5	
15	91	93	91.7	90.2	
18.5	91.7	93.6	93	90.2	

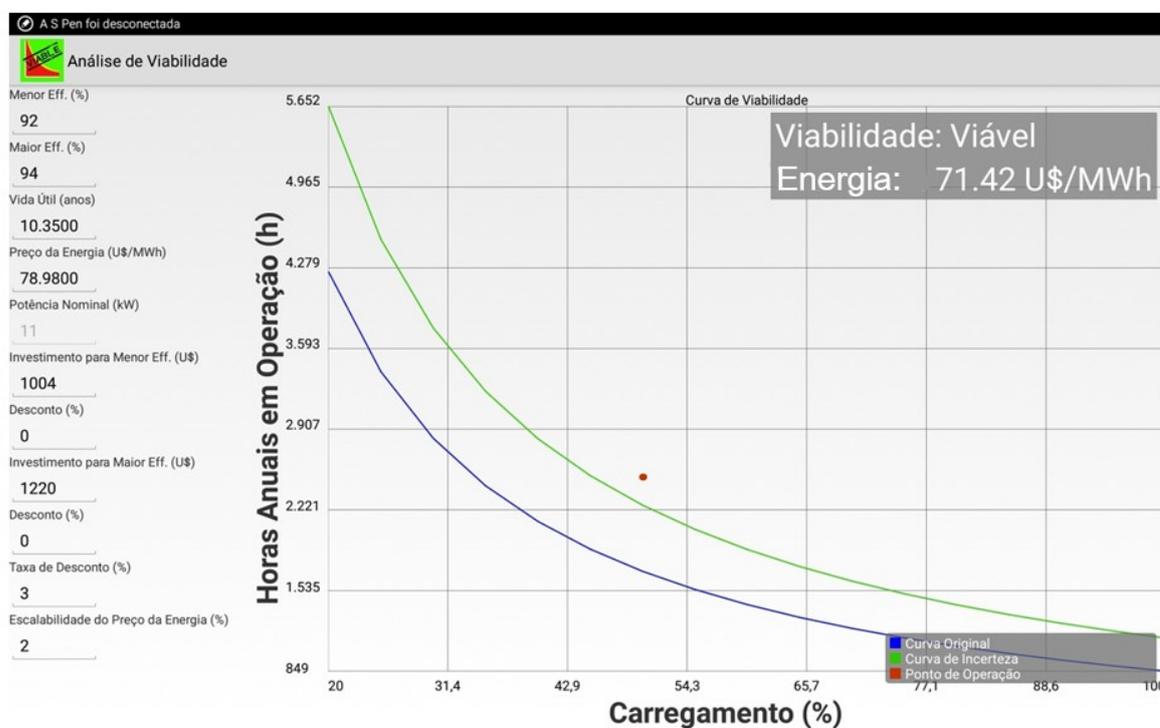
Fonte: (ANDRADE, 2015)

A Figura 43 mostra um exemplo da barra de alteração dos valores dos parâmetros de entrada para a Análise da Incerteza (pode ser acessada com um Press+Hold sobre a caixa de cada parâmetro), que pode ser variada percentualmente em relação ao valor original do parâmetro.

Aplicativo desenvolvido na tecnologia Android versão 4.0 (Ice Cream Sandwich) (API 15) que pode ser utilizado em aparelhos móveis (tablet e smartphones) com a versão mínima do Android 2.3 (Gingerbread) (API 10). Atualmente o aplicativo está em processo de registro no Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI).

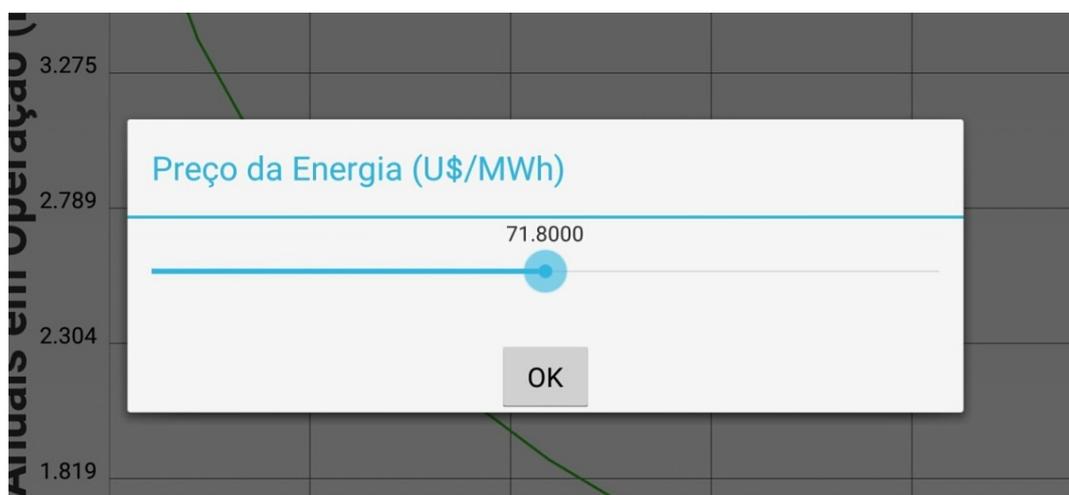
O Código do aplicativo está disponibilizado em <https://github.com/CassioTCA/Doutorado>. O Aplicativo está disponível para download em <https://github.com/CassioTCA/Curva-de-Viabilidade>.

Figura 43 - Tela da análise de sensibilidade após a alteração no valor do parâmetro de eficiência.



Fonte: (ANDRADE, 2015)

Figura 44 – Barra de alteração do parâmetro de entrada Preço da Energia.



Fonte: (ANDRADE, 2015)

4.4 Análise da Incerteza

Existem duas técnicas para tratar a incerteza dos dados de entrada de uma análise de viabilidade econômica: a determinística, que mede o impacto no resultado da análise de um

projeto quando se variam um valor ou uma combinação de valores de entrada no decurso do tempo; e a probabilística, que assume que nenhum parâmetro pode representar todas as possibilidades de risco de um investimento e propõe que cada uma das alternativas deva ser considerada e cada uma associada a uma probabilidade, para então dar um peso médio para cada uma dos valores esperados do projeto (FULLER; PETERSEN, 1995).

A técnica determinística de análise da incerteza é a mais apropriada para o objeto de estudo de trabalho, tendo em vista o caráter individualizado da análise (projetos e programas de equipamentos específicos); caso se tenha acesso a um universo de dados, os métodos probabilísticos poderiam ser avaliados. As avaliações determinísticas de incerteza podem ser assim resumidas:

➤ **Análise de sensibilidade:** Determina dentre os parâmetros de entrada aquele que provoca a maior variação no resultado final. A partir desta definição, pode-se determinar limites máximos e mínimos para os resultados do método de avaliação do projeto (LCC, NS, etc.) com base neste parâmetro, ou ainda apresentar uma série de cenários otimistas ou pessimistas em relação ao valor do cálculo inicial;

➤ **Análise Breakeven:** Quando uma variável é considerada crítica para o sucesso de um projeto, determina-se os valores máximos ou mínimos desta variável que irá permitir que o projeto ainda seja viável. No caso da análise de projetos de eficiência energética, a determinação desta variável passa necessariamente pelos fatores que determinam a economia de energia, visto que o investimento inicial dificilmente pode ser objeto de alterações. Determinado este parâmetro, deve-se calcular o valor mínimo de economia resultante da alteração deste parâmetro que ainda compensaria o investimento a ser feito.

O Aplicativo desenvolvido permite a implantação dos dois métodos determinísticos apresentados. A Análise da Sensibilidade foi a escolhida para calcular a incerteza dos parâmetros nos resultados de viabilidade dos projetos de eficiência energética por determinar o efeito da incerteza de cada um dos parâmetros no resultado final e então determinar qual deles será utilizado como base para os cálculos finais. A seguir será apresentada a análise da sensibilidade para todos os parâmetros apresentados nos capítulos anteriores, utilizando uma simulação de uma substituição de um motor elétrico por outro mais eficiente. Os valores base para as simulações de incertezas são aqueles listados na Tabela 3.9, acrescentado da incerteza decorrente do efeito rebote (Item 4.1).

As simulações apresentadas se baseiam na viabilidade de substituição de um motor de indução trifásico (MIT), 15cv, 4 polos, do padrão MEPS IR1 por outro de mesma potência, porém pertencente ao padrão IR2 (ABNT, 2013). A simulação base (Limite Inicial)

utiliza os seguintes parâmetros: $d=5%$, $e=3%$, $C= 0,156$ US\$/kWh. Como referência, foi utilizado o ponto de operação médio dos motores de média potência da União Europeia (Carregamento = 45% e Horas de Operação = 2400 h/ano) (EU EUROPEAN COMMISSION, 2000).

4.4.1 Incerteza na Eficiência

A Figura 45 mostra o resultado da variação de $\pm 1,0%$ no valor da eficiência do novo motor, de acordo com a exatidão esperada do método de perdas segregadas (Método B1 (IEEE MACHINERY COMMITTEE, 2004)) descrito no Capítulo 2. Como esperado, o erro negativo na medição da eficiência ($-1,0%$) desloca a curva de viabilidade para cima ($+40,58%$ em relação à curva limite inicial), reduzindo a área de viabilidade, enquanto o erro de medição positivo ($+1,0%$) tem o efeito oposto ($-22,05%$ do limite inicial).

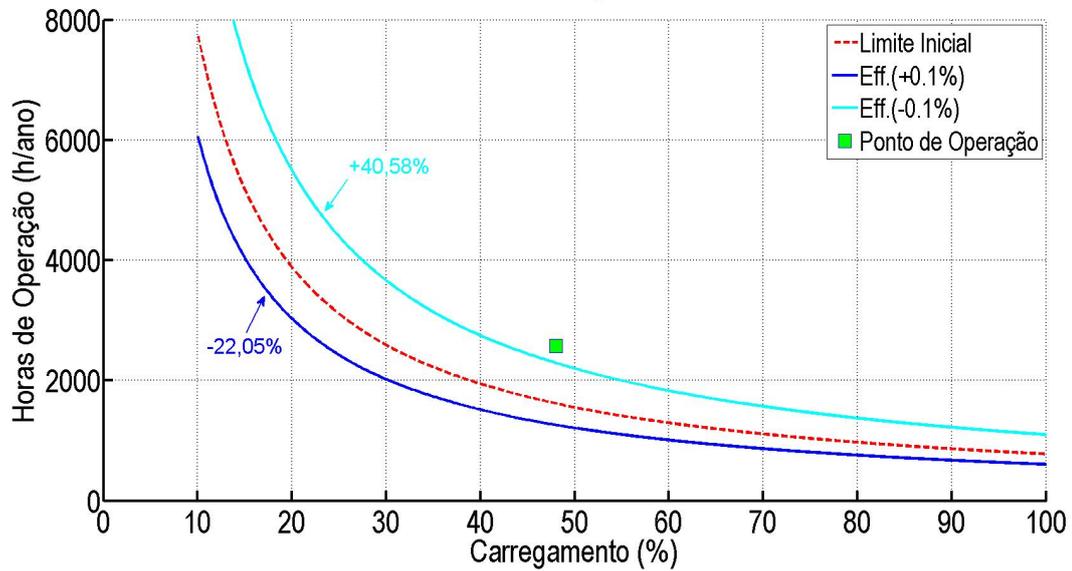
Convém ressaltar que, no cálculo da economia de energia (expressão (4.9)), utiliza-se a diferença entre a maior eficiência (η_{maior}) e a menor eficiência (η_{menor}), o que torna a precisão da eficiência ainda mais importante. Nos cálculos realizados, utiliza-se os valores de eficiência sob carga nominal, desprezando-se o efeito da variação da eficiência com o carregamento da carga; esta aproximação é minimizada pelo fato do cálculo da economia de energia depender da diferença entre as eficiências das duas opções consideradas, o que minimiza o efeito desta aproximação no resultado final.

A influência do erro de medição das análises de viabilidade econômica tende a aumentar a medida que as bandas de eficiência (limites entre níveis MEPS adjacentes) tende a diminuir (AGAMLOH, EMMANUEL B.; ANDRADE, CASSIO T. C. ; HUSAIN, 2013), o que vem acontecendo nas recentes padronizações de MEPS de motores elétricos do nível Premium para o SuperPremium ((ALMEIDA; FERREIRA, 2014). Isso se torna especialmente preocupante para motores de grande potência, cujos índices de eficiência já são elevados. A diferença entre níveis MEPS está se igualando ao erro de medição, o que tornará a medição da eficiência, nos padrões de exatidões atuais, insuficiente para determinar este aumento real de eficiência.

4.4.2 Incerteza na Taxa de Desconto (d)

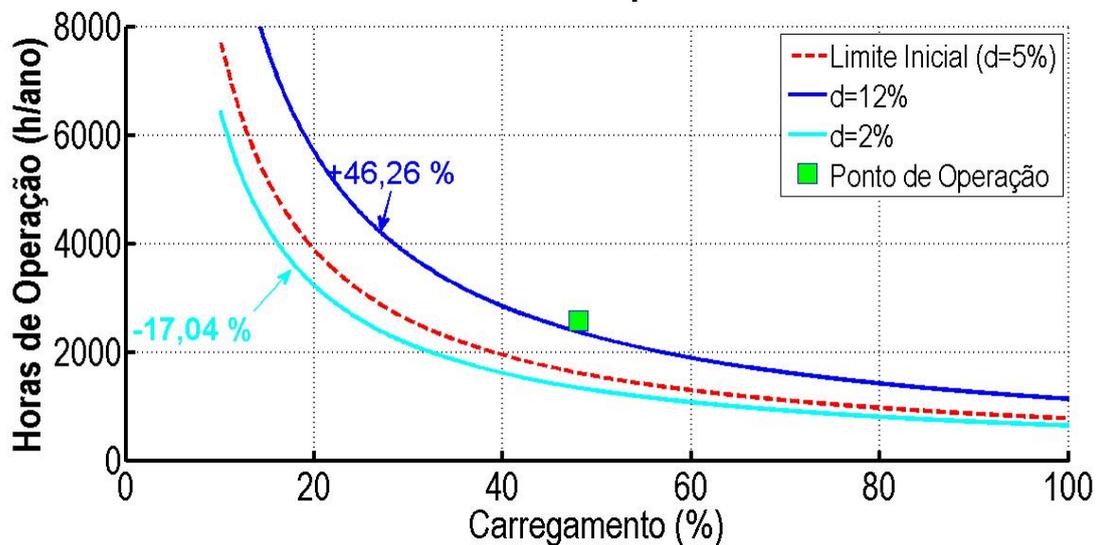
A Figura 46 mostra o resultado da variação da taxa de desconto (d) entre os valores máximos e mínimos apresentados na Tabela 3.9. O aumento na taxa de desconto desloca a curva de viabilidade para cima ($+46,26%$ em relação à curva limite inicial), reduzindo a área de viabilidade, enquanto a sua redução tem o efeito oposto ($-17,04%$ do limite inicial).

Figura 45 – Simulação da Incerteza no valor da Eficiência na viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 polos, do nível IR1 para o nível IR2.



Fonte: elaborado pelo autor com base em (ANDRADE, 2015)

Figura 46 – Simulação da Incerteza no valor da Taxa de Desconto na viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 polos, do nível IR1 para o nível IR2.



Fonte: elaborado pelo autor com base em (ANDRADE, 2015)

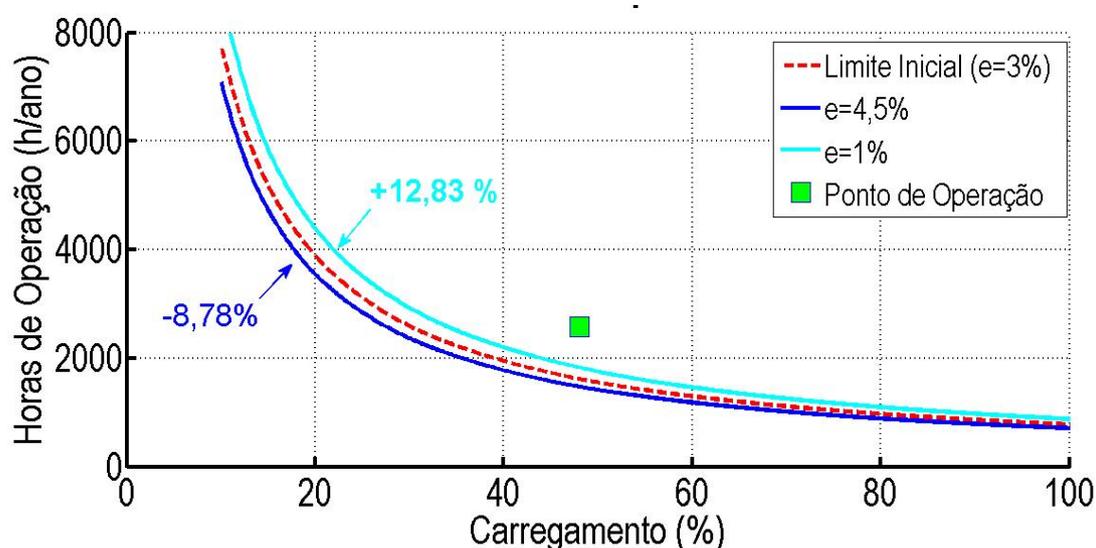
Apesar dos limites simulados apresentarem uma grande variação (de 2% a 12%), já que foram escolhidas com base em uma amostra de índices utilizados em diferentes países, esta variação tende a ser reduzida quando considera-se a realidade de cada país. Programas de

incentivo a projetos de eficiência energética ((STEINBACH; STANIASZEK, 2015a)) podem reduzir estas taxas, aumentando a área de viabilidade.

4.4.3 Incerteza na Taxa de Escalada da Energia (e)

A Figura 47 mostra a simulação para a incerteza da taxa de escalada da eletricidade, com variações percentuais altas (4,5% acima da inflação) e conservadoras (1% acima da inflação). O comportamento da curva de viabilidade é o oposto da variação da taxa de desconto: uma taxa de escalada elevada desloca a curva de viabilidade para baixo (-8,78%), aumentando a área de viabilidade, enquanto uma taxa de escalada conservadora provoca o efeito oposto (+12,83%), reduzindo a área de viabilidade. Este efeito é esperado, pois uma expectativa de preço de energia elevado aumenta a economia gerada a partir do incremento na eficiência, aumentando os benefícios do projeto.

Figura 47 – Simulação da Incerteza no valor da Taxa de Escalada da tarifa de eletricidade na viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 polos, do nível IR1 para o nível IR2.



Fonte: elaborado pelo autor com base em (ANDRADE, 2015)

4.4.4 Incerteza na Tarifa da Energia (C)

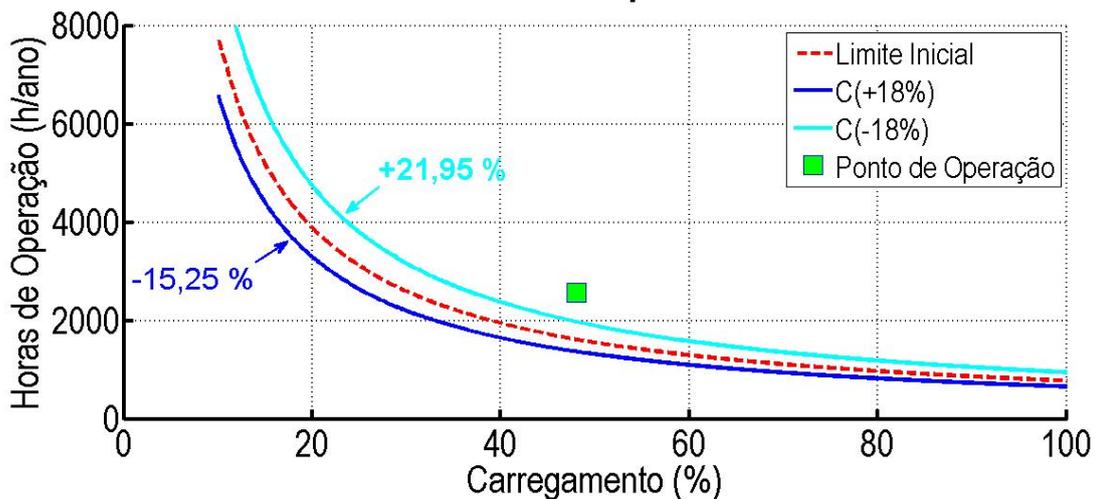
A Figura 48 apresenta o efeito da variação da tarifa de eletricidade na curva de viabilidade de um projeto de substituição de motores. As variações do preço da tarifa têm o efeito similar às variações na taxa de escalada, porém com um impacto maior: uma tarifa elevada desloca a curva de viabilidade para baixo (-15,25%), aumentando a área de

viabilidade, enquanto uma tarifa reduzida provoca o efeito oposto (+21,95%), reduzindo a área de viabilidade.

4.4.5 Incerteza na Vida Útil do Equipamento (n)

A Figura 49 mostra os efeitos da variação da vida útil do motor no resultado da viabilidade do projeto de melhoria da eficiência. O aumento da vida útil do equipamento provoca um deslocamento da curva de viabilidade para baixo (-21,52%), aumentando a área de viabilidade do projeto, enquanto a redução da vida útil tem um efeito oposto (+9,88%). Quanto maior a vida útil do equipamento, maiores os benefícios gerados pela sua substituição, e maiores as chances do investimento ser recompensado.

Figura 48 – Simulação da Incerteza no valor da tarifa de eletricidade sobre a viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 polos, do nível IR1 para o nível IR2.

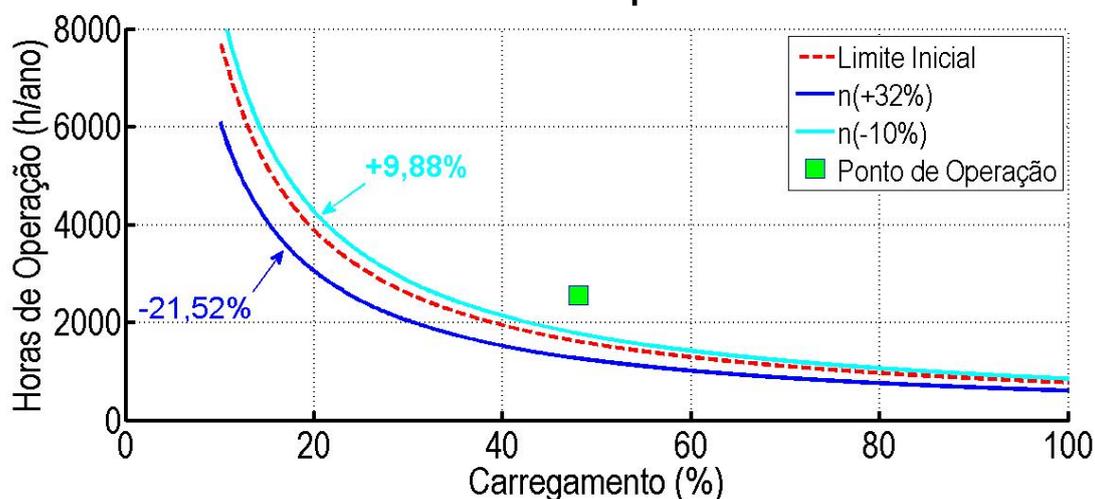


Fonte: elaborado pelo autor com base em (ANDRADE, 2015)

4.4.5 Incerteza do Efeito Rebote

O efeito rebote foi citado na introdução deste Capítulo como uma das causas das “barreiras” de mercado à adoção, por parte do consumidor, de um comportamento mais favorável à eficiência energética. O efeito rebote (“rebound effect”) obscurece os efeitos de redução de consumo de energia resultantes do aumento de eficiência por uma tendência do consumidor em aumentar a utilização dos equipamentos (ou a produção) após uma percepção inicial desta redução. A simulação do efeito rebote é feita reduzindo-se os benefícios do aumento da eficiência.

Figura 49 – Simulação da Incerteza na vida útil do equipamento sobre a viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 polos, do nível IR1 para o nível IR2.



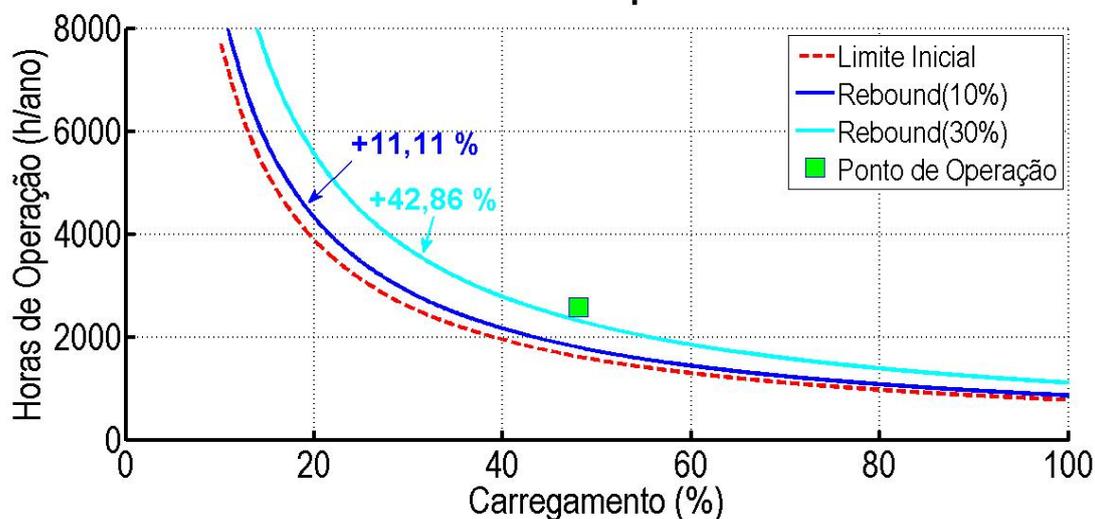
Fonte: elaborado pelo autor com base em (ANDRADE, 2015)

Convém ressaltar que o efeito rebote se faz sentir em projetos de eficiência energética setoriais, envolvendo um ou vários processos e equipamentos; em equipamentos individuais, o efeito rebote é minimizado, e no caso de aumento de utilização do equipamento (aumento do carregamento ou das horas de operações do equipamento), o efeito é benéfico à viabilidade, por colocar o Ponto de Operação da máquina em um local mais elevado do gráfico de viabilidade.

A Figura 50 mostra os efeitos deste efeito rebote na curva de viabilidade da substituição de um motor elétrico. O efeito rebote desloca a curva de viabilidade para cima, reduzindo a área de viabilidade, e quanto maior o efeito, menor a área de viabilidade.

A Tabela 4.1 resume os efeitos da Incerteza representados nos itens anteriores e nela podemos observar a influência do erro de medição da eficiência no resultado final da viabilidade do projeto. Por ser um valor medido, sua incerteza pode ser controlada com a melhoria nos processos de medição. A Taxa de Desconto também apresenta um grande efeito sobre a viabilidade, mas as variações consideradas na simulação se referiam a valores em diferentes países; dentro de um mesmo país as variações são menores, e em situações específicas, esta taxa depende da forma de captação do valor a ser investido (ESPOSITO, A, 2015). Dentre as demais opções, a vida útil do equipamento e a tarifa de energia se destacam nos seus efeitos sobre a curva de viabilidade, mas a tarifa de energia aparece com um efeito maior, e, como este trabalho se propõe a avaliar os efeitos de um programa MEPS em âmbito nacional, esta variação terá um maior efeito sobre os resultados e, portanto, será utilizada nas simulações do Capítulo seguinte.

Figura 50 – Simulação da Incerteza do efeito rebote sobre a viabilidade da substituição de um MIT de 10cv, 4 polos, do nível IR1 para o nível IR2.



Fonte: elaborado pelo autor com base em (ANDRADE, 2015)

Tabela 4.1 – Resumo do efeito da Incerteza dos parâmetros de entrada na Viabilidade de um projeto de substituição de MIT.

<i>Item</i>	<i>Incerteza (%)</i>		<i>Efeito na Curva de Viabilidade</i>	
	Máx.	Mín.	Máx.	Min
Eficiência	+1,0%	-1,0%	-22,05%	+40,58%
Taxa de Desconto	12%	2%	+48,26	-17,04%
Taxa de Escalabilidade	4,5%	1%	-8,78%	+12,83%
Tarifa de Energia	+18%	-18%	-15,25%	+21,95%
Vida Útil	+32%	-10%	-21,52%	+9,88%
Efeito Rebote	30%	10%	+11,11%	+42,86%

Fonte: elaborado pelo autor com base em (ANDRADE, 2015)

4.5 Considerações Finais

Dando sequência à análise dos parâmetros técnicos e econômicos relacionados a projetos de eficiência, este capítulo introduziu o conceito de lacunas de eficiência energética, associado ao comportamento do consumidor, que coloca a análise financeira entre suas prioridades para investir em eficiência. Depois analisou os métodos existentes para determinar a viabilidade de projetos de eficiência, determinou aqueles que melhor satisfaziam as necessidades dos participantes e apresentou a implementação destes métodos na forma de um aplicativo para dispositivos móveis, facilitando o acesso a consumidores e demais agentes do mercado de eficiência energética. O conceito de análise de incerteza também foi apresentado e, utilizando as funcionalidades do aplicativo, foi implementada a análise de sensibilidade de um projeto de melhoria de eficiência de um motor elétrico de indução, concluindo pela

definição da tarifa de eletricidade como o parâmetro que mais influencia o resultado final da análise de viabilidade.

A principal contribuição deste capítulo foi a definição de um novo modelo para análise de projetos de eficiência, combinando a definição da viabilidade ou não do projeto com o cálculo do Custo da Energia Economizada, que permite a comparação do investimento em eficiência com outras opções de investimento em energia. Outra contribuição foi a implementação do aplicativo Análise de Viabilidade, que permite o acesso ao cálculo da viabilidade de projetos de eficiência neste modelo proposto a partir de dispositivos móveis (smatphones e tablets com tecnologia android). A introdução da incerteza dos parâmetros na análise também torna os resultados mais transparentes para os participantes do projeto.

O Custo da Energia foi o escolhido como o mais sensível a alterações no resultado final, considerando o objeto deste trabalho, a análise da evolução dos MEPS de motores elétricos no Brasil. Diante disto, ficam definidos todos elementos necessários para a análise da viabilidade do aumento de eficiência de equipamentos e processos.

4.5.1 Realizações

O Capítulo 4 inclui um artigo publicado em Congresso e o desenvolvimento de um aplicativo para dispositivos móveis (Android):

- ANDRADE, CÁSSIO T C; PONTES, R. S. T. . **A method to measure the cost-effectiveness of energy efficiency projects: a case study comparing US/Brazil efforts to improve Induction Motors' MEPS.** Proceedings of the 10th International Conference EEMODS'15. Anais...2015
- Aplicativo em processo de registro no Instituto Brasileiro de Propriedade Industrial(INPI) na modalidade Registro de Programa de Computador.

5 ESTUDO DE CASO – MOTORES ELÉTRICOS

O uso de energia elétrica responde por 18% da energia consumida no planeta e tem no motor elétrico a sua maior *commoditie*. O Mercado atual de motores elétricos é de cerca de 300 milhões de unidades em utilização no mundo (excluindo os motores fracionais), consumindo 7.400 TWh/ano (entre 40 e 50% da energia elétrica produzida) (WAIDE; BRUNNER, 2011).. Responde ainda pela comercialização de 30 milhões de unidades por ano e ainda pelo reparo de outras 90 milhões de unidades. Destes totais, 96% são motores AC, e destes, 87% são motores de indução trifásicos (MIT), mostrando a importância deste tipo específico de motor (DE ALMEIDA et al., 2008). Os números mostram a importância deste equipamento no mercado de energia e justificam o esforço que vem sendo feito para aumentar a sua eficiência.

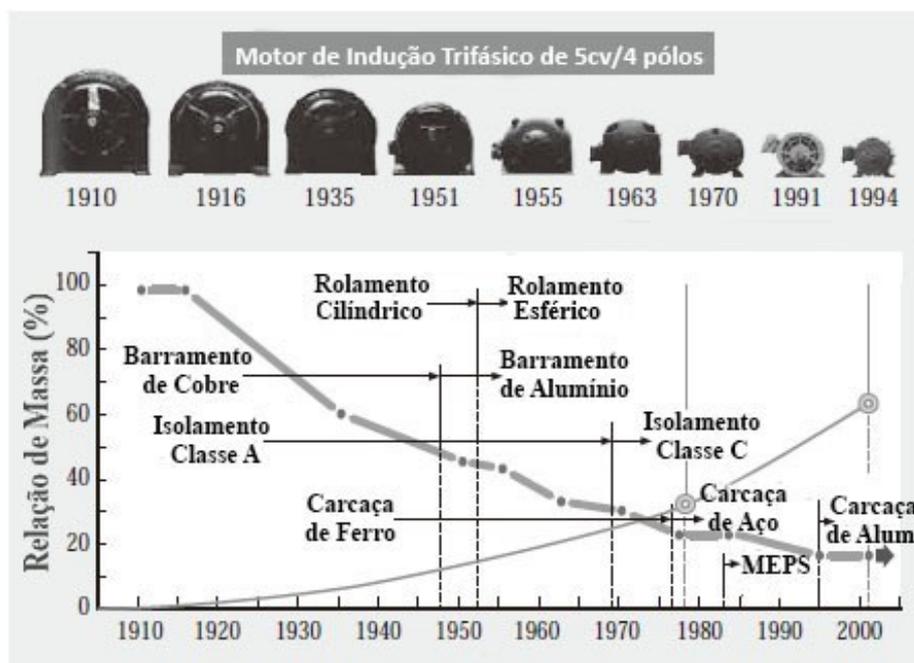
Este capítulo aplica o que foi analisado e proposto nos capítulos anteriores no caso do aumento de eficiência de motores elétricos, mais especificamente no programa MEPS brasileiro de motores de indução trifásicos. Inicia com uma revisão dos avanços tecnológicos associados à eficiência destes motores, detalha o mercado brasileiro e, por fim, aplica o modelo de viabilidade de projetos de eficiência proposto neste trabalho e apresenta as simulações para o aumento da eficiência deste equipamento de uso final.

5.1 Introdução

A invenção da máquina de indução tem seus primeiros passos nos experimentos iniciais de Faraday sobre rotação eletromagnética (1821), passa pela definição da lei da reciprocidade entre campos elétricos e magnéticos (Lenz, 1933), pela montagem do primeiro motor elétrico (Davenport, 1936), pela criação do sistema trifásico de corrente alternada e do motor polifásico (Tesla, 1887), e nasce com a construção do primeiro motor de indução a gaiola de esquilo (Dolivo-Dobrowski, 1891) (KIT (KARISRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY), 2014). Desde então, a tecnologia do motor de indução tem evoluído constantemente e hoje domina o consumo de eletricidade no mundo. A Figura 51 ilustra os principais saltos tecnológicos ocorridos no motor de indução e sua influência na relação massa/potência da máquina. O aparecimento de novas tecnologias, como os rolamentos esféricos, carcaça de aço, o barramento de alumínio, tornam a máquina mais leve e mais eficiente.

As maneiras de se aumentar a eficiência de uma máquina de indução podem ser resumidas em: otimizar a quantidade de material ativo; utilizar materiais e componentes com melhor desempenho; e otimizar o design da máquina (FUCHSLOCH; FINLEY; WALTER, 2008). A primeira atua nas perdas resistivas através da otimização da seção transversal dos condutores e/ou na distribuição dos enrolamentos. A segunda tem efeitos nas perdas resistivas e magnéticas através da utilização de materiais novos (barramentos de cobre no rotor) e de alto desempenho (núcleos magnéticos com laminações de alto desempenho). A terceira atua nas perdas mecânicas e suplementares através do aumento da taxa de transferência de calor entre as partes ativas e o ambiente, da otimização da distância de entreferro e das geometrias do rotor e do estator, da redução dos diâmetros dos ventiladores, e do uso de rolamentos de alta eficiência. Existe uma inter-relação entre todos estes procedimentos que devem ser cuidadosamente analisados pelo fabricante para que a redução de um tipo de perda não provoque o aumento de outra, isso sem citar os aumentos de custo associados a cada uma destas ações. As melhorias recentes desta máquina são detalhadas a seguir.

Figura 51 – Evolução da tecnologia do motor de indução trifásico.



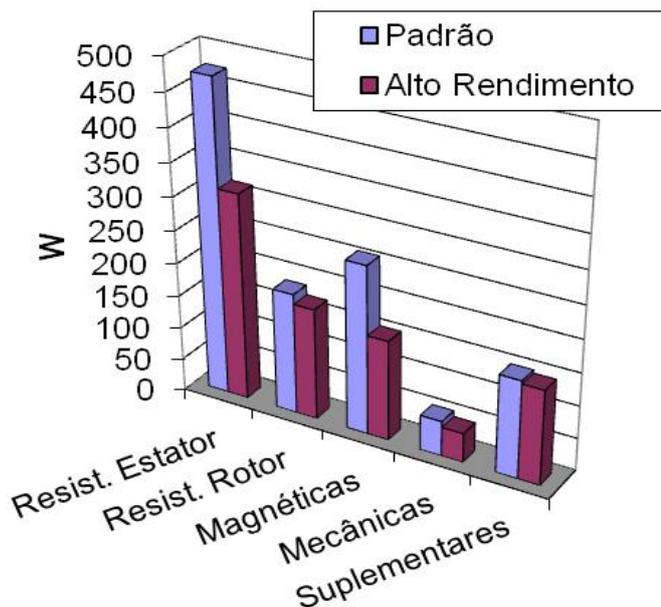
Fonte: (MIKAMI et al., 2011)

5.1.1 Do motor Padrão (IR1) para o Alto Rendimento (IR2)

Este salto de eficiência é alcançado atuando principalmente nas perdas resistivas, aumentando a quantidade de cobre no rotor e superdimensionando as barras e anéis de curto-circuito do rotor, e com alguns ganhos nas perdas magnéticas e mecânicas. A redução destas

perdas também reduz a temperatura da máquina, o que favorece a redução da resistência do material condutor. Algumas outras medidas reduzem as perdas da máquina, tais como: melhoria do design do ventilador, a utilização de chapas magnéticas de baixas perdas, um menor diâmetro no entreferro, e o tratamento térmico do rotor. A Figura 52 mostra como estas medidas afetam as perdas de um motor de 10 cv de 4 polos.

Figura 52 – Perdas em carga nominal de motores de 10 cv/4 polos/60 Hz



Fonte: (ANDRADE, 2009).

5.1.2 Do motor de Alto Rendimento (IR2) para o Premium (IR3)

As perdas magnéticas, resistivas e mecânicas podem ser reduzidas com a utilização de materiais mais eficientes. As chapas de aço silício utilizadas no núcleo do estator e do rotor da máquina de indução possuem perdas magnéticas que variam de 4,0 W/Kg (aço de baixo rendimento) até 1,0 W/Kg (aço de alto rendimento) (AGUIAR, 2005). Esta redução nas perdas magnéticas é obtida a partir de melhorias nos processos de fabricação das chapas, o que aumenta os custos, no entanto, há que se considerar a redução nos preços do aço após a crise de 2008 (queda de 40 %) (PETRO, 2009).

Os barramentos utilizados no rotor do motor de indução são, em sua maioria, de alumínio, isto ocorre principalmente pelo custo reduzido em relação ao cobre (O preço por quilo do alumínio é cerca de 30% do preço do cobre (ROBERTSON, 2017) e porque a tecnologia de moldagem dos barramentos de alumínio no núcleo magnético do rotor é mais fácil que a do cobre (a liquefação do alumínio se dá a 660,5°C, enquanto a do cobre ocorre a 1.085°C). No entanto, os ganhos em redução de perdas resistivas são consideráveis, já que a

resistividade do cobre é cerca de 40% menor que a do alumínio ($\rho_{Cu} = 1,72 \times 10^{-8} \Omega.m$ e $\rho_{Al} = 2,8 \times 10^{-8} \Omega.m$).

A utilização de rolamentos e lubrificantes mais eficientes, além de trazer reduções nas perdas mecânicas, podem reduzir as falhas em motores, já que este item é responsável por cerca de 69% das falhas em motores (BONNETT; YUNG, 2008).

Os formatos dos barramentos do rotor ou das ranhuras do estator podem levar a ganhos de fluxo concatenado e conseqüente redução de perdas. A dimensão do entreferro também pode ser reduzida para minimizar o efeito dos harmônicos gerados pela distorção dos fluxos que ocorrem na região do entreferro. O ventilador pode ter o seu desenho melhorado por redução do diâmetro ou por ajustes nas pás para reduzir as perdas por fricção e ventilação.

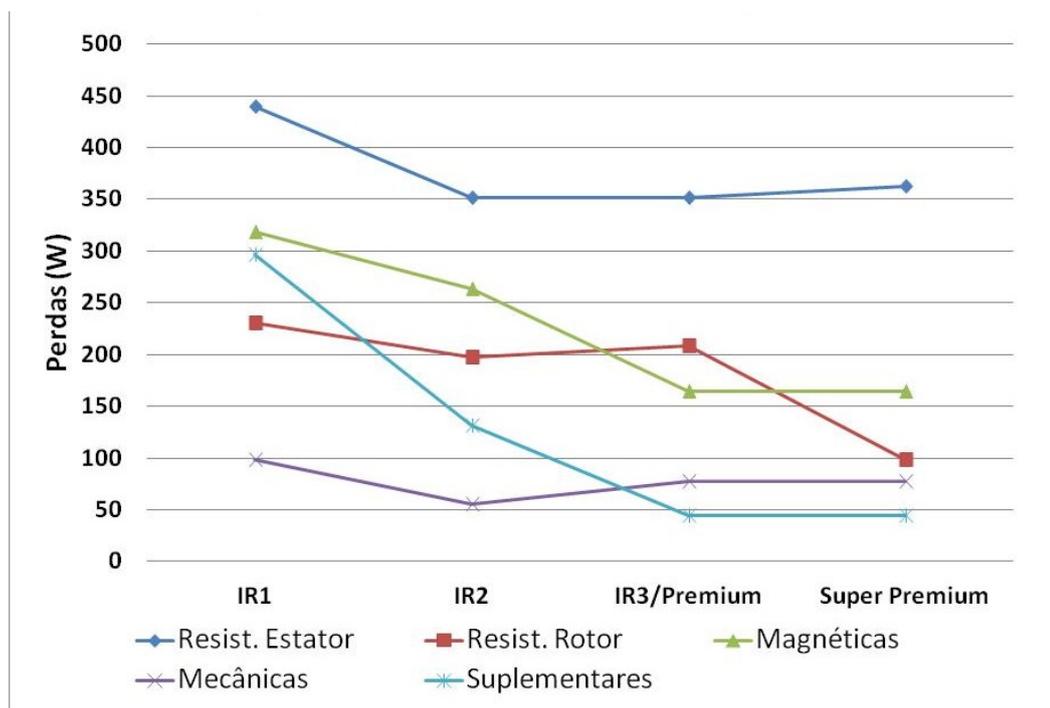
A taxa de transferência de calor pode ser melhorada alterando a carcaça da máquina com a utilização de uma maior quantidade de aletas na superfície do motor ou ainda pela escolha de outros materiais para a carcaça (alumínio, por exemplo). Como a redução das perdas resistivas podem reduzir a temperatura de operação da máquina, soluções que melhoram a taxa de transferência de calor da máquina podem implicar em reduções do diâmetro do ventilador, comprovando ao já citado inter-relacionamento entre as perdas da máquina. A Figura 53 mostra a evolução das perdas de um motor de média potência (15 cv) do nível MEPS IR1 até o SuperPremium; verifica-se que a redução de perdas do nível IR2 para o Premium se concentram nas perdas magnéticas e suplementares, estas reduções, entretanto, podem variar de acordo com a faixa de potência.

5.1.3 Acima do motor Premium (IR3)

Aqui reside desafio atual; os fabricantes, se utilizando das técnicas descritas nos itens anteriores, já colocam no mercado motores de indução com índices de eficiência superiores aos estipulados para os motores Premium, no entanto, existem dúvidas na capacidade do motor de indução alcançar os índices superiores para todas as faixas de potência (DE ALMEIDA; FERREIRA; FONG, 2011). A solução já colocada no mercado é o Motor Síncrono com Imãs Permanentes (MSIM), que difere do Motor de Indução por gerar um fluxo magnético no rotor a partir de imãs permanentes a base de Ferrite (menor custo) ou Terras Raras (MOREAU, 2009; UPADHYAY, PARAG; FRANK, 2015). Esta modificação elimina as perdas resistivas no rotor, porém tem a limitação de baixo torque de partida. Para superar esta limitação, faz-se necessário a inclusão de uma gaiola auxiliar no rotor (provocando perdas resistivas) ou, o que é mais frequente, o controle eletrônico da partida.

Durante os experimentos realizados com a bancada de testes de motores implementada como complemento a este trabalho (Item 2.4.1), foram realizadas medições com um motor MSIM com partida direta de 10cv (Vide resultados no Apêndice A.4), os resultados, porém, mostraram que o mesmo alcança a eficiência do motor Premium.

Figura 53 – Perdas em carga nominal de motores de 15 cv/4 polos/60 Hz para diferentes níveis MEPS



Fonte: elaborado pelo autor com base em (MALINOWSKI; MCCORMICK; DUNN, 2004)

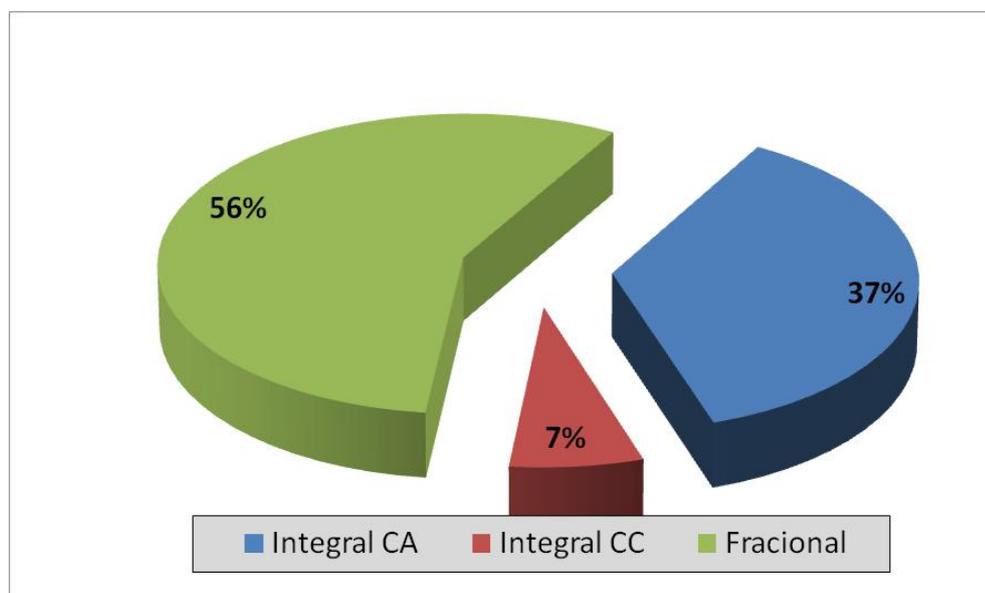
Existem projetos experimentais, que também se propõem a atingir estes índices de eficiência, como o motor a imã permanente com rotor cônico, que utiliza um tipo de material magnético de baixo custo (ferrite) (PETRO, 2015) ou com motores de indução com diferentes formatos de rotor e estator (Multirotor ou Multiestator com fluxo radial e com fluxo axial, Motores Híbridos, e outros (TONG, 2014) (VAIRAMOHAN, BASKAR; SAMOTYJ, 2015), mas a sua produção industrial ainda não foi alcançada.

5.2 Mercado de Motores Elétricos no Brasil

Em 2015, mais de 30 milhões de motores elétricos foram vendidos pela indústria brasileira (IBGE, 2015). A maioria deles de potência fracional (abaixo de 1cv), como pode ser visto na Figura 54, mas os motores integrais (a partir de 1cv) representam 44% (14 milhões) do total. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE),

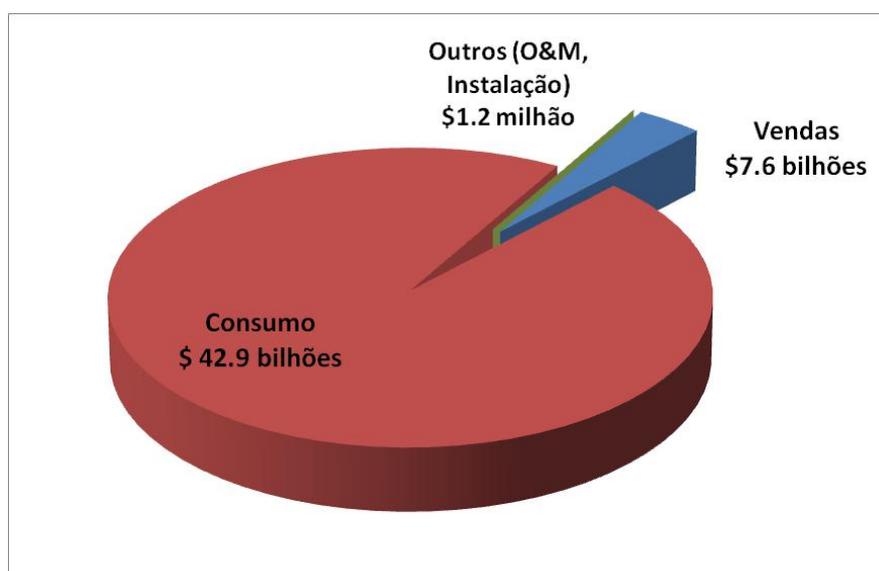
o Brasil é um exportador de motores e geradores elétricos (ABINEE, 2014), com cerca de US\$ 750 milhões de vendas para o exterior em 2014. Esses números, juntamente com a informação do consumo total de eletricidade do país por setor (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2016), revelam um mercado de motores elétricos de cerca de US\$ 50 bilhões (Figura 55), a maior parte associada ao consumo de energia (96%), o que revela o potencial para eficiência energética.

Figura 54 – Distribuição da produção brasileira de motores elétricos por tipo de motor.



Fonte: (IBGE, 2015)

Figura 55 - Mercado brasileiro de motores elétricos

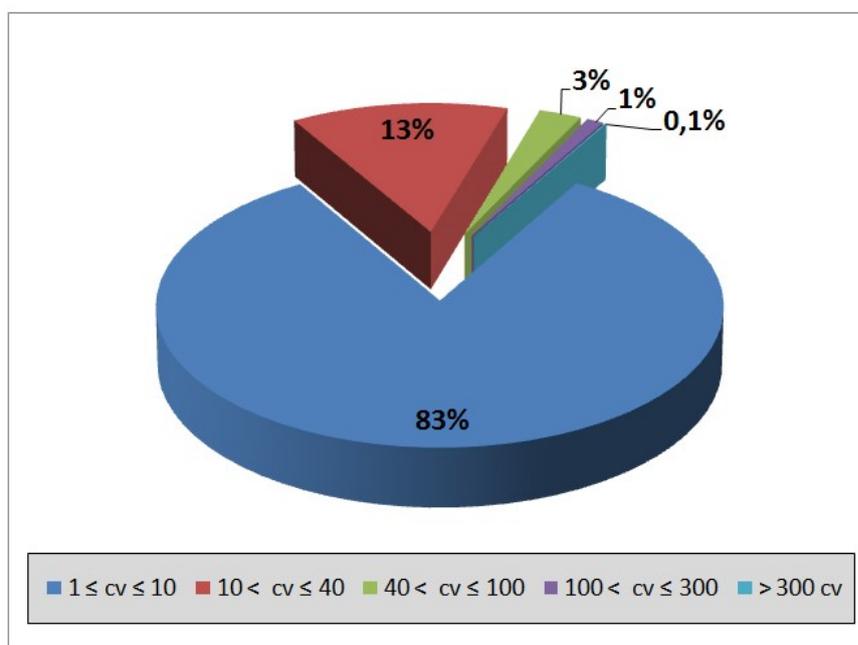


, Fonte: elaborado pelo autor com base em (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2016; IBGE, 2015)

Segundo Schaeffer (SCHAEFFER et al., 2005), a população de motores integrais em uso no era de 13,3 milhões em 2005. Este relatório baseava-se em uma amostra de campo de 2119 motores pertencentes a 18 plantas industriais e ainda nas informações de venda e produção de motores disponíveis. Em 2006, o PROCEL realizou uma grande avaliação de mercado sobre o uso e posse de equipamentos para os setores residencial, comercial e industrial (ELETROBRAS, 2007). Em relação ao setor industrial, a avaliação baseou-se na amostra de 6820 motores em operando 209 plantas industriais.

Anualmente, o IBGE (IBGE, 2015) publica uma pesquisa com dados da produção e vendas da indústria nacional, onde classifica os dados dos motores elétricos por tipo de tensão (CA, CC) e pela faixa de potência geral (Fracional, Integral). A ABINEE descontinuou sua estimativa de venda anual de motores integrais no país, os dados da última coleta (2012) indicavam a distribuição de vendas por faixa de potência apresentada na Figura 56. Esta informação, no entanto, é apresentada apenas por faixa de potência, sem a especificação do tipo de tensão do motor ou o número de fases. Os dados de vendas anuais de motores elétricos dos EUA (NADEL et al., 2002) apresentam uma porcentagem similar para motores integrais de baixa potência (88% do total para potências abaixo de 5cv) e incluem motores integrais CC e CA monofásicos.

Figura 56 – Distribuição das vendas anuais de motores elétricos integrais por faixa de potência



Fonte: elaborado pelo autor com base em (Cardoso, 2012)

O Ministério das Minas e Energia – MME publica anualmente um relatório denominado Balanço Energético Nacional (BEN) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2016), que apresenta a contabilidade relativa à produção e ao consumo de energia. O BEN apresenta o consumo final de energia classificado por fontes primárias e secundárias para cada setor da economia. Com base nesses dados, a Tabela 5.1 atualiza o Consumo de Eletricidade de Motores por Setor de Atividade apresentado originalmente por (GARCIA et al., 2007).

Tabela 5.1 – Análise do consumo de motores elétricos por Setor no Brasil

Setor (2014)	Motores ⁽¹⁾		Motores Trifásicos ⁽²⁾	
	(%)	(GWh)	(%)	(GWh)
Energia	88	26.108	90	23.497
Residencial	40	49.967	20	9.993
Comercial	40	33.761	50	16.881
Público	28	11.510	50	5.755
Agricultura	42	10.136	50	5.068
Transportes	60	1.130	50	565
Cimento	71	5.793	90	5.214
Aço e Ferro Fundido	30	5.902	90	5.312
Ferro-alloys	30	2.183	90	1.965
Mineração	90	10.660	90	9.594
Não-Ferroso	30	10.834	90	9.751
Químico	71	16.203	90	14.583
Alimentício	71	19.457	90	17.511
Têxtil	71	5.243	90	4.719
Papel	71	13.914	90	12.523
Cerâmico	71	3.140	90	2.826
Outras Industrias	47	21.347	90	19.213
Total		247.290		164.969
% Consumo de eletricidade		47,89%		31,94%

⁽¹⁾ Consumo de Motores elétricos por Setor, baseado no percentual de uso energético em motores. (ELETROBRAS, 2007; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2016; UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2002)

⁽²⁾ Participação no consumo por setor de motores elétricos trifásicos no Brasil. (ELETROBRAS, 2007; NADEL et al., 2002)

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 5.2 – Característica de uso energético médio de motores elétricos no Brasil

Tipo de Motor	Vida Útil (anos)	Potência Média cv	Carreg. (%)	Horas de Operação (h/ano)	Eficiência Média (%)
Indução Trifásico					
1 ≤ cv ≤ 10	15	2,7	62	4.594	80
10 < cv ≤ 40	20	20,7	64	5.228	88
40 < cv ≤ 100	25	52,5	73	6.175	91
100 < cv ≤ 300	25	119,7	74	5.805	92

Fonte: elaborado pelo autor com base em (ELETROBRAS, 2007; SCHAEFFER et al., 2005)

Tabela 5.3 – População estimada e uso energético de motores elétricos no Brasil em 2013.

Tipo de Motor	População Estimada (milhões)	Uso Energético (GWh)/% do Consumo Total de Eletricidade
Motores Integrais	16,5	247.290 (47,9%) ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Inclui o consumo de motores Fracionais.

Fonte: elaborado pelo autor

A fonte de dados mais abrangente e recente encontrada para caracterizar o consumo anual de eletricidade de um motor elétrico médio por faixa de potência, apresentada na Tabela 5.2, foram os dados de campo de (GARCIA et al., 2007) e de (ELETROBRAS, 2007). Em comparação com os dados utilizados no modelo dos EUA para estimar a população de motores (NADEL et al., 2002), esses dados parecem otimistas, especialmente para motores pequenos (2.745 h/ano para motores de indução de 1 a 5 cv no modelo dos EUA), mas são dados coletados em campo.

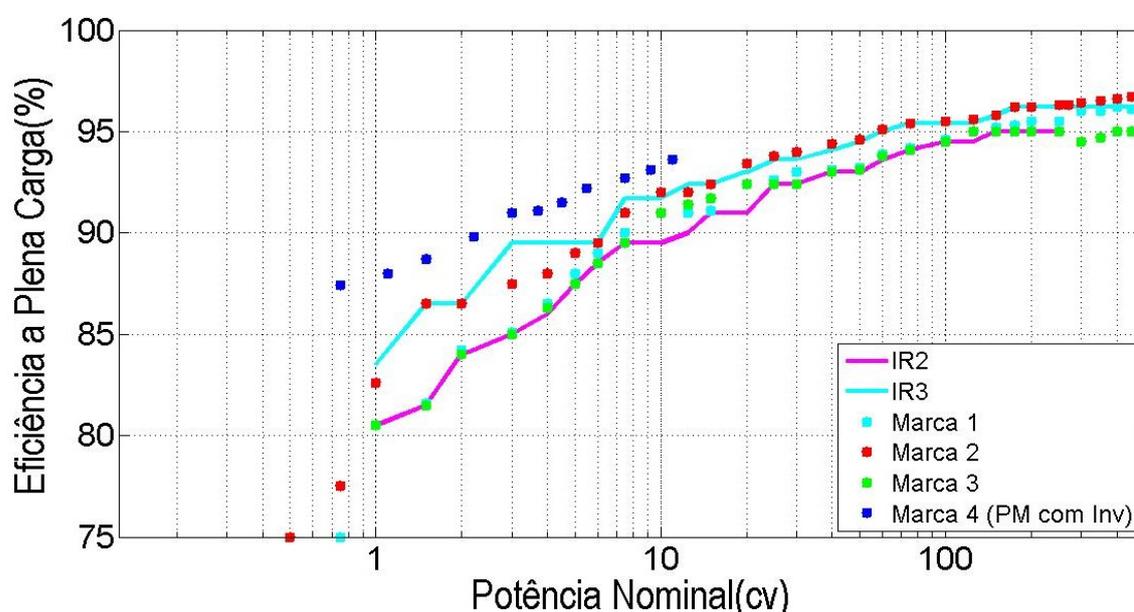
Esses dados fornecem uma boa base para o trabalho analítico sobre o uso de energia do sistema motriz. A população estimada dos motores elétricos é o principal resultado e pode ser usado para planejar políticas de eficiência energética e verificar os resultados esperados. A Tabela 5.3 apresenta a população estimada de motores integrais no Brasil, assim como o seu uso energético. Os motores fracionários não foram incluídos nesses resultados porque as informações sobre o uso desses equipamentos não estão disponíveis, porém, usando a mesma proporção da população de motor dos EUA, pode-se assumir um número extra de 750 milhões de motores fracionários no Brasil.

5.2.1 Níveis de Eficiência no Mercado

A Figura 57 mostra os níveis de eficiência para carga nominal de motores elétricos (trifásicos de indução/IM e trifásicos de imã-permanente/PM) que estão atualmente

disponíveis no mercado brasileiro. Os dados foram retirados de catálogos de fabricantes e são exibidos como pontos na trama. Também são exibidos os níveis de eficiência (IR2 e IR3 Premium (ABNT, 2013)). Um olhar sobre os níveis de eficiência exibidos indica que o nível IR3 Premium já foi alcançado em alguns casos e até excedido em alguns outros, tanto para motores de indução como para motores PM. Existem motores de indução no mercado hoje que são pelo menos uma banda acima da eficiência IR3 premium e essas informações confirmam as expectativas dos formuladores de políticas brasileiras de alcançar o nível IR3 Premium obrigatório em breve (SOARES et al., 2013).

Figure 57 – Eficiência a carga nominal para motores de indução trifásicos e PM/4 polos/60Hz (Mercado Brasileiro)



Fonte: elaborada pelo autor baseada em (WEG, 2016) e (ABNT, 2013)

5.3 Parâmetros de Referência

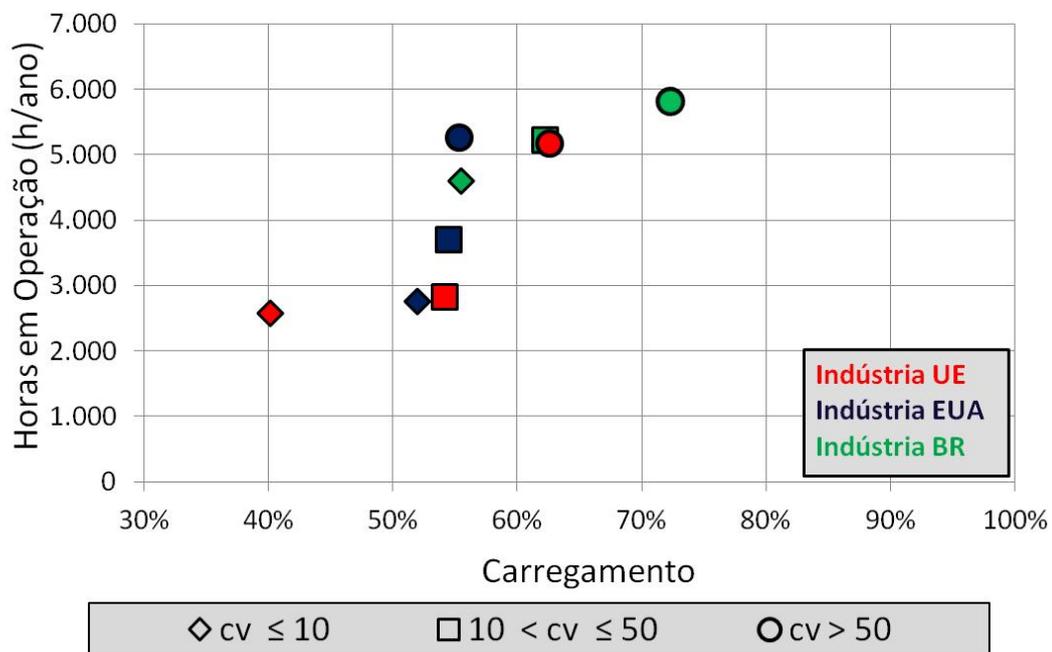
Para simular os cenários de viabilidade econômica de projetos de melhoria da eficiência de motores elétricos, faz-se necessário definir os parâmetros de entrada das simulações e alguns parâmetros de referência que darão subsídios à análise. No Item anterior, o mercado nacional de motores elétricos foi estimado, assim como foram apresentados os dados disponibilizados pelos fabricantes com os respectivos índices de eficiência.

5.3.1 Características de operação

As características de operação da máquina (horas anuais de operação(h) e carregamento(%)) são as referências básicas para a verificação da viabilidade de um projeto.

A Figura 58 mostra as características médias de operação (carregamento e horas anuais de operação) de motores elétricos do setor industrial da União Europeia (UE), dos Estados Unidos (EUA) e do Brasil (BR) para diferentes faixas de potência nominal. Pode-se ver que os motores da indústria brasileira estão sendo operados em um nível mais alto de carga e horas de operação do que as outras regiões mostradas. Os dados brasileiros baseiam-se em uma pesquisa de 8.119 motores de 209 plantas, enquanto a pesquisa europeia se baseia em levantamentos de centenas de milhares de motores realizados em instalações de todo o continente (DE ALMEIDA et al., 2008). Os dados dos EUA vieram de (LYAMA; BLUM, 2011) e o tamanho da amostra não foi divulgado.

Figura 58 – Valores médios de operação para motores de indução.



Fonte: elaborado pelo autor com base em (DE ALMEIDA et al., 2008; LYAMA; BLUM, 2011; SCHAEFFER et al., 2005)

5.3.2 Distribuição da população de motores

As simulações realizadas analisam os projetos de aumento de eficiência por faixa de potência e por número de polos, com o objetivo de analisar o máximo de opções possíveis de equipamentos disponíveis no mercado. As Tabelas 5.4 e 5.5 mostram a distribuição da população de motores elétricos por faixa de potência e por número de polos. O motor de 4 polos é dominante em todas as regiões analisadas (não há dados do Brasil, mas espera-se a mesma distribuição), assim como são dominantes os motores de baixa potência (abaixo de 10 cv).

Para a avaliação dos projetos de aumento da eficiência de motores, foram escolhidos os motores com potência de 1,5 cv, 15 cv, 50 cv e 150 cv, como representativos de cada uma das faixas de potência de motores listadas.

Tabela 5.4 – Distribuição do estoque de motores elétricos por faixa de potência.

Região	$1 \leq cv \leq 10$	$10 < cv \leq 40$	$40 < cv \leq 100$	$100 < cv \leq 300$
Brasil	42% - 54%	30% - 36%	6% - 22%	4% - 6%
União Europeia	79,1%	16,5%	3,3%	1,1%
EUA	71,1% ⁹	39,8% ¹⁰	3,7% ¹¹	3,1%

⁹Refere-se a $1 \leq cv \leq 5$

¹⁰Refere-se a $5 < cv \leq 50$

¹¹Refere-se a $50 < cv \leq 100$

Fonte: elaborado pelo autor com base em (ABINEE, 2014; FERREIRA, 2008; NADEL et al., 2002; SCHAEFFER et al., 2005)

Tabela 5.5 – Distribuição do estoque de motores elétricos por número de polos.

Região	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
Brasil	N/A	N/A	N/A	N/A
União Europeia	15% - 35%	50% - 70%	7% - 15%	1% - 7%
EUA	7% - 8%	60% - 70%	12% - 16%	2% - 3%

Fonte: elaborado pelo autor com base em (NADEL et al., 2002), (FERREIRA, 2008)

5.3.3 Parâmetros técnicos e econômicos

Para implementar a análise de viabilidade econômica, os seguintes parâmetros de entrada escolhidos refletem a situação econômica no Brasil em janeiro de 2017.

➤ Taxa de desconto (d) = 6%, com base na taxa de juros praticada pelo Banco Central do Brasil, excluindo a inflação (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2017);

➤ Taxa de escalação do preço da eletricidade (e) = 3,24%, com base no aumento médio do preço da eletricidade industrial nos últimos 20 anos acima da inflação (Tabela 3.3) (ANEEL, 2015a);

➤ Custo de eletricidade (C) = 0,1097 US\$/kWh, que é a tarifa média brasileira de energia elétrica para a indústria brasileira, conforme (ANEEL, 2015a). Nas simulações, será utilizada uma variação de $\pm 18,05\%$ (Tabela 3.2);

➤ O ciclo de vida do motor (n) é de 10 anos (para motores 1-1.5cv), 12 anos (para motores 2-15cv), 15 anos (para motores de 20 a 150cv) e 20 anos (para motores acima de 150hp) (DE ALMEIDA et al., 2008). Em algumas simulações, será utilizada a variação de + 31,92% (Tabela 3.9);

➤ Preços médios dos motores no mercado brasileiro compilados a partir de pesquisas de mercado em março de 2016 (para transição IR2 para IR3) e em janeiro de 2009 (para IR1 a IR2). Listados no Apêndice D.2;

➤ Preços de Rebobinamento de motores baseados em pesquisa de mercado realizada em abril de 2017. Listados no Apêndice D.1;

➤ Os dados técnicos para os motores em análise (potência, eficiência) são do catálogo de dados do fabricante. Listados no Apêndice D.2;

➤ A conversão monetária é de U\$ 1,00 = R\$ 3,50. Para a transição dos níveis IR1 para IR2 MEPS, que ocorreu em 2012, foi usado conversão de U\$ 1,00 = R\$ 2,00.

5.4 Simulações

As seguintes simulações foram implementadas utilizando a metodologia de análise de viabilidade proposta para o caso de aumento de eficiência de motores de indução trifásicos:

- Incremento dos índices MEPS IR2 para IR3/Premium no Brasil (que está sob análise (SOARES et al., 2013)), incluindo cálculo do Custo da Energia Economizada e a redução de consumo prevista para o país com a medida até 2030;
- Substituição de motores em operação, incluindo o efeito de programas de incentivo à substituição;
- Perspectivas para o Motor Superpremium, com a simulação de preços ideais para este modelo que mantenham a viabilidade da aquisição;
- Efeitos dos Custos Ambientais(C_{Env}) sobre a viabilidade do aumento da eficiência de motores, considerando os custos previstos para a Política de Carbono dos EUA(111TH CONGRESS, 2009) (Tabela 3.6).

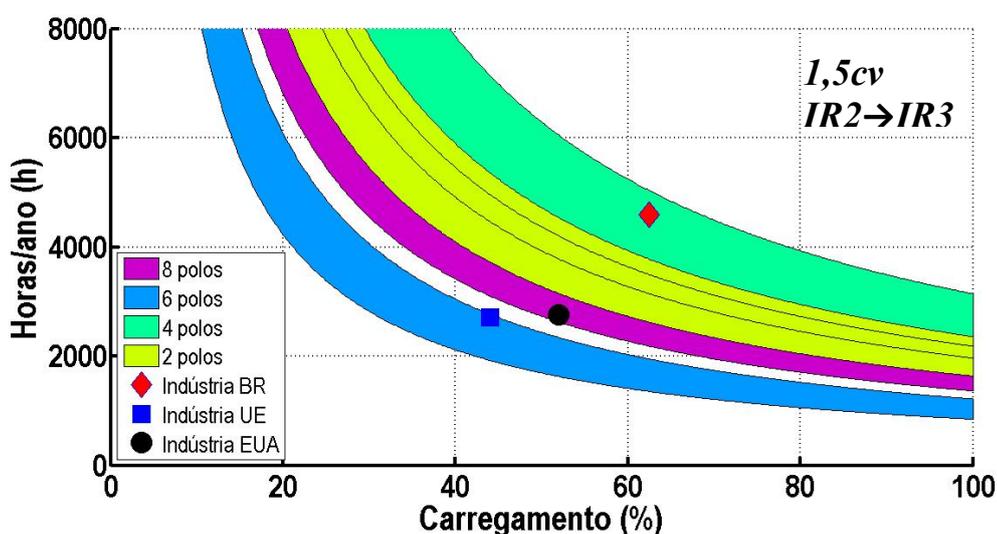
5.4.1 Incremento dos níveis MEPS no Brasil (IR2 para IR3)

A análise de viabilidade econômica para a elevação dos níveis MEPS de motores de indução no Brasil é feita simulando a transição para o MEPS obrigatório do nível IR2 para o nível IR3 Premium que está sob análise pelo CGIEE e deve ocorrer em breve (SOARES et al., 2013). O custo de MWh economizado é determinado para ambas as transições (IR1 a IR2 e IR2 a IR3) e os resultados são comparados com os demais custos de geração de eletricidade.

Uma simulação para economia a ser gerada com a transição dos níveis MEPS de IR2 para IR3 até ano de 2030 também é apresentada usando os dados apresentados no Item 5.3.2.

As Figuras 59 a 62 mostram uma análise da viabilidade da melhoria da eficiência dos motores de indução (IM) dos níveis de IR2 para IR3 no Brasil para motores de pequenas (1,5 cv, Figura 59), médias (15 cv e 50 cv, Figuras 60 e 61, respectivamente) e grandes potências (150 cv, Figura 62). Cada Figura mostra os limites de viabilidade para motores com 2, 4, 6 e 8 polos. As características médias de operação dos motores de indução na indústria (Figura 5.11) são usadas como referência para a análise da viabilidade desta transição. O limite de viabilidade é representado por uma área que representa a incerteza da tarifa de eletricidade industrial no Brasil ($\pm 18,05\%$ de variação regional (Tabela 3.2)). O lado superior do limite representa a tarifa mais baixa, enquanto o lado inferior representa a tarifa mais elevada.

Figura 59 - Limites de viabilidade para o aumento da eficiência de um motor de indução trifásico de baixa tensão/1,5cv/60 Hz do nível IR2 para IR3. Inclui pontos de operação médios para a Indústria dos EUA, UE e Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.1.1 Motores de pequena potência

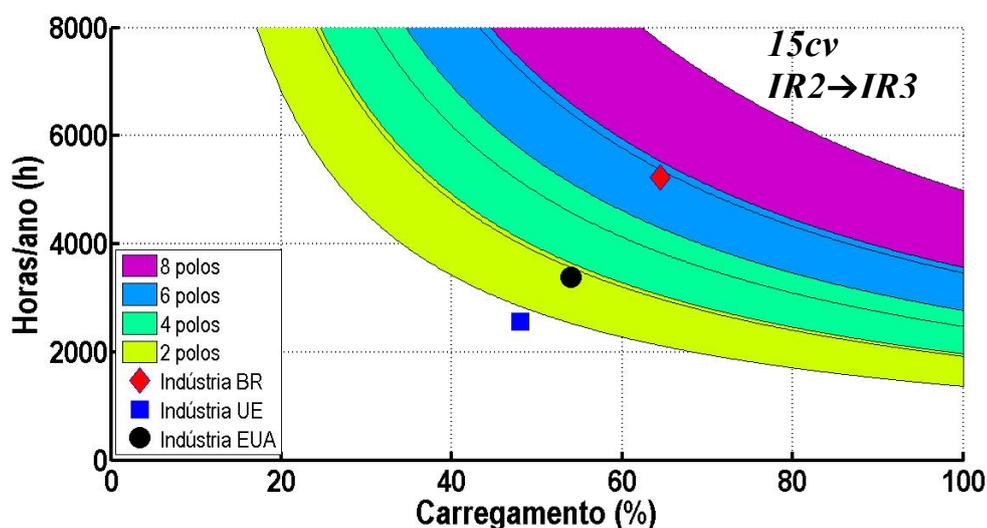
Para uma potência nominal pequena (Figura 59), é claro que o ponto de operação médio da indústria brasileira está acima dos limites de viabilidade, com exceção do motor de 4 polos, cuja viabilidade depende da tarifa de eletricidade (as tarifas mais baixas tornam a opção para motores IR3 inviável economicamente). Este é um problema porque o motor de 4 polos representa a maior parcela da população de motores (50% -70% (Tabela 5.5)). Os pontos de operação médios para a indústria da UE e dos EUA ficariam abaixo dos limites

econômicos, exceto para os motores de 6 polos. Esta última conclusão é apenas para fins de comparação, já que estamos usando parâmetros do Brasil.

5.4.1.2 Motores de média potência

Para a potência nominal média, as curvas das Figuras 60 e 61 mostram uma tendência diferente, não há viabilidade para os motores de 8 polos e os motores de 6 polos depende do valor da tarifa para sua viabilidade para a indústria brasileira. Já os motores de 2 e 4 polos estão com os limites de viabilidade bem abaixo do ponto médio de operação da indústria brasileira, tornando a transição de MEPS (IR2 para IR3) vantajosa para o consumidor. Os pontos de operação médios dos EUA e da indústria da UE ainda estão fora da área de viabilidade para esta simulação, mas revelaram uma melhora com o aumento da faixa de potência.

Figura 60 - Limites de viabilidade para o aumento da eficiência de um motor de indução trifásico de baixa tensão/15cv/60 Hz do nível IR2 para IR3. Inclui pontos de operação médios para a Indústria dos EUA, UE e Brasil.



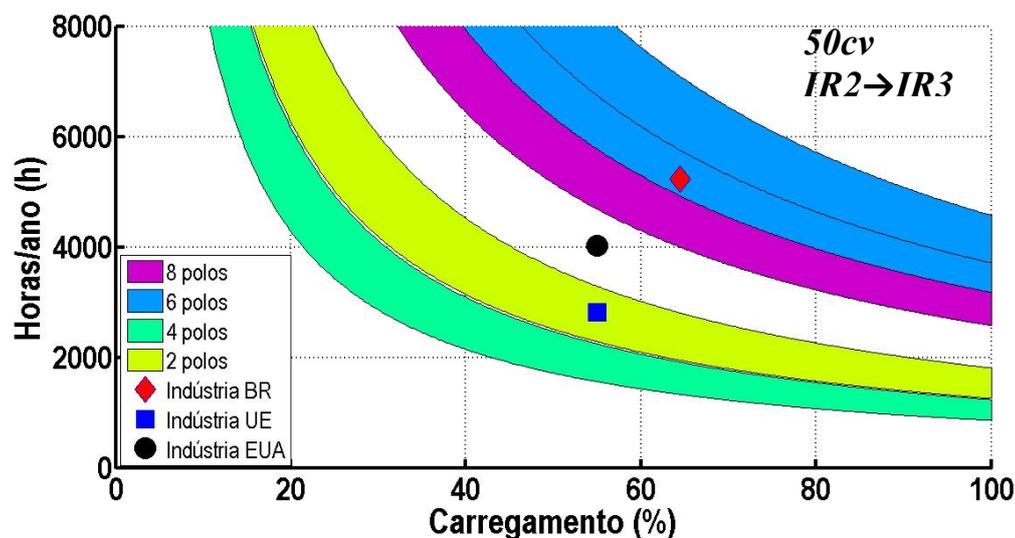
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.1.3 Motores de grande potência

A simulação do motor de 150 cv (Figura 62) mostra números ainda melhores, com os pontos de operação médios da indústria brasileira acima do limite de viabilidade, com exceção de um resiliente motor de 8 polos, cujos limites econômicos englobam o ponto de operação da indústria brasileira na área intermediária (viável para as Tarifas de eletricidade mais baixas). A indústria dos EUA tem um ponto médio de operação semelhante à brasileira para esta faixa de potência e a indústria da UE opera em uma percentagem de carga mais

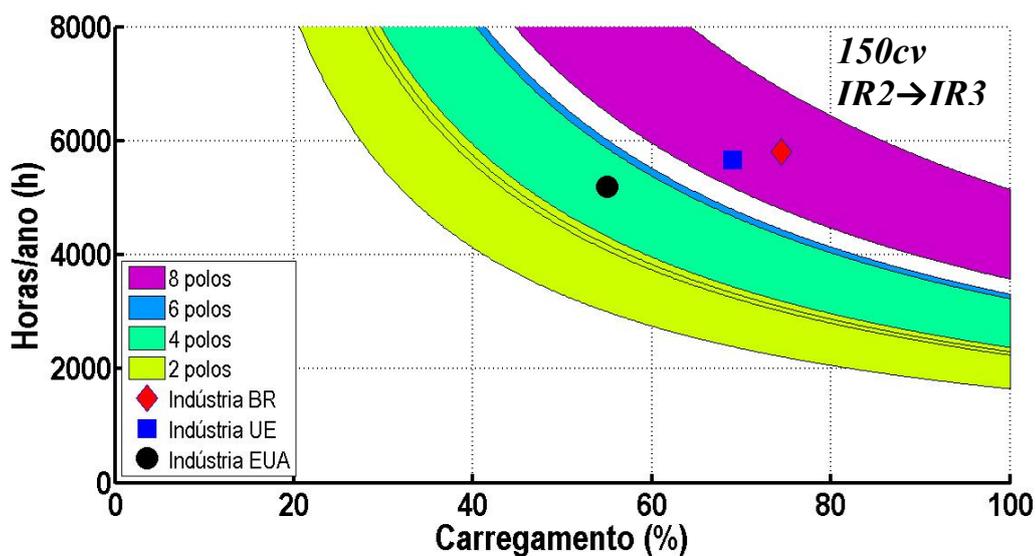
baixa, o que tornaria a transição viável para motores de 2 polos e relativamente viável para 6 polos e 4 polos.

Figura 61 - Limites de viabilidade para o aumento da eficiência de um motor de indução trifásico de baixa tensão/50cv/60 Hz do nível IR2 para IR3. Inclui pontos de operação médios para a Indústria dos EUA, UE e Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62 - Limites de viabilidade para o aumento da eficiência de um motor de indução trifásico de baixa tensão/150cv/60 Hz do nível IR2 para IR3. Inclui pontos de operação médios para a Indústria dos EUA, UE e Brasil.

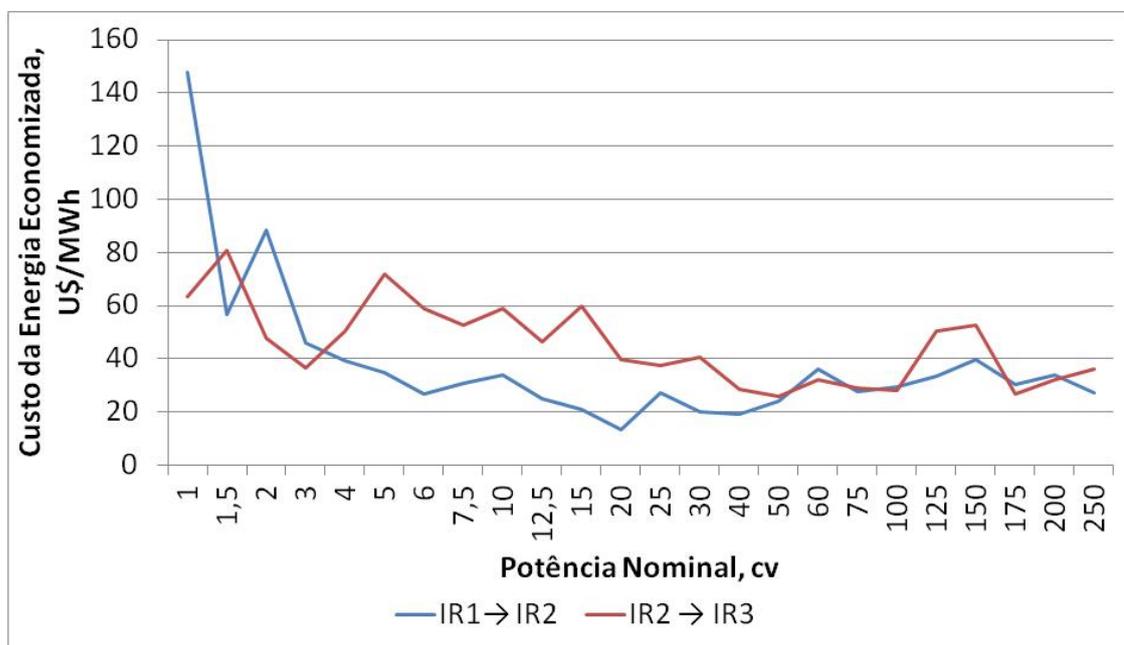


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.1.4 Custos da Energia Economizada

As Figuras 63 e 64 mostram o Custo de Energia Economizada (U\$/MWh) para as transições: do nível MEPS IR1 para IR2, ocorrida em 2012, e do IR2 para o IR3. A Tabela 5.6 complementa essa comparação, mostrando o aumento médio nos níveis de eficiência e do custo de aquisição dos motores para ambas as transições. A Figura 64 ainda compara este custo com outras formas de investimento em energia, mais especificamente o custo da energia para diversas formas de geração de energia elétrica.

Figura 63 – Comparação do Custo da Energia Economizada para a transição dos níveis IR1 para IR2 com a transição dos níveis IR2 para IR3 no Brasil.



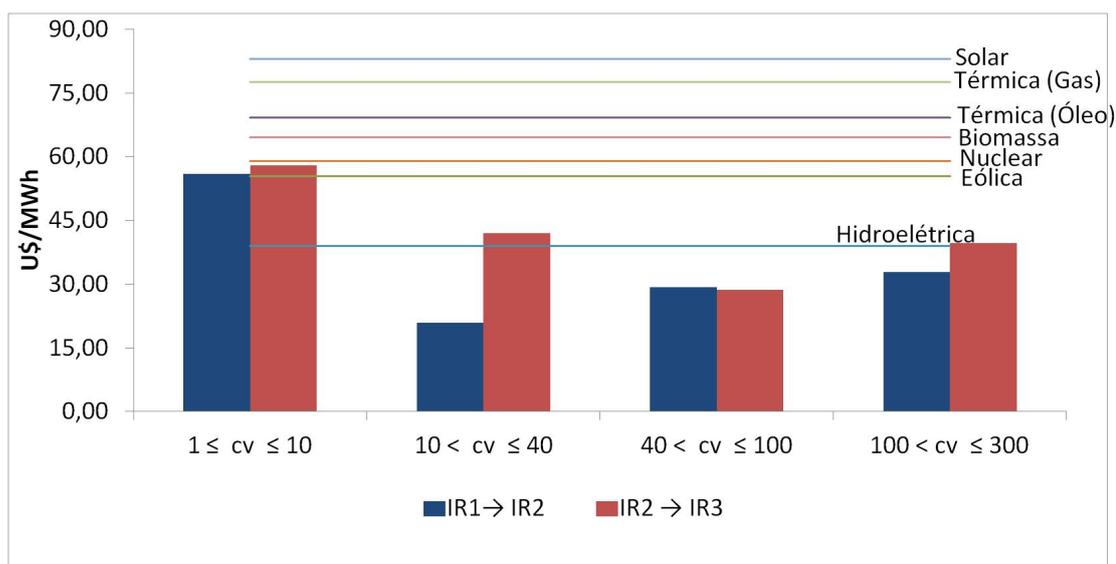
Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira constatação é que a transição IR2 para IR3 apresenta custos de energia economizada superiores à da transição IR1 para IR2. Esse comportamento é esclarecido pela informação na Tabela 5.6: o aumento médio de eficiência para a transição IR2 para IR3 é menor do que o anterior, assim como é o aumento médio de preço, mas em menor proporção, o que aumenta os custos de energia economizados.

O aumento do custo de energia economizado para a transição dos níveis MEPS IR2 para IR3, quando comparado com o IR1 para IR2, traz uma dificuldade extra para a viabilidade econômica, mas ainda é um indicador positivo para o programa MEPS dos motores elétricos, uma vez que os números são competitivos com os custos de geração de eletricidade no Brasil, como mostra a Figura 64. Somente os motores de pequena potência tem um custo de energia economizado superior a alguns custos de geração de eletricidade; os

motores de potência média (acima de 40 cv e abaixo de 100 cv) tem um custo ainda menor do que o custo de geração hidroelétrica.

Figura 64 – Comparação do Custo da Energia Economizada para a transição de níveis MEPS de motores elétricos (IR1 para IR2 e IR2 para IR3) com custos de geração de eletricidade de diversas fontes primárias.



Fonte: Elaborado pelo autor usando dados de (DGSE/MME, 2016)

Tabela 5.6 - Comparação dos aumentos de eficiência e do preço dos motores de indução para a transição MEPS de IR1 para IR2 e de IR2 para IR3.

Faixa de Potência	Aumento Médio da Eficiência		Aumento Médio do Preço	
	IR1 → IR2	IR2 → IR3	IR1 → IR2	IR2 → IR3
1 ≤ cv ≤ 10	2,3%	1,8%	37,5%	24,4%
10 < cv ≤ 40	2,4%	1,0%	35,8%	23,8%
40 < cv ≤ 100	1,2%	1,0%	38,1%	23,8%
100 < cv ≤ 300	1,1%	0,7%	47,2%	25,4%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Deve ser observado que o Brasil tem uma grande dependência da geração de hidroelétricas (Hidroelétrica (64%); Térmica(Gás) (12,9%); Biomassa (8,0%); Térmica (Óleo) (4,8%); Eólica (3,5%); Nuclear (2,4%); Solar (0,01%) (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL), 2016) e durante períodos de longas estações secas, o custo da geração térmica dita o custo de geração, elevando o custo médio de geração de eletricidade e tornando o investimento em programas de eficiência ainda mais atraentes.

5.4.1.5 Economia Prevista para Plano Nacional de Eficiência Energética-PNEf

O impacto global da melhoria da eficiência do motor de indução dos níveis IR2 para IR3 MEPS é de cerca de 164 GWh/ano, e, se adotado a partir de 2019 levará a uma economia de cerca de 3.400 GWh/ano até 2030. Esses resultados são provenientes da estimativa de estoque mostrado na Tabela 5.3, supondo que os motores de indução correspondam a cerca de 40% do número total de motores integrais no país e que todas as vendas de motores de indução a partir de 2019 estarão sob níveis de IR3. Usando o consumo total de eletricidade previsto para 2030 pelo PNEF (Plano Nacional de Energia 2030) (MME, 2011) para a Indústria Brasileira (410 TWh sob o cenário B2), a melhoria na eficiência do motor de indução contribuirá para a redução de 0,84 % desse total. A Tabela 5.7 mostra os números relativos à economia de eletricidade esperada em 2030 e o programa MEPS elétrico seria responsável por 6,9% da economia total de energia prevista pelo PNEf.

Tabela 5.7 – Economia total de eletricidade para a transição de níveis MEPS de motores elétricos de IR2 para IR3 no Brasil

	Economia em 2019	Economia em 2030	% da Economia no Total
Transição de IR2 para IR3	164 GWh	3.446 GWh	6,9%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2 Viabilidade para Substituição de Motores em Operação

Ao optar pela substituição de um motor em operação, é importante se determinar qual o momento mais apropriado para esta troca. A Figura 65 representa o período de estudo de um caso de substituição de um motor em operação. O Motor é substituído no instante t_s , e este será o ponto do início do Período de Estudo da avaliação da viabilidade econômica da substituição.

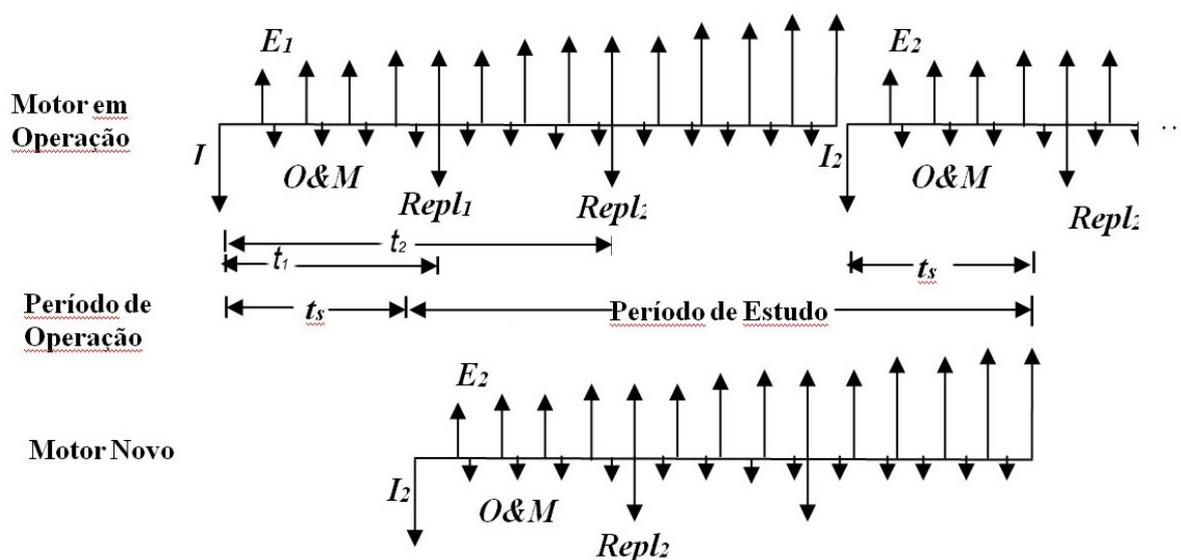
Algumas considerações devem ser feitas sobre esta simulação:

- O período de estudo compreende a vida útil do novo motor adquirido;
- A substituição será por um motor similar ao antigo, porém com uma eficiência maior;
- Estima-se que os motores sejam reparados (rebobinados) a cada 5 anos (t_1 e t_2), com base nos valores de MTBF para motores de indução (Tabela 3.4), contados a partir no início de operação de cada motor. Exemplificando, para um motor de

150 cv, que tem uma vida útil média de 20 anos, $t_1 = 5$ anos, e $t_2 = 10$ anos, e assim por diante;

- O custo do reparo foi estimado de acordo com base em dados de mercado (Apêndice C.1);
- Não será considerado na análise um eventual fluxo de caixa com a venda do motor substituído. Esta simulação será feita no tópico seguinte quando será avaliado o efeito dos incentivos a trocas por motores mais eficientes;
- Os custos de operação e manutenção (O&M) são considerados idênticos e, desta forma, não serão incluídos na análise de viabilidade;
- Neste e nos próximos itens, a incerteza admitida na análise será a Vida Útil do motor (+31,92%, Tabela 3.9) porque considera-se que a tarifa de eletricidade é determinada com precisão, já que se trata de substituição de um motor em operação em uma planta industrial ou instalação comercial. Recordando que o aumento da vida útil do motor tem o mesmo efeito na viabilidade que o aumento da tarifa, puxando o limite para baixo, aumentando a área de viabilidade.
- As simulações foram realizadas considerando a substituição de um motor IR1 por IR2 e IR3 e do motor IR2 por IR3, incrementando o tempo de serviço (t_s) do motor a ser substituído de 2 a 16 anos, a depender da vida útil do mesmo.
-

Figura 65 - Diagrama do Período de Estudo de um projeto de substituição de um motor em operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

➤ Nas simulações, para fins de análise, foram incluídos os tempos médios de operação dos motores nas Indústrias da União Europeia (EU), Estados Unidos (EUA) e Brasil (BR).

Na aplicação do método da Poupança Líquida (NS), os custos e investimentos considerados são a redução de custos de energia (ΔE), o incremento nos investimentos (ΔI), resultantes da implantação do projeto de eficiência energética dos motores. Sendo que a redução nos custos de energia se restringe ao período entre a substituição do motor e o fim estimado da vida útil do motor substituído, enquanto o incremento nos investimentos se dá na diferença temporal da aplicação dos mesmos, tendo em vista que a compra do equipamento mais eficiente é apenas antecipada. As expressões (5.1) a (5.3) representam este cálculo

$$NS = \sum_{t=t_s}^n \Delta E \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - \sum_{t=t_s}^{n+t_s} \frac{\Delta I}{(1+d)^t} \quad (5.1)$$

Onde,

$$\sum_{t=t_s}^n \Delta E \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t = \Delta E \times \frac{(1+e)}{(d-e)} \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^{n-t_s} \right] \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \sum_{t=t_s}^{n+t_s} \frac{\Delta I}{(1+d)^t} &= I_2 + Repl \times \frac{1}{(1+d)^{t_1}} + Repl \times \frac{1}{(1+d)^{t_2}} - I_2 \times \frac{1}{(1+d)^{n-t_s}} - Repl \\ &\times \frac{1}{(1+d)^{t_1-t_s}} - Repl \times \frac{1}{(1+d)^{t_2-t_s}} \quad (5.3) \end{aligned}$$

5.4.2.1 Motores de pequena potência

As Figuras 66 e 67 apresentam os resultados das simulações da substituição de um motor de 1,5cv em operação para as transições de IR1 para IR2 e de IR1 para IR3. A Primeira constatação de que o limite de viabilidade atinge um valor máximo (menor área de viabilidade) logo após a ocorrência de um reparo ($t_s=6$ anos), porque neste momento já foi efetivado o custo do rebobinamento (C_{Repl}). Todas as simulações (Figuras 66 a 69) feitas com diferentes potências de motores confirmam esta constatação.

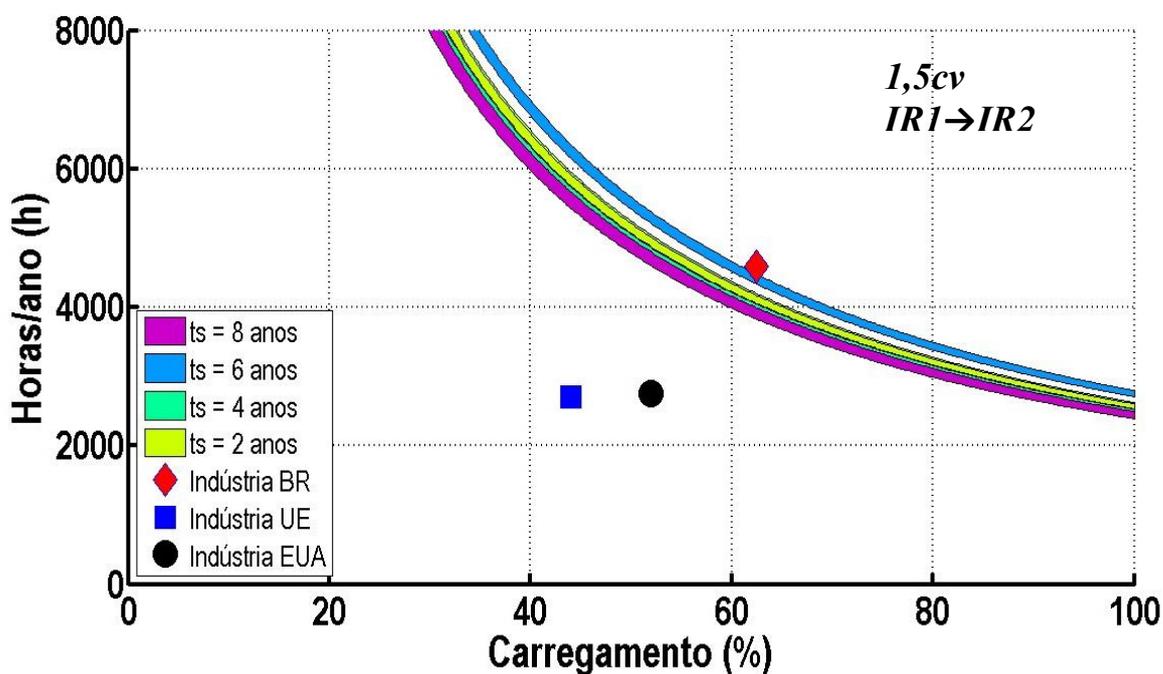
Outra constatação é que a substituição de motor IR1 por um IR3 apresenta uma área de viabilidade maior do que a substituição de um motor IR1 por um motor IR2. O

aumento no custo da aquisição do motor IR3 é compensado pelo aumento da eficiência para esta faixa de potência. Os pontos de operação da indústria brasileira se mostraram viáveis para ambas as trocas.

5.4.2.2 Motores de média potência

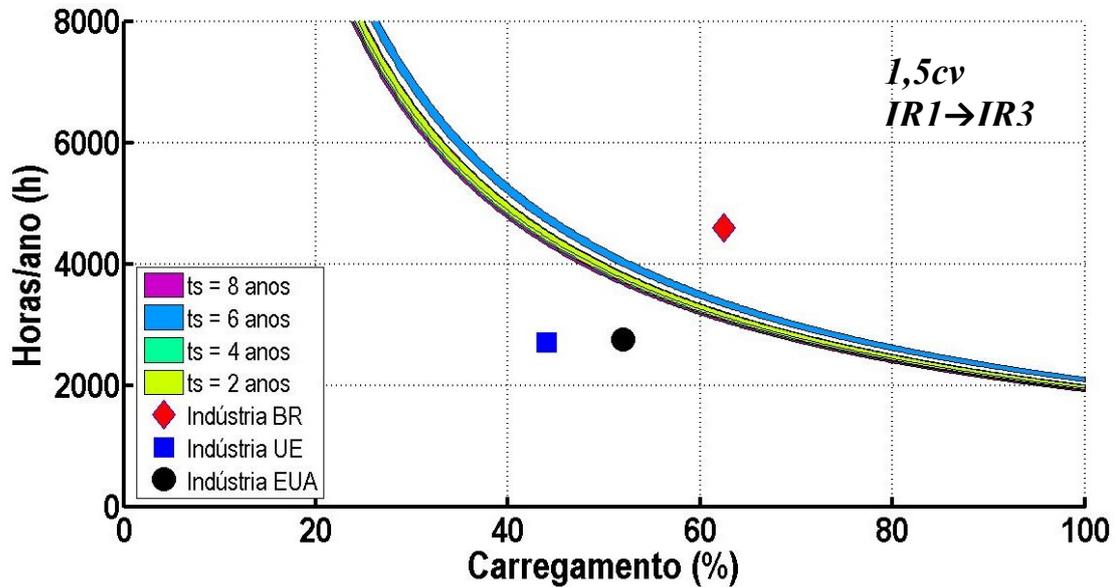
A Figura 68 apresenta o resultado das simulação da substituição de um motor de 15cv em operação para as transições de IR2 para IR3. A substituição se mostrou inviável para todos os tempos de serviço(t_s) simulados. Para esta faixa de potência e para esta transição de MEPS, apenas ao final da vida útil do motor se torna viável a substituição por um mais eficiente (vide Figura 60) para os dados de operação da indústria brasileira (exceto para os motores de 6 e 8 polos).

Figura 66 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 1,5 cv/4 polos/60 Hz em operação (t_s de 2 a 8 anos) por um Motor IR2.



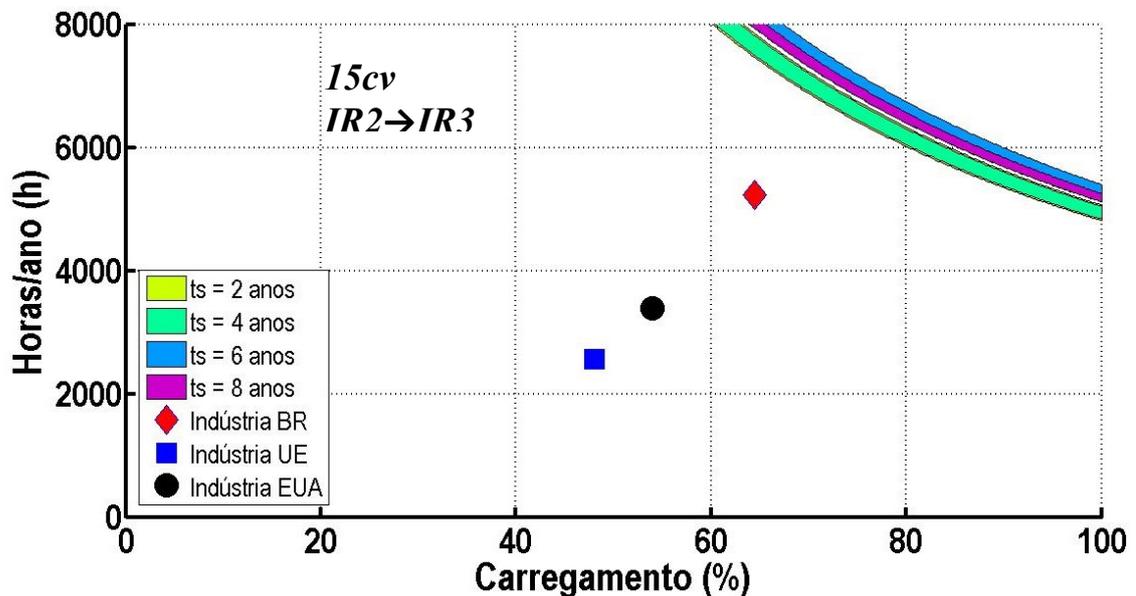
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 67 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 1,5 cv/4 polos/60 Hz em operação (t_s de 8 a 15 anos) por um Motor IR3



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 68 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 15 cv/4 polos/60 Hz em operação (t_s de 8 a 15 anos) por um Motor IR3



Fonte: Elaborado pelo autor.

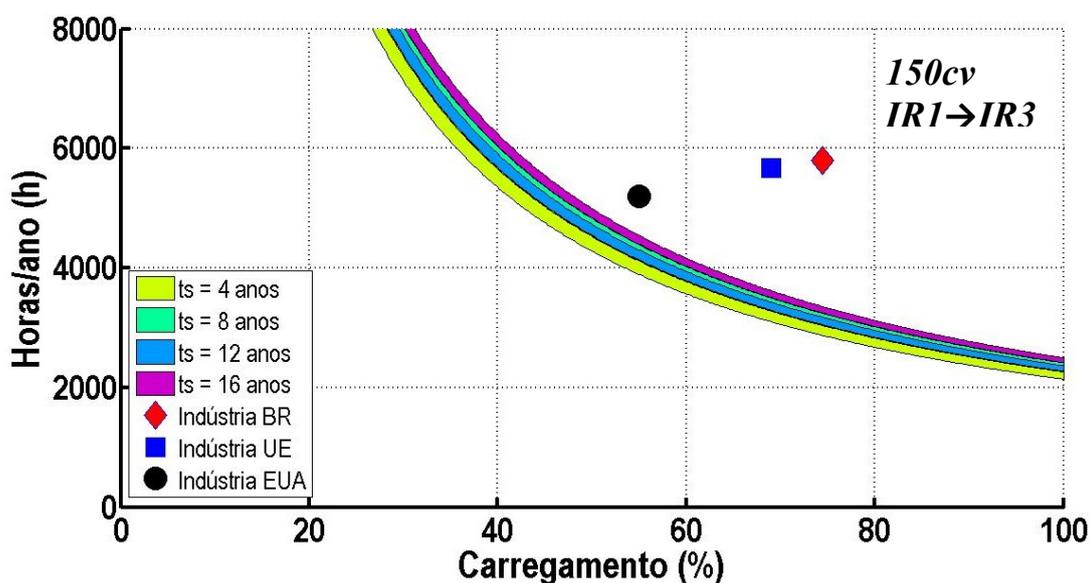
5.4.2.3 Motores de grande potência

A Figura 69 ilustra os limites de viabilidade para a substituição de um motor de 150cv em operação do nível MEPS IR1 para um nível IR3. A situação é confortável para esta

potência, mesmo porque as características de operação são melhores (maiores carregamentos e maior quantidade de horas em operação). À medida que se aproxima o final da vida útil do motor as condições de viabilidade pioram levemente. Este fato pode ser comprovado quando se verifica o Custo da Energia Economizada desta Substituição (Figura 70), onde, à medida que o tempo de serviço evolui, o custo aumenta.

Esta Figura 70 deve ser analisada tendo em mente que os custos de geração de eletricidade variam de 40,00 a 80 U\$/MWh, o que tornaria pouco atraente ao investidor apenas a substituição do motor de 15 cv do nível IR2 para o IR3.

Figura 69 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 150 cv/4 polos/60 Hz em operação (t_s de 2 a 8 anos) por um IR3



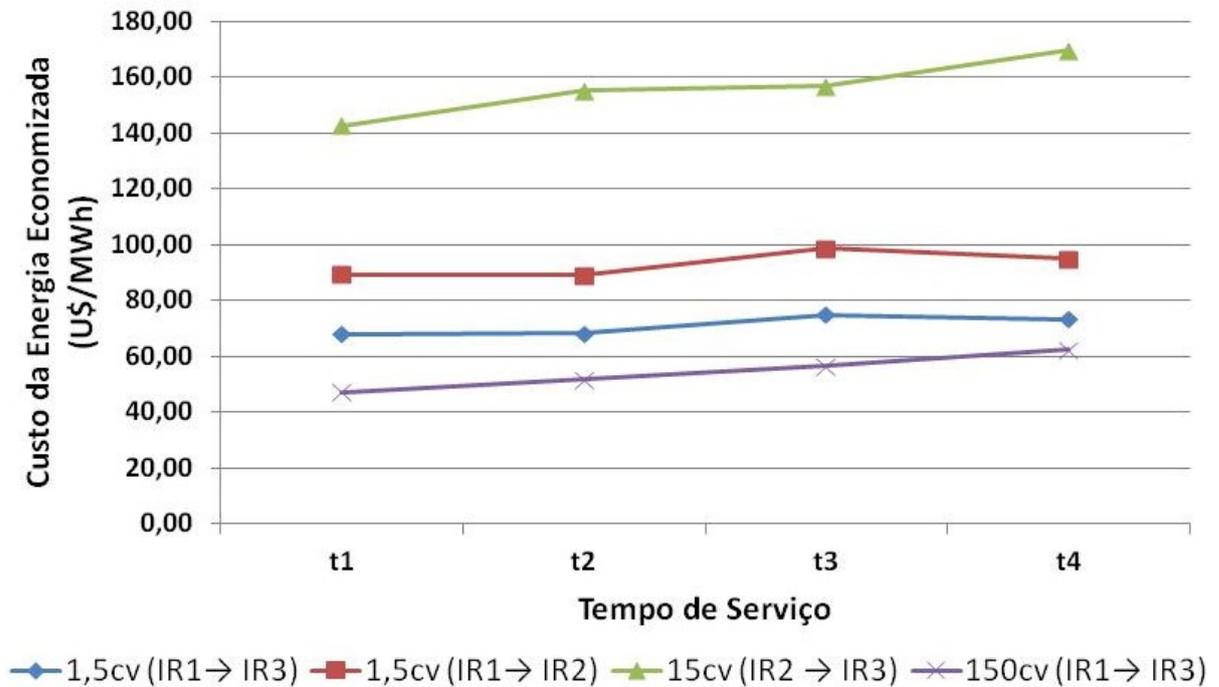
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2.4 Efeito dos programas de incentivo à substituição de motores

Existem programas de incentivo (rebate program) para a substituição de motores por modelos mais eficientes. Em alguns casos, o fabricante recebe o motor usado a um custo proporcional ao motor novo adquirido (Brasil) (ANEEL, 2015b), em outros ocorrem o incentivo financeiro (EUA) (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2011) por parte de organizações interessadas na melhoria da eficiência das máquinas.

As simulações aqui apresentadas usam o valor de $t_s = 2$, e várias situações de desconto percentual ($desc$) no motor adquirido, de acordo com as expressões (5.4) a (5.6).

Figura 70 – Custos da Energia Economizada para a substituição de motores de indução 4 polos/60 Hz em operação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$NS = \sum_{t=2}^n \Delta E \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - \sum_{t=0}^n \frac{\Delta I}{(1+d)^t} \quad (5.4)$$

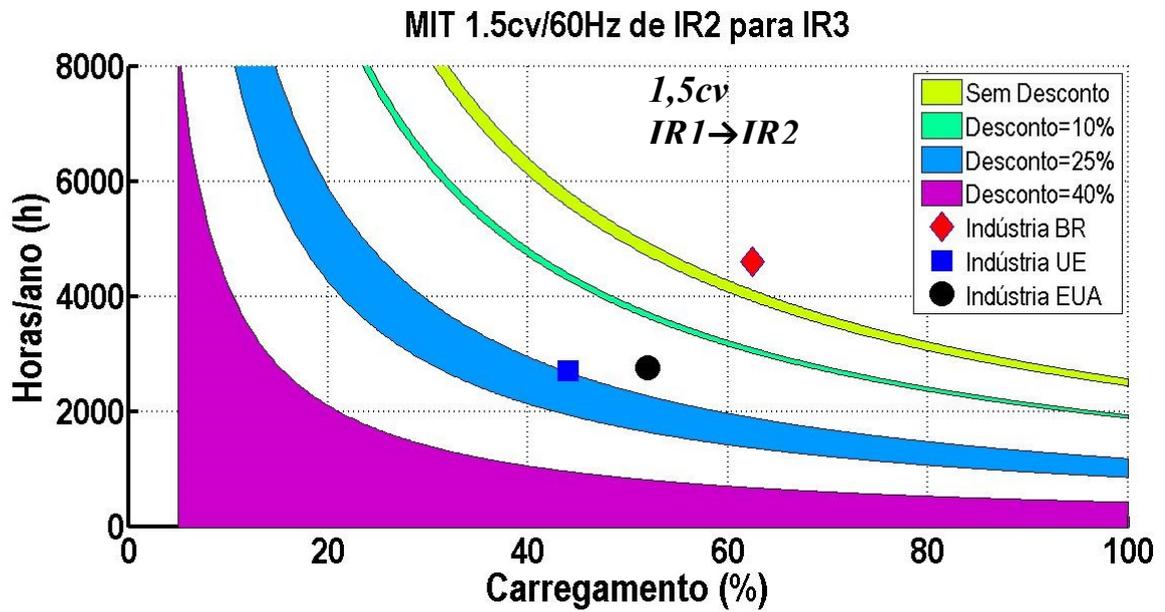
Onde,

$$\sum_{t=2}^n \Delta E \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t = \Delta E \times \frac{(1+e)}{(d-e)} \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^{n-t_s} \right] \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^n \frac{\Delta I}{(1+d)^t} &= I_2 \times (1 - desc) + Repl \times \frac{1}{(1+d)^{t1}} + Repl \times \frac{1}{(1+d)^{t2}} - I_2 \times \frac{1}{(1+d)^{n-t_s}} \\ &\quad - Repl \times \frac{1}{(1+d)^{t1-t_s}} - Repl \times \frac{1}{(1+d)^{t2-t_s}} \quad (5.6) \end{aligned}$$

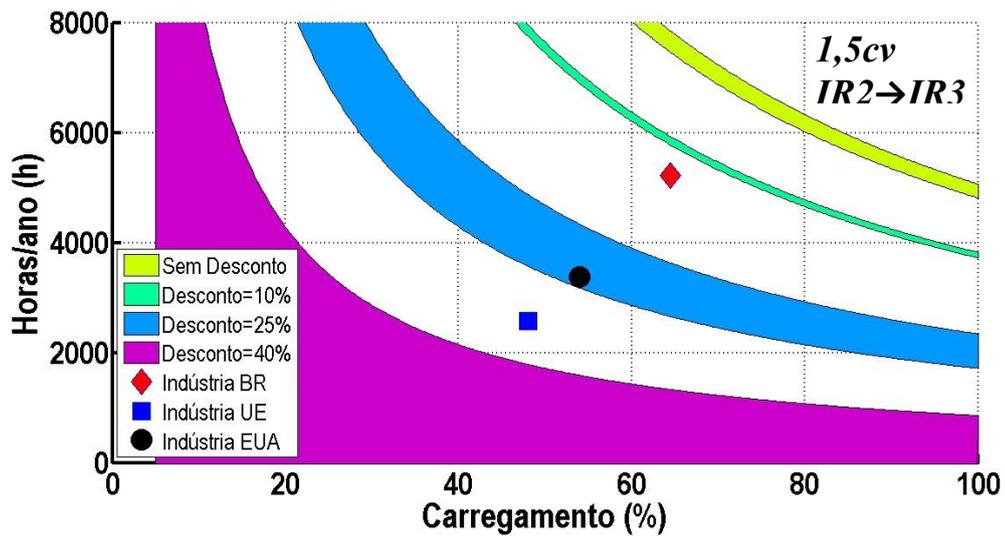
As Figuras 71 a 74 apresentam os resultados da simulação de viabilidade para os casos em que a substituição do motor em operação apresentava pouca área de viabilidade. Foram simuladas principalmente as substituições de motores IR2 por motores IR3 (Figuras 5.24 a 5.26), mas também foi simulada a substituição de um motor de pequena potência (1,5cv/4 polos) na transição de IR1 para IR2. Os descontos simulados foram de 10%, 25% e 40% sobre o preço original.

Figura 71 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 1,5 cv/4 polos/60 Hz em operação ($t_s = 2$ anos) por um Motor IR2 com várias faixas de desconto.



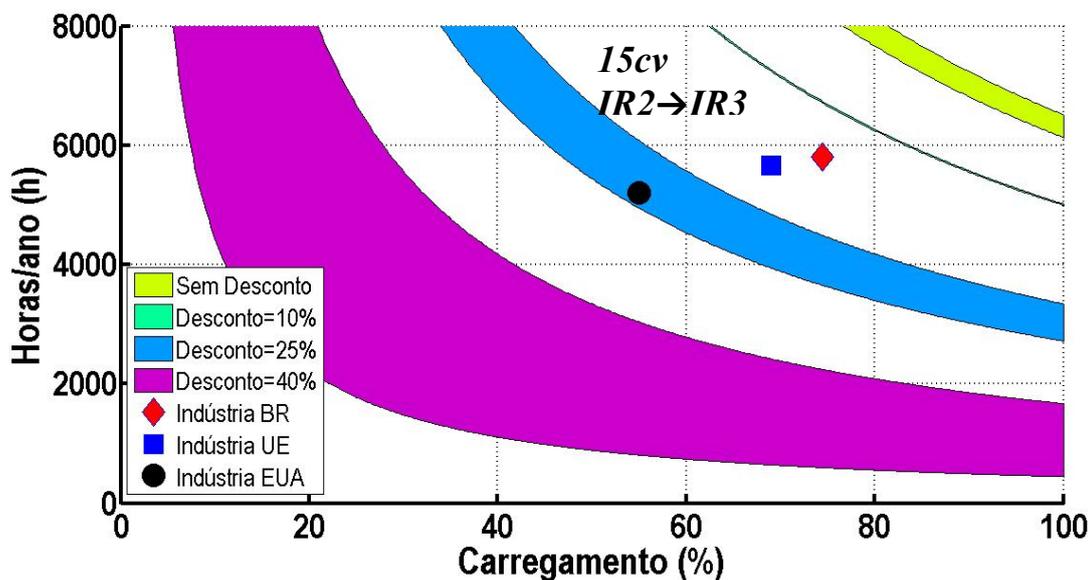
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 72 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 1,5 cv/4 polos/60 Hz em operação ($t_s = 2$ anos) por um Motor IR3 com várias faixas de desconto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 73 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 15 cv/4 polos/60 Hz em operação ($t_s = 2$ anos) por um Motor IR3 com várias faixas de desconto.

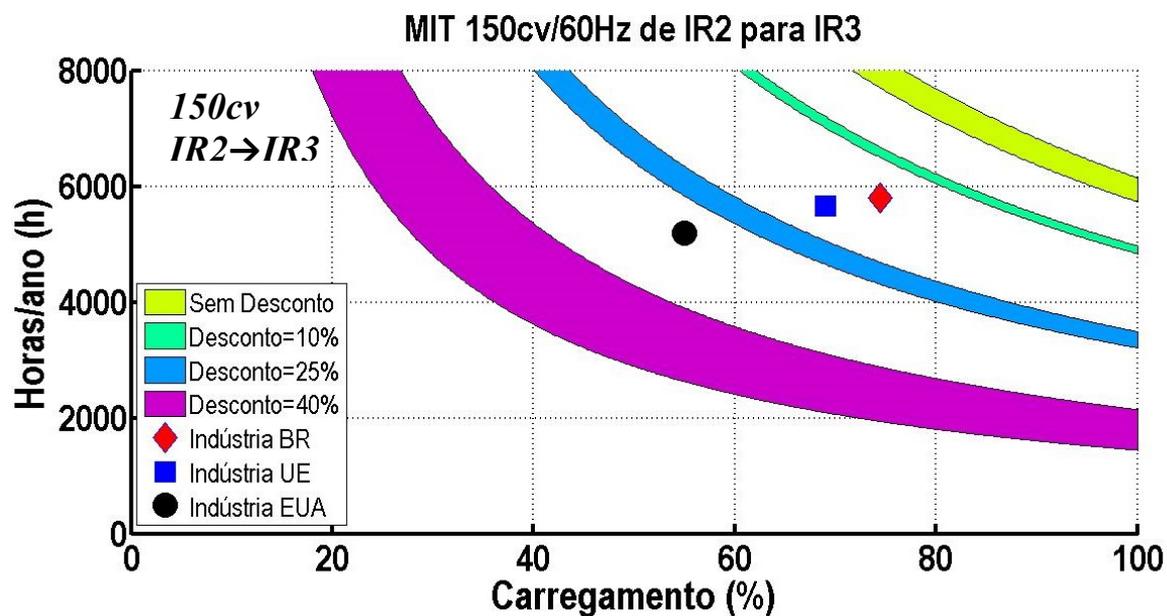


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados mostram os efeitos esperados dos descontos com o aumento crescente da área de viabilidade. No caso do motor de 1,5cv/polos/IR1→IR2, verifica-se que um desconto de 25% já colocaria até os pontos de operação da EU e dos EUA dentro da área de viabilidade; uma expectativa interessante considerando serem estes os motores os que apresentam maiores dificuldades para serem viabilizados devido aos baixos pontos de operação. No caso da transição de IR2 para IR3, a indústria brasileira só seria beneficiada com descontos de 25%, enquanto as demais requerem descontos de 40%. O motor de 15cv, que apresentou uma dificuldade de viabilidade para substituição em operação, necessitaria de um desconto de 25% (Figura 73) para passar à faixa de viabilidade no caso dos números da indústria nacional. O motor de 150cv (Figura 74), na transição de IR2 para IR3, também requer um desconto de 25% para a viabilidade.

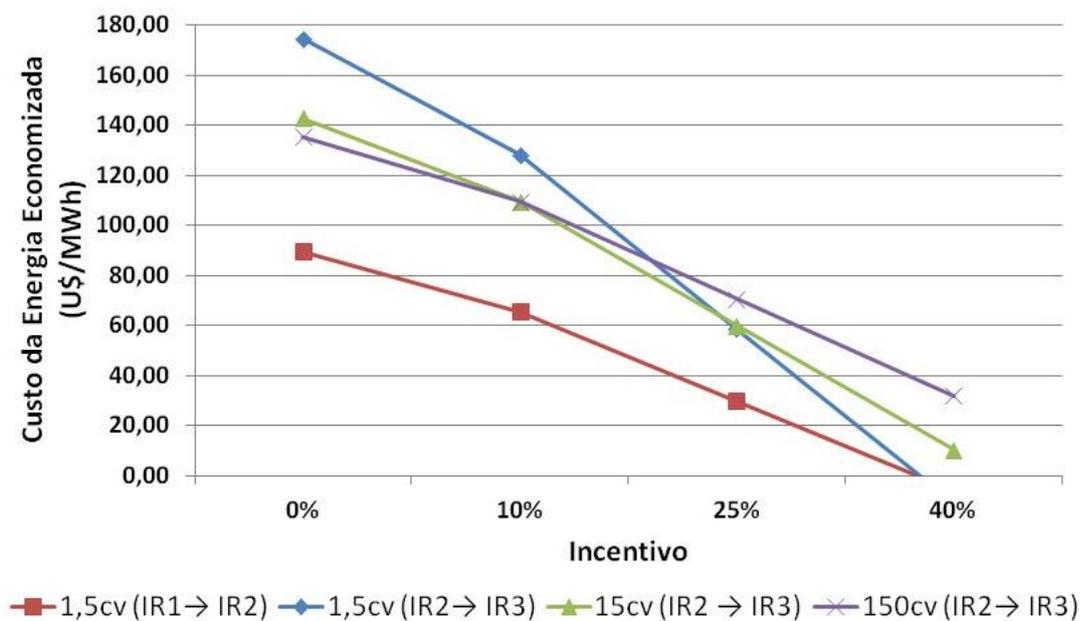
A Figura 75 mostra o efeito dos incentivos sobre o Custo da Energia Economizada. A substituição do motor de 1,5cv do nível IR2 para o nível IR3 só passa a ter um custo competitivo para o investidor a partir do desconto de 25% do preço do motor.

Figura 74 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 150 cv/4 polos/60 Hz em operação ($t_s = 2$ anos) por um Motor IR3 com várias faixas de desconto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 75 – Custos da Energia Economizada para a substituição de motores de indução 4 polos/60 Hz em operação com incentivos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.3 Perspectivas para o Motor Superpremium

A International Electrotechnical Commission (IEC) já definiu os índices mínimos de eficiência para motores que supera os já alcançados pelos motores Premium. Os índices IE4, ou Superpremium, já estão definidos (ALMEIDA; FERREIRA, 2014; IEC, 2007) e já existem no mercado soluções que atendem estes índices, pelo menos para algumas faixas de potência.

A abordagem destas simulações é diferente das anteriores, já que o objetivo é determinar faixas de preços do motor IE4/Superpremium que tornem viáveis a substituição de motores IR3/Premium. Deste modo, visualiza-se o limite de viabilidade da substituição do motor IE3 para diferentes preços do novo motor IE4. Os Níveis IE4 de eficiência utilizados estão listados no Apêndice D.3.

A Comparação não inclui a Incerteza de nenhum parâmetro de entrada e é feita a partir da opção da aquisição de um motor novo de 4 polos entre os níveis IE3 e IE4; mas aqui são simulados possíveis preços para o: motor Superpremium com base no preço do motor existente (I_{Prem}). As expressões (5.7) a (5.9) mostram o cálculo.

$$NS = \sum_{t=t_s}^n \Delta E \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t - \sum_{t=0}^n \frac{\Delta I}{(1+d)^t} \quad (5.7)$$

Onde,

$$\sum_{t=0}^n \Delta E \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t = \Delta E \times \frac{(1+e)}{(d-e)} \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^n \right] \quad (5.8)$$

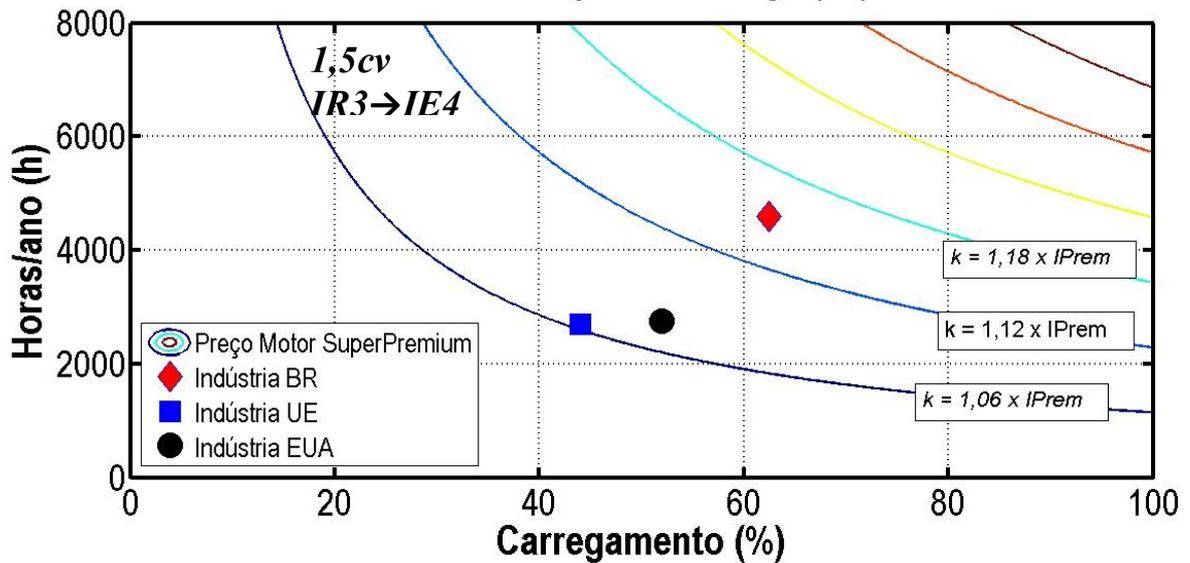
$$\sum_{t=0}^n \frac{\Delta I}{(1+d)^t} = k \times I_{Prem} - I_{Prem} \quad (5.9)$$

As Figuras 76 a 79 apresentam os resultados destas simulações para os motores de pequena (1,5 cv, Figura 76), média (15 cv e 50cv, Figuras 77 e 78, respectivamente), e grande potência (150 cv, Figuras 79), com as curvas de viabilidade para diversos preços para o motor IE4/Superpremium, quando comparado com o motor IR3/Premium. As características médias de operação dos motores do setor industrial da EU, dos EUA e do Brasil são incluídos nas figuras para facilitar a análise.

Para os motores de pequena potência (Figura 76), o aumento de eficiência para o motor Superpremium só será viável economicamente se o seu preço não exceder em 12% o preço do motor Premium, para o setor industrial do Brasil, e de apenas 6% para os setores

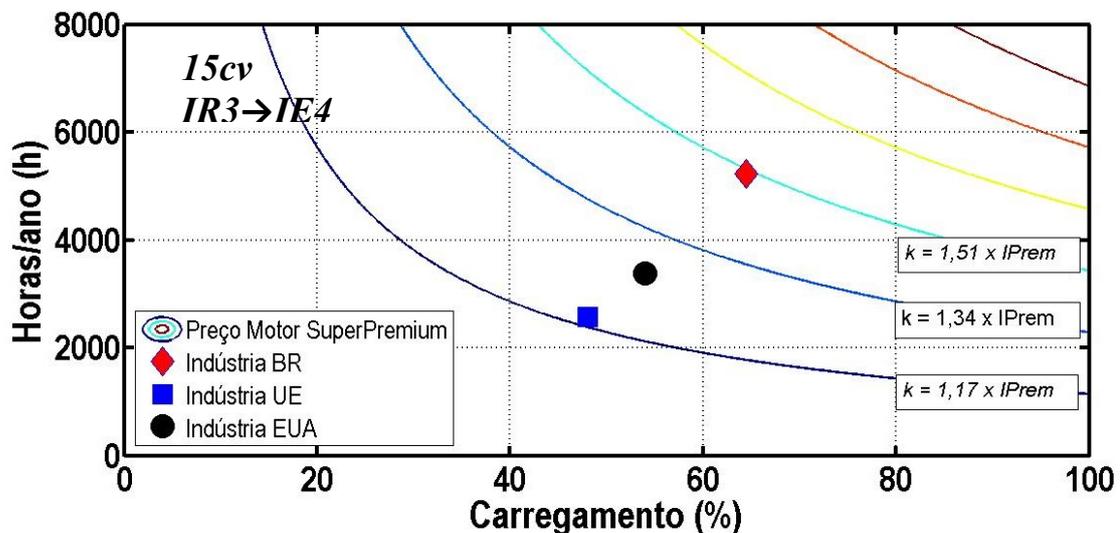
industriais da EU e dos EUA Trata-se de um desafio e tanto, considerando que a subida no grau da eficiência da transição de IR2 para IR3, o aumento médio dos preços foi de 24,4% no Brasil (Tabela 5.6).

Figura 76 - Curvas de Viabilidade para diferentes preços para a aquisição de um motor Superpremium de 1,5 cv/4 polos/60 Hz quando comparado a um motor IR3/Premium.



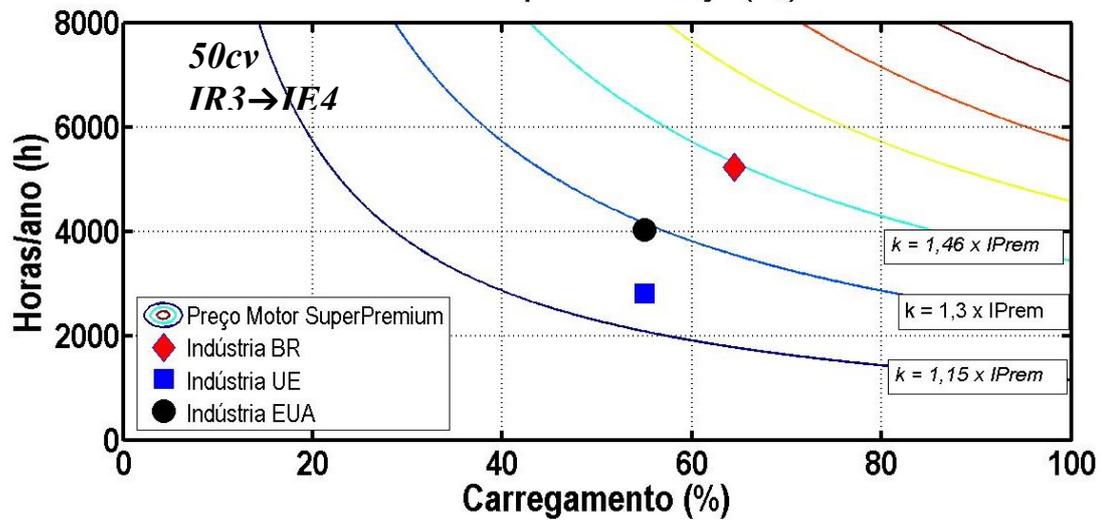
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 77 - Curvas de Viabilidade para diferentes preços para a aquisição de um motor Superpremium de 15 cv/4 polos/60 Hz quando comparado a um motor IR3/Premium.



Fonte: Elaborado pelo autor.

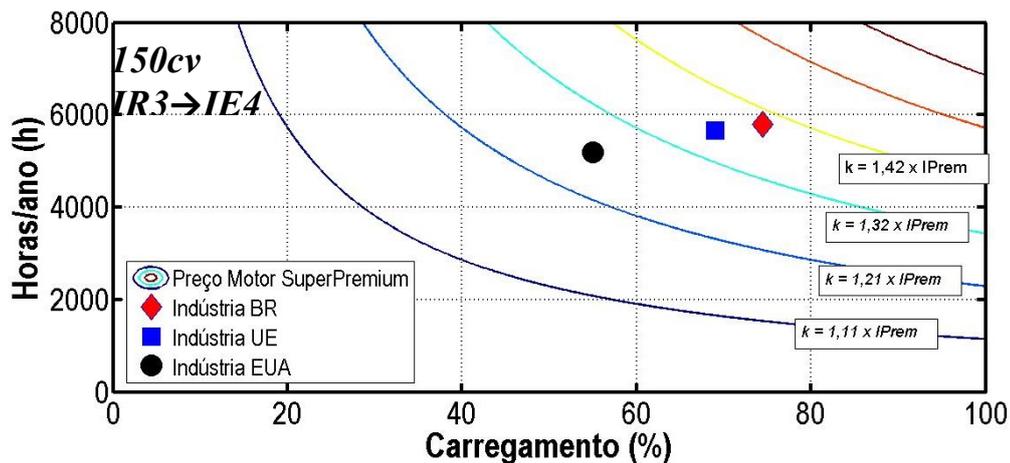
Figura 78 - Curvas de Viabilidade para diferentes preços para a aquisição de um motor Superpremium de 50 cv/4 polos/60 Hz quando comparado a um motor IR3/Premium.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os motores de média potência (Figuras 77 e 78) este desafio é facilitado, pois um aumento de preço em torno de 30% tornaria esta a opção do motor Superpremium viável para a indústria brasileira; as indústrias da EU e dos EUA requereriam um aumento menor, de cerca de 15%.

Figura 79 - Curvas de Viabilidade para diferentes preços para a aquisição de um motor Superpremium de 150 cv/4 polos/60 Hz quando comparado a um motor IR3/Premium.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os motores de grandes potências (Figura 79), a situação é mais favorável, condições de operação superiores (maiores carregamento e horas trabalhadas); assim, um aumento de 32% em relação ao preço do motor Premium ainda viabilizaria a opção para as

indústrias do Brasil e da EU, enquanto a indústria dos EUA necessita de um aumento mais reduzido (21%).

5.4.4 Efeito dos Custos Ambientais

As simulações anteriores não incluem os custos ambientais principalmente dificuldade de definição de parâmetros para o seu cálculo e a inexistência, pelo menos no Brasil, de uma definição de valores de referência para a conversão monetária destes custos. No entanto, a partir de dados coletados de uma simulação feita com os padrões da União Europeia ((DE ALMEIDA et al., 2008; VHG DG ENTR (EUROPEANCOMMISSION), 2005) e a estimativa de preços da emissão de gases de efeito estufa dos EUA (111TH CONGRESS, 2009), foi criada a Tabela 5.8 abaixo com valores de Gases do Efeito Estufa (kg CO₂ eq/h) liberados por motores de indução durante as fases de Produção, Manutenção, Uso e Descarte do mesmo. As Expressões abaixo foram utilizadas para a geração das curvas de viabilidade incluindo o Custo Ambiental (C_{Env}), considerando que cerca de 99% das emissões de gases de efeito estufa estão associadas à operação do motor (Uso) e, portanto, o Custo Ambiental se desenrola durante a vida útil da máquina.

Nesta simulação foi considerada a incerteza na vida útil do motor (+31,92%) e o custo do Preço Default do Cenário da Política de Carbono dos EUA (Tabela 3.6) de US\$ 0.02/kg CO₂ eq..As expressões (5.10) a (5.12) detalham o cálculo do efeito dos custos ambientais na viabilidade da substituição de motores.

Tabela 5.8 – Impactos ambientais (Gases de Efeito Estufa) durante a vida do motor (Fabricação, Manutenção, Uso e Descarte).

<i>Potência do Motor</i>	<i>Emissões de Gases do Efeito Estufa (Kg CO₂ eq./h)</i>		
	IR1	IR2	IR3
1,5 cv	0,102	0,065	0,052
15 cv	0,436	0,338	0,287
150 cv	2,216	1,811	1,521

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (Almeida, de et al., 2008)

$$NS = \sum_{t=0}^n \Delta E \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t + \sum_{t=0}^n \Delta C_{Env} - \sum_{t=0}^n \frac{\Delta I}{(1+d)^t} \quad (5.10)$$

Onde,

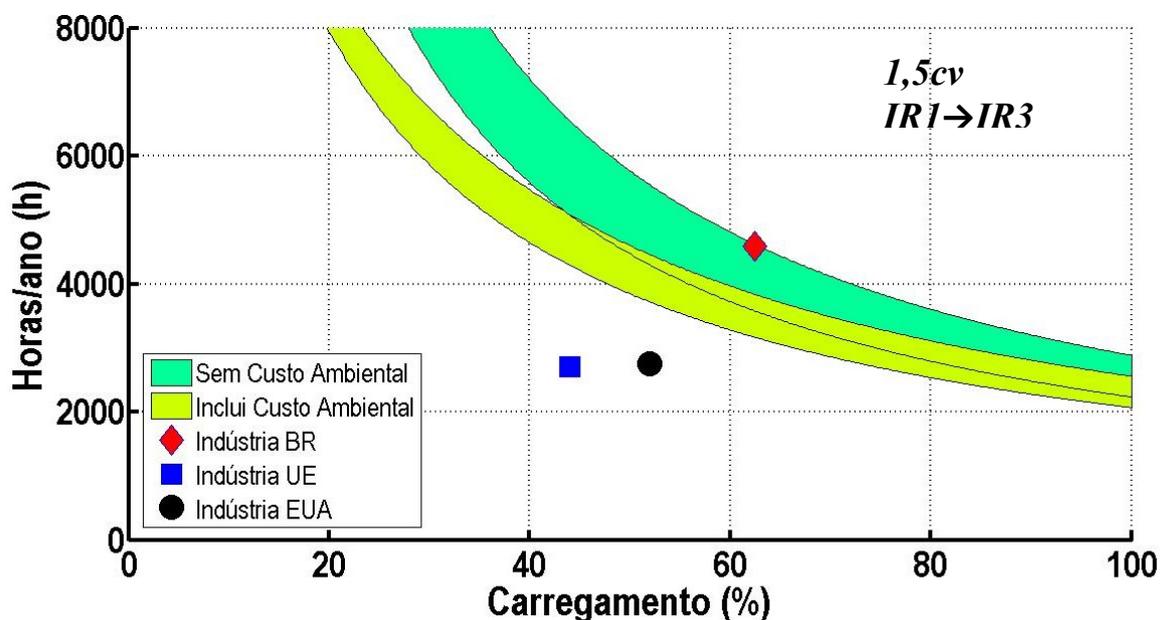
$$\sum_{t=0}^n \Delta E \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^t = \Delta E \times \frac{(1+e)}{(d-e)} \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+d} \right)^n \right] \quad (5.11)$$

$$\sum_{t=0}^n \Delta C_{Env} = \Delta C_{Env} \times \frac{(1+d)^n - 1}{d(1+d)^n} \quad (5.12)$$

As Figuras 80 a 82 mostram os resultados de simulações considerando a viabilidade da opção de compra de motores mais eficientes com e sem a inclusão do Custo Ambiental no cálculo. O Efeito da inclusão do custo ambiental é pequeno, mas pode fazer a diferença; na Figura 80, a simulação com a C_{Env} empurra o limite de viabilidade para baixo e deixa a situação de viabilidade dos motores da indústria brasileira em posição mais confortável para os motores de pequena potência na transição de IR1 para IR3. No caso de motores de potência média (Figura 81), os números da indústria dos EUA passam a ter relativa viabilidade, e o caso Europeu tem sua dificuldade reduzida para a transição de IR2 para IR3. A inclusão do C_{Env} no cálculo para grandes potências (Figura 82) faz pouca diferença para a transição do nível IR1 para IR2, já que a situação já era confortável.

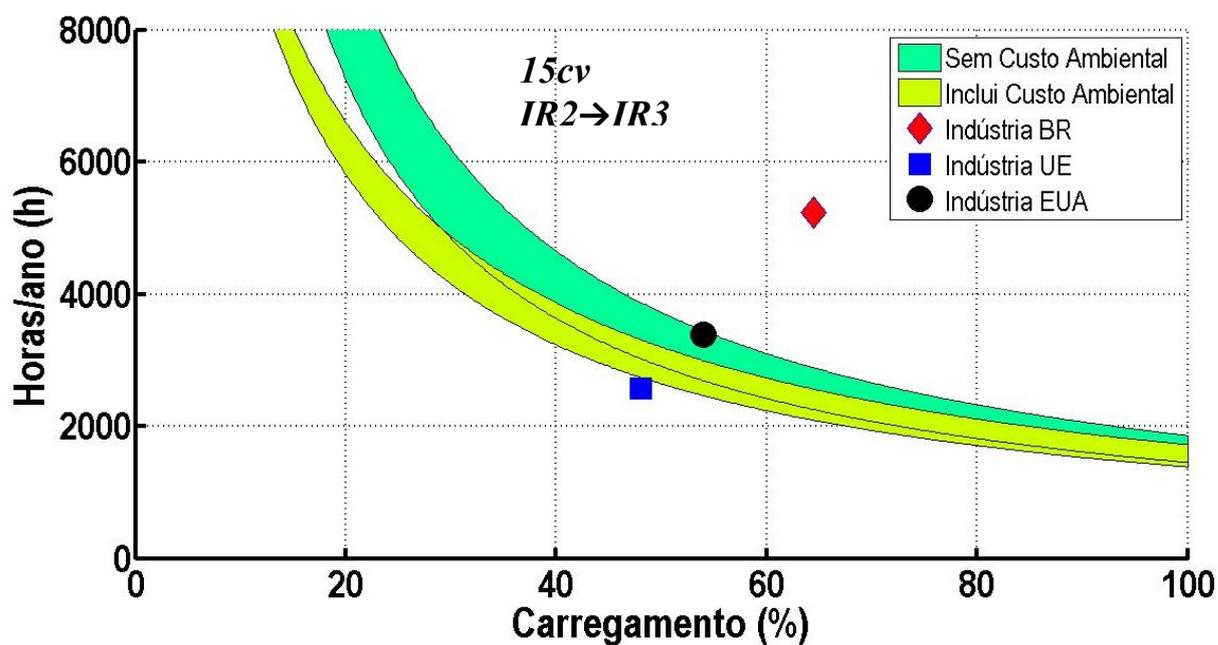
Os resultados mostraram uma pequena influência do Custo Ambiental na viabilidade do aumento de eficiência de motores elétricos, mas esta influência pode fazer a diferença em alguns casos, a questão é saber para que agentes do mercado estes Custos devem ser utilizados. Para o consumidor final esta é uma realidade distante, porém para produtores e distribuidores de energia esta pode ser uma moeda com valor e já uma realidade em algumas simulações (MEYERS, STEPHEN; WILLIAMS, ALISON; CHAN, 2013). As tentativas de regular este assunto relacionadas a iniciativas de eficiência energética estão sendo feitas atualmente pelos reguladores da UE (EU DIRECTIVE, 2012) e dos EUA (111TH CONGRESS, 2009). O governo brasileiro apresentou recentemente uma Intenção Nacional de Contribuição Determinada (INDC) na Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, com o objetivo de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa até 2025 em 37% da linha de base de 2005 (EPE, 2016). Para alcançar esses objetivos, o custo ambiental deve ser levado em consideração para verificar a viabilidade dos programas de eficiência energética.

Figura 80 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 1,5 cv/4 polos/60 Hz por um Motor IR3 com e sem a inclusão do Custo Ambiental no LCC.



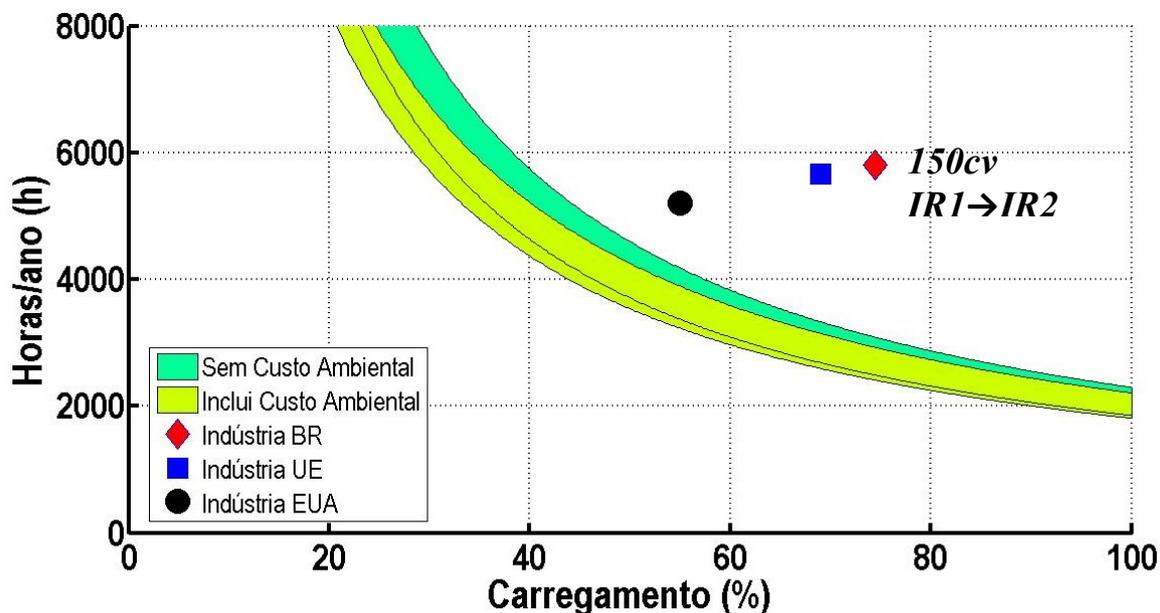
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 81 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR2 de 15 cv/4 polos/60 Hz por um Motor IR3 com e sem a inclusão do Custo Ambiental no LCC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 82 - Curvas de Viabilidade para a substituição de um motor IR1 de 150 cv/4 polos/60 Hz por um Motor IR2 com e sem a inclusão do Custo Ambiental no LCC.



5.5 Considerações Finais

Este capítulo aplica, para os motores elétricos de indução, a metodologia de análise de projetos de eficiência energética proposta neste trabalho. As análises realizadas mostraram a versatilidade da ferramenta gráfica implementada, com potencial para auxiliar todos os agentes do mercado de energia, de consumidores e formuladores de políticas públicas, podendo simular até preços de futuras tecnologias que permitam a sua viabilidade no mercado.

A nova metodologia inclui o impacto da incerteza dos parâmetros no resultado final, acrescenta a taxa de escalada (e) sobre os custos da energia, fornece uma interação gráfica associando a viabilidade a parâmetros assimiláveis pelos usuários (características de operação do equipamento) e estabelece um novo paradigma para a avaliação da viabilidade de projetos de eficiência ao estabelecer a viabilidade associada ao custo da energia economizada, o que permite a comparação da eficiência energética com diferentes formas de investimento em energia.

O Estudo da Viabilidade do aumento da eficiência de motores de indução mostrou que o Brasil está pronto para dar o próximo passo MEPS para motores elétricos. O mercado brasileiro oferece motores com níveis de eficiência até superiores ao nível IR3/Premium e a

análise de viabilidade da transição dos níveis de IR2 para IR3 mostrou-se satisfatória para todas as simulações.

As demais análises mostraram as possibilidades da substituição de motores em operação, com e sem programas de incentivo e até uma simulação de preços de futuras tecnologias que permitam a sua viabilidade no mercado. Os Custos ambientais foram um tema secundário no trabalho, apesar de sua importância no mundo moderno, mas não deixou de ser simulada a sua inclusão nos cálculos de viabilidade econômica com resultados satisfatórios.

As análises de substituição de motores elétricos aqui apresentadas tiveram o objetivo de mostrar o potencial da ferramenta de análise econômica desenvolvida e dos efeitos da incerteza nos resultados finais desta análise, assim como de estimar os impactos do programa MEPS de motores elétricos em curso no Brasil. A análise técnica da substituição de um motor deve incluir o sistema em que o mesmo está inserido e os efeitos do motor proposto sobre a eficiência total deste sistema. Algumas situações de carga requerem a aplicação de equipamentos de controle do motor (Inversores de Frequência), e, em alguns casos, os motores mais eficientes apresentam velocidades de operação diferentes do motor original, o que pode provocar alterações na operação do sistema e, em algumas situações, até reduzir a eficiência total. Simulações de viabilidade econômica de projetos de eficiência energética envolvendo motores elétricos devem incluir os efeitos do aumento da eficiência em todo o sistema motriz analisado.

5.5.1 Realizações

O Capítulo 5 inclui um artigo publicado em Periódico:

ANDRADE, C. T. DE C.; PONTES, R. S. T. Economic analysis of Brazilian policies for energy efficient electric motors. *Energy Policy*, v. 106, p. 315–325, 2017.

6 CONCLUSÕES

O aumento da eficiência de equipamentos de uso energético é uma realidade, no entanto, existem barreiras no mercado de energia que impedem a difusão de tecnologias mais eficientes de uma forma mais rápida. Estas barreiras podem ser reduzidas através do acesso a informação sobre o aumento da eficiência de equipamentos, principalmente sobre os benefícios associados ao aumento do custo de produção e aquisição.

Este trabalho se propôs a pôr uma luz sobre este tema, analisando todos os parâmetros associados ao aumento da eficiência de equipamentos, desde a definição do indicador de eficiência, passando pela sua utilização como objeto de políticas regulatórias e pela sua medição, até a análise de todos custos associados ao ciclo de vida do equipamento, incluindo a incerteza associada a cada um deles. Também analisou as necessidades de todos os agentes envolvidos no mercado de eficiência energética quanto à viabilidade dos investimentos e apresentou um aplicativo que implementa uma nova abordagem para esta análise de viabilidade incorporando o efeito das incertezas dos parâmetros que caracterizam os projetos de eficiência energética. Por fim, apresentou a aplicação desta metodologia no processo de aumento de eficiência de motores de indução trifásicos em curso no Brasil.

As principais contribuições apresentadas nesta tese são as seguintes:

- Os indicadores de eficiência determinam como a energia está sendo utilizada para suprir as necessidades humanas no planeta e são a base para as atuais políticas para a melhoria da eficiência de equipamentos de uso final. O programa de índices mínimos de eficiência (MEPS) em curso no Brasil e nos principais países do mundo tem sido bem sucedidos em induzir o aumento gradual da eficiência energética. No desenvolvimento deste trabalho foi implementada uma bancada de testes para a medição da eficiência motores de indução trifásicos e ficou comprovado o grau de incerteza dos resultados a partir da análise dos erros associados à medição das grandezas envolvidas. A experiência da construção desta bancada no laboratório FREEDM System Center, na North Carolina State University, permitiu a implementação de uma bancada similar nas instalações do laboratório LAMOTRIZ, da Universidade Federal do Ceará, onde atualmente são realizadas pesquisas para melhoria da eficiência de motores de indução;

- A Análise de projetos de eficiência energética requer o estudos de todos os custos associados à vida útil de um equipamento de uso final (LCC) e a sua atualização para uma data comum (valor presente), com o objetivo de comparação de custos e benefícios. O método mais comum para a cálculo da viabilidade destes projetos, o retorno simples, ignora a maioria do LCC e a atualização para o valor presente. Este trabalho analisou todos os custos associados ao LCC, incluindo a incerteza associada a cada um deles, e apresentou a expressões para a atualização destes custos ao valor presente (PV), detalhando a utilização da taxa de desconto (d), taxa utilizada para a atualização dos custos para o PV.
- Considerando que as tarifas das fontes de energia dos equipamentos de uso final, base para o cálculo do custo de energia (C_E), tem um comportamento descolado da inflação durante o ciclo de vida útil, e também considerando ser o custo da energia o principal benefício associado ao aumento da eficiência, este trabalho introduziu o conceito de taxa de escalada da energia (e). Esta taxa representa o quanto da variação da tarifa da energia difere da inflação durante o período de análise do projeto de eficiência energética (vida útil) e é pouco utilizada na análise da viabilidade de projetos de eficiência energética de equipamentos de uso final (nos EUA é usada em contratos de melhoria de eficiência de prédios públicos federais e em contratos com distribuidoras de energia (TECHNOLOGY, 2017)). Foi apresentado um cálculo para a escalada da tarifa da eletricidade industrial no Brasil com base no histórico dos últimos 20 anos de reajuste tarifário.
- A existência de lacunas no mercado de eficiência energética, indica, entre outras coisas, que o consumidor não está adequadamente informado sobre eficiência energética e principalmente sobre viabilidade financeira deste investimento. Este trabalho analisou os métodos existentes para determinar a viabilidade de projetos de eficiência, determinou aqueles que melhor satisfaziam as necessidades dos participantes neste projetos e apresentou a implementação destes métodos na forma de um aplicativo para dispositivos móveis. Este aplicativo permite o acesso a todos os parâmetros envolvidos na análise e ainda permite a determinação da análise da sensibilidade (incerteza) destes parâmetros e seu efeito no resultado final. A abordagem proposta para a determinação da viabilidade do aumento de eficiência não adota o padrão usual

de determinar um período de retorno para o investimento (retorno simples ou descontado), que acabava sendo mascarado por consequências como o efeito rebote (*rebound effect*), e associa a determinação da viabilidade do projeto ao custo da energia economizada (U\$/MWh), o que tem a vantagem adicional de permitir a comparação do investimento em eficiência energética com diferentes formas de investimento em energia.

- O aplicativo com o método gráfico para análise de viabilidade de projetos de eficiência energética foi customizado para motores elétricos de indução trifásicos pela importância desta carga no consumo de eletricidade mundial e por ser um dos escolhidos para um programa MEPS em curso no Brasil. A análise da transição do nível MEPS IR2 para o nível IR3, que está sendo planejado para acontecer no Brasil, foi apresentada concluindo pela viabilidade desta transição para as características médias de operação dos motores da indústria brasileira. Os números do Custo da Energia Economizada corroboraram estes resultados apresentando valores compatíveis com os custos de geração de eletricidade de diversas fontes. Também foi apresentada uma perspectiva de economia de consumo de eletricidade até 2030 no país com a adoção do nível MEPS IR3 a partir de 2019;
- As possibilidades de aquisição de equipamentos mais eficientes não se restringem ao momento de decisão de um novo modelo; aqueles em operação também podem ser substituídos e existem programas de incentivos para a troca por modelos mais eficientes. Foram simuladas situações de troca de motores em operação por modelos com uma ou duas bandas de eficiência acima do existente e os resultados mostraram a viabilidade para alguns casos e também as necessidades de programas de incentivos com descontos para outros casos.
- A evolução da eficiência dos equipamentos é contínua e os formuladores de políticas públicas se antecipam na definição de padrões de eficiências mais elevados. No caso de motores elétricos, já existem definições de índices MEPS Superpremium (IE4) e até Ultrapremium (IE5). Estas novas tecnologias devem manter a viabilidade para serem aceitas no mercado e uma das simulações apresentadas com esta nova abordagem de análise de viabilidade foi a de perspectivas de preços para novas tecnologias de motores com níveis de MEPS Superpremium que mantenham a viabilidade econômica de sua aquisição em substituição aos existentes modelos Premium/IR3. Os resultados obtidos

mostraram um desafio para os motores de pequena potência (cerca de 12% de margem de acréscimo de preço) e um cenário confortável para os motores de grande potência. Neste salto de eficiência o desafio passa a ser a medição da eficiência, cuja incerteza da medição já se aproxima da variação das bandas de eficiência;

- Os custos ambientais (C_{Env}) ainda são objeto de polêmicas mas estão se tornando uma realidade e sua inclusão no LCC de equipamento se faz necessária. Este trabalho apresentou o atual estágio de definições destes custos e apresentou uma simulação com a sua influência na análise da viabilidade do aumento da eficiência de motores de indução trifásicos. Os resultados mostraram uma influência pequena, mas capaz de influenciar no resultado final da análise de viabilidade;
- Para a determinação do efeito dos programas de aumento de eficiência de equipamentos de uso final, faz-se necessário conhecer o mercado deste equipamento no país. O mercado de motores elétricos no país foi analisado, mostrando uma indústria preparada para oferecer soluções compatíveis com os níveis MEPS IR3. Os dados de produção, vendas, consumo de energia e população dos motores do país também foi analisada com a constatação de que existem melhorias a serem feitas nas metodologias de coletas de dados e também na atualização de pesquisas sobre o uso destes equipamentos;

A maioria das contribuições aqui listadas foram temas de artigos publicados em congressos e jornais científicos, relacionados no final de cada capítulo. E, além do aplicativo em fase de registro no INPI e do recente laboratório montado no LAMOTRIZ, durante o desenvolvimento deste trabalho foi feito um esforço para disseminar os trabalhos e pesquisas na área de eficiência energética de motores elétricos com a realização do I Fórum Internacional de Eficiência em Motores Elétricos, que ocorreu em fevereiro de 2011 na cidade de Fortaleza, e, em fase de divulgação, o II Fórum Internacional de Eficiência em Motores Elétricos, a ser realizado em dezembro de 2017, também em Fortaleza.

6.1 Recomendações para Trabalhos Futuros

O trabalho aqui apresentado, apesar de ter sido direcionado para o caso de aumento de eficiência de motores elétricos de indução, abordou diversas áreas relacionadas e levantou questionamentos que permitem uma continuidade em trabalhos futuros. Eis algumas sugestões:

- A Ferramenta Gráfica para o cálculo da viabilidade de projetos de eficiência energética aqui apresentada ainda está em sua versão inicial e deve ser desenvolvida para a inclusão de novas funcionalidades. A Ferramenta foi utilizada para estudar os casos de aumento na eficiência de motores elétricos e mostrou sua eficácia ao explicitar as situações de viabilidade para a aquisição de motores mais eficientes ou a substituição de motores em operação por outros mais eficientes. Existem diversas aplicações para esta ferramenta, praticamente qualquer projeto que envolva aumento de eficiência pode ser visualizado graficamente na maneira proposta, desde melhorias em sistemas de refrigeração até a viabilidade na escolha entre uma geração na forma eólica, hidroelétrica ou solar, todas estas situações apresentam situações de carregamento e tempo de operação e possuem um retorno associado a um investimento e, assim, podem ser visualizadas por esta ferramenta. Diversas situações podem ser simuladas e a decisão pelo projeto mais viável fica facilitada;
- A taxa de escalada da energia (e) é um parâmetro fundamental para a análise da viabilidade de projetos de eficiência energética e, como ficou comprovado, traz benefícios para a viabilidade deste projetos; no entanto, no Brasil esta taxa não está definida para nenhuma forma de energia. Faz-se necessário definir uma metodologia para aferir esta taxa e definir uma expectativa para o seu comportamento para os próximos 40 anos para o Brasil, tomando como modelo a experiência americana;
- Este trabalho mostrou a necessidade de se conhecer melhor as expectativas do consumidor em relação à melhoria da eficiência de equipamentos elétricos. Analisar o comportamento de consumidores relacionadas à eficiência energética pode levar ao aprimoramento desta ferramenta, incorporando novas funcionalidades que permitam, por exemplo, o monitoramento do consumo energético, a simulação de viabilidade de aquisição de equipamentos mais eficientes baseadas nas características de consumo, etc.;
- A coleta de informações sobre a produção, as vendas e os hábitos de uso de motores elétricos no Brasil está deficiente e desatualizada. Uma pesquisa para determinar as características de operação dos motores elétricos em uso no Brasil para os diversos setores da economia deve ser proposta;

REFERÊNCIAS

111TH CONGRESS. **H.R. 2454 - American Clean Energy and Security Act of 2009**. Washington. 2009.

ABINEE. Comportamento da Industria Eletrica e Eletronica. **Associacao Brasileira da Industria Eletrica e Eletronica/Rio de Janeiro**, 2014.

ABNT. NBR 5383-1 Máquinas Elétricas Girantes Parte 1: Motores de Indução Trifásicos-Ensaio. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2002.

ABNT. NBR 17094-1 Máquinas Elétricas Girantes-Motores de Indução Parte 1: Trifásicos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2013.

AGAMLOH, EMMANUEL B.; ANDRADE, CASSIO T. C. ; HUSAIN, I. ; **Assessment of prospects of prescribing super-premium efficiency levels with induction motor technology**. Proceedings of the 8th International Conference EEMODS'2013 - Energy Efficiency in Motor Driven Systems. **Anais...**Rio de Janeiro: 2013

AGAMLOH, E. B. **A Comparison of direct and indirect measurement of induction motor efficiency**. Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International, p. 36–42, 2009.

AGAMLOH, E. B.; DAE-WON, K.; JOO-YOUNG, J. **An automated test system for induction motor efficiency**. Proceedings of the EEMODS'11 International Conference on Energy Efficiency on Motor Driven Systems Washington. **Anais...**2011

AGUIAR, F. J. P. **Influência da Não-Conformidade senoidal da Tensão de Alimentação nas Perdas de Magnetização em Transformadores de Potência**. Universidade Federal do Ceará, 2005.

AHERN, J. E. **Exergy method of energy systems analysis**. New York: John Wiley, 1980.

ALMEIDA, A. T. D.; FERREIRA, F. J. T. E. **Technical and Economical Considerations on SuperPremium motors**. IEEE Transactions on Industry Applications. **Anais...**2014

ANDRADE, C. T. **Análise de Métodos para a Determinação da Eficiência de Motores de Indução Trifásicos**. 2009. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

ANDRADE, C. T. C. **Curvas de Viabilidade**, Fortaleza, 2015.

ANDRADE, C. T. C.; PONTES, R. S. T. **Increase in Equipments Efficiency Performance - The Brazilian Mandatory Standards Experience –**. XI Spanish-Portuguese Conference on Electrical Engineering. Zaragoza. **Anais...**2009

ANDRADE, C. T. C.; PONTES, R. S. T. Economic analysis of Brazilian policies for energy efficient electric motors. **Energy Policy**, v. 106, p. 315–325, 2017.

ANDRESEN, B; BERRY, R. S.; SALMON, P. **Optimisation processes with finite-time thermodynamic**. (C. B. Fazzolare, R A and Smith, Ed.) Energy Use Management: Proceedings of the International Conference. **Anais...**New York: Pergamon Press, 1977

ANEEL. **Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética**. Brasília: 2008.

ANEEL. **ANEEL-Legislação**. 2014a. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/pesquisadigit.cfm>>. Acesso em: 2 de mar de 2014.

ANEEL. **Resolução ANEEL 414/2010 -Condições Gerais do Fornecimento de Energia Elétrica**. . 2014 b.

ANEEL. **Tarifas de Eletricidade**. 2015a. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>>. Acesso em 5 de out. de 2015.

ANEEL. **Incentivo à substituição de motores elétricos: promovendo a eficiência energética no segmento de força motriz**Brazil, 2015b.

ANG, B. W. Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: From energy-GDP ratio to composite efficiency index. **Energy Policy**, v. 34, n. 5, p. 574–582, 2006.

ANSI/ASME STANDARDS. **ASME performance test codes, supplement on instruments and apparatus, part 1: measurement uncertainty**. New York, 1985.

AOULKADI, M.; BINDER, A. Comparison of different evaluation methods to determine stray load losses in induction machines with Eh-star method. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 44, n. 6, p. 1675–1682, 2008.

ASME. **ASME PTC 19.1 2005, test uncertainty**. 2005.

ASSUMPÇÃO, M. G. **Implementação da Lei de Eficiência Energética**. Brasília/DF, 2002a.

AULETE. **Aulete Digital**. Disponível em: <<http://www.aulete.com.br/>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Sistema de Metas para a Inflação**. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pt-br#!n/sismetas>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

BENAITEAU, J-Y.; RIOUT, J.; DUCHAZEAUBENEIX, B. **Life Cycle Costing of Valve Systems**. Proceedings of the 6th international conference eemods '09 energy efficiency in motor driven systems. **Anais...**2009

BEVINGTON, PHILIP R.; ROBINSO, D. K. **Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences**. 3. ed. McGraw-Hill Higher Education, 2003.

BNDES. **BNDES - FINEM Eficiência Energética**. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-eficiencia-energetica>>. Acesso em: 20 out. 2017.

BONNETT, A. H.; YUNG, C. Increased efficiency versus increased reliability. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 14, n. 1, p. 29–36, 2008.

BORDEAUX-RÊGO, RICARDO; PAULO, GORET PEREIRA; ALMEIDA SPRITZER, I. **Viabilidade Econômica de Projetos**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2008.

BORTONI, E. C. et al. Assessment of the achieved savings from induction motors energy efficiency labeling in Brazil. **Energy Conversion and Management**, v. 75, p. 734–740, 2013.

BRANDON, A.; LEWIS, G. Reducing household energy consumption: a qualitative and quantitative field study. **Journal of environmental psychology**, v. 19, n. 1, p. 75, 1999.

BRUNNER, C. U.; WERLE, R. **Market Transformation Program for Electric Motor Systems-Global progress report and outlook**. Proceedings of the 80 International Conference, EEMODS, **Anais...** 2013.

CARDOSO, R. B. **Estudo dos impactos energéticos dos Programas Brasileiros de Etiquetagem Energética: Estudo de caso em refrigeradores de uma porta , condicionadores de ar e motores elétricos**. Tese submetida a Universidade Federal de Itajubá, 2012. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0039606.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2016..

CEC - CALIFORNIA ENERGY COMISSION. **Efficiency Regulations: Appliances**, 2010. Disponível em: < <http://www.energy.ca.gov/appliances/>>. Acesso em: 10 mar.. 2012

CGIEE/MME. **Relatório de Atividades do Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEEMME**. 2014. Disponível em: <www.mme.gov.br>. . Acesso em: 15 jun.. 2015.

COLLINS, C. **Transport Energy Management Policies: Potential in New Zealand**. Wellington: 1982.

COMPANY, R. S. M. **Means Building Construction Cost Data**. Disponível em: <<https://www.rsmeans.com/>>. Acesso em: 15 maio. 2017.

CORUM, K. R.; O'NEAL, D. L. Investment in energy-efficient houses: An estimate of discount rates implicit in new home construction practices. **Energy**, v. 7, n. 4, p. 389–400, 1982.

CPUC. California Standard Practice Manual Economic Analysis of Demand-Side Programs and Projects,. 2001, p. 37.

CULLEN, J. M.; ALLWOOD, J. M. Theoretical efficiency limits for energy conversion devices. **Energy**, v. 35, n. 5, p. 2059–2069, 2010a.

CULLEN, J. M.; ALLWOOD, J. M. The efficient use of energy: Tracing the global flow of energy from fuel to service. **Energy Policy**, v. 38, n. 1, p. 75–81, 2010b.

DE ALMEIDA, A. T. et al. **EUP Lot 11 Motors**, 2008. Disponível em: <http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Lots/Final_Documents/Lot11_Motors_FinalReport.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2012.

DE ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, F. J. T. E.; FONG, J. A C. Standards for Efficiency of Electric Motors. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 17, n. 1, p. 12–19, 2011.

DECICCO, J. et al. U.S. consumer attitudes and expectations about energy. **Energy Policy**, v. 86, p. 749–758, 2015.

DGSE/MME. **Electricity Auction/Jan-2016**. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1540210/Quadro+Leiloes+Boletim+Tarif%C3%A1rio+1-16.pdf/51c2134f-d546-44a6-a581-5b1c52ded7e7>>. Acesso em: 12 jun. 2016.

DOPPELBAUER, M. **Measurement Uncertainty of Direct And Indirect Efficiency Testing of Induction Machines**. Proceedings of the 10th International Conference EEMODS'15. **Anais...2015**

ELETROBRAS, P. &. **Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - ano base 2005**. Programa Nacional de Eficiência Energética/Rio de Janeiro, 2007.

EL-IBIARY, Y. An Accurate Low-Cost Method for Determining Electric Motors' Efficiency for the Purpose of Plant Energy Management. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 39, n. 4, p. 1205–1210, 2003.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Brazilian Energy Balance 2015Epe**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2017.

ENERGIA, P. N. DE. **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério das Minas e Energia. 2007.

EPA. **Climate Protection Partnerships- 2014 Report**. Environmental Protection Agency. Washington: 2014.

EPE. **O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas : Produção e Uso de Energia**. 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/NT COP21 iNDC.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2017.

ESPOSITO, A, S. . **BNDES e a Eficiência Energética**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/BNDES_Forum_de_Ef_En_Aneel_\(maio_de_2015\)_Alexandre.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/BNDES_Forum_de_Ef_En_Aneel_(maio_de_2015)_Alexandre.pdf)>. Acesso em: 27 maio. 2017.

EU DIRECTIVE. Directive 2012/27/EU. . 2012, p. 1–56.

EU EUROPEAN COMMISSION. **Improving the Penetration of Energy Efficient Motor and Drives** EU European Commission SAVE II program, 2000.

Evolução da Taxa de Juros Real de Equilíbrio no Brasil. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/htms/relinf/port/2012/09/ri201209b6p.pdf>>. Acesso em: 20 maio. 2017.

FERREIRA, FERNANDO J. T. E.; DE ALMEIDA, A. T. ;; QUINTINO, ANDRÉ; ABRANTES, N. **Four-Quadrant Electric Motor Test Bench with a Fully Programmable Load Profile**. Proceedings of the EEMODS'11 International Conference on Energy Efficiency on Motor Driven Systems. **Anais...2011**

FERREIRA, F. J. **Strategies to Improve the Performance of Three-phase induction motor driven systems**. Tese submetida a Universidade de Coimbra. Portugal. 2018

FERREIRA, F. J. T. E.; DE ALMEIDA, A. T. **Considerations on in-field induction motor load estimation methods**. Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, ICEM'08, **Anais...** 2008.

FUCHSLOCH, J. F.; FINLEY, W. R.; WALTER, R. W. The next generation motor. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 14, n. 1, p. 37–43, 2008.

FULLER, S. K.; PETERSEN, S. R. **Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program**. NIST Handbook 135. 1995.

GARCIA, A. G. P. et al. Energy-efficiency standards for electric motors in Brazilian industry. **Energy Policy**, v. 35, n. 6, p. 3424–3439, 2007.

GREENE, D. L.; EVANS, D. H.; HIESTAND, J. Survey evidence on the willingness of U.S. consumers to pay for automotive fuel economy. **Energy Policy**, v. 61, p. 1539–1550, 2013a.

GREENE, D. L.; EVANS, D. H.; HIESTAND, J. Survey evidence on the willingness of U . S . consumers to pay for automotive fuel economy. **Energy Policy**, v. 61, p. 1539–1550, 2013b.

HAAS, R. Energy efficiency indicators in the residential sector. **Energy Policy**, v. 25, n. 7-9, p. 789–802, 1997.

HANIMANN, R.; VINTERBOCK, J.; MARK-HERBERT, C. Consumer behavior in renewable electricity: Can branding in accordance with identity signaling increase demand for renewable electricity and strengthen supplier brands? **Energy Policy**, v. 78, p. 11–21, 2015.

HARRISON, M. **Valuing the Future: The social discount rate in cost-benefit analysis**. Productivity Commission/Australian Government. Melbourne.2010.

HOPE, C. W. Assessing Renewable Energy Research and Development. **Energy**, v. 7, n. 4, p. 319–333, 1981.

HYDRAULIC INSTITUTE; EUROPUMP; OFFICE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGIES - US DEPARTMENT OF ENERGY. **Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems - Executive Summary**. Renewable Energy. 2001.

IBGE. **Pesquisa Industrial Anual - Produto 2015**, IBGE. 2015.

IEA. **IEA Online Data Services**. Disponível em:
<<http://data.iea.org/ieastore/statslisting.asp>>. Acesso em: 20 jul. 2017

IEA. **Key World Energy Statistics**International Energy Agency. 2017b.

IEC. **IEC 60034-2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)**. IEC. 2014.

IEEE. **Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems Electronics**, IEEE.2007.

IEEE MACHINERY COMMITTEE. **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and ANSI/IEEE Standards**, 2004. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/reading/ieee/uupdates/errata/index.html>>, Acesso em: 25 ago. 2014.

INMETRO. **Inmetro - Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbeSelo.asp>>. Acesso em: 28 mai. 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Efficiency Indicators: Essentials for Policy Making**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IEA_EnergyEfficiencyIndicators_EssentialsforPolicyMaking.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2017.

IPEA. **IpeaData**. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 20 outi. 2016.

ISO. **ISO 5725: accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results**. 1994.

JAFFE, ADAM B.; STAVINS, R. N. . The energy-efficiency gap “What does it mean?” **Energy Policy**, v. 22, n. 10, p. 804–810, 1994.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. **Avaliação de dados de medição — Guia para a expressão de incerteza de medição**, Inmetro. 2008. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf>. Acesso em: 15 set. 2016

KARANFIL, FATI; LI, Y. Electricity consumption and economic growth: Exploring panel-specific differences. **Energy Policy**, v. 82, p. 264–277, 2015.

KIT (KARISRUICHE INTITUTE OF TECHNOLOGY). **The invention of the electric motor 1800-1854**. Disponível em: <<http://www.eti.kit.edu/english/1376.php>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

KNITTEL, C. R.; GREENSTONE, M.; DE LA PENA, C. T. Understanding the economics of energy Efficiency. **Energy Efficiency Economics/MIT Energy Initiative**, p. 22, 2014.

KRENZ, J. H. **Energy Conversion and Utilization**. 2. ed. Boston: Allyn and Bacon, 1984.

KUECK, J. D. et al. **Assessment of Available Methods for Evaluating In-Service Motor Efficiency**. Lockheed Martin Energy Research Corporation. 1996..

KULTERER, K.; WERLE, R. **Analysis of Motor Policies around the World**. Proceedings of the EEMODS’11 International Conference on Energy Efficiency on Motor Driven Systems. **Anais...2011** Disponível em: <https://www.motorsystems.org/files/otherfiles/0000/0076/kulterer_motor_policies_12092011.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2016.

LAVAPPA, P. D.; KNEIFEL, J. D. **Energy Price Indices and Discount Factors for Life-Cycle Cost Analysis – 2016 Annual Supplement to NIST Handbook 135 National Institute of Standards and Technology . U.S Department of Commerce**. Gaithersburg, MD: [s.n.]. Disponível em: <<http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2016/NIST.IR.85-3273-31.pdf>>.

LAVAPPA, P. D.; KNEIFEL, J. D. **Energy Price Indices and Discount Factors for Life-**

Cycle Cost Analysis – 2016 Annual Supplement to NIST Handbook 135 National Institute of Standards and Technology . U.S Department of Commerce. Gaithersburg, MD: 2016. Disponível em: <<http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2016/NIST.IR.85-3273-31.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2017

LU, B. et al. **Solving induction motor equivalent circuit using numerical methods for an in-service and nonintrusive motor efficiency estimation method.** Conference Proceedings - IPEMC 2006: CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, v. 2, p. 837–842, **Anais...**2007.

LU, B.; HABELTLER, T. G.; HARLEY, R. G. **A nonintrusive efficiency estimation method for in-service motor testing using a modified induction motor equivalent circuit.** PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, **Anais...**2006.

LYAMA, S.; BLUM, H. **Estimating the US Motor Market Baseline.** Proceedings of the 8th International Conference eemods '11, **Anais...** 2011.

MALINOWSKI, J.; MCCORMICK, J.; DUNN, K. Advances in construction techniques of AC induction motors: Preparation for super-premium efficiency levels. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 40, n. 6, p. 1665–1670, 2004.

MCMAHON, J. E. et al. **Uncertainty and sensitivity analyses of ballast life-cycle cost and payback period** Environmental Energy Technologies Division. Berkeley, CA: 2000. Disponível em: <<http://www.osti.gov/scitech/biblio/767554>>. Acesso em: 15 set. 2011.

MEYERS, STEPHEN; WILLIAMS, ALISON; CHAN, P. **Energy and Economic Impacts of U . S . Federal Energy and Water Conservation Standards Adopted From 1987 Through 2012.** Lawrence Berkeley National Laboratory. 2013.

MEYERS, S.; MCMAHON, J.; ATKINSON, B. **Realized and Projected Impacts of U.S. Energy Efficiency Standards for Residential and Commercial Appliances.** Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.

MIKAMI, H. et al. Historical evolution of motor technology. **Hitachi Review**, v. 60, n. 1, p. 38–45, 2011.

MISES, L. V. **Intervencionismo, uma Análise Econômica.** 2. ed. Instituto Ludwig von Mises Brasil, 1940.

MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética-Premissas e Diretrizes Básicas,** Ministério de Minas e Energia, Brasília. 2011.

MME. **Legislação e Relatórios de Eficiência Energética.** Ministério de Minas e Energia, Brasília. 2014.

MOREAU, E. **A Wide Range of Very High Efficiency Permanent Magnet Motors for Variable Speed Applications.** Proceedings of the 6th International Conference eemods '09. **Anais...**Nantes: 2009

MORRIS, ALAN S.; LANGARI, R. **Measurement and Instrumentalization - Theory and Application.** Elsevier, 2012.

NADEL, S. et al. **Energy-efficient motor systems: a handbook on technology, program, and policy opportunities**. American Council for an Energy-Efficient Economy. Washington, DC: 2002.

NADEL, S. **which energy efficiency policies saved the most last year?** ACEE (American Council for an Energy-Efficient Economy). 2015. Disponível em: <<http://aceee.org>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

NATIONAL ACTION PLAN FOR ENERGY EFFICIENCY. **Understanding Cost-Effectiveness of Energy Efficiency Programs: Best Practices, Technical Methods, and Emerging Issues for Policy Makers** Energy and Environmental Economics, Inc. and Regulatory Assistance Project. 2008. Disponível em: <<http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-programs/suca/resources.html>>. Acesso em: 15 abr. 2016

NATURAL RESOURCES CANADA. **RETSscreen**. Disponível em: <<http://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

NCSU. **FREEDM Systems Center**. Disponível em: <<https://www.freedm.ncsu.edu/>>. Acesso em: 12 jul. 2017.

NETTO, L. F. **Conversão Direta da Energia**. Feira de Ciências, 1999. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala21/21_12_01.asp>. Acesso em: 15 mar. 2017.

NOGUEIRA, L. A. H. et al. Evaluation of the energy impacts of the Energy Efficiency Law in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 24, p. 58–69, 2015.

OIKONOMOU, V. et al. Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. **Energy Policy**, v. 37, n. 11, p. 4787–4796, 2009.

PARLIAMENT, European. **DIRECTIVE 2009/125/EC**. . 2009.

PATTERSON, M. G. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. **Energy Policy**, v. 24, n. 5, p. 377–390, 1996.

PÉREZ-LOMBARD, L. et al. Constructing HVAC energy efficiency indicators. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 619–629, 2012.

PETRO, J. **Cost-Effective Construction of High Efficiency Motors**. Proceedings of the 6th International Conference eemods'09. **Anais...2009**

PETRO, J. **Advanced Materials for Motor Laminations : Past , Present and Future**. Proceedings of the 10th International Conference EEMODS'15. **Anais...Helsinki: 2015**

PROCEL/ELETROBRÁS. **ProcelInfo**. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp>>. Acesso em: 1 jun. 2014.

PROCEL/ELETROBRÁS. **PROCEL Results 2015**. Programa Nacional de Eficiência Energetica/Rio de Janeiro. 2015.

PROGRAMME, D. **Energy and the Challenge of Sustainability Assessment**. 2000. Disponível em: <<http://www.amazon.com/dp/9211261260>>. Acesso em: 5 nov. 2016.

REISTER, B.; NATIONAL, O. R.; RIDGE, O. the Link Between Developing Energy and Gdp in. **Energy**, v. 12, n. 6, p. 427–433, 1987.

RENÉ, B.J.;ELBURG,VAN. **Methodology for Ecodesign of Energy-related Products**. 2016.

ROBERTSON, A. **InvestmentMine**. Disponível em: <<http://www.infomine.com/investment/metal-prices/copper/>>. Acesso em: 15 out. 2017.

ROSENQUIST, G. et al. Energy efficiency standards for residential and commercial equipment: Additional opportunities. **Energy Policy**, v. 34, p. 3257–3267, 2006.

SADORSKY, P. The impact of financial development on energy consumption in emerging economies. **Energy Policy**, v. 38, p. 2528–2535, 2010.

SAKTHIVEL, V. P.; BHUVANESWARI, R.; SUBRAMANIAN, S. Non-intrusive efficiency estimation method for energy auditing and management of in-service induction motor using bacterial foraging algorithm. **IET Electric Power Applications**, v. 4, n. March, p. 579, 2010.

SCHAEFFER, R. et al. **Avaliacao dos Indices de Eficiência Energetica para Motores Trifasicos de Inducao**. Clasp/Un/Desa. 2005.

SHARON, G. L.; LEVIN, S. L.; MEISEL, J. B. A Dynamic Analysis of the Adoption of a New Technology: The Case of Optical Scanners. **The Review of Economics and Statistics**, v. 69, n. 1, p. 12–17, 1987.

SLESSER, M. **Dictionary of Energy**. New York: Schocken Books, 1982.

SLOUGH, T.; URPELAINEN, J.; YANG, J. Light for all? Evaluating Brazil's rural electrification progress, 2000-2010. **Energy Policy**, v. 86, p. 315–327, 2015.

SOARES, G. A. et al. **IS IE3 Efficiency Class: A Feasible Next Step for Industrial Motor's MEPS in Brazil?** Proceedings of the 8th international conference EEMODS '2013. **Anais...2013**

SORRELL, S. **The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency**. UK Energy Research Centre, October, 2007.

SPREI, F.; KARLSSON, S. Energy efficiency versus gains in consumer amenities-An example from new cars sold in Sweden. **Energy Policy**, v. 53, p. 490–499, 2013.

SRC. **Alion System Realibility Center**. Alion System Realibility Center. 2017. Disponível em: <<https://src.alionscience.com/>>. Acesso em: 15 jun. 2017.

STANLEY, S. **MTBF, MTTR, MTTF & FIT Explanation of Terms, I** IMC Network. p. 1–6. 2011. Disponível em: <www.imcnetworks.com>. Acesso em: 16 jun. 2017.

STEINBACH, J.; STANIASZEK, D. **Discount rates in energy system analysis Discussion Paper**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://bpie.eu/publication/discount-rates-in-energy-system-analysis/>>. Acesso em: 12 fev. 2016.

SUTHERLAND, R. J. Energy Efficiency or the Efficient Use of Energy Resources? **Energy Sources**, v. 16, n. 2, p. 257–268, 1994.

SÜTTERLIN, B.; BRUNNER, T. A.; SIEGRIST, M. Who puts the most energy into energy conservation? A segmentation of energy consumers based on energy-related behavioral characteristics. **Energy Policy**, v. 39, n. 12, p. 8137–8152, 2011.

TANAKA, K. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. **Energy Policy**, v. 36, n. 8, p. 2877–2892, 2008.

TAYLOR, J. R. **An Introduction To Error Analysis The Study Of Uncertainties In Physical Measurements**. 2. ed. Sausalito, CA: University Science Book, 1997.

TAYLOR, R. P. et al. **FINANCING ENERGY EFFICIENCY: Lessons from Brazil, China, India, and Beyond**, Energy Sector Management Assistance Programme. Washington: 2008.

TECHNOLOGY, N. I. OF S. AND T. **The Energy Escalation Rate Calculator/EERC**, 2017. Disponível em: <<https://energy.gov/eere/femp/energy-escalation-rate-calculator-download>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

THORNTON, D. L. **The Discount Rate and Market Interest Rates : What ' s the Connection ?** Federal Reserve Bank of St Louis, 1980.

TIEBEN, R.; WERLE, R.; BRUNNER, C. U. . **EASY- Lessons learned from four years of the Swiss EASY audit and incentive program**. Proceedings of the 10th International Conference EEMODS'15. **Anais...**Helsinki: 2015

TONG, W. **Mechanical Design of Electric Motors**. crc Press, 2014.

TOPPING, J. **Errors of Observation and Their Treatment**. Chapman and Hall, 1957. v. 25

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **United States Industr Industrial Electric Motor Systems Market Market Opportunities Assessment**. US Department of Energy/Burlington, December, p. 386, 2002.

UPADHYAY, PARAG; FRANK, N. **Comparison of permanent magnet machine technologies based on system cost for harsh environment application**. Proceedings of the 9th international conference EEMODS '2015. **Anais...**Helsinki: 2015

US DEPARTMENT OF ENERGY. Department of Energy. vol .76, p. No. 164. 2011

US DEPARTMENT OF ENERGY. **Motor Challenge - Buying an Energy-efficient Motor**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/mc-0382.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

VAIRAMOHAN, BASKAR; SAMOTYJ, M. **Evaluation of a new high efficiency motor and drive solution for current and emerging applications**. Proceedings of the 9th international conference EEMODS '2015. **Anais...**Helsinki: 2015

VHG DG ENTR (EUROPEANCOMMISSION). **Methodology Study Ecodesign for Energy using ProductsEuropean Comission**. 2005.

VINE, E.; DU PONT, P.; WAIDE, P. Evaluating the impact of appliance efficiency labeling programs and standards: process, impact, and market transformation evaluations. **Energy**, p. 1041–1059, 2001.

WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. **Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems**. Internationale energy agency, p. 132, 2011.

WEG. **Catálogo de Motores WEG**. WEG, Joinvile. 2016.

WERLE, R. et al. **Global effort for efficient motor systems : EMSA**. Proceedings of the 8th International Conference eemods '11. **Anais...**2011

WIEL, S.; MCMAHON, J. E. Governments should implement energy-efficiency standards and labels - cautiously. **Energy Policy**, v. 31, n. 13, p. 1403–1415, 2003.

WIEL, S.; MCMAHON, J. E. **Energy Efficiency Labels and Standarts-A Guide Book for Appliances, Equipment and Lightning**. Clasp. 2005.

WILSON, D. S.; SMITH, R. **Electric Motor Reliability Model**. New York: 1977.

WITTE, L. C.; SCHMIDT, P. S.; BROWN, D. R. **Industrial Energy Management and Utilization**. Hemisphere Publishing Corporation, New York. 1988.

WU, C. Power optimisation of a finite-time Camot heat engine. **Energy:The International Journal**, v. 13, n. 9, p. 681–687, 1988.

XUEWEI, Y.; MORENO-CRUZ, J.; CRITTENDEN, J. C. Regional Energy rebound Effect: The impact of economy-wide and sector level energy efficiency improvement. **Energy Policy**, v. 87, p. 250–259, 2015.

ZHANG, T.; SIEBERS, P.-O.; AICKELIN, U. A three-dimensional model of residential energy consumer archetypes for local energy policy design in the UK. **Energy Policy**, v. 47, n. 0, p. 102–110, 2012.

APÊNDICE A

A.1 – Descrição dos Equipamentos da Bancada de Testes

Item	Descrição	Marca	Qtdd.
1	Inversor de Frequência ACS800 - Regenerativo. Tensão de Entrada 240 VAC. 32.2A ND, 26A HD. NEMA 1 UL Tipo 1. Carcaça -R5	ABB	01
2	Motor de Indução de 10 cv, 4 polos, 230/460V, TEFC, Carcaça 215T	Siemens	01
3	Módulo de Acoplamento : Diâmetro : 2.5 in. , Comprimento : 4.75 in. Diâmetro de calibre externo : 1.375 in. , Diâmetro de calibre interno : 0.625 in. Torque Nominal 50 Nm, Velocidade 6.000 rpm	Helical	02 ^a
4	Disjuntor trifásico 40A 480y277 VCA ul1077 curva de proteção suplementar k, montado em trilho	ABB	02
5	Tomada 20A 250V 3Ph 3P4W Lkg Bw		02
6	Transdutor de Torque : MODEL MCRT® 48202V(5-2)NZ, 500 lbf-in (56.5 Nm), 7,000 rpm, Standard, ±0.2% do fundo de escala combinado, 60 pulsos por volta, Radial	Himmelstein	01
7	Display Modelo 723 Instrumento de Potência Mecânica, sinal condicionador de torque, velocidade e potência(hp), inclui sistema NIST de calibração rastreada, software de interface M700 PC e cabo serial RS232	Himmelstein	01
8	Base mecânica para a bancada de medição.		01
9	Cabo SOOW 8/4 600V		100 ft
10	Motor de Imã Permanente de 10 hp CA , 4 polos, 230/460V, TEFC.	WEG	01
11	Inversor para o Motor de Imã Permanente de 10 hp CA , 4 polos, 230/460V	WEG	01
12	Conjunto de acoplamento Multiflex Bore 5/8", Comprimento 3-5/16", Diâmetro Externo 4"		01
13	Conjunto de acoplamento Multiflex 1-3/8" Bore, Comprimento 3-5/16" h, Diâmetro Externo 4"		01
14	Conjunto de acoplamento Multiflex de Borracha para Diâmetro Externo 4"		01

A.2 Descrição do Ensaio para Cálculo da Eficiência de Motores Elétricos

1. Método Direto

1. Medir toda a combinação de resistências do enrolamento de terminal a terminal (R_a) com a máquina à temperatura ambiente (t_a). A resistência deve ser ajustada (R_b) à temperatura em condições de teste (t_b) usando a Expressão (A.1).

$$R_b = \frac{R_a(t_b + k_1)}{t_a + k_1} \quad (A.1)$$

Onde k_1 é 234.5 para Cobre e 225 para Alumínio.

Se não houver nenhuma maneira de medir a temperatura do enrolamento em condições de teste, o motor deve funcionar durante 2,5 horas antes do teste e a temperatura especificada é selecionada da Tabela A.1 com base na classe de isolamento do sistema.

Tabela A.1 - Temperatura especificada para cálculos de eficiência quando a temperatura não é medida na carga nominal da máquina.

<i>Classe de isolamento do Sistema</i>	<i>Temperatura em °C (temperatura total incluindo referência de ambiente de 25 °C)</i>
A	75
B	95
F	115
H	130

2. O motor é testado em condições de carga, alterando o torque de carga para seis pontos de operação (25, 50, 75, 100, 115 e 125% da carga nominal do motor testado) a partir do torque mais alto. Velocidade, corrente, torque, tensão, potência de entrada, fator de potência e temperatura ambiente são medidos.
 - o Correção de velocidade: o escorregamento do motor em teste (s_t) é calculado a partir da velocidade medida ((velocidade síncrona, n_s - velocidade medida, n_t)/velocidade síncrona, em pu) e ajustado para a temperatura observada do

estator (t_t) usando a temperatura especificada para correção da resistência (t_s) para obter o deslizamento corrigido (s_s) de (A.2).

$$s_s = \frac{s_t(t_s + k_1)}{t_t + k_1} \quad (A.2)$$

A velocidade corrigida é $n_s(1-s_s)$

- Correção do Dinamômetro: o torque lido no dinamômetro pode ser corrigido usando o torque medido e a potência de entrada com a menor carga possível (T_{LLP} e P_{LLP}); o torque medido sem carga e a potência de entrada com dinamômetro acoplado (T_{NLC} e P_{NLC}); e a energia de entrada medida sem carga com dinamômetro desacoplado (P_{NLU}), para obter a correção de torque (T_c) de (A.3)

$$T_c = \frac{T_{LLP} - T_{NLC}}{P_{LLP} - P_{NLC}} \times (P_{NLC} - P_{NLU}) - T_{NLC} \quad (A.3)$$

O torque corrigido é a soma de T_c e o torque medido. Esta correção é necessária para motores pequenos e quando o transdutor de torque não está alinhado com o eixo da máquina.

- Correção de Potência do Estator: Para colocar todas as medidas na mesma temperatura de referência, a energia de entrada do estator deve ser corrigida para uma temperatura especificada usando a resistência medida do estator na temperatura de teste (R_t , medida no desligamento do motor, após os testes) e R_t calculado na temperatura de referência usando (1) (R_s), e a corrente de estator medida (I_l) de (A.4).

$$P_c = I_l^2 R_s - I_l^2 R_t \quad (A.4)$$

A Potência do estator corrigida (P_{in} , potência de entrada) é a soma da potência de entrada medida nos pontos de teste e da correção de potência do estator (P_c).

3. A Eficiência em cada ponto testado é calculada a partir de (A.5) usando a potência do estator corrigida (P_{in}) e a potência do eixo (P_{out}).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (A.5)$$

A potência do eixo (P_{out} , em Watts) é obtida de (A.6) usando o Torque corrigido (T , em Nm) e a velocidade corrigida (n , em rpm).

$$P_{out} = \frac{Ts}{9,549} \quad (A.6)$$

2. Método Indireto com Perdas Segregadas

1. Os passos 1 a 3 do método anterior podem ser usados, exceto para a correção de potência do estator; e a Tabela A.1 não deve ser usada para a temperatura especificada, que deve ser medida a partir do aumento da temperatura da resistência.
2. Testes a vazio: O motor funciona durante 1 hora sem carga (desconectar do dinamômetro) com tensão e frequência nominal, e a tensão é reduzida até a corrente de entrada começar a aumentar. Em cada ponto de redução de tensão, é medido corrente, potência de entrada, tensão, fator de potência e temperatura ambiente.
3. Cálculo das Perdas:
 - **Perdas Mecânicas:** a partir da potência de entrada sem carga, subtrair as perdas do estator (I^2R , ajustado a temperatura do teste) e plotar os resultados em uma curva de potência versus tensão ao quadrado, estendendo a curva à tensão zero. O ponto da interceptação com ponto de tensão zero representam as perdas mecânicas (atrito e ventilação).
 - **Perdas do núcleo:** A partir da potência de entrada sem carga, subtrair as perdas do estator (I^2R , ajustado a temperatura do teste) e as perdas mecânicas.
 - **Perdas Resistivas do Estator (PSIR):** Usando a medida de resistência a frio de terminal a terminal ajustada à temperatura em (1), as perdas resistivas de estator são calculadas em todos os pontos dos testes de carga usando a corrente medida (I_l) em (A.7).

$$P_{SIR} = 1.5I_1^2R_b \quad (A.7)$$

- **Perdas Resistivas no Rotor:** A Expressão (A.8) é usada para calcular estas perdas. O escorregamento (s) não deve ser ajustado.

$$P_{RIR} = (\text{Potência de Entrada do Estator} - P_{SIR} - \text{Perdas no Núcleo}) * s \quad (A.8)$$

- **Perda Total Aparente:** Calculadas separadamente para cada ponto de carga subtraindo-se a potência de saída, em Watts, da potência de entrada, em Watts.
 - **Perdas Suplementares:** Trata-se da Perda Total Aparente subtraída das perdas anteriores (estator, rotor, núcleo e mecânicas). Essa perda pode ser suavizada usando uma análise de regressão linear com base na expressão da perda suplementar em função do quadrado do torque de carga. O resultado deve ter uma inclinação positiva e um fator de correlação maior que 0,9 (os piores pontos podem ser rejeitados para alcançar esse resultado), caso contrário, o teste em carga deve ser repetido. A Perda Suplementar corrigida aplicando-se o método de regressão linear, deslocando-se a curva para passar pela origem enquanto mantém-se a inclinação original.
- 4. Cálculo da Eficiência:** As perdas do estator e do rotor devem ter uma correção de temperatura e os valores da potência mecânica e da perda total também devem ser ajustados. A eficiência é calculada a partir de (A.9).

$$\eta = \frac{\text{potência de entrada} - \text{perdas}}{\text{potência de entrada}} \quad (\text{A.9})$$

- 5.** O Fator de potência é calculado de (A.10)

$$PF = \frac{\text{potência de entrada}}{\sqrt{3}VI} \quad (\text{A.10})$$

A.3 Resultados dos Testes de Eficiência

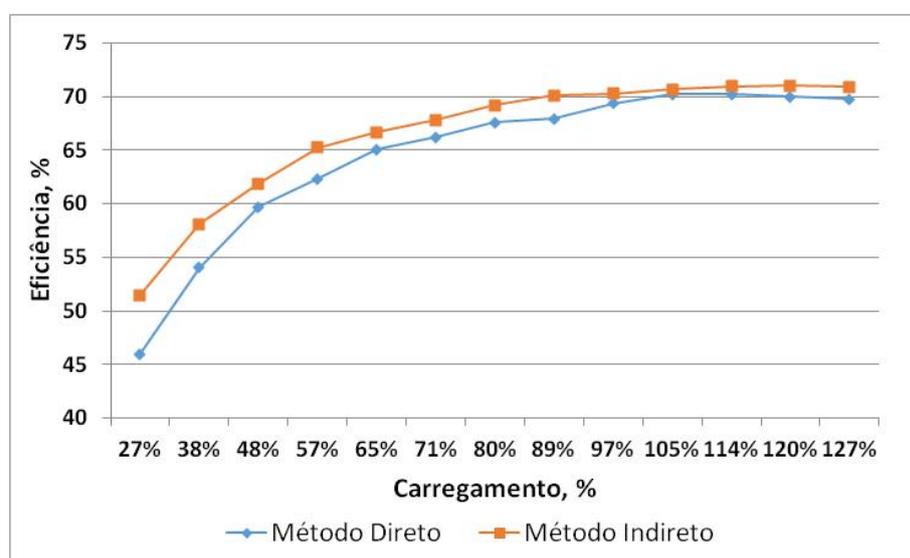
1. Teste com um Motor de Indução – IM

Tabela A.2 - Dados do Fabricante do motor de indução

Potência Nominal (cv)	0,5
Tensão (V)	230/460
Corrente (A)	2
	(230V)
Velocidade (rpm)	3450
Frequência (Hz)	60
Fases	3
Carcaça	
NEMA Desig Code	B
Nema Nom. Eff.	0,68
Fator de Potência	0,63
Fator de Serviço	1,25
Torque a Carga Máxima (LB-FT)	0,756
Corrente de Partida (A)	10,8
Corrente a Vazio (A)	1,35
Resistencia a 25o C (ohms)	8,96
Aumento de Temperatura a Carga Nominal	47
Aumento de Temperatura a Meia Carga	57

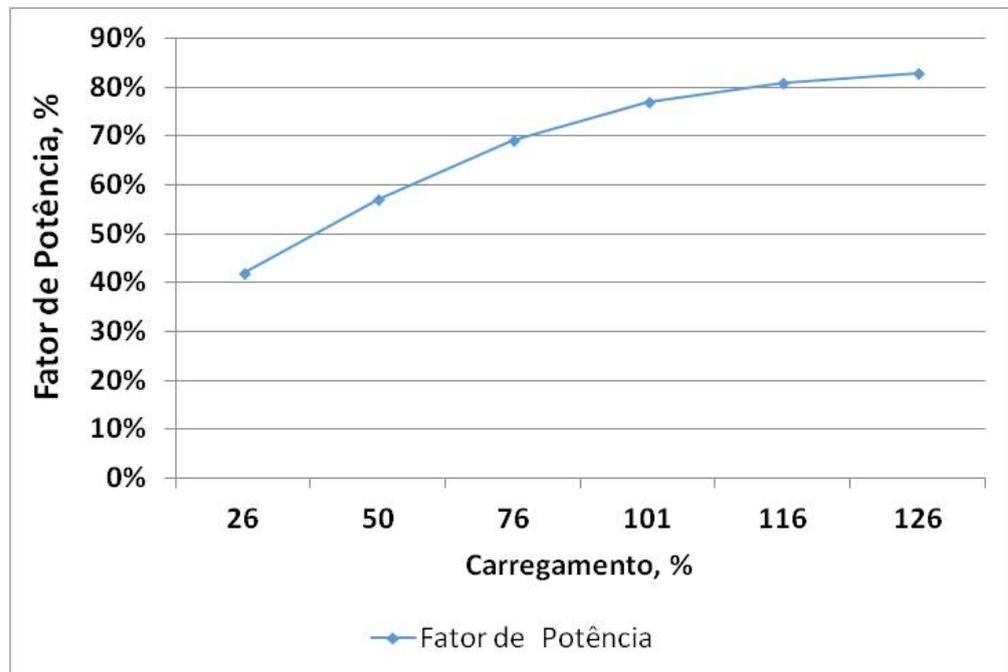
- Resultados dos Testes

Figura A.1 – Curvas de Eficiência a partir dos Métodos Direto e Indireto



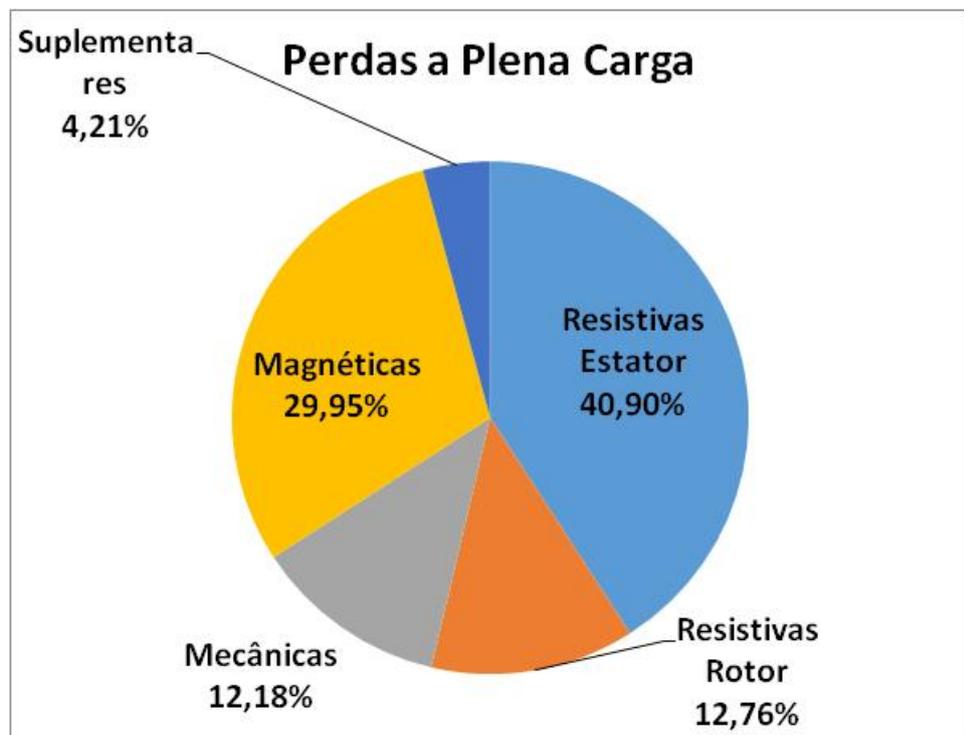
Fonte: elaborado pelo autor

Figura A.2 – Curva do Fator de Potência



Fonte: elaborado pelo autor

Figura A.3 – Distribuição de Perdas a Plena Carga do motor de indução de ½ cv



Fonte: elaborado pelo autor

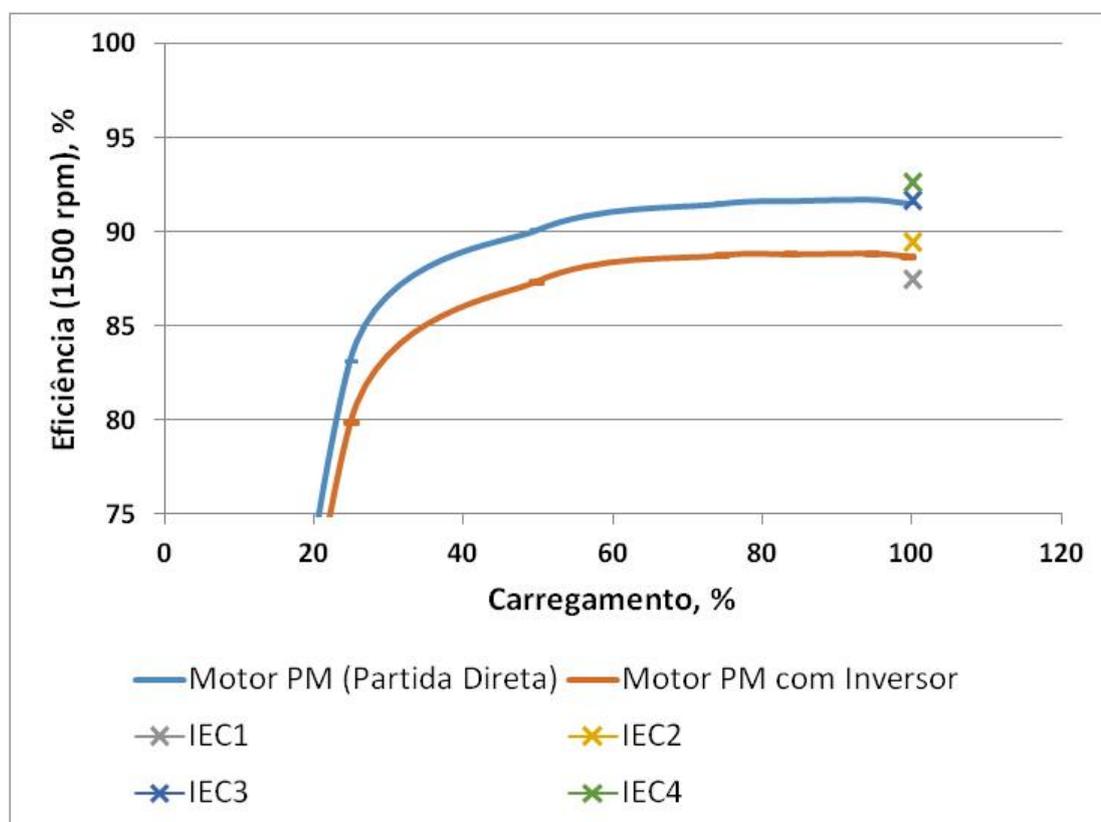
2. Teste com um Motor a Imã Permanente-PM

Tabela A.3 - Dados do Fabricante Motor PM

<i>Potência Nominal (cv)</i>	10
Tensão (V)	230/460
Corrente (A)	20.8
Velocidade (rpm)	1500
Frequência (Hz)	60
Fases	3
Carcaça	132M/L
Nema Nom. Eff.	93.0
Fator de Potência	0.93
Torque a Carga Máxima (LB-FT)	47.8

- Resultado do Teste com Método Direto

Figura A.4 – Curvas de eficiência a partir dos Métodos Direto com e sem Inversor de Frequência



Fonte: elaborado pelo autor

A.4 Análise da Incerteza na Medição

1 Descrição geral

Análises da incerteza na medição de grandezas requer o conhecimento das características dos equipamentos utilizados e a aplicação das técnicas resumidas no item 2.5 para o cálculo do erro no resultado final. Os erros existentes se classificam em sistemáticos e aleatórios, sendo que estes últimos requerem a realização de conjunto de medições e aplicação de análise probabilísticas para a sua determinação e eliminação. No caso aqui analisado, de medição da eficiência de motores elétricos, o cálculo da incerteza na medição se restringirá aos erros sistemáticos, com base nos dados dos fabricantes dos equipamentos e nas operações realizadas para a obtenção do resultado final.

O apêndice A.3 descreveu os procedimentos e as operações aritméticas realizadas para a obtenção da eficiência do motor elétrico. O apêndice A1 descreve as características gerais dos equipamentos da bancada, enquanto o próximo item se restringe às suas características referentes a erros de medição.

2 Equipamentos

O seguintes equipamentos foram utilizados na coleta de dados para a determinação da eficiência dos motores elétricos analisados:

➤ Resistência (Ω): As medições de resistência foram realizadas com um multímetro digital (Fluke 8088A) com exatidão de $\pm 0,02\%$ de leitura acrescido de $\pm 0,05\%$ de escala para medições na faixa de 200Ω . A variação com a temperatura de $\pm 0,003\%/^{\circ}\text{C}$ para leituras fora do intervalo de $18-28^{\circ}\text{C}$;

➤ Corrente (A): O instrumento utilizado (Yokokawa Power Analyser WT1800) apresenta exatidão de $\pm 0,1\%$ de leitura acrescido de $\pm 0,05\%$ de escala, ambos para uma frequência de 60 Hz. A variação com a temperatura de $\pm 0,03\%/^{\circ}\text{C}$ para leituras fora do intervalo de $18-28^{\circ}\text{C}$;

➤ Tensão (V): Foi utilizado o mesmo equipamento da Corrente, com as mesmas especificações de erro;

➤ Potência (W): Foi utilizado o mesmo equipamento da Corrente, com as mesmas especificações de erro;

➤ Velocidade (rpm): A velocidade foi coletada pelo sensor de torque e está sujeita aos mesmos erros descritos no item seguinte.

➤ Torque Rotativo (Nm): O equipamento utilizado na bancada apresenta uma exatidão de $\pm 0,2\%$ (incluindo os efeitos de não-linearidade, não repetibilidade e histerese), apresenta uma variação com a temperatura entre $\pm 0,004$ e $\pm 0,007\%/^{\circ}\text{C}$ (temperatura de referência de $23,9^{\circ}\text{C}$) e sua saída analógica está sujeita a um ruído elétrico (erro aleatório) de $0,1\%$.

➤ Display de Dados de Torque e Velocidade (Himmelstein Modelo 723): Apresenta precisão típica de $\pm 0,01\%$ em fundo de escala ($\pm 0,02\%$ no pior cenário e resolução de $\pm 0,01\%$ em fundo de escala, e variação com a temperatura de $\pm 0,001\%/^{\circ}\text{F}$.

A temperatura ambiente durante as medições realizadas estava em torno de 25°C . Além das inexatidões listadas acima, a bancada de testes apresenta acoplamentos de eixo que podem acrescentar erros na determinação do torque, o que pode ser minimizado com um perfeito alinhamento no acoplamento.

3 Cálculo da Incerteza na medição da eficiência

Cada um dos equipamentos listados no item anterior um ou mais erros sistemáticos em suas medições (os erros aleatórios não serão considerados) e estas grandezas medidas são submetidas a operações aritméticas (Apêndice A.3), o que requer a utilização das expressões (2.19) e (2.22) para o cálculo da incerteza do resultado final.

Os ajustes de temperatura não foram utilizados porque a temperatura média dos ensaios ($25,4^{\circ}\text{C}$) estavam dentro dos limites aceitáveis pelos equipamentos.

3.1 Erro na medição de Potência Elétrica

O cálculo da potência elétrica (P) é dado pela expressão (A.11).

$$P = \sqrt{3}VA\lambda \quad (\text{A.11})$$

Onde V é a tensão medida entre fases nos terminais de entrada da máquina, A é corrente de fase de alimentação da máquina e λ representa o fator de potência do conjunto medido.

O equipamento utilizado (Yokokawa Power Analyser WT1800) expressa o valor da potência no seu display (erro de escala $\pm 0,05\%$), mas obtêm o valor da potência a partir da expressão (A.11)

O erro do valor da potência aparente ($\sqrt{3}VA$) é dado pela exatidão do equipamento, enquanto o cálculo do fator de potência (λ) é feito por uma divisão de potências (divisão da potência ativa (P) pela potência aparente). Ou seja, temos uma divisão de medições de medições multiplicada por uma medição; assim, o erro total da medição da potência elétrica (e_{pex}) é dado pela expressão (A.12).

$$e_{pex} = \pm\sqrt{0,1^2 + 0,1^2 + 0,1^2} = \pm 0,17\% \quad (\text{A.12})$$

Para obter o erro total da medição desta potência (e_p), ao erro de exatidão deve ser acrescido o erro de escala ($\pm 0,05\%$), de acordo com a expressão (A.13)

$$e_p = \pm\sqrt{0,17^2 + 0,05^2} = \pm 0,18\% \quad (\text{A.13})$$

3.2 Erro na medição do Torque Mecânico

O torque mecânico da máquina é medido através de um display que apresenta uma precisão em pior cenário de $\pm 0,02\%$, valor este que deve ser acrescido à exatidão do transdutor de torque e ao erro de ruído de $\pm 0,1\%$. A expressão (A.14) representa o erro sistêmico da leitura de torque (e_{TMs}), e a expressão (A.15), o erro de medição (e_{TMP}).

$$e_{TMs} = \pm\sqrt{0,2^2 + 0,02^2} = \pm 0,201\% \quad (\text{A.14})$$

$$e_{TMP} = \pm\sqrt{0,201^2 + 0,1^2} = \pm 0,2245\% \quad (\text{A.15})$$

A medição do torque para o cálculo da eficiência de motores deve ser corrigida usando o valor de T_c calculado a partir da expressão (A.3) para excluir erros agregados de alinhamento do eixo motor e do acoplamento. Esta correção é um erro estimado que deve ser adicionado ao erro da medição do torque mecânico da expressão (A.15). Nas medições realizadas com os motores de indução e de Imã Permanente (Apêndice A.3), esta correção chegou a 0,52% do torque nominal do motor de indução e a 3,52% do torque nominal do motor de Imã Permanente.

3.3 Erro na medição das Perdas

As perdas do motor são calculados a partir de expressões de potência elétrica, calculada a partir do uso da resistência (Expressão A.7). O equipamento para medir resistência (Multímetro Digital Fluke 8088A) possui exatidão de $\pm 0,02\%$ acrescido de $\pm 0,05\%$ de escala para medições na faixa de 200 Ω . As medições realizadas estavam na faixa

de 1 a 10 Ω , o que indica que este equipamento não era o mais apropriado. Para este cálculo será mantido o erro de escala de $\pm 0,05\%$.

O erro de medição da resistência (e_r) é dado pela expressão (A.16).

$$e_r = \pm\sqrt{0.02^2 + 0.05^2} = \pm 0,054\% \quad (\text{A.16})$$

O erro total do erro das perdas resistivas (e_{PR}) é dado pela expressão (A.17).

$$e_{PR} = \pm\sqrt{0,1^2 + 0,1^2 + 0,054^2} = \pm 0,151\% \quad (\text{A.17})$$

3.4 Erro na medição da eficiência

Os métodos implementados para o cálculo da eficiência foram o Método Direto e o Método Indireto das Perdas Segregadas, cujos resultados são apresentados nas expressões (A.18) e (A.19), respectivamente.

$$\eta_{Direto} = \frac{P_{entrada}}{P_{saída}} \quad (\text{A.18})$$

$$\eta_{Indireto} = \frac{P_{entrada} - \Sigma Perdas}{P_{entrada}} \quad (\text{A.19})$$

- **Erro do Método Direto:** A Expressão (A.20) representa o cálculo do erro da medição de eficiência do Método Direto (e_{Direto}).

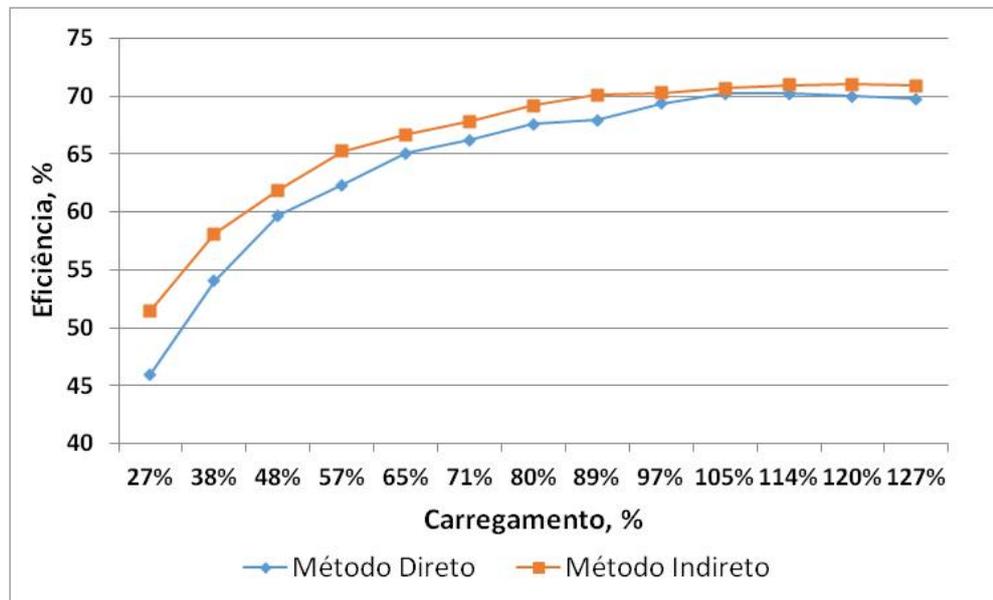
$$e_{Direto} = \pm\sqrt{e_P^2 + e_{TMP}^2} = \pm 0.29\% \quad (\text{A.20})$$

Este número, entretanto, deverá ser acrescido aos erros associados a acoplamento e alinhamento do eixo do motor com o transdutor de torque. Nas poucas medições realizadas, este erro variou entre 0,5% e 3,5% na medição do torque nominal do motor.

- **Erro do Método Indireto:** A Expressão (A.21) representa o cálculo do erro da medição de eficiência do Método Indireto ($e_{Indireto}$). O numerador da expressão (A.19) mostra uma adição de resultados que apresentam erros e, para calcular o erro resultante, faz-se necessário aplicar a expressão (2.21). Neste caso de adição de grandezas, o erro depende dos valores medidos, o que, para o motor de indução de 1/5 cv, que apresentou um somatório de erros para a carga nominal de 161 W e uma correspondente potência de entrada de 514 W, o erro do somatório do numerador é de 0,26%.

$$e_{Indireto} = \pm\sqrt{0.26^2 + e_p^2} = \pm 0.32\% \quad (\text{A.21})$$

Figura A.5 – Resultados da medição da eficiência do MIT de ½ cv/4 polos/60 Hz.



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura A.5 mostra a comparação entre os resultados dos métodos Direto e Indireto de Perdas Segregadas para a eficiência do motor de indução de ½ cv. Apesar de apresentar um resultado de erro inferior ao do método indireto, o método direto possui mais limitações devido ao acréscimo dos erros de acoplamento e alinhamento do eixo do motor sob teste com o transdutor de torque da bancada de ensaios. Análises probabilísticas comprovam uma maior estabilidade para os resultados do método direto (DOPPELBAUER, 2015).

Os resultados aqui apresentados tem o objetivo de exemplificar a incerteza na medição da eficiência, pois carecem de uma amostra maior de medições para comprovar cientificamente os números apresentados.

APÊNDICE B

B.1 Taxa de Escalada da Energia

1 Descrição geral

Algumas *commodities* não acompanham o ritmo de preços ditados pelo índice de inflação (FULLER; PETERSEN, 1995); o petróleo é uma delas e sua variação de preços afeta diretamente as tarifas de energia (eletricidade, óleo, gasolina, gás natural), que são responsáveis pela maior parcela do consumo de energia do planeta (cerca de 75%) (IEA, 2017b). Diante desse fato se faz necessário a definição de um índice que reflita a escalada ano-ano desta variação de preços acima da inflação. Este índice é a taxa de escalada da energia (e).

2 Cálculo da Taxa de Escalada da Energia

Cada tipo de energia terá uma taxa de escalada específica e ela poderá variar de região para região, por setor industrial e poderá variar ano a ano. A sua influência sobre o custo anual de energia (C_E) é dado pela expressão (B.1).

$$C_{PV} = (1 + e_1)C_E + (1 + e_1)(1 + e_2)C_E + \dots + (1 + e_1)(1 + e_2) \dots (1 + e_n)C_E \quad (B.1)$$

Em que:

C_{PV} é o valor presente da soma total dos custos anuais futuros de energia (C_E) sobre o período de estudo (vida útil).

e_j é a taxa anual de escalada de energia anual, que varia ano a ano durante o período de estudo.

n é o número de anos do período de estudo (normalmente associado à vida útil do equipamento/processo em análise).

Quando a taxa de escalada da energia se mantém durante o período de estudo, a expressão (B.1) pode ser simplificada para a expressão (B.2).

$$C_{PV} = \left[\frac{(1+e_{avg})^{n+1} - (1+e_{avg})}{e_{avg}} \right] * A \quad (B.2)$$

Em que e_{avg} é a taxa de escalada média anual.

A taxa de escalada média de energia(e_{avg}) é simplificada para a taxa de escalada da energia (e) durante o período de estudo. O seu valor pode ser gerado incluindo a inflação (nominal) ou excluindo a inflação (real), mas o valor real é o utilizado na análise de projetos de eficiência energética.

3 Taxa da Escalada da Eletricidade Industrial no Brasil

A taxa de escalada da energia é uma estimativa, e como tal requer um acúmulo de dados do passado e uma previsão de comportamentos futuros de todos os fatores que possam influenciar no preço da tarifa da energia sob análise. No caso brasileiro, a proposta de estimativa da taxa de escalada da eletricidade se faz analisando o comportamento passado da tarifa, no caso deste trabalho, da tarifa de eletricidade industrial. Além da tarifa da eletricidade, os dados de inflação também são requeridos. A Tabela B.1 apresenta os valores médios da tarifa de eletricidade industrial dos últimos 20 anos do Brasil, acompanhada dos dados do índice de inflação:

Tabela B.1 – Evolução das tarifas de eletricidade industrial dos últimos 20 anos no Brasil comparadas com a taxa de inflação.

<i>Ano</i>	<i>Tarifa Média da Elet. Industrial (R\$/MWh)</i>	<i>Taxa de Escalada Nominal (E_i)</i>	<i>Taxa de Inflação Anual (r_i)</i>	<i>Taxa de Escalada da Eletricidade Anual (e_i)</i>
1996	66,75		11,34%	2,15%
1997	73,11	9,54%	7,23%	6,92%
1998	79,48	8,71%	1,67%	-4,41%
1999	82,90	4,30%	9,11%	11,20%
2000	97,91	18,11%	6,21%	6,39%
2001	112,43	14,83%	7,94%	9,56%
2002	138,15	22,88%	12,15%	20,53%
2003	181,36	31,28%	8,92%	10,76%
2004	213,49	17,71%	6,28%	8,27%
2005	242,54	13,61%	4,93%	3,68%
2006	256,66	5,82%	2,06%	-3,61%
2007	258,81	0,84%	4,61%	-9,99%
2008	247,10	-4,53%	6,07%	1,07%
2009	259,55	5,04%	3,93%	-4,04%
2010	264,58	1,94%	6,23%	-1,04%
2011	278,47	5,25%	6,36%	-0,54%
2012	292,85	5,17%	5,73%	-17,82%
2013	254,22	-13,19%	5,64%	-1,33%
2014	268,06	5,44%	6,86%	23,76%
2015	367,28	37,02%	10,71%	2,15%

Fonte: elaborado pelo autor com base em(ANEEL, 2015a; IPEA, 2016)

A taxa de escalada de eletricidade industrial (e) para o período de n anos é calculada com base nas expressões (B.3) a (B.5).

$$E_i = (r_i - r_{i-1}) \quad (B.3)$$

$$e_i = \left(\frac{1 + E_i}{1 + r_i/100} \right) - 1 \quad (B.4)$$

$$e = \frac{\sum_i^n e_i}{n} \quad (B.5)$$

Em que:

E_i é a taxa de escalada nominal no ano i .

r_i é a taxa de inflação no ano i .

e_i é a taxa de escalada real no ano i .

A Tabela B.2 apresenta a análise estatística da taxa anual de escalada (e_i) da eletricidade industrial no Brasil do período de 1996 a 2015.

Tabela B.2 – Análise Estatística da taxa Anual da eletricidade industrial (1996-2015)

<i>Indicador Estatístico</i>	<i>Valor (%)</i>
Média	3,24%
Desvio Médio	7,57%
Desvio padrão	9,90%
Desvio Máximo (+)	23,76%
Desvio Máximo (-)	-17,82%
Mediana	2,15%

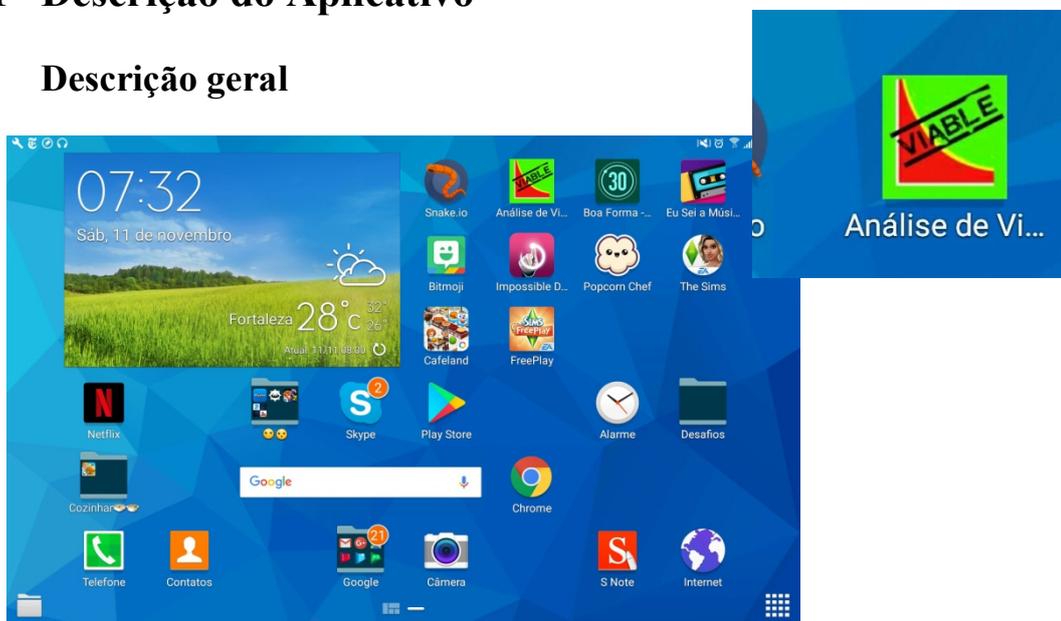
Fonte: elaborado pelo autor

A taxa de escalada de 3,24% foi calculada para a tarifa de eletricidade industrial do Brasil e pode ser utilizada como base para a análise de projetos de eficiência energética de equipamentos de uso final de eletricidade no país. Os índices estimados nos EUA (LAVAPPA; KNEIFEL, 2016a) para a taxa de escalada de eletricidade industrial nos EUA variam de 0,9 a -0,2 para os próximos 30 anos.

APÊNDICE C

C.1 Descrição do Aplicativo

1 Descrição geral



Curva de Viabilidade é uma nova ferramenta gráfica para avaliar economicamente projetos que envolvam a melhoria de eficiência energética. Suas principais vantagens são apresentar uma solução para análise de viabilidade econômica de projetos de eficiência energética aliando as características técnicas e financeiras do projeto em um mesmo ambiente gráfico (Curva de Viabilidade) e permitir a visualização da influência da incerteza dos parâmetros analisados (Análise da Incerteza). Este aplicativo apresenta a primeira das facilidades desta ferramenta que é verificar a viabilidade econômica de uma proposta para a melhoria de eficiência em comparação com outra proposta (com menor eficiência e consequente menor custo). O Aplicativo foi customizado para analisar a decisão de adquirir um novo motor elétrico, fazendo a comparação entre opções disponíveis com diferentes eficiências e preços de aquisição, mas pode ser utilizado para comparar projetos de eficiência com diferentes custos e eficiências gerais.

1.1 Dados Técnicos

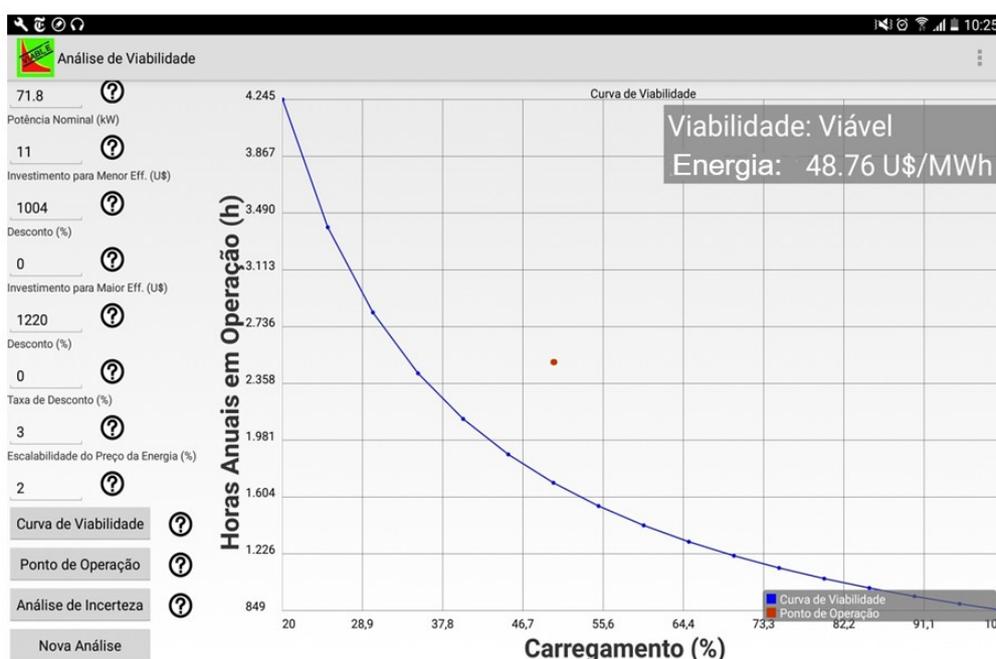
Aplicativo desenvolvido na tecnologia Android versão 4.0 (Ice Cream Sandwich) (API 15) que pode ser utilizado em aparelhos móveis (tablet e smartphones) com a versão mínima do Android 2.3 (Gingerbread) (API 10).

O Código do aplicativo está disponibilizado em <https://github.com/CassioTCA/Doutorado>. O Aplicativo está disponível para download em <https://github.com/CassioTCA/Curva-de-Viabilidade>.

2 Como Utilizar o Aplicativo Curva de Viabilidade

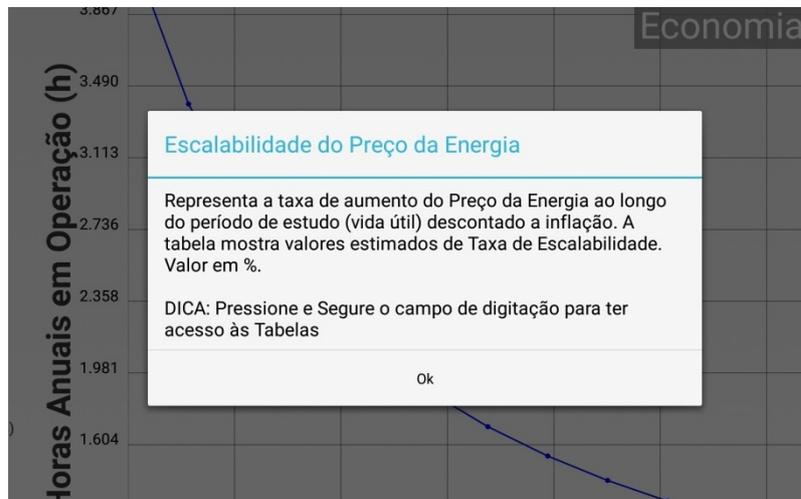
A descrição aqui apresentada também está disponível no ícone de Ajuda (Help) do Aplicativo

2.1 Tour Inicial



1. Ao abrir o aplicativo, os campos já se encontram preenchidos com os dados de um motor de 11 kW;
2. Para Gerar a Curva de Viabilidade, role a barra de dados para cima e clique no botão Curva de Viabilidade;
3. Para inserir um Ponto de Operação, clique o botão Ponto de Operação e digite as características de operação do caso a ser analisado (Ex. 50 para Carregamento (%) e 3000 para Horas Anuais de Operação (h));
4. Aparecerá na tela um ponto vermelho representando o Ponto de Operação e os resultados de Viabilidade e Economia na parte superior direita da tela;
5. Para a Análise da Incerteza, clique no botão Análise da Incerteza e aparecerá uma nova tela. Altere o valor de um dos parâmetros e observe a alteração da Curva de Viabilidade e os novos resultados de Viabilidade e Economia (Ex. digite 82 para Menor Eff.).

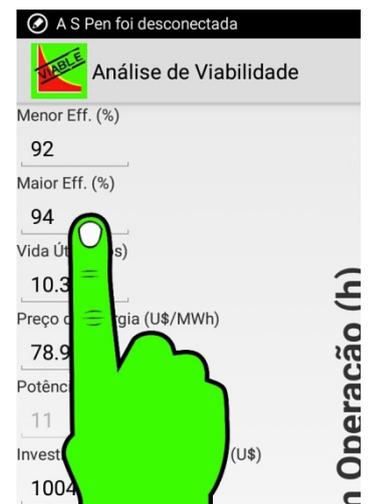
2.2 Telas de Ajuda



1. Ao lado de cada caixa de inserção de dados, há o símbolo ? que, ao ser pressionado, gera uma tela explicativa sobre o parâmetro. O mesmo acontece com os botões de Curva de Viabilidade, Ponto de Operação e Análise da Incerteza;
2. No campo superior direito da tela, há o símbolo ⋮ que, ao ser pressionado, exibe as opções Sobre e Tutorial, onde poderão ser acessados, respectivamente, um texto sobre o conceito do aplicativo e o texto sobre como operar o aplicativo;
3. TOQUE DUAS VEZES para ampliar o texto do Sobre e da Tutorial;
4. Mensagens de Erro aparecerão caso os dados estejam inconsistentes ou faltar algum dado a ser preenchido.

2.3 Inserindo Dados

1. Para Limpar todos os campos preenchidos, clicar em Nova Análise;
2. Para digitar novos dados, **TOQUE** na caixa do campo correspondente, como na figura acima;
3. Para ter acesso aos dados padronizados de tabela, **MANTENHA PRESSIONADO O TOQUE** na caixa do parâmetro correspondente;
4. Na Análise da Incerteza, ao **MANTER PRESSIONADO O TOQUE** na caixa do parâmetro a ser alterado, aparecerá uma **BARRA DE ROLAGEM** para facilitar a variação dos dados.



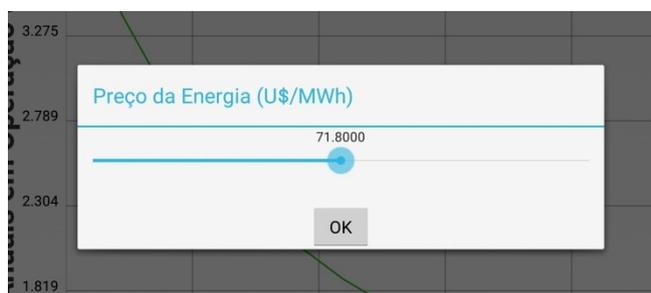
2.4 Gerando a Curva de Viabilidade

1. Após a inserção de todos os parâmetros, TOQUE no botão Curva de Viabilidade e será gerada a curva.

2.5 Ponto de Operação

1. TOQUE no botão Ponto de Operação para inserir as características de Carregamento (%), em valor não superior a 100, e Horas Anuais de Operação (h), em valor não superior a 8.700;
2. Este item também permite o acesso a valores tabelados MANTENDO PRESSIONADO O TOQUE na caixa de digitação do parâmetro;
3. Após o preenchimento dos dados, clique em OK e será gerado uma tela no canto superior direito com os resultados da análise de viabilidade e com o cálculo do custo do MWh Economizado (Economia).

2.6 Análise da Incerteza



1. Após a Análise de Viabilidade, TOQUE no botão de Análise de Incerteza para abrir uma nova tela que permite a variação dos parâmetros iniciais e a geração de uma nova curva, gerada a partir dos parâmetros modificados, assim como uma respectiva nova Análise de Viabilidade e cálculo do custo do MWh economizado (Economia);
2. Para alterar um parâmetro, siga os mesmos passos da Inserção de Dados. Um TOQUE simples permite a digitação do novo parâmetro; MANTER PRESSIONADO O TOQUE mostra uma BARRA DE ROLAGEM que facilita na alteração do parâmetro.

APÊNDICE D

D.1 Preços para Rebobinamentos de Motores

Preços para Rebobinamentos (U\$)				
Motores IP 55 Trifásico				
Potência	Número de Polos			
CV	II Polos	IV Polos	VI Polos	VIII Polos
0,16	53,21	51,84	57,82	69,82
0,25	53,34	52,27	60,50	76,88
0,33	53,87	53,77	68,76	81,58
0,05	54,91	56,65	68,01	84,33
0,75	57,59	63,64	77,71	89,07
1	60,29	63,90	82,87	95,06
1,5	71,29	71,48	86,50	122,76
2	78,18	81,73	107,02	165,76
3	89,50	94,47	116,39	203,31
4	99,31	118,15	166,68	227,86
5	121,91	123,99	185,72	252,62
6	143,18	160,74	206,41	341,69
7,5	148,10	170,38	224,24	343,94
10	191,05	200,43	254,76	383,84
12,5	212,45	225,88	337,16	513,17
15	239,15	241,05	372,46	554,64
20	339,21	332,01	435,82	609,26
25	381,43	388,75	634,39	723,12
30	396,42	524,69	719,99	1.147,60
40	690,79	690,24	974,13	1.217,94
50	729,78	765,25	4.078,97	1.353,43
60	1.132,58	1.090,33	1.391,73	1.464,78
75	1.282,18	1.210,15	1.433,00	1.998,03
100	1.449,49	1.373,07	1.967,99	2.160,02
125	2.037,57	1.964,03	2.196,51	3.042,67
150	2.272,80	2.141,09	2.519,58	3.194,99
175	2.670,46	2.556,52	3.042,24	4.858,60
200	2.901,36	2.691,09	3.127,33	5.207,60
250	3.855,21	3.103,73	5.248,59	5.729,62
300	5.077,75	4.533,48	5.608,38	5.991,78
350	5.708,01	4.956,11	21.804,34	6.441,37
400	7.196,81	5.226,76	6.051,14	7.862,39
450	7.916,49	5.708,53	7.386,44	0,00
500	8.708,14	6.267,86	7.755,76	0,00

D.2 Preços e Eficiências para Motores de Indução Trifásicos

Número de Polos	Potência Nominal (cv)	Eficiência a Plena Carga (%)			Preços (US\$)		
		IR1	IR2	IR3	IR1	IR2/	IR3
2	1	77	80,5	82,5	93,99	194,43	243,03
2	1,5	78,5	82,6	84,6	105,14	243,52	304,39
2	2	81	83,7	85,7	128,12	267,05	333,82
2	3	81,5	85,5	86,5	148,11	325,82	404,02
2	4	83	87,5	88,5	190,23	361,59	448,37
2	5	85,6	87,6	88,6	201,08	452,29	560,84
2	6	85,1	88,5	89,5	277,39	569,29	705,93
2	7,5	86,7	88,7	89,7	294,03	588,91	730,24
2	10	87,6	89,6	90,6	351,45	780,47	983,40
2	12,5	88	90,2	91,2	396,07	882,63	1.112,09
2	15	87,8	90,5	91,5	422,70	973,35	1.226,42
2	20	89	90,8	92,2	604,46	1.420,15	1.817,80
2	25	89,5	91,5	92,8	702,67	1.585,49	2.029,43
2	30	91	92	93,2	1.000,03	1.719,74	2.202,33
2	40	90,4	92,4	93,4	1.336,81	3.054,37	3.909,59
2	50	92,2	93	94	1.482,07	3.226,95	4.130,48
2	60	92,5	93,5	94,3	2.152,15	5.041,29	6.301,60
2	75	92,8	93,8	94,6	2.388,60	5.748,63	7.185,78
2	100	93,5	94,3	95	2.803,67	6.674,34	8.676,63
2	125	93,7	94,6	95,3	4.153,57	9.717,31	11.855,12
2	150	93,3	94,8	95,5	4.527,98	10.839,14	13.223,75
2	175	94	95	95,6	5.504,87	13.763,68	17.264,80
2	200	94,2	95,2	95,8	5.794,61	14.885,35	18.689,32
2	250	94,3	95,6	96,1	6.841,60	20.846,52	26.260,01
4	1	79,5	80,5	82,8	93,07	218,28	270,67
4	1,5	79,5	81,6	83	104,11	244,18	302,79
4	2	83,1	84,2	86,5	126,88	297,57	383,86
4	3	83,1	85,1	87,5	146,67	344,00	443,76
4	4	84,1	86,5	88	188,38	438,33	552,29
4	5	85,5	88	89	199,13	463,34	593,08
4	6	86,2	88,5	89,5	274,69	639,17	767,03
4	7,5	88	90	91	291,17	677,52	813,02
4	10	89	91	92	348,04	809,83	1.012,29
4	12,5	88,5	91	92	392,22	912,64	1.140,80
4	15	88,6	91,7	92,4	418,59	974,01	1.217,51
4	20	90,2	92,4	93,4	598,58	1.380,05	1.766,47
4	25	91	92,8	93,8	695,84	1.604,29	2.053,48
4	30	91,1	93	94	990,31	2.283,18	2.853,98
4	40	91,8	93,4	94,4	1.323,81	3.052,09	3.601,46
4	50	92,5	93,6	94,6	1.467,66	3.383,74	3.992,81
4	60	93,1	94,1	95,1	2.131,23	4.853,27	6.066,58

Número de Polos	Potência Nominal (cv)	Eficiência a Plena Carga (%)			Preços (US\$)		
		IR1	IR2	IR3	IR1	IR2/	IR3
4	75	93,1	94,4	95,4	2.365,38	5.386,48	6.733,09
4	100	93,5	94,6	95,5	2.776,42	6.322,49	7.903,12
4	125	93,8	94,9	95,6	4.113,19	9.366,62	11.895,61
4	150	94,1	95,2	95,8	4.483,96	10.210,94	12.967,89
4	175	94,2	95,3	96,2	5.451,35	13.210,48	16.562,23
4	200	94,6	95,5	96,2	5.738,28	13.863,87	17.392,04
4	250	94,6	95,7	96,3	6.775,09	16.224,90	20.390,55
6	1	74,5	80,5	82,4	135,59	302,84	378,55
6	1,5	75	77	81,5	151,68	314,93	393,67
6	2	78	83,9	85,5	184,84	397,04	512,18
6	3	78,5	83,9	86,2	213,68	435,00	587,25
6	4	83	86,5	88	274,43	662,83	835,17
6	5	84	87,7	89	290,10	771,62	949,10
6	6	85,5	88	89	400,18	857,55	1.054,78
6	7,5	86	88,5	89,5	424,19	931,54	1.145,79
6	10	86,3	88,5	89,7	507,03	1.058,41	1.301,84
6	12,5	88	89,5	91	571,39	1.440,98	1.772,40
6	15	89,5	91	91,8	609,82	1.580,33	1.943,81
6	20	89,5	91,3	92,2	872,03	1.849,28	2.330,09
6	25	90,2	92,4	93,1	1.013,72	2.760,58	3.478,33
6	30	91	93	93,6	1.442,71	3.183,62	4.234,21
6	40	91,7	93,4	94,1	1.928,56	4.307,39	5.728,83
6	50	92	93,6	94,2	2.138,13	5.438,60	6.798,24
6	60	92,5	93,8	94,5	3.104,82	6.408,48	8.010,60
6	75	93	94,1	94,7	3.445,94	6.598,45	8.248,05
6	100	93	94,4	95	4.044,75	9.387,38	11.921,97
6	125	93,5	94,7	95,3	5.992,20	10.475,32	13.303,65
6	150	94,1	95,1	95,8	6.532,34	13.031,13	16.334,46
6	175	94,1	95,3	95,8	7.941,66	15.569,09	19.557,67
6	200	94,2	95,4	95,9	8.359,66	15.982,22	20.082,35
6	250	94	95,5	96	9.870,11	28.499,07	35.367,62
8	1	68	70	74,9	182,07	346,12	461,44
8	1,5	74,5	78	81,6	203,66	455,43	555,64
8	2	79	83,5	84,5	248,19	659,15	790,97
8	3	80	84,5	86,5	286,92	844,66	1.013,59
8	4	81,3	85,1	86,6	368,50	953,57	1.144,29
8	5	83	85,6	86,7	389,53	1.049,52	1.280,41
8	6	84,5	87	88,5	537,35	1.470,86	1.823,87
8	7,5	86	87,5	89,8	569,58	1.480,59	1.835,94
8	10	87,5	89,5	90,6	680,82	1.628,74	2.019,63
8	12,5	88	90	91	767,24	2.233,03	2.768,95
8	15	88,5	90,4	91,3	818,84	2.413,57	2.992,82
8	20	89,5	90,5	91,6	1.170,93	2.651,15	3.287,43

Número de Polos	Potência Nominal (cv)	Eficiência a Plena Carga (%)			Preços (US\$)		
		IR1	IR2	IR3	IR1	IR2/	IR3
8	25	89	91	92,1	1.361,18	3.197,39	3.996,73
8	30	91	91,7	92,4	1.937,21	5.108,19	6.385,23
8	40	91	92,2	93,5	2.589,60	5.421,22	6.776,53
8	50	91	92,6	93,6	2.870,99	6.232,01	8.101,61
8	60	91,5	92,6	93,6	4.169,04	6.744,78	8.768,21
8	75	92	93,5	94,3	4.627,07	9.528,83	11.911,04
8	100	92,5	93,7	94,5	5.431,13	10.301,33	12.876,67
8	125	93,5	94,2	94,9	8.046,09	15.307,26	18.789,83
8	150	93,8	94,5	95	8.771,37	16.310,83	20.034,23
8	175	93,8	95	95,4	10.663,75	26.455,23	32.812,82
8	200	94,5	95,2	95,6	11.225,03	28.283,97	35.098,74
8	250	93,9	95,3	95,7	13.253,20	31.016,47	38.514,37

D.3 Níveis de Eficiência IE4/Superpremium/60 Hz

<i>kW</i>	<i>2 polos</i>	<i>4 polos</i>	<i>6 polos</i>
0.75	-	85.9	85.4
1.1	86.1	87.6	87.2
1.5	87	88.4	88
2.2	88.5	89.8	89.5
3.7	89.9	91.1	90.8
5.5	91.1	92.2	92
7.5	91.6	92.7	92.5
11	92.6	93.6	93.4
15	93	94.1	93.8
18.5	93.4	94.4	94.2
22	93.8	94.8	94.5
30	94.1	95.1	94.8
37	94.4	95.4	95.1
45	94.7	95.6	95.4
55	95	95.9	95.6
75	95.2	96.1	95.8
90	95.4	96.3	96
110	95.6	96.5	96.1
150	95.7	96.6	96.2
185	95.9	96.7	96.3
220	96	96.8	96.4
250	96	96.8	96.4
300	96.1	96.9	96.4
335	96.2	97	96.4
375	96.2	97	96.4