

MANUEL CAMELA RAFAEL

**POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA
NO SEGMENTO INDUSTRIAL PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO**

FLORIANÓPOLIS

2004

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA
NO SEGMENTO INDUSTRIAL PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO

Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Elétrica.

MANUEL CAMELA RAFAEL

Florianópolis, setembro de 2004.

acima de todos e por tudo, à Deus.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. C. Celso de Brasil Camargo pela orientação, encorajamento, confiança e amizade sempre manifestos, estimulando o desenvolvimento harmonioso de todas as etapas deste trabalho.

A todos os colegas do LABPLAN/EEL/CTC/UFSC - professores, doutorandos, mestrandos, bolsistas, administradores, secretárias – com os quais partilhei esperanças e laços de amizade.

A toda a equipe da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, PPGEL/UFSC, pelo apoio e assistência administrativa sempre disponibilizados.

Ao Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, UnilesteMG, ao Instituto Católico de Minas Gerais, ICMG, e à Fundação Geraldo Perlingeiro de Abreu, FGPA, pelo apoio e suporte oportunizados para suprir as diversas demandas e custeios fundamentais à normalidade da consecussão deste trabalho.

À minha família, pelo apoio, compreensão e encorajamento, com os quais pude equilibrar ansiedades e levar adiante este projeto.

Meus agradecimentos se estendem àqueles que, de modo formal ou informal, no anonimato, contribuíram através de suas atitudes e sinergias positivas, para que este trabalho evoluísse ao longo de todas as suas etapas até tornar-se realidade.

Resumo da Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NO SEGMENTO INDUSTRIAL PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO

MANUEL CAMELA RAFAEL

setembro / 2004

Orientador: C. Celso de Brasil Camargo, Dr. Eng.

Área de Concentração: Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Conservação de Energia, Gerenciamento do Lado da Demanda, Intensidade Energética, Planejamento Integrado de Recursos, Usos-finais Industriais da Energia, Programação Linear.

Número de Páginas: 224

A exploração e o consumo energético a que estão atrelados os modelos de desenvolvimento industrial e social também têm sido a base da indução de tendências insustentáveis, de um lado para o aumento do consumo e do outro, para o aumento da expansão dos sistemas de energia elétrica. Entretanto, a sociedade vem se apercebendo das fortes restrições econômicas, sociais e ambientais, elevando-se a importância das *externalidades* frente à expansão de sistemas tecnológicos energeticamente intensivos. Em face das preocupações crescentes, abordagens orientadas ao atendimento de objetivos do Planejamento Integrado de Recursos tornam-se adequadas. Particularmente no setor industrial, aonde elevadas intensidades energéticas têm sido características e, sendo que numa grande maioria de suas atividades esses níveis são superiores aos requeridos, essas características tornam este setor propício para a eficiência energética, a conservação de energia e o gerenciamento do lado da demanda. Perante essa relevância, considerando aspectos do dimensionamento da demanda, os custos sociais e ambientais e a inovação tecnológica, propõe-se neste trabalho, uma metodologia para a avaliação do potencial de economia energética latente em projetos industriais, usando-se para isso, um modelo inovador e oportuno. Quanto à implementação computacional, a abordagem é simplificada através de justificativas aplicáveis permitindo-se a sua formulação e resolução como um problema de programação linear. Sua grande contribuição está no fato de proporcionar uma alternativa para a inserção dos valores associados com a preservação e a racionalização na utilização dos recursos naturais para a produção de serviços energéticos necessários ao desenvolvimento industrial e social.

Abstract of Thesis presented to UFSC as partial fulfillment of the requirements for the degree of
Doctor in Electrical Engineering.

POTENTIAL OF ENERGY CONSERVATION IN INDUSTRIAL SEGMENT TO THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT

MANUEL CAMELA RAFAEL

september / 2004

Advisor: C. Celso de Brasil Camargo, Dr. Eng.

Area of Concentration: Systems of Electric Power.

Palavras-chave: Energy Efficiency, Energy Conservation, Demand Side Management, Energetic Intensity, Resources Integrated Planning, Energy Industrial End-uses, Linear Programming.

Number of de Pages: 224

The exploration and the energy consumption associated with the industrial and social development models also have been the base of the induction of unsustainable trends, from a side for the increase of the consumption and the other, for the increase of the expansion of the electric energy systems. However, the society has been understanding about the strongest of the economical, social and environmental constraints, raising the importance of the externalities faced from the expansion of energetic intensive technological systems. Facing this increasing concerns, approaches guided to the attendance of objectives of the Integrated Resources Planning become adequate. Particularly in the industrial sector, where high energy intensities they have been characteristic, and in a great majority of its activities these levels are higher than the required ones, becoming this sector propitious for the energy efficiency, the conservation and the demand side management. In order to this relevance, considering aspects of the determining the demand, the social and environmental costs and the technological innovation, in this research is presented a methodology for the evaluating of the energy saving potential in industrial projects, using for this, an innovative and opportune model. Concerning to the computational implementation, the approach is simplified through applicable justifications allowing its formulation and solution as a linear programming problem. Its mean contribution is the fact that it provides an alternative for the insertion of the related values to the conservation and the rationalization in the use of the natural resources for the production of necessary energy services for the industrial and social development.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE QUADROS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
LISTA DE APÊNDICES	xxiii
LISTA DE ANEXOS	xxiv
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS DA PESQUISA.....	3
1.2. ESTRUTURA DA TESE..	4
1.3. ESTUDOS ENERGÉTICOS BASEADOS NO GERENCIAMENTO DO LADO DA DEMANDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	6
1.4. O PROBLEMA DO ATENDIMENTO DO CRESCIMENTO DA DEMANDA ATRAVÉS DAS OPÇÕES DE OFERTA E A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.....	19
1.5. PROBLEMAS TÍPICOS DA INFRA-ESTRUTURA DE GRANDE PORTE... ..	20
1.6. PROBLEMAS TÍPICOS DA PREVISÃO DO CRESCIMENTO DA DEMANDA.....	22
1.7. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DOS MÉTODOS DE PROJEÇÃO E DA ANÁLISE DA DEMANDA DE ENERGIA.....	24
1.8. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	28
CAPÍTULO 2	30

2.	ASPECTOS CRÍTICOS DO PLANEJAMENTO E DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA NUMA VISÃO BASEADA NA ALOCAÇÃO DE BENEFÍCIOS.	30
2.1.	OBJETIVOS GERAIS DE UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA..	32
2.2.	OBJETIVOS OPERACIONAIS ESPECÍFICOS DE UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA.....	35
2.3.	OBJETIVOS SOBRE A CURVA DE CARGA.....	41
2.4.	AS EXTERNALIDADES E O PROBLEMA DO ATENDIMENTO ENERGÉTICO	44
2.5.	O PROBLEMA DO ATENDIMENTO ENERGÉTICO E AS SOLUÇÕES DA ANÁLISE INTEGRADA.	48
2.6.	O PROBLEMA DO ATENDIMENTO E OS ASPECTOS DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA	49
2.7.	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	52
	CAPÍTULO 3	54
3.	UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DO POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA.	54
3.1.	SERVIÇOS DE ENERGIA E CARGAS MODIFICADAS DAS UTILIZAÇÕES-FINAIS DA ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA.	56
3.1.1.	Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Força-motriz.	62
3.1.2.	Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Calor..	71
3.1.2.1.	Fornos Elétricos.....	71
3.1.2.2.	Bombas Elétricas de Calor...	75
3.1.2.3.	Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Aquecimento.	76
3.1.3.	Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Ar Condicionado.	77
3.1.4.	Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Aquecimento – Ventilação – Ar Condicionado.	78

3.1.5.	Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Refrigeração	79
3.1.6.	Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Iluminação.....	79
3.2.	OPERAÇÃO MODIFICADA DOS SERVIÇOS DE ENERGIA.	81
3.3.	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	86
CAPÍTULO 4.....		88
4.	CUSTOS DA ENERGIA ELÉTRICA, SUAS FONTES E SOLUÇÕES.....	88
4.1.	CUSTOS TÉCNICO – ECONÔMICO - FINANCEIROS.	88
4.1.1.	Fator de Potência e Potência Reativa.....	90
4.1.2.	Perdas Joule.	91
4.1.3.	Perdas por Efeito Proximidade	93
4.1.4.	Perdas por Efeito <i>Skin</i>	94
4.1.5.	Perdas por Correntes Parasitas.....	95
4.1.6.	Perdas Magnéticas ou de Histerese.....	95
4.1.7.	Perdas nas Linhas e nos Circuitos de Distribuição.	97
4.1.8.	Perdas na Distribuição Elétrica em Edifícios Industriais.....	97
4.1.9.	Qualidade da Energia Elétrica.....	99
4.1.9.1.	Perdas por Distorções Harmônicas.....	100
4.1.9.2.	Quedas de Tensão.....	101
4.1.9.3.	Surtos e Transitórios de Tensão.....	102
4.1.9.4.	Variações de Frequência.....	103
4.1.9.5.	Desequilíbrio de Fases.....	104
4.2.	CUSTOS DAS EXTERNALIDADES.	105
4.2.1.	Custos Sociais.....	109
4.2.2.	Custos Ambientais.....	115
4.3.	ENERGIA ELÉTRICA LIMPA E MITIGAÇÃO DOS CUSTOS DAS EXTERNALIDADES.....	119

4.4.	CENÁRIOS DE POTENCIAIS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.....	125
4.4.1.	Potencial de Eficiência Energética Congelada.....	126
4.4.2.	Potencial de Eficiência Energética Técnica.....	127
4.4.3.	Potencial de Eficiência Energética Econômica.....	128
4.4.4.	Potencial de Eficiência Energética de Mercado.....	130
4.4.5.	Potencial de Eficiência Energética de Mercado Alcançável.....	131
4.5.	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	132
CAPÍTULO 5.....		134
5.	PROBLEMA DO POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NO SEGMENTO INDUSTRIAL PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO.....	134
5.1.	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	139
5.2.	METODOLOGIA DE SOLUÇÃO.....	150
5.3.	METODOLOGIA E SOLUÇÃO REDUZIDA.....	157
5.4.	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	170
5.5.	ESTUDO DE CASO.....	172
5.5.1.	Estudo de Caso: Exemplo Didático.....	172
5.5.2.	Estudo de Caso: Sistema Real.....	179
5.5.3.	Conclusões Sobre os Resultados Obtidos.....	187
5.6.	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	188
CAPÍTULO 6.....		190
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	190
6.1.	RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	192
APÊNDICES.....		193
ANEXOS.....		209
GLOSSÁRIO DAS PRINCIPAIS DEFINIÇÕES.....		217
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		219

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação do Comportamento de Consumidores Frente ao GLD.....	7
Figura 2 – Estratégia de Avaliação do GLD pelas Concessionárias.....	10
Figura 3 – Compromisso no Atendimento do Consumidor Considerando a CEn num Mercado de Energia Desregulado.....	41
Figura 4 – Participação dos Segmentos Consumidores no Perfil do Consumo Final da Energia Elétrica no Brasil, 1995.....	57
Figura 5 – Participação dos Principais Serviços Energéticos no Consumo da Energia Elétrica Industrial no Brasil.....	57
Figura 6 – Esquema Elementar da Cadeia de Produção do Serviço de Energia Força-motriz	62
Figura 7 - Comparação do Desempenho do Rendimento e do Fator de Potência dos Motores de Indução Padrão MPEE e MPES, 2 Pólos.	68
Figura 8 - Comparação do Desempenho do Rendimento e do Fator de Potência dos Motores de Indução Padrão MPEE e MPES, 4 Pólos.	68
Figura 9 - Comparação do Desempenho do Rendimento e do Fator de Potência dos Motores de Indução Padrão MPEE e MPES, 6 Pólos.	69
Figura 10 - Comparação do Desempenho do Rendimento e do Fator de Potência dos Motores de Indução Padrão MPEE e MPES, 8 Pólos.	69
Figura 11 – Esquema Básico da Produção do Serviço de Energia Calor Através de um Forno elétrico	72
Figura 12 – Modelo Básico de uma Carga Modificada do Tipo Bomba de Calor.....	76
Figura 13 – Modelo Básico de uma Carga Modificada do Tipo Ar Condicionado	78
Figura 14 – Modelo Básico de uma Carga Modificada Combinada de Aquecimento – Ventilação - Ar Condicionado.	78
Figura 15 – Modelo Básico de Carga Modificada do Serviço de Energia Iluminação	80
Figura 16 – Impactos Qualitativos no Corte de Ponta, de Cargas Modificadas e da Operação Modificada, Sobre a Demanda e Energia de um Consumidor Industrial.	83
Figura 17 – Impactos Qualitativos no Preenchimento de Vales, de Cargas Modificadas e da Operação Modificada, Sobre a Demanda e Energia de um Consumidor Industrial.	84
Figura 18 – Impactos Qualitativos no Deslocamento da Carga, de Cargas Modificadas e da Operação Modificada, Sobre a Demanda e Energia de um Consumidor Industrial.	84
Figura 19 – Impactos Qualitativos na Conservação Estratégica de Energia, de Cargas Modificadas e da Operação Modificada, Sobre a Demanda e Energia de um Consumidor Industrial.	85

Figura 20 – Impacto da Eficiência Energética Sobre as Perdas Joule num Elemento de Circuito.....	92
Figura 21 a) – Ilustração das Distribuições das Correntes em Condutores Circulares Paralelos no Efeito Proximidade com o Mesmo Sentidos das Correntes.	94
Figura 21 b) - Ilustração das Distribuições das Correntes em Condutores Circulares Paralelos no Efeito Proximidade com Sentidos Opostos das Correntes.	94
Figura 22 – Ilustração da Distribuição da Corrente num Condutor Circular com <i>Efeito Skin</i>	94
Figura 23 – Perdas de Energia num Modelo de Dispositivo Conversor Genérico.	96
Figura 24 – Consumo Mundial de Energia Elétrica por Fonte (%), 2000.	120
Figura 25 – Geração Mundial de Energia Elétrica por Fonte (%), 2000.	120
Figura 26 – Taxas Médias Globais de Crescimento das Principais Fontes de Energia: Convencionais <i>versus</i> Renováveis (1992 – 2002).	120
Figura 27 – Capacidade Eólica Cumulativa Mundial (1992 - 2001)..	122
Figura 28 – Capacidade Fotovoltaica Cumulativa Mundial (1992 - 2001)..	122
Figura 29 – Capacidade Instalada (GW) de Fontes de Energia Renovável em Países Membros da OCDE (2000)..	123
Figura 30 - Capacidade Instalada (GW) de Fontes de Energia Renovável Hídrica Convencional em Países Membros da OECD (2000)..	123
Figura 31 – Exemplo Prático de Curvas de Custo Marginal da Conservação de Energia no Setor de Iluminação Pública..	129
Figura 32 – Dados dos Gastos com os Principais Programas de Saúde Ambiental no Brasil (1995 - 1998)..	136
Figura 33 – Consumo de Energia Elétrica no Brasil.....	137
Figura 34 – Fluxograma da Metodologia do Problema do Potencial de Conservação de Energia no Segmento Industrial para o Desenvolvimento Sustentado.....	171
Figura 35 – Exemplo Didático de um Sistema Elétrico de uma Indústria Siderúrgica.....	173
Figura 36 – Configuração do Sistema Elétrico da Indústria Real.....	180
Figura 37 – Cargas dos Serviços de Energia da Indústria (kW) – Subestação 01.....	180
Figura 38 – Cargas dos Serviços de Energia da Indústria (kW) – Subestação 02.....	181
Figura 39 – Cargas dos Serviços de Energia da Indústria – Subestação 03.....	181
Figura 40 – Cargas dos Serviços de Energia da Indústria (kW) – Subestação 04.....	182
Figura 41 – Cargas dos Serviços de Energia da Indústria (kW).....	182
Figura 42 – Modelo de Simulação da Engenharia de Uso-Final.....	199
Figura 43 – Ilustração das Eficiências Energéticas das Principais Tecnologias do Serviço de Energia Iluminação.....	209

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Perfil do Consumo Final de Energia (1995) no Balanço Energético Nacional (1996).....	63
Tabela 2 - Dados Técnicos Parciais dos Motores Elétricos de Indução dos Padrões de Eficiência Elevada e Standard.	65
Tabela 3 – Custos da Energia Elétrica, Com e Sem Custos das Externalidades.....	119
Tabela 4 - Participação Elétrica de Origem Eólica na Matriz Geradora de Regiões Seleccionadas (2003).....	121
Tabela 5 - Participação Elétrica de Origem Eólica na Matriz Geradora de Alguns Países – Previsão.....	122
Tabela 6 - Dados das Cargas do Sistema Industrial Didático.	174
Tabela 7 - Dados dos Custos <i>EVEC</i> da Função - Objetivo.....	174
Tabela 8 - Dados dos Custos <i>EDA</i> da Função - Objetivo.	175
Tabela 9 - Dados dos Custos <i>EDS</i> da Função - Objetivo.....	175
Tabela 10 – Solução do Sistema Didático: Energia Primária (EP) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.....	177
Tabela 11 – Solução do Sistema Didático: Energia Elétrica (EEL) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.....	177
Tabela 12 – Solução do Sistema Didático: Custo da Solução e Potencial de Redução do Custo com a Solução Ótima..	177
Tabela 13 – Solução do Sistema Real - Subestação 01: Energia Primária (EP) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.	183
Tabela 14 – Solução do Sistema Real - Subestação 01: Energia Elétrica (EEL) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.	183
Tabela 15 – Solução do Sistema Real - Subestação 01: Custo da Solução e Potencial de Redução do Custo com a Solução Ótima.....	183
Tabela 16 – Solução do Sistema Real - Subestação 02: Energia Primária (EP) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.	184
Tabela 17 – Solução do Sistema Real - Subestação 02: Energia Elétrica (EEL) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.	184

Tabela 18 – Solução do Sistema Real - Subestação 02: Custo da Solução e Potencial de Redução do Custo com a Solução Ótima.....	184
Tabela 19 – Solução do Sistema Real - Subestação 03: Energia Primária (EP) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima	185
Tabela 20 – Solução do Sistema Real - Subestação 03: Energia Elétrica (EEL) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.	185
Tabela 21 – Solução do Sistema Real - Subestação 03: Custo da Solução e Potencial de Redução do Custo com a Solução Ótima.....	185
Tabela 22 – Solução do Sistema Real - Subestação 04: Energia Primária (EP) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima	186
Tabela 23 – Solução do Sistema Real - Subestação 04: Energia Elétrica (EEL) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima	186
Tabela 24 – Solução do Sistema Real - Subestação 04: Custo da Solução e Potencial de Redução do Custo com a Solução Ótima.....	186
Tabela 25 – Dados dos Custos EDA e EVEC da Produção dos Serviços de Energia	206
Tabela 26 – Dados dos Custos EDS da Produção dos Serviços de Energia	208
Tabela 27 – Comparação dos Parâmetros de Desempenho para Cargas Modificadas do Serviço de Energia Iluminação	209

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Hierarquia e Objetivos do Planejamento e da Operação de uma Concessionária de Energia.	31
Quadro 2 - Principais Cargas Elétricas da Produção dos Serviços Energéticos Industriais. ...	61
Quadro 3 – Potenciais de Economia Energética Possível em Fornos Elétricos a Arco Submerso.....	73
Quadro 4 - Potenciais de Conservação de Energia em Função de Cenários de Eficiência Energética.	132
Quadro 5 - Estimativas dos Custos de Redução das Emissões e dos Negócios das Emissões de Dióxido de Carbono	163
Quadro 6 - Dados dos Custos da Admissão Hospitalar Devidos às Doenças Respiratórias.....	165
Quadro 7 - Estudos e Dados Referentes à Variação da Mortalidade com a Variação de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10.	166
Quadro 8 - Estudos e Dados Referentes à Ocorrência de Doenças com a Variação de PM10.....	166
Quadro 9 - Estudos e Dados Referentes à Ocorrência de Mortes e Doenças com a Variação de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na Concentração de SO ₂	167
Quadro 10 - Estudos e Dados Referentes à Ocorrência de Mortes e Doenças com a Elevação da Concentração de Ozônio.	167
Quadro 11 - Valor Estatístico da Vida Baseado em Estudos de Risco Ocupacional.....	167
Quadro 12 - Dados para Estimativa das Taxas de Morbidade e das Taxas de Mortalidade Associadas com as Explorações Energéticas	202
Quadro 13 - Efeitos Perigosos Sobre a Saúde Humana de Altas Concentrações de Dióxido de Carbono	205
Quadro 14 – Tempo de Tolerância Fisiológico para Várias Concentrações de Dióxido de Carbono	206
Quadro 15 – Dados da Conversão Tecnológica, Serviços de Energia e de Benefícios Ambientais e Não Energéticos de Cargas Modificadas Industriais	210

LISTA DE ABREVIATURAS

ACEEE – “American Council for an Efficient-Energy Economy” (EUA).

ANA – Agência Nacional de Água (Brasil).

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil).

AP – Autoprodutor de energia.

BEN – Balanço Energético Nacional.

CESTEH/FIOCRUZ - Centro de Estudos da Saúde do Trabalhador e Ecologia Humana/Fundação Fio Cruz.

CDB – Convenção sobre a Diversidade Biológica.

Com – Comercialização.

Con – Consumidor.

DHT – Distorção Harmônica Total.

EPI – “Earth Policy Institute”.

EPRI – “Electrical Power Research Institute” (USA).

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas do Brasil S.A (Brasil).

EIA – “Energy Information Administration” (USA).

EPA – “Environmental Protection Agency” (USA).

forno - Cargas do tipo forno elétrico.

G – Geração de Energia.

GLD – Gerenciamento do lado da demanda.

GD – Geração distribuída de energia.

G&T – Geração e Transmissão de energia.

G&T&D – Geração, Transmissão e Distribuição de energia.

ilum - cargas do tipo iluminação.

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética (Brasil).

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Brasil).

IEA – ‘International Energy Agency’ (França).

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (Brasil).

LBNL – ‘Ernest Orlando Lawrence / Berkeley National Laboratory’ (USA).

LFC – Lâmpada fluorescente compacta.

MCA – Motor de corrente alternada.

MCC – Motor de corrente contínua.

MPES – Motor de padrão eficiência standard.

MPEE – Motor de padrão elevada eficiência energética.

MME – Ministério de Minas e Energia (Brasil).

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia (Brasil).

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (do Protocolo de Kyoto).

MIC – Mecanismo de Implementação Conjunta (do Protocolo de Kyoto).

MT – Média Tensão.

O&M – Operação e Manutenção.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico Interligado (Brasil).

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

ONU – Organização das Nações Unidas.

PL - Programação Linear.

PROCEL – Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica (Brasil).

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento.

PLC – ‘Programmable Logical Controller’.

PIE – Produtor independente de energia.

PIR – Planejamento integrado de recursos.

PWM – ‘Pulse Width Modulated’.

RNL – ‘Riso National Laboratory’ (Dinamarca).

SE – Sistema elétrico.

SEE – Sistema de energia elétrica.

SUS – Sistema Único de Saúde (Brasil).

UMA – Universidade Livre da Mata Atlântica (Brasil).

UFBA – Universidade Federal da Baía (Brasil).

UNCED – “United Nations Council for Environment and Development”.

UNIDO – “United Nations for Industrial Development Organization”.

UG – Unidade Geradora.

UPS – “Uninterruptible Power System”.

Ut – Utilização.

WWI – “World Watch Institute”.

LISTA DE SÍMBOLOS

ar cond - Cargas do tipo ar-condicionado.

ar comp - Cargas do tipo ar-comprimido.

calor - Cargas do tipo calor.

Cap_{inst}^i - Capacidade instalada na unidade industrial i .

C_{ij}^{t-conv} - Custo da tecnologia convencional no uso-final j da unidade industrial i .

c_{ij} - Coeficiente de custo unitário da tecnologia eficiente no uso-final j da indústria i .

$\cos \varphi$ - Fator de potência.

CED – Consumo de energia do dispositivo.

CEn – Conservação de energia.

CDC – Controle direto da carga.

CIC – Controle indireto da carga.

$CEUF_{ji}$ – Consumo de energia do uso-final j do segmento industrial i .

$CepUF_j$ – Consumo de energia por uso-final j .

CETS – Consumo de energia total do sistema.

[CCREDS] - Matriz das capacidades por medidas de controle e redução dos impactos sociais gerados pela produção dos serviços de energia.

[CCREDA] – Matriz das capacidades por medidas de controle e redução dos impactos ambientais gerados pela produção dos serviços de energia.

C_{inv} – Custos de investimento.

CMCP – Custo marginal de custo prazo.

CMLP – Custo marginal de longo prazo.

CCCv – Curva de carga convencional.

CCGLD – Curva de carga com gerenciamento do lado da demanda.

CCEEn – Curva de carga com eficiência energética.

CCGLD&EE_n - Curva de carga com gerenciamento do lado da demanda e eficiência energética.

[CD_{in}] - Matriz das capacidades importadas totais.

[CE_{out}] - Matriz das capacidades exportadas totais.

[CG_p] - Matriz das capacidades geradas próprias totais.

C_{opm} – Custos de operação e manutenção.

[CL] - Matriz das capacidades da energia perdida total por perdas constantes.

CPH – B – ‘Combined power and heating – bottoming’.

CSEE – Constante do serviço de energia eficiente.

CO₂ – Dióxido de carbono.

cenef – Cenário eficiente.

cenefTc – Cenário de eficiência técnica ou cenário técnico.

cenefEc – Cenário de eficiência econômica ou cenário econômico.

cenefMc – Cenário de eficiência de mercado ou cenário de mercado.

cenefCg – Cenário de eficiência congelada ou cenário congelado.

[cf] - Matriz dos serviços de energia por tipo de carga.

{CONSENERG} - Conjunto das indústrias integrantes do estudo de conservação de energia.

D – Distribuição de energia.

DHT – Distorção harmônica total.

EE_n – Eficiência energética.

EDA_{ij} – Valor do ambiente, equivalente ao custo econômico da exploração dos recursos ambientais para gerar e fornecer o vetor de energia elétrica para o uso-final *j* da unidade industrial *i*.

EDS_{ij} – Valor social, equivalente ao custo econômico da demanda de serviços sociais provocados ou não atendidos devido à exploração dos recursos naturais para gerar e fornecer o vetor de energia elétrica para o uso-final *j* da unidade industrial *i*.

EDA – Matriz de valores econômicos equivalentes dos danos ambientais.

EDS – Matriz de valores econômicos equivalentes dos danos sociais.

EVEC - Matriz de valores econômicos equivalentes da produção tecnológica dos serviços de energia.

E_{ij} - Nível aceitável do custo ambiental associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i (disposição ao custo ambiental).

e_{ij} - Coeficiente de custo ambiental unitário associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i .

f.c.e.m – Força contra-eletromotriz.

f.e.m – Força eletromotriz.

FO – Função - objetivo.

Folga (R) - Diferença entre o limite de recursos e o valor dos recursos efetivamente usados, correspondente à restrição R.

H_{ij} - Nível aceitável do custo social associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i (disposição ao custo social).

h_{ij} - Coeficiente de custo social unitário associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i .

IE – Intensidade energética.

Ic – Corrente de carga.

i – Identificador do segmento consumidor.

j – Identificador do tipo de uso-final.

KD – Constante de desperdício ou de perdas.

MP – Material particulado.

m – Quantidade de segmentos consumidores.

mot_{ca} - Cargas do tipo motor de corrente alternada (MCA).

mot_{cc} - Cargas do tipo motor de corrente contínua (MCC).

$NCUF_j$ – Número de consumidores com o uso-final j .

NOx – Nitratos.

n – Quantidade de usos-finais no segmento consumidor.

n_c – Número de consumidores.

P – Potência ativa.

PE – Potência de entrada.

P_{ent} – Potência de entrada.

$P_{entSist}$ - Potência de entrada do sistema.

p_{ij} – Coeficiente de custo unitário do nível de penetração da tecnologia de uso-final j da unidade industrial i .

P_{ij} – Nível de penetração alcançável para a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i .

ppm – partes por milhão.

P_{sai} – Potência de saída.

$P_{saiSist}$ - Potência de saída do sistema.

P_{entMot} - Potência de entrada do motor.

P_{saiMot} - Potência de saída do motor.

$P_{entDacp}$ - Potência de entrada do dispositivo de acoplamento.

$P_{saiDacp}$ - Potência de saída do dispositivo de acoplamento.

$P_{entDmec}$ - Potência de entrada do dispositivo mecânico.

$P_{saiDmec}$ - Potência de saída do dispositivo mecânico.

pefenEc - potencial de eficiência energética econômico.

pefemca - Potencial de eficiência energética de mercado alcançável.

[pfc] - Matriz das perdas constantes por tipo de carga.

[pfv] - Matriz das perdas variáveis por tipo de carga.

[pfs] - Matriz das perdas suplementares por tipo de carga.

$p.u$ – por unidade.

Q – Potência reativa.

QEE – Qualidade de energia elétrica.

R – Resistência ôhmica.

refg - Cargas do tipo frio.

R_o – Resistência de operação.

RCA – Resistência em corrente alternada.

RCC – Resistência em corrente contínua.

RE – Rendimento do dispositivo.

S – Potência aparente.

SENEF – Serviço de energia eficiente.

SEN – Serviço de energia.

[SL] - Matriz das capacidades de energia perdida total por perdas suplementares.

s – Saturação no número de dispositivos por consumidor.

SEN_{ij} - Serviço de energia no uso-final j da unidade industrial i .

SO₂ – Dióxido de enxofre.

T_{adm} - Temperatura admissível.

t_{ij} – Coeficiente da taxa de desconto unitário para a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i .

T_{ij} – Nível da taxa de desconto atrativa para a tecnologia de uso-final j da indústria i .

t – Tempo de utilização do dispositivo.

[UL] - Matriz dos serviços de energia totais nas utilizações-finais.

[VL] - Matriz de capacidades da energia perdida total por perdas variáveis.

VEC – Vetor de energia convertido.

VEC_{ij} - Vetor de energia convertido no uso-final j da unidade industrial i .

VEC_{ij}^{supEE} - Limite superior eficiente do vetor de energia convertido no uso-final j da unidade industrial i .

ΔT – Acréscimo de temperatura.

η - Rendimento.

η_{Sist} - Rendimento do sistema.

η_{Mot} - Rendimento do motor.

η_{Dacp} - Rendimento do dispositivo de acoplamento.

η_{Dmec} - Rendimento do dispositivo mecânico.

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1 – Técnicas Usadas nos Estudos de Projeção da Demanda em Energia Elétrica	193
Apêndice 2 – Aspectos Sobre Morbidade e Mortalidade Associados Com Emissões Poluentes da Valorização Econômica dos Danos Sociais Induzidos por Atividades Tecnológicas	202
Apêndice 3 – Dados Adicionais dos Termos dos Custos EVEC, EDA e EDS, da Função – Objetivo, da Produção dos Diversos Serviços de Energia	206

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Parâmetros Técnicos de Cargas Modificadas do Serviço de Energia Iluminação	209
Anexo 2 – Dados Relevantes da Conversão Tecnológica, Serviços de Energia, Benefícios Ambientais e Outros Benefícios Não – Energéticos de Cargas Modificadas Industriais	210

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento pode merecer interpretações diferentes, inclusive contraditórias consoante sejam, principalmente, os objetivos preconizados pelo agente que o busca. Enquanto, para a gerência de uma indústria siderúrgica, por exemplo, a visão do desenvolvimento está associada ao aumento da produtividade, para o gerente de uma indústria que observa o desenvolvimento sustentável¹ esse mesmo desenvolvimento está associado com a redução das emissões de gases do efeito estufa. Na interseção dos interesses destes dois segmentos reserva-se, para a tecnologia, um papel importante e crítico no desenvolvimento da economia em todos os níveis de extensão. Numa perspectiva de formulação de políticas, quanto melhor for o entendimento acerca da evolução da tecnologia, mais efetivas serão as aplicações dos investimentos ao longo do tempo e tão bem será também, a compreensão e a definição das estratégias de desenvolvimento.

Ademais, a maioria dessas tecnologias ao operar, basicamente à energia elétrica, faz desta, um insumo chave das economias modernas. Entre os vários setores da economia, o segmento industrial representa o consumidor mais significativo da energia elétrica, com

¹ Conforme FONSECA (1999), nos últimos vinte anos, sob pressão dos ecologistas, muitos economistas começaram a elaborar novos conceitos, um deles, o “desenvolvimento sustentável”, seria o “desenvolvimento econômico” com os devidos cuidados para minimizar os estragos no meio ambiente. Em sua versão mais abrangente, ele apoiaria a atividade econômica em um tripé: equilíbrio ecológico, equidade social e eficiência econômica.

uma demanda mundial média estimada entre 40% e 50% do total dos recursos de energia primária (MARTIN *et al.*; 2000). Sendo assim a energia é, fundamentalmente necessária para ajudar as indústrias na produção de produtos e serviços importantes. Entretanto, associado a isso, somos confrontados, de modo crescente, com o desafio de mover nossa economia e nossa sociedade numa direção da economia de produção, do consumo limpo e de mais sustentabilidade. O desenvolvimento e a utilização de tecnologias limpas e com maior eficiência energética pode desempenhar um papel fundamental na limitação dos impactos ambientais associados com a maioria das indústrias enquanto, simultaneamente, se obtêm melhorias na qualidade dos produtos, na produtividade e na redução dos custos industriais.

Usualmente, as tecnologias de eficiência energética não são adquiridas e incorporadas nas indústrias devido, apenas, a seus benefícios energéticos, mas também a outros benefícios não-energéticos que resultam a partir do seu uso. Entre os benefícios não-energéticos incluem-se os benefícios ambientais, sociais, em produtividade, em qualidade da produção e em segurança. Esses benefícios adicionais, que não são em conservação de energia, freqüentemente podem ser usados como fatores determinantes nas decisões de aquisição e incorporação tecnológica. Os benefícios ambientais referem-se, entre outros, às reduções nas emissões poluentes aéreas (por exemplo, sulfatos, nitratos, gás carbônico, material particulado, cinzas) ou reduções nos fluxos de perdas ou desperdícios que resultam a partir da utilização de tecnologias e processos mais eficientes. Os benefícios em produtividade, freqüentemente, podem resultar de casos em que a tecnologia reduz os tempos mortos requeridos para a operação e manutenção, os custos de operação e manutenção ou ajuda no aumento dos rendimentos. Os benefícios em qualidade da produção e os benefícios em segurança resultam do fato de que os requisitos energéticos dos processos podem ser controlados e monitorados com maior cuidado e precisão.

Como exemplo simples, atualmente poucos modelos econométricos e de engenharia de uso-final provêm uma caracterização merecida das tecnologias, tanto das existentes quanto das emergentes. Mesmo em se tratando de modelos com apenas uma caracterização limitada da tecnologia, quando comparadas as diferentes opções tecnológicas, tais modelos tendem a prever diferenças muito significativas nos padrões de consumo da energia. Uma caracterização não apropriada da tecnologia pode induzir à análises relativamente fracas e, eventualmente, à escolhas distantes das ótimas. Uma perspectiva mais esclarecedora acerca

das tecnologias emergentes/eficientes auxilia: (i) a identificar novos projetos de pesquisa e desenvolvimento; (ii) a identificar as tecnologias potenciais para as ações de transformação do mercado; (iii) a prover informações relevantes sobre as tecnologias para os formuladores de políticas; e (iv) a oferecer novos subsídios para o desenvolvimento tecnológico e para os potenciais de eficiência energética.

Um panorama sobre o atual estado de desenvolvimento dos estudos e pesquisas, objetivando incorporar o planejamento integrado de recursos (PIR) no atendimento das utilizações da energia elétrica, pode ser percebido através da conjuntura apresentada no decorrer deste capítulo.

1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS DA PESQUISA

A exposição desenvolvida nas seções seguintes, do estado da arte sobre a problemática quanto às utilizações da energia elétrica, como *commodity* e bem essencial, e sua importância fundamental para o desenvolvimento, releva ser imperioso que essas funções da energia sejam realizadas observando-se a sustentabilidade, dada esta, ser a forma através da qual essas funções se poderão manter ao serviço das gerações atuais e futuras. Entretanto, a consideração conjunta das funções da energia junto com os requisitos de sustentabilidade, no modelamento dos problemas em energia elétrica, ainda não alcançou a plenitude das dimensões dos vários contextos de subproblemas associados. Depreende-se, assim, que ainda existem oportunidades potenciais para o desenvolvimento de pesquisas associadas a esses âmbitos.

Nesse contexto, esta pesquisa tem como objetivos gerais:

Estender a discussão do problema eletro - energético, especialmente no segmento dos usos - finais industriais, de modo a se considerarem as variáveis que expressam, também, os objetivos em sustentabilidade. Esses objetivos são discutidos sob a forma de custos das externalidades ambientais e sociais decorrentes das explorações e utilizações da energia elétrica.

Através dessa discussão, relevar a necessidade de os problemas em energia elétrica, nos diversos segmentos, se contextualizarem como problemas integrados do atendimento

energético com explicitação de objetivos e custos considerados nos modelos tradicionais e, também, de objetivos e custos das externalidades sociais e ambientais. Fazendo-se essa integração a abordagem dos problemas em energia elétrica estará emergindo para a dimensão do planejamento integrado de recursos energéticos.

Os objetivos específicos visados por esta pesquisa são:

Incorporar no problema do atendimento em energia elétrica para a produção dos serviços de energia industriais: (i) as variáveis de alta eficiência energética proporcionada pelas opções de tecnologias e processos industriais, de modo que a solução do problema do atendimento da demanda consumidora industrial seja de mínimo custo técnico; e (ii) as variáveis dos custos das externalidades ambientais e sociais visando a que o problema do atendimento em energia elétrica, da demanda consumidora, tenha como solução, também, um custo mínimo das externalidades. A consideração simultânea destes custos, num mesmo problema de atendimento energético dos usos – finais, conduz à obtenção de soluções de mínimo custo total ou global. A partir da abordagem e integração exploradas o problema resultante é formulado, modelado e resolvido como um problema de programação linear.

A principal contribuição da tese está no fato de proporcionar uma metodologia analítica para a determinação e compreensão da demanda de energia elétrica nas utilizações finais, numa perspectiva de custos, tanto técnicos quanto em externalidades ambientais e sociais. Com isso, subsidia-se o apoio à decisão de consumidores industriais na implementação de tecnologias de eficiência energética, conservação de energia e gerenciamento pelo lado da demanda, fatores importantes no auxílio ao alcance da tão requerida transformação do mercado de energia elétrica.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

No capítulo 1 é feito um levantamento geral do estado da arte associado com as metodologias que lidam com a energia elétrica, com ênfase na determinação da demanda de energia elétrica. Junto com esse levantamento são identificados os aspectos problemáticos que determinam a necessidade de um contínuo aprimoramento dessas metodologias, sobretudo em vistas a refletirem o interesse crescente e insustentável dos

custos técnicos e das externalidades induzidos pelos aumentos contínuos das demandas em energia elétrica, aumentos esses, freqüentemente acomodados pelos modelos tradicionais da oferta de energia elétrica.

No capítulo 2 são analisados os aspectos considerados críticos dentro do planejamento e da operação energética do setor elétrico, associando-se isso, a um contexto baseado na alocação de benefícios. Esta abordagem é particularmente importante para se poder identificar e situar o consumidor como um agente ativo do setor de energia que pode dispor de instrumentos de intervenção nos negócios em energia. Em decorrência de o atendimento energético estar associado a um aumento do valor das externalidades, neste mesmo capítulo são discutidas as externalidades que inferem no problema do atendimento energético.

No capítulo 3 é apresentada uma nova abordagem para o problema do potencial de conservação de energia elétrica na indústria. Para tanto são discutidos os principais serviços de energia e as principais cargas envolvidas nas utilizações-finais da eletricidade na indústria. Conceitos como cargas modificadas e operações modificadas na indústria são propostos como elementos competitivos que interagem com cargas e serviços industriais existentes.

No capítulo 4 são discutidas as principais variáveis associadas aos custos da energia elétrica, as fontes desses custos e as possibilidades de soluções mitigadoras. Esta abordagem afigura-se particularmente necessária devido a necessidade da explicitação dessas variáveis nos modelos de uso-final. Isto é fundamental quando o objetivo é buscar sinergias da eficiência energética e da inovação tecnológica como partes da solução do problema da redução das intensidades energéticas sem perda da produção de *commodities* energéticas industriais. Os custos são divididos e analisados em dois grandes grupos, os custos técnico – econômico – financeiros e os custos das externalidades.

No capítulo 5 são abordadas as conexões que vinculam o desenvolvimento e o atendimento energético, implicando-se na caracterização do problema energético como um problema que requer estratégias de sustentabilidade para assegurar a continuidade das utilizações energéticas e o consumo de energia requerido por esse desenvolvimento. Através desse debate subsidia-se a conformidade da formulação proposta, como um problema cuja solução busca o desenvolvimento sustentado. Seguidamente, é desenvolvida a formulação

matemática do problema do potencial de conservação de energia no segmento industrial para o desenvolvimento sustentado e detalhada a metodologia de sua solução. Validando a proposta é realizada, finalmente, a implementação computacional através de dois estudos de caso, sendo um exemplo teste e outro, um sistema real com características próximas da realidade industrial.

1.3 ESTUDOS ENERGÉTICOS BASEADOS NO GERENCIAMENTO DO LADO DA DEMANDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Os estudos sobre as projeções da demanda tiveram abordagens, ao longo de muitos anos, vinculadas, sobretudo, às perspectivas de expansão da oferta devido à diversas razões, outrora vistas como óbvias. As abordagens, numa perspectiva do lado da demanda, como opção para assegurar ou aumentar a disponibilidade de suprimento, começaram a ser objeto de estudos e pesquisas há relativamente pouco tempo. Essas abordagens têm tido como causas relevantes as reavaliações dos modelos de desenvolvimento seguidos, principalmente em relação ao meio ambiente e a valorização de novas dimensões de capital.

A avaliação do GLD começou com o primeiro GLD ou programa de conservação, em 1973, segundo PETERS (FLORY *et al.*, 1994) e, desde então, gradativamente o GLD tem-se tornado uma opção importante ao longo dos últimos quarenta anos.

Durante os anos 70, a avaliação dos programas de GLD concentrava-se sobre os aspectos de monitoramento dos participantes dos programas, da sua satisfação e das avaliações da engenharia de uso-final sobre os impactos de carga. A partir desses primórdios até meados dos anos 80, ocorreram diversos melhoramentos nas metodologias para a avaliação dos programas de GLD.

A principal melhoria foi o início da comparação das despesas dos participantes de programas com informações estatísticas de grupos de controle, formados por consumidores não-participantes. Essa visão permitiu aos analistas das concessionárias, distinguir mudanças no consumo, motivadas por programas de GLD, das mudanças que ocorreriam sem a participação desses programas. Nesse âmbito constatou-se, por exemplo, que alguns participantes dos programas de GLD se dispunham a diminuir seus usos energéticos não

em decorrência dos programas de GLD, mas sim, de outros fatores tais como preços, condições econômicas, clima, ou a possibilidade de alguns participantes modificarem seu comportamento mesmo sem programas de GLD das concessionárias.

A Figura 1, por exemplo, ilustra uma comparação da mudança do comportamento entre consumidores participantes e um grupo de controle de consumidores não-participantes de programas de GLD. Através dessa figura denota-se que os consumidores não-participantes registram uma pequena redução "natural" no uso da energia. Esse comportamento pode ser estendido e interpretado em termos de alguns participantes dos programas de GLD também se habilitarem a diminuir seu consumo em virtude de outras razões (*free-riders* ou voluntários espontâneos).

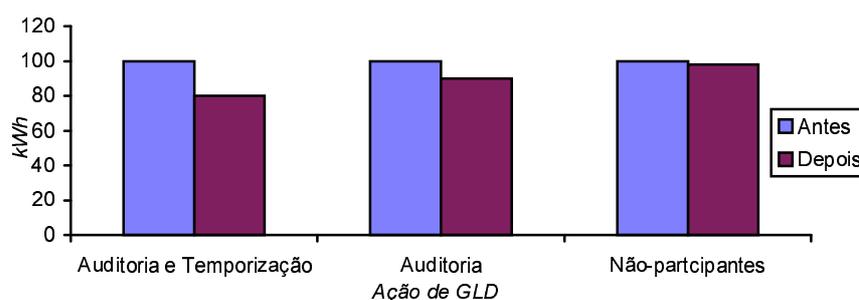


Figura 1 - Comparação do Comportamento de Consumidores Frente ao GLD (FLORY *et al.*, 1994).

Assim, o processo de avaliação precisa considerar a análise da eficiência e da efetividade da implementação e administração de determinado programa de GLD. O objetivo final é certificar-se de que a implementação de um programa resulte em economias de custo efetivo. Ademais, a avaliação do GLD precisa determinar se o mesmo está sendo oferecido com eficiência a consumidores com potencial de economias, determinar seus custos e fornecer indicadores sobre como ele poderá ser modificado de modo a assegurar que o objetivo final seja alcançado.

Desde esses tempos à atualidade, vêm sendo desenvolvidas relevantes abordagens e metodologias associadas com a busca de equacionamentos adequados e balanceados face aos problemas em energia, e que consideram as opções de conservação de energia como principal ênfase. Esses estudos são analisados a seguir.

RAO e RADHAKRISHNA (1991) propõem uma metodologia de GLD para o setor agrícola, baseada no controle direto do equipamento da concessionária em situações onde o controle indireto através de incentivos tarifários e o controle direto do equipamento do consumidor não sejam viáveis em virtude de problemas locais de natureza social e/ou política. Nesse trabalho, adicionalmente, são identificadas diversas estratégias para o controle do equipamento da concessionária, sendo posteriormente, investigados seus relativos méritos técnico - econômicos e recomendada uma metodologia de GLD para a agricultura, baseada no controle dos transformadores de distribuição da concessionária. No artigo é utilizado um modelo de decisão simplificado, baseado no carregamento do alimentador, para estimar o impacto do GLD no planejamento da expansão do sistema e que satisfaça o crescimento da demanda ao longo de um horizonte de longo prazo (10 a 15 anos). Esta proposta foi implementada num sistema de distribuição real servindo cerca de 20.000 consumidores do segmento agrícola.

SHIRMOHAMMADI e THOMAS (1991), no interesse de valorizar a integração de novos recursos para o aumento da disponibilidade energética, apresentam um estudo no qual avaliam o impacto do sistema de transmissão no processo de planejamento da oferta desses novos recursos. A metodologia estabelece um conjunto de atributos para a valorização do recurso considerado. Esses atributos, principalmente de natureza econômica, são aqueles considerados relevantes à entrega do recurso e ao provimento de maiores benefícios ao consumidor. Entre esses atributos destacam-se a tarifa, a localização, a flexibilidade do recurso e da sua entrada em operação, a diversidade do combustível, a viabilidade do projeto além do impacto ambiental. Advém desses atributos, que o objetivo é fornecer “sinais econômicos corretos” para que potenciais recursos novos sejam conectados em pontos apropriados da rede, de modo a se prover um impacto ótimo do sistema de transmissão. A metodologia pressupõe um processo de gestão transparente no qual todas as informações podem ser disponibilizadas.

KULOOR *et al.* (1992) propõem um algoritmo para a programação do despacho de unidades geradoras no horizonte de curto-prazo. Esse algoritmo é inovador em virtude de incluir uma nova função para a manipulação das emissões de dióxido de enxofre (SO₂) de unidades geradoras térmicas à base de combustíveis fósseis. O método utiliza um algoritmo baseado na relaxação *lagrangeana* e pode ser considerado como uma nova abordagem para a programação de sistemas reais. Nesta proposta, as emissões são

consideradas através de uma função-objetivo secundária que é adicionada a uma função-objetivo principal usando-se um fator de ponderação. No modelo são consideradas as restrições de geração, de reserva, de combustíveis e ambientais. Também são levadas em conta as restrições individuais das unidades tais como, do estado de obrigatoriedade de funcionamento, da taxa de tomada da carga e dos tempos mínimos de carga e de descarga.

Num extenso e envolvente trabalho para a reflexão sobre a eficácia do GLD como recurso em atividades profissionais, FLORY *et al.* (1994) constataram que existe, com relação a ele, um interesse crescente, particularmente junto às concessionárias de energia e organismos reguladores. Associado com esse interesse observaram, igualmente, o aumento das preocupações e motivações para com as avaliações do GLD.

Os reguladores esperam que os profissionais das concessionárias, especialmente engenheiros, usem metodologias de planejamento de mínimo custo e o planejamento integrado de recursos (PIR) para ajustarem seus planos referentes à oferta de capacidade, refletindo o GLD.

As concessionárias também têm acenado para um interesse crescente na consideração dos efeitos do GLD sobre seus planos para o aumento da capacidade de transmissão e distribuição (T&D). Compartilham o consenso de que nenhuma maior e melhor expansão da distribuição poderá ser alcançada enquanto não forem esgotadas todas as opções de GLD.

Pelo fato de a maioria dos programas de GLD das concessionárias, ser ainda recente, relatam, como dificuldade aparente dos engenheiros das concessionárias, a previsibilidade do estado do GLD no momento em que ele for realmente preciso. Ensejando responder à questões desta natureza, verificar e melhorar a contribuição dos programas de GLD, analistas das concessionárias têm desenvolvido várias metodologias e procedimentos para mensurar o GLD.

Nessa perspectiva, os autores defendem, como princípios metodológicos, explorar as diferenças inerentes às avaliações do GLD ao nível da T&D e ao nível da geração, e rever a persistência e a confiabilidade dos programas de GLD nos segmentos industrial, comercial e residencial.

Desde um passado recente começaram a ser desenvolvidos esforços, no âmbito do GLD, para melhorar a precisão das avaliações dos impactos de carga, através de uma combinação de métodos. Conforme indicado na Figura 2, as concessionárias procuram determinar o verdadeiro impacto através de medições nos usos finais, análise das despesas faturadas e análises de engenharia. Essa triangulação aborda questões a respeito dos aspectos fortes e fracos dos diferentes métodos de GLD para avaliar as economias resultantes. Mediante a utilização dessa combinação de três critérios é possível diagnosticar as fontes das diferenças entre os métodos, podendo-se esclarecer as estimativas das economias dos diferentes métodos.



Figura 2 – Estratégia de Avaliação do GLD pelas Concessionárias (FLORY *et al.*, 1994).

STRBAC *et al.* (1996) propõem uma metodologia para a programação da operação de usinas, em simultâneo com a redução da demanda requerida para o estabelecimento de um mercado de energia pleno, tendo o lado da demanda, oportunidade para competir com o da oferta. O procedimento é semelhante ao mecanismo de GLD usado em algumas concessionárias de energia, como a *England & Wales Pool*.

Segundo constatação dos autores, a demanda não pode ser tratada como uma geração negativa, devido a sua habilidade para se redistribuir em resposta ao gerenciamento da carga, baseado na sinalização da tarifa. Devido a isso, sustentam a necessidade de uma metodologia mais apropriada para a programação dos recursos disponíveis, considerando as opções dos lados da oferta e da demanda, de modo a facilitar o novo mercado. Eles realçam, ainda, o fato de as formulações tradicionais, acerca do problema da programação

do despacho, não serem válidas quando a redução da carga for disponível, porque em consequência disso, a demanda bruta pode não ser conhecida.

Em vistas disso, apresentam um modelo composto para a programação da geração ótima, no qual também é considerada a redução da carga. Mostram também, que esse modelo pode ser usado para uma avaliação compreensiva de possíveis cenários para a implementação do GLD no mercado de energia e para a avaliação da sua influência sobre o custo total da produção, os custos marginais do sistema, a remuneração dos elementos de capacidade e a alocação de benefícios entre produtores e consumidores.

BILLINTON e LAKHANPAL (1996) se baseiam nas atribuições das concessionárias de energia elétrica junto com a preocupação pública em relação às questões ambientais e à necessidade da conservação de recursos naturais, para realçarem a atuação das concessionárias no sentido de darem resposta ao problema, considerando a participação crescente do lado consumidor. Neste sentido, o GLD torna-se uma das metas mais importantes das concessionárias de energia elétrica.

Conceituam o GLD, em geral, como toda a atividade adotada por uma concessionária de energia com o objetivo de modificar a curva de carga do sistema. Nesse contexto, eles apresentam um modelo que pode ser usado para quantificar objetivos sobre a modificação da carga base, inerentes ao GLD. Tendo constatado impactos significativos sobre a carga base, sugerem que o modelo proposto seja usado como ferramenta básica na elaboração e implementação de programas de GLD das concessionárias.

A integração do planejamento com opções dos lados da oferta e da demanda, na análise da confiabilidade, também é considerada. Adicionalmente, são conduzidos estudos para avaliar os efeitos das modificações da curva de carga sobre o planejamento da reserva, bem como, sobre o custo total da energia. Nesse custo total incluem-se os custos do sistema e os custos da interrupção do consumidor, sem inclusão dos custos associados com a implementação do GLD.

STRBAC e KIRSCHEN (1998) consideram o GLD como um meio muito flexível para o atendimento da carga de ponta na programação da geração. Nesse contexto, demonstram que num mercado competitivo de energia, o GLD e outras formas de geração flexíveis podem causar um aumento considerável e descontrolado nos preços se a programação da geração for estabelecida com base na minimização do custo total da produção.

Também se referem ao fato da competitividade do GLD poder resultar em índices artificialmente superestimados, se a programação da produção não levar em consideração os períodos de restituição da carga, normalmente subseqüentes aos de redução da carga. Em decorrência desses fatos, defendem então, que o valor atual do GLD deve ser reexaminado à luz destas constatações.

Nesse sentido, apontam para o fato de, num mercado de eletricidade, algumas concessionárias de geração poderem fornecer energia a um custo baixo, porém, com unidades geradoras inflexíveis, e outras, oferecerem o serviço a um custo mais elevado, mas com unidades altamente flexíveis. Conseqüentemente, aos consumidores deve ser dada oportunidade para oferecerem sua disponibilidade para a redução de suas demandas durante os períodos de ponta.

Referem-se ao exemplo da concessionária *Electricity Pool of England and Wales* (EPEW), que formaliza a participação de consumidores no mercado, mediante a adoção de um mecanismo de GLD. As opções oferecidas por esse mecanismo ajudam a proporcionar ao consumidor, um mercado aonde os preços da energia elétrica também podem ser reduzidos. Em outras palavras, esta atuação, aparentemente pode transferir, diretamente para os consumidores, os benefícios da diversidade de opções existentes. Isto porque, em seus procedimentos, a EPEW não simplesmente faz o despacho da geração numa base competitiva, como também realiza uma programação para um horizonte diário, de 24 horas, tomando em consideração as características das unidades geradoras em adição com os benefícios oferecidos por essas unidades. Quando a programação ótima das unidades é estabelecida, os preços são fixados com base nos custos marginais do sistema (CMS)².

Entretanto, seria desejável que tal programação ótima servisse melhor aos interesses dos consumidores, porém, existe uma diferença significativamente importante entre essa otimização e o funcionamento de um mercado livre (JACOBS, 1997). Na perspectiva do consumidor, toda a demanda é indistinta e, por isso, deveria ser comprada pelo menor preço possível, porém, na ótica da programação da geração, parte da demanda se reveste de maior valor. Considerando estes aspectos, neste trabalho é demonstrado que a minimização do custo de uma programação nem sempre resulta em preço mínimo para os consumidores.

² O CMS é definido como o custo incremental ajustado do gerador mais caro alocado no sistema, durante os intervalos de programação, com o objetivo de satisfazer ao incremento da demanda de carga do sistema.

Também é indicado como os vários componentes, da oferta de eletricidade, podem ser utilizados para se manipularem os preços marginais do sistema e se aumentarem as receitas de uma concessionária, proprietária de diversas unidades geradoras. Dado que, na prática (a exemplo da EPEW), o GLD é modelado como uma geração negativa muito flexível, então, os resultados também podem explicar porquê a introdução desta nova forma de competição tem sido acompanhada, ocasionalmente, de aumentos consideráveis dos preços durante os períodos de ponta. Esta situação tem relação com o fato dos períodos de redução da carga serem, usualmente seguidos e/ou ocasionalmente precedidos de períodos de restituição da carga (FLORY *et al.*, 1994). Em virtude de essa energia restituída ser fornecida pelos geradores, ela terá um efeito sobre o custo total de produção no período da programação. Com esse raciocínio, os autores argumentam o fato desse comportamento reduzir significativamente o valor do GLD. Sendo assim, recomendam para a necessidade de métodos que levem em consideração, também, a restituição da carga durante o processo de programação sem, contudo, se perder a competitividade do GLD.

NG e SHEBLÉ (1998) propõem uma metodologia para o gerenciamento da demanda, baseada no lucro/receita, com a finalidade de examinar a programação genérica do controle direto da carga (*direct load control* - DLC). A motivação dos autores tem como base o fato de, numa indústria de energia elétrica desregulada as concessionárias absorverem as conseqüências finais das decisões tomadas e, devido a isso, configurar-se a necessidade de um reexame do gerenciamento da carga.

A filosofia da proposta está em linha com a do gerenciamento da carga (GLD) que, introduzida inicialmente nos anos 70, almejava reduzir o custo da operação mantendo a confiabilidade do sistema de energia elétrica. Os autores se baseiam nos princípios de que, geralmente, o gerenciamento da carga pode ser categorizado em: *controle direto da carga*, que permite as concessionárias realizarem, unilateralmente, o corte remoto das cargas dos consumidores; *o controle indireto da carga*, que permite aos consumidores controlar suas cargas, independentemente, de acordo com o sinal de preço enviado pelas concessionárias; e a *conservação de energia local*, que prioriza o consumo de energia durante os períodos fora-de-ponta (baixo-custo) e a conservação de energia em períodos de ponta (alto-custo).

Com base numa função do preço de custo/mercado, a metodologia objetiva aumentar a rentabilidade das concessionárias. A metodologia não determina a quantidade de energia a

ser postergada ou restituída mais tarde, mas sim, controla o número de grupos por tipo de carga/consumidor para maximizar o rendimento. Neste sentido, através de um algoritmo baseado em programação linear, é examinado apenas o controle direto da carga com base no lucro das concessionárias. Adicionalmente à vantagem de um melhor sentido físico sobre como o controle dos equipamentos deve ser operado, o algoritmo de programação linear proporciona uma abordagem relativamente barata, porém poderosa, para a dimensão e complexidade do problema.

Agrupando seletivamente as cargas dos consumidores, as concessionárias podem oferecer incentivos aos respectivos consumidores para o controle direto de cargas selecionadas. Vários algoritmos, sobretudo de programação dinâmica, têm sido desenvolvidos para reduzir a ponta dos sistemas, os custos de operação, ou a margem de reserva (CHEN *et al.*, 1995; HSU e SU, 1991; COHEN e WANG, 1988; LEE e BREIPOHL, 1984; KURUCZ *et al.*, 1996).

À luz de estratégias, tendo o GLD como enfoque principal, essas abordagens, em geral, relevam determinados méritos em detrimento de outros. Por exemplo, no trabalho de CHEN *et al.* (1995) não é reconhecido o fato de que a carga máxima controlável varia de um período ao outro e, na abordagem de HSU e SU (1991) omite-se o comportamento restitutivo dependente da carga.

Um modelo de programação linear é abordado por KURUCZ *et al.*, (1996), visando reduzir a ponta do sistema. A metodologia considera todas as possíveis durações do controle. Com essa preposição, se a carga (custo) alterar ao longo do tempo, a solução resultante pode ser não-ótima. Entretanto, enquanto estes últimos tentam reduzir a ponta do sistema, LE *et al.* (1983) expõem o fato de que o custo de produção da configuração do sistema resultante, derivado da aplicação do controle da carga, pode não ser o ótimo.

De extrema importância, a despeito dos vários questionamentos que, sucessivamente, têm sido desenvolvidos, para acomodar objetivos específicos, tanto as concessionárias como os consumidores têm colhido os benefícios do gerenciamento da carga.

Entretanto, na perspectiva das concessionárias, os consumidores participantes dos programas de gerenciamento da demanda podem causar prejuízos financeiros. Igualmente, não obstante o conflito de interesses entre as duas partes, os consumidores têm acenado para o fato de o gerenciamento da demanda reduzir seus custos.

A introdução de estruturas de tarifas do tipo tempo de uso e de tarifas do tipo variadas no tempo tem suscitado muita controvérsia sobre a efetividade do gerenciamento da demanda. Por exemplo, a despeito da redução de custos, um deslocamento da carga de um período de tarifa elevada para um período de tarifa baixa pode, igualmente, resultar em um nível maior de perda do lucro. Contudo, os investimentos adiados, necessários para expandir o sistema de modo a acomodar a não migração dessa carga, sugerem-se compensadores.

Finalmente, o advento da desregulamentação e a conseqüente competição no mercado de energia elétrica têm tornado mais controverso o gerenciamento da demanda. O ambiente de mercado aberto força as concessionárias a absorverem as conseqüências finais das decisões tomadas. Desse modo, junto à necessidade de algoritmos mais eficientes para otimizar o gerenciamento da demanda, respostas sobre como este pode beneficiar as concessionárias e os consumidores ainda são requeridas.

As evoluções atuais sobre as práticas de avaliação incluem diversos assuntos nomeadamente, a persistência, a confiabilidade, a disponibilidade, o potencial técnico, o potencial de mercado e o potencial econômico. Essas metodologias interessam-se pela análise da persistência e da confiabilidade dos impactos de carga do GLD. Por exemplo, analisam se os impactos de carga da substituição da iluminação irão persistir ao longo do tempo, analisam aspectos da confiabilidade dos impactos de carga em períodos em que eles se afigurarem realmente necessários, como por exemplo, os períodos sazonais muito quentes ou muito frios. Entretanto, a persistência e a confiabilidade variam em função de cada programa de GLD particular.

Especificamente, a disponibilidade, um assunto de crucial importância no momento, procura respostas para questões colocadas em termos da possibilidade de se alocar geograficamente o GLD, numa parte de um sistema de distribuição onde ele se faça particularmente necessário e em termos da possibilidade de ativá-lo quando necessário ou desativá-lo quando não.

Critérios de avaliação, também contemporâneos, têm procurado abordar diferenças entre o potencial técnico e o potencial de mercado dos programas de GLD. O potencial técnico máximo de um programa de GLD está relacionado com a implementação de tecnologias já existentes, tecnicamente mais avançadas e de máximo custo efetivo. O potencial máximo

de mercado é baseado no número de consumidores atualmente dispostos a migrar para novas tecnologias tendo como determinantes os indicadores em conservação de energia.

Enquanto as pesquisas sobre o desenvolvimento de novas metodologias para a avaliação do GLD continuam evoluindo, algumas conclusões substanciais já são conhecidas, nomeadamente, as demonstrações consistentes das reduções de carga por medidas de GLD, as vias para melhorar os projetos de programas, de modo a conferi-los maior custo efetivo e o auxílio às concessionárias no desenvolvimento de programas de GLD para provimento confiável da energia elétrica.

Não obstante, a partir desta análise ao estado da arte, constata-se que a conservação de energia, no contexto do atendimento dos serviços energéticos, tem tido como foco a complementação da gestão dos sistemas de energia elétrica numa visão muito centrada no papel dos segmentos de oferta. Por outro, a ênfase às externalidades da oferta e do consumo de energia ainda não é incorporada com a devida profundidade.

Conseqüentemente, a constatação desse estado da arte sinaliza para a existência de campos de estudo nos contextos da produção dos serviços de energia, aonde se aprofundem, sobretudo: (i) a participação efetiva do consumidor na produção de seus serviços versus consumo de energia; e (ii) a relevância das externalidades como fatores de decisão do consumo de energia.

A concepção e a realização desta pesquisa emerge justamente da necessidade de se acomodarem, nos modelos de engenharia de uso-final, as variáveis associadas aos aumentos da eficiência técnica das tecnologias de uso-final, da possibilidade da eficiência comportamental dos consumidores nas utilizações da energia elétrica e dos valores das externalidades sociais e ambientais nos custos totais da energia elétrica. Tem-se como meta identificar, incorporar e avaliar o impacto dessas opções nas necessidades da produção dos serviços energéticos de consumidores industriais, a partir de suas variáveis determinantes, associadas aos benefícios energéticos e não-energéticos.

Enquanto se atribui um enfoque às tecnologias que sinalizam para um forte potencial em economizar energia, busca-se simultaneamente, contabilizar os benefícios não-energéticos associados com essas tecnologias, dado que esses podem ser fatores determinantes na adoção das tecnologias de uso-final. Espera-se através desta abordagem, ajudar a

continuidade dos esforços no sentido de se prover a identificação de potenciais significativos de economia de energia, disponíveis nas utilizações industriais proporcionando-se, nesse sentido, um avanço diante da produção e do consumo de energia limpa.

Também concorre, para a motivação deste trabalho, a percepção sobre a existência de um espaço, ainda imenso e pouco explorado, nos âmbitos da pesquisa, desenvolvimento e formulação de políticas em conservação, como fonte adicional da oferta de energia. Tais insuficiências relacionam-se ao fato de ainda não estarem esgotados os aspectos envolvendo a melhora do conhecimento comum sobre a contribuição efetiva da inovação tecnológica em eficiência energética, sobretudo no setor industrial. Realce-se que, apesar de várias tecnologias terem como característica principal, a economia de energia, freqüentemente os fatores que orientam a decisão de sua adoção são as reduções nos custos de capital além de outros benefícios não propriamente energéticos. Neste sentido, afigura-se importante um entendimento melhor acerca dos fatores determinantes da adoção e da utilização das tecnologias de eficiência e conservação de energia.

Diante desses fatos, este trabalho objetiva, assim, a análise compreensiva e a incorporação dos custos incorridos na produção dos serviços energéticos, incluindo-se nesses custos, os custos tradicionais (técnico – econômico - financeiros) e os custos das externalidades ambientais e sociais. A partir da análise, profunda e compreensiva do significado e da importância desses custos, é caracterizada a figura de um consumidor industrial, interessado também com os efeitos não desejáveis sobre o ambiente (poluentes aéreos, líquidos, sólidos) decorrentes das explorações da energia elétrica, especialmente induzidos por suas utilizações-finais. Ou seja, é um consumidor que encara o problema das externalidades como uma extensão do problema do atendimento da sua demanda de energia elétrica.

Para este “novo consumidor” a matriz de decisão, no escopo das utilizações-finais energéticas, contempla os custos técnicos – econômicos - financeiros e os valores das externalidades ambientais e sociais.

Sob essa visão de custo total assentam as decisões desse consumidor o qual atribui uma importância especial à adoção das tecnologias de eficiência e sinaliza para uma mudança de comportamento na operação de suas instalações elétricas. Ou seja, frente à compreensão

analítica dos subsídios gerados por uma tal metodologia e da possibilidade da sua efetividade, o consumidor industrial se posiciona como um participante ativo da *transformação do mercado* de energia elétrica, muito requerida para se beneficiar da funcionalidade da conservação, da eficiência energética e do gerenciamento do lado da demanda, como fontes adicionais e confiáveis da oferta de energia elétrica.

A metodologia é formulada, inicialmente, como um problema de programação matemática, do tipo *programação linear*, com uma função-objetivo que minimiza o custo total e um conjunto de restrições que atendem: (i) os limites do desperdício de energia; (ii) os serviços energéticos; (iii) os aspectos técnico-tecnológicos; (iv) os aspectos de mercado; (v) os aspectos econômicos; (vi) os limites dos custos ambientais; e (vii) os limites dos custos sociais.

Devido à elevada dimensionalidade e à inexistência de uma nova base de dados, que incorpore históricos de custos afins, seguidamente, o problema proposto é razoavelmente simplificado, reduzindo-se o espectro de suas restrições e variáveis, e viabilizando-se a sua implementação computacional. Nesse sentido, o modelo do problema contempla, finalmente, a mesma função-objetivo e os conjuntos das restrições do atendimento dos serviços de energia, do desperdício de energia, dos custos ambientais e dos custos sociais.

Com essa envergadura, uma apuração dos coeficientes e recursos do modelo matemático é viabilizada, segundo uma base de valoração comum, associada à unidades de conversão envolvendo desde a energia primária, passando por vetores, até a produção dos serviços de energia nos usos-finais. O problema resultante é, conseqüentemente, resolvido como um problema de *programação linear* (PL).

De modo a se alcançarem os objetivos previstos, nas seções seguintes, deste capítulo, é realizada uma discussão detalhada acerca da problemática envolvida no atendimento do crescimento da demanda, através das tradicionais opções de oferta, relacionando-se essa problemática com as potencialidades da conservação de energia como opções de solução do problema. São identificados, como restrições de um tal modelo prevalecente, os problemas associados à maturação de projetos de grande porte e os problemas com a escassez de investimentos, por um lado. Por outro, os próprios modelos de previsão do crescimento da demanda são analisados, deduzindo-se o quão, em alguns momentos do

histórico, podem ter sido equivocados, tanto por superestimativas quanto por subestimativas nas previsões, causando pesados efeitos sobre a economia como um todo.

Frente a essas dificuldades dos modelos históricos é destacada a importância do desenvolvimento de novos métodos de projeção e da análise da demanda de energia nos quais se contemplem como variáveis, a eficiência energética, a conservação de energia e o gerenciamento do lado da demanda, como recursos adicionais da oferta de energia.

1.4 O PROBLEMA DO ATENDIMENTO DO CRESCIMENTO DA DEMANDA ATRAVÉS DAS OPÇÕES DE OFERTA E A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

A atividade econômica consiste basicamente na organização do ambiente para atender às nossas necessidades e propiciar o nosso conforto. Para isto é necessária a energia, ou seja, é necessária a capacidade de executar trabalho, de movimentar massas e transformar a matéria (FONSECA, 1999). As necessidades humanas orientam e determinam, finalmente, a demanda por energia elétrica. Cite-se, por exemplo, a necessidade de água para consumo de moradores de determinado condomínio residencial, a qual poderá ser satisfeita, parcialmente pela compra de um acionamento elétrico composto, basicamente, de um motor de indução de alta eficiência e de uma bomba d'água. Este sistema demandará, para operação, uma certa quantidade de energia elétrica em conformidade, também, a um determinado padrão de comportamento dos moradores. O lojista, vendedor do acionamento elétrico, utiliza a energia elétrica para, entre outras finalidades, iluminar os ambientes e expor os produtos de fabricantes, entre os quais os do fabricante do acionamento elétrico. De seu lado, os fabricantes dos acionamentos elétricos utilizam-se da energia elétrica para seus diversos processos de manufatura. Deduz-se deste exemplo prático e elementar, que os usos considerados estão intrinsecamente associados num só uso, para o qual estes se interligam visando satisfazê-lo: o desejo individual expresso sob alguma forma de serviço da água. Diante das expectativas inter-relacionadas, numa visão de concessionária (atendimento da demanda pela oferta) resulta, como umas de suas diretrizes primordiais, que o seu objetivo-fim é o de prover fornecimento adequado e confiável de energia elétrica, aos consumidores, a um custo justo.

Desta simples leitura, compreende-se que este problema, como um todo e fim, pode ser interpretado e desagregado, tanto em função dos interesses dos diferentes agentes do setor elétrico (geradores, transmissores, distribuidores, comercializadores e consumidores), quanto em função dos diferentes horizontes de tempo (longo-prazo, médio-prazo e curto-prazo). Desempenhando um papel importante, como característica permanente, está a necessidade de haver uma interação adequada entre os equacionamentos dos problemas envolvendo esses diversos agentes e horizontes.

Para cada tipo de problema, em função do horizonte e da abrangência da formulação, que contemplem múltiplos objetivos de interesse também do consumidor, podem identificar-se aspectos que impeçam que as soluções do problema, tradicionalmente formulado pela concessionária, satisfaçam simultaneamente, à concessionária num extremo e ao consumidor no outro. Concomitantemente, muito menos ainda, que algumas de tais soluções possam ser implementadas em prazos de tempo e custos razoavelmente satisfatórios para ambos. Neste sentido torna-se importante caracterizar a cadeia problemática envolvendo os diversos agentes, detalhando principalmente, os aspectos dos custos percebidos pelo consumidor, por um lado, para quem estes devem ser mínimos, e do serviço confiável ofertado pelas concessionárias, por outro, para quem um retorno compatível pelo serviço é esperado. Para tanto, nas seções seguintes é desenvolvida uma abordagem contemplando uma visão compreensiva moderna, a respeito do problema do atendimento em energia elétrica. Nessa discussão são levantadas, também, as razões para a necessidade de se incluírem outras variáveis associadas a esse problema básico, tipicamente explorado pelas concessionárias, mas com características para atrair, igualmente, o interesse de consumidores. A modernidade de que se trata e que é vinculada, de modo inovador, ao problema do atendimento energético convencional, refere-se a conservação de energia, a eficiência energética, ao gerenciamento da demanda e outras estratégias sustentáveis que resultem na redução de intensidades energéticas e na mitigação de externalidades da geração e do consumo da energia elétrica.

1.5 PROBLEMAS TÍPICOS DA INFRA-ESTRUTURA DE GRANDE PORTE

As usinas geradoras de energia elétrica, tradicionalmente necessárias à expansão da oferta, são tipicamente, empreendimentos tecnológicos de grande porte, com elevada intensidade

de capital e com longos períodos para a sua efetivação, desde o projeto até a entrada em operação. Estas características prevalecem, mesmo se desprezando as incertezas associadas aos seus investimentos e custos e, considerando-se apenas, o período entre o início das obras até a entrada em operação de determinada usina.

Particularmente, devido aos longos períodos de tempo necessários para colocar em serviço novos sistemas de geração (G) de um lado, e de transmissão (T) de outro, ou de ambos geração e transmissão (G&T), prover fornecimento adequado de energia elétrica, requer projeções de longo prazo para as vendas/consumo de energia e para a demanda de ponta. Neste sentido tem-se, de um lado, a tradicional característica da longa duração das construções e, do outro, a imperiosa necessidade de previsões oportunas de dados adequados sobre o crescimento da demanda, motivo das expansões requeridas. Estas duas características adicionam mais incertezas aos problemas da oferta de energia com o conseqüente fortalecimento da necessidade de soluções inovadoras e atualizadas.

Especificamente, o exame ao longo desses longos períodos, das necessidades de investimentos de capital na geração, pode revelar períodos de elevada demanda de investimentos. Se nesse exame adotar-se, também, o Planejamento Integrado de Recursos (PIR), pode-se chegar à conclusão de que determinado empreendimento ou infra-estrutura adicional da oferta (geração e/ou transmissão) pode ser postergado através de soluções baseadas em eficiência energética (EEn), gerenciamento do lado da demanda (GLD) e conservação de energia (CEn). Através dessas soluções, pode-se aliviar as pressões associadas às necessidades de investimento e estabilizar-se o fluxo financeiro atual e futuro das concessionárias e, de algum modo, dos segmentos consumidores. O nível de soluções baseadas em EEn, GLD e CEn depende de vários fatores objetivos e subjetivos, entre eles, da decisão de consumidores para dispor de tais soluções. CAMARGO (1996) é um dos exemplos que analisa e avalia, com detalhe, esses fatores, apontando algumas soluções para lidar com eles e, dessa forma, o planejamento dispor dessas opções como soluções adicionais da oferta de energia elétrica. As estratégias da busca de soluções em EEn, GLD e CEn, têm sido abordadas, em geral, enfatizando-as como iniciativas das concessionárias. Apesar de alguns notáveis e bons resultados, já obtidos e divulgados em diversos trabalhos especializados (BROWN, 2003; SWISHER *et al.*, 1997; FLORY *et al.*, 1994), as tradicionais abordagens, tipicamente assentes em incentivos, das concessionárias para os consumidores, remete estes últimos a proverem apenas as soluções “participativas em prol

das concessionárias”, deixando-se assim, de se captarem também, as soluções latentes em ações “participativas em prol do próprio consumidor”. Exemplos de abordagens sobre soluções “participativas em prol das concessionárias” são o controle direto da carga, o controle indireto da carga e os métodos incentivados (NG e SHEBLÉ, 1998; KURUCZ *et al.*, 1996; STRBAC *et al.*, 1996; CHEN *et al.*, 1995; FLORY *et al.*, 1994; HSU e SU, 1991; COHEN e WANG, 1988; LEE e BREIPOHL, 1984; LE *et al.*, 1983; BELLARMINE, 2000; MENDONÇA, 1999; PARACHA e DOULAI, 1998).

Em face da enormidade de opções disponíveis do lado da demanda, ainda não muito bem exploradas, este trabalho busca, também, a consideração desta parcela de soluções, ou seja, de soluções “participativas em prol do próprio consumidor”, de modo a se alargar o conjunto de soluções adicionais da oferta e da disponibilidade de energia elétrica nas utilizações finais industriais.

1.6 PROBLEMAS TÍPICOS DA PREVISÃO DO CRESCIMENTO DA DEMANDA

A energia elétrica, vista como uma *commodity* agregada, porém com grande variedade de seus consumidores e serviços finais – variando desde a simples iluminação de interiores de residências até, por exemplo, às complexas cadeias da produção de aços em fornos elétricos de siderúrgicas – implica numa vasta gama de demandas desagregadas. Assim, para uma *commodity*, desta natureza, torna-se importante, desagregar os diferentes padrões de demanda para que se percebam o comportamento e os impactos da operação associada. Conseqüentemente, tem sido prática comum, desagregar a utilização da energia elétrica em segmentos consumidores como residencial, comercial, industrial, agropecuário, público e outros. Ademais, atualmente têm sido crescentes a busca e a utilização da desagregação do consumo de energia elétrica, por usos-finais dentro de cada segmento, tendo-se em vista a abstração de uma visão tão próxima quanto possível, a respeito das vias em que a energia elétrica é utilizada.

A desagregação é, então, vista como um método que permite abstrair e compreender melhor as informações implícitas na curva de carga, por exemplo, a forma como se

comportam as variações de cada tipo de carga, o seu impacto sobre a curva de carga e as relações (diferenças, semelhanças) entre as demandas das diversas cargas.

Até por volta da década de 70, por exemplo, muitas indústrias, incluindo as concessionárias de energia elétrica, projetavam o crescimento da demanda usando, preferencialmente, abordagens baseadas em retas de tendência temporal. Não obstante, a obtenção de alguma forma da curva do histórico não conduz à abstração das causas ou fatores importantes do crescimento da carga.

Tomando como exemplo, o evento bem conhecido da crise do petróleo, de 73 - 74, essas abordagens não foram capazes de prever ou explicar as bruscas variações no crescimento da demanda, que se seguiram a partir daquele período. Assim, técnicas de projeção mais aprimoradas e complexas vêm sendo adotadas, especialmente nas indústrias concessionárias de energia elétrica. Entre essas técnicas destacam-se as diversas variantes de modelos econométricos e de modelos de usos-finais ou modelos de engenharia, os quais geralmente, podem ser enquadrados nos seguintes tipos (GELLINGS, 1996):

- *Métodos de extrapolação;*
- *Métodos estatísticos;*
- *Métodos econométricos e de usos-finais;*
- *Métodos econométricos;*
- *Métodos econométricos agregados;*
- *Métodos de usos-finais;*
- *Métodos econométricos e de usos-finais integrados;*
- *Métodos de projeção da curva de carga; e*
- *Métodos de aceitação ou penetração de mercado.*

No Apêndice 1 são descritos, de modo sucinto, os principais conceitos e fundamentos acerca desses métodos, comumente usados nos estudos sobre a projeção do crescimento da demanda em energia elétrica.

1.7 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DOS MÉTODOS DE PROJEÇÃO E DA ANÁLISE DA DEMANDA DE ENERGIA

A literatura especializada, que trata do problema associado com a busca de novas soluções energéticas compatíveis com a realidade atual, tem evoluído bastante, citando-se, por exemplo, entre outros, BROWN, 2003; MARTIN *et al.*, 2000; FONSECA, 1999; SWISHER *et al.*, 1997; GELLINGS, 1996 e GOTTSCHALK, 1996. Essa realidade associada ao problema do atendimento energético, é caracterizada pela insuficiência de recursos volumosos para atender a expansão da oferta tradicional e pelo aumento das restrições ecológicas, induzidas pelas utilizações tecnológicas com elevadas intensidades energéticas.

Nessa literatura especializada tem-se realçado, como oportuna e fundamental, a continuidade do desenvolvimento de esforços com foco em modelos híbridos de engenharia de uso-final, modelos econométricos, modelos sobre a curva de carga e modelos de saturação do mercado. Esses esforços são essenciais para que a disponibilidade de energia confiável para as sociedades não sofra colapso intempestivo, cujos sintomas têm sido percebidos através de recentes racionamentos ou blecautes, ocorridos em vários sistemas de energia elétrica pelo mundo afora (Brasil, Argentina, EUA, Canadá, Itália, entre outros).

A identificação e a utilização efetiva das soluções associadas, proporcionadas por esses esforços em modelagem, é particularmente importante se levarmos em conta o fato de que as implementações de mudanças, no provimento de novas alternativas tecnológicas, na geração e na utilização de energia, evoluem lentamente. Nesse sentido, devem continuar sendo buscadas, metodologias que conduzam à racionalização e adequação entre o comportamento e os recursos existentes, sem se interromper o atendimento à produção dos serviços energéticos.

Associados, ainda, com a demanda de energia, diversos assuntos têm sido levantados e outros questionados, caracterizando-se o desejo da construção de um novo ambiente preocupado com a busca de respostas acerca do que poderá demandar maior atenção no futuro, em vistas ao atendimento energético. Respostas e correntes preliminares têm indicado que, entre as questões que exigirão atenção especial, continuarão tendo como foco

central de fundamental importância, o incremento da eficiência energética nas utilizações finais da energia elétrica e o aumento da oferta de energia renovável na composição da matriz energética de todas as nações.

Juntando-se a isso, as novas ações regulatórias, o crescimento de pressões políticas e a evolução da percepção dos benefícios públicos, têm atraído a atenção de concessionárias de energia, especialmente para o suprimento e o fornecimento de energia elétrica, com maior envolvimento e integração das variáveis que expressem a conservação de recursos energéticos.

Quanto à diversificação da matriz energética, entendida aqui, como a direção correta que aponte para a substituição da energia elétrica não-limpa pela de outras fontes limpas ou outros combustíveis ou processos com menores intensidades energéticas, visando melhorar a produtividade e restabelecer a vantagem tecnológica e de custos efetivos da indústria, esta também está no centro das discussões atuais, pelo estabelecimento de novas e mais racionais relações entre a energia e seus agentes.

Paralelamente às modelagens com esses enfoques, buscam-se também, respostas sobre quais ações, e por quem (concessionárias, reguladores, consumidores, governos), devem ser encetadas para se estimular a transformação do mercado de energia elétrica e se acelerar o seu enquadramento a custos efetivos.

Ainda existem várias questões requerendo respostas a partir de estudos apropriados. Entre essas questões, citam-se: (i) a disponibilidade de dados sobre as indústrias e mercados de produtos; (ii) a disseminação de novas tecnologias emergentes, ora existentes, e a estimativa de suas penetrações no mercado alcançável; (iii) o desenvolvimento contínuo de novas tecnologias e o prognóstico de suas características, custos e lançamento no mercado de energia; e (iv) a determinação das ações de impacto sob responsabilidade dos agentes do setor de energia elétrica com relação aos itens relacionados.

No decurso desses esforços deve-se ter em conta o fato de que, sob o ponto de vista de custo-efetivo, existe um limite viável quanto à quantidade de dados, a serem colhidos e manipulados, em comparação aos ganhos adicionais decorrentes do empenho nesses esforços. Depreende-se conseqüentemente, ser interessante também, que se pesquisem novas técnicas que tenham como características fundamentais: (i) requisito de uma

quantidade reduzida de dados para um grau de precisão desejado; e (ii) requisito de um nível de detalhe reduzido para a elaboração das projeções, porém, sem prejuízo da qualidade das informações resultantes.

Para tanto, pesquisadores de renomadas instituições, como ELETROBRÁS/PROCEL, EPRI, LBNL, ACEEE, RNL e WWI, têm se envolvido para prover a indústria de eletricidade, de ferramentas, dados e técnicas que acomodem esses objetivos e auxiliem na obtenção dessas informações de uma forma racional, confiável e a custo-efetivo. Não obstante, em virtude de várias razões, sobretudo associadas aos modelos históricos da estrutura do setor de energia elétrica, esses esforços têm sido orientados mais para os setores da indústria de concessionárias do que para os das indústrias de consumo de energia elétrica, como se pode aperceber, por exemplo, a partir das abordagens em FLORY *et al.* (1994) e GELLINGS (1996).

Ademais, pretende-se que na pesquisa dessas metodologias, atenção especial seja atribuída à elevação do nível de sofisticação e precisão dos modelos. Os esforços desenvolvidos têm produzido grandes impactos, entre os quais, veicular a arte e a ciência da previsão para uma ênfase mais científica do que “artística”. Especialmente, é no contexto dos objetivos da avaliação dos impactos dos avanços tecnológicos e da eficiência energética no consumo de energia, que os novos modelos encontram melhor aceitação, devendo-se isso, às suas características marcantemente explícitas, da estrutura física e comportamental do consumo de energia elétrica.

Conforme se tem referido, cuidados especiais devem ser tomados nas abordagens de engenharia, centradas apenas na estrutura física do consumo de energia. Busca-se, através desses cuidados, evitar possíveis omissões tanto em relação ao surgimento de novas utilizações finais quanto de outros efeitos importantes, tais como as políticas de incentivo aos programas de conservação de energia e os enquadramentos apropriados da energia sustentável nas matrizes e procedimentos tradicionais. É de fundamental importância o entendimento de que esses enquadramentos têm impactos significativos sobre as políticas de planejamento e da operação do setor de energia elétrica, como um todo, e de seus subsistemas particulares de geração, transmissão, distribuição, comercialização e utilização de energia.

Deve-se considerar ainda, que os modelos de previsão, para se aproximarem ainda mais da realidade, requerem projeções de valores futuros de cada fator de suas equações (coeficientes, parâmetros). Na prática, isto significa que também devem ser determinadas as projeções futuras de variáveis como: penetrações de mercado dos diversos dispositivos elétricos, expectativa do comportamento dos consumidores, opções de substituição de combustíveis, oportunidades de cogeração, níveis médios de potência ou capacidade das tecnologias, eficiências futuras e fatores de utilização dos diversos dispositivos elétricos.

Recentemente, diversas razões têm conduzido à algum modo de unificação dos dois tipos de abordagens previsionistas – de engenharia e de econometria - em diversas aplicações, entre os quais, dois deles, descritos na seqüência, são particularmente importantes.

Primeiro, porque se tornou evidente que os níveis futuros da penetração de mercado e dos fatores de utilização, para cada utilização final, estarão fortemente influenciados pela resposta dos consumidores à vários fatores sócio-econômicos, relevantes do consumo de energia (SWISHER e JANNUZZI, 1997). A este respeito, alguns estudos têm constatado e indicado que, para além dos importantes fatores sócio-econômicos do consumo de energia também podem prevalecer, nessa influência, diversos fatores, tanto objetivos quanto subjetivos, da decisão de consumidores (CAMARGO e BORENSTEIN, 1997; CAMARGO, 1996). Em face desta constatação, fazem-se necessárias também, abordagens que consigam balancear, adequadamente, os diversos interesses, alguns dos quais, conflitantes entre si. Advém da interação da resposta de consumidores às variáveis sócio-econômicas a importância de se recorrer às análises econométricas das informações históricas do consumo de energia, para se apurarem os impactos de ordem energética. É assim que uma das tendências seguidas é à busca da integração econométrica das relações que expressam o comportamento do consumidor com os modelos de usos-finais. Esforços inovadores também têm emergido na tentativa de se obterem novos modelos de previsão que incorporem as características das abordagens do tipo uso-final e do tipo econométrico, mantendo-se, porém, a relevância do consumidor (GELLINGS, 1996). Afinal, é ao consumidor a quem cabe decidir pela compra e utilização de aparelhos e dispositivos que operam a base de eletricidade.

Em segundo lugar, os modelos de previsão da demanda de energia baseados na oferta, enfrentam modernamente e cada vez mais, o aumento dos níveis das diversas restrições

associados às suas soluções, até certo ponto, vistas como insustentáveis quanto à capacidade de implementação, por parte dos agentes em particular e da sociedade como um todo (BROWN, 2003; FONSECA, 1999; SWISHER e JANNUZZI, 1997). Em virtude das restrições eminentes, configura-se oportuno e apropriado investir-se no exame de soluções baseadas na conservação de energia, gerenciamento do lado da demanda, eficiência energética e oferta de energia a partir de fontes renováveis, geralmente descentralizadas. Significa dizer que a CEn, a EEn e o GLD devem ser tratados como “fontes adicionais” no aumento da disponibilidade da energia elétrica. A CEn, a EEn e o GLD, como recursos adicionais da oferta de energia, podem ser avaliados dentro de uma formulação expandida e detalhada da previsão do crescimento da carga. Em tais formulações devem estar explicitados, criteriosamente, os efeitos das variações na quantidade, na eficiência, no comportamento e nos fatores de utilização dos diversos dispositivos de uso-final energético, sendo o resultado, um modelo de planejamento integrado de recursos energéticos (PIR).

1.8 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Através do desenvolvimento deste capítulo ficou evidente que o problema do atendimento energético tem sido tratado, no estado da arte, de modo a contemplar, sobretudo o gerenciamento do lado da demanda (GLD) e outras opções que refletem a redução do custo do fornecimento de energia. O estado da arte mostra, também, uma característica típica, prevalecente no tratamento do problema: o fato dessas opções serem abordadas, sobretudo como uma extensão do problema das concessionárias de energia, buscando a minimização do custo associado ao fornecimento da energia ou ao suprimento da demanda de ponta.

Por outro lado, constatou-se que os fatores de ordem ambiental devem ser trazidos para o bojo do problema relevando-se, ainda mais, a importância da conservação da energia, da eficiência energética e do gerenciamento do lado da demanda. Não obstante, a necessidade da redução dos impactos ambientais da oferta de energia tem sido, preferencialmente, relacionada como uma necessidade de se reduzirem os custos das externalidades associadas. Ou seja, os custos das externalidades não são contemplados com a devida objetividade e importância, como fatores de decisão do problema da oferta e do atendimento energético.

Ainda assim as metodologias, considerando essas opções e variáveis, são caracterizadas por fortes apelos, particularmente para o lado da oferta, ao abordarem o problema, com vínculo, sobretudo aos âmbitos do planejamento da expansão, da programação do despacho ou da administração do sistema elétrico concessionário.

As restrições que dificultam a continuidade do apelo à expansão tradicional da oferta de energia elétrica foram igualmente sintetizadas, concluindo-se ser necessária a elevação contínua da importância do lado consumidor nas estratégias da oferta e da disponibilidade da energia elétrica.

Finalmente, as técnicas usadas nos métodos de projeção e de análise da demanda de energia elétrica foram analisadas, concluindo-se pela necessidade de se privilegiarem os métodos dos usos-finais conjugados com os métodos econométricos, de modo a se explicitarem melhor os impactos e, a partir disso, se dispor das efetivas contribuições à solução do problema energético, das tecnologias de alta eficiência energética, da inovação tecnológica e dos aspectos comportamentais dos consumidores.

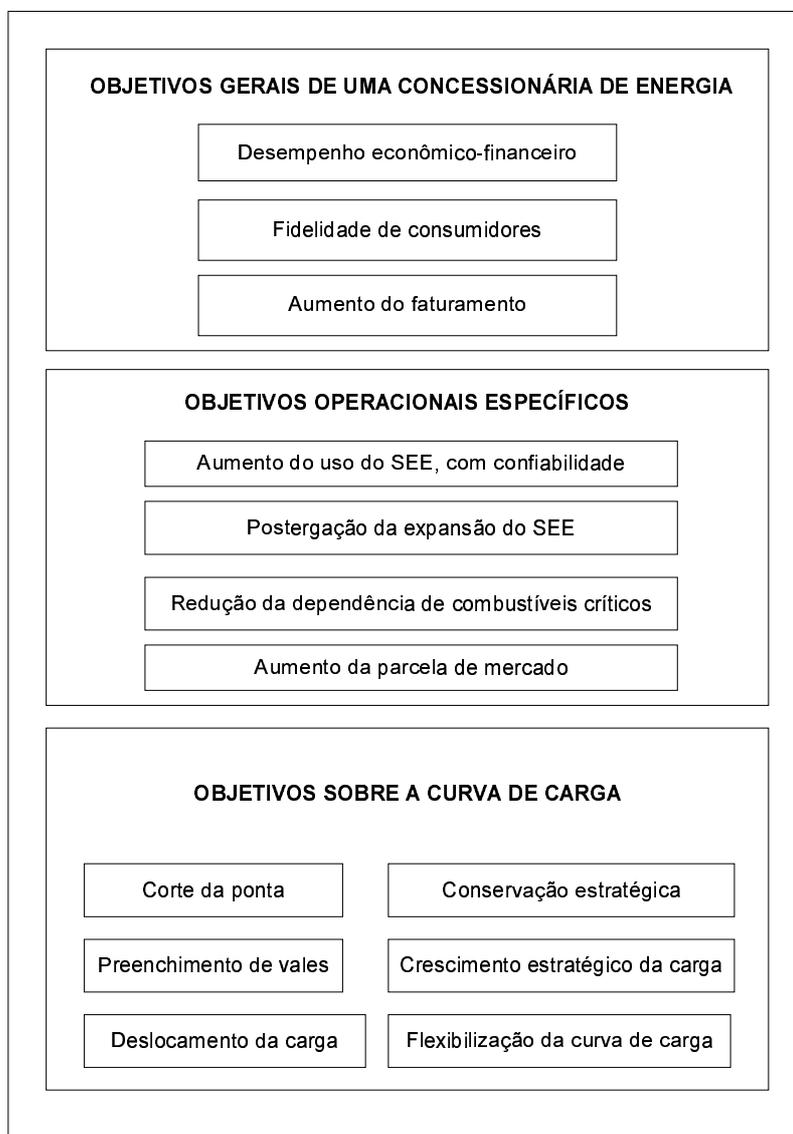
CAPÍTULO 2

2. ASPECTOS CRÍTICOS DO PLANEJAMENTO E DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA NUMA VISÃO BASEADA NA ALOCAÇÃO DE BENEFÍCIOS

No capítulo anterior foram discutidos o estado da arte e as técnicas utilizadas nas abordagens e metodologias sobre a problemática do atendimento energético e da previsão da demanda de energia, requerida à satisfação de diversas necessidades impostas por consumidores. O alcance e os objetivos dessas previsões podem ser estratificados para horizontes de longo, médio e curto prazo, numa visão de planejamento. Além dessas estratificações, são de grande importância os objetivos operacionais associados normalmente à programação energética.

As diversas restrições, assim como as saídas para contorná-las, que se têm tornado características no setor de energia, numa reflexão profunda, conduzem necessariamente ao questionamento sobre as parcelas de valores, na forma de custos e benefícios alocáveis, resultantes desses modelos, não importando qual a abordagem utilizada. Pretende-se, através de uma tal análise, e numa visão apoiada no planejamento, apurar subsídios que possam sustentar políticas atuais ou tendências de políticas, indexadas com a desregulamentação do setor, especificamente no que se refere à importância do consumidor, sua participação no setor de energia e na relação com a energia, vista esta, como *commodity* e bem público.

Para isso, adaptado de GELLINGS (1996), no Quadro 1 estão sintetizados, de modo geral, os fundamentos sobre a hierarquia, os objetivos e a alocação de benefícios no âmbito de um planejamento energético.



Quadro 1 – Hierarquia e Objetivos do Planejamento e da Operação de uma Concessionária de Energia. Adaptado de GELLINGS (1996).

Uma conclusão, dedutível a partir deste quadro, é a natureza explícita e predominantemente parcial com respeito à alocação de benefícios diretos, indexados aos resultados do modelo, a favor dos fornecedores de energia. Em outras palavras, não obstante o fato deste modelo visar, como objetivo-fim, o atendimento da demanda da sociedade como um todo, numa visão dos paradigmas da eficiência energética, pode-se concluir que os objetivos particulares de consumidores não estão explicitados. Refira-se

que, a explicitação e a alocação de objetivos dos agentes são condicionantes que desempenham papel importante na busca da mitigação das intensidades energéticas através da implementação dos diversos mecanismos do âmbito da conservação de energia (CEn), da eficiência energética (EEn) e do gerenciamento do lado da demanda (GLD).

Visando facilitar o entendimento sobre a carência e a importância da explicitação de benefícios particulares bem como a forma como essa carência interfere nas decisões de consumidores dentro das ações de cunho da CEn, nas seções seguintes é apresentada uma discussão em torno dos objetivos latentes nos três níveis hierárquicos representados no Quadro 1.

2.1 OBJETIVOS GERAIS DE UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA

A projetada abertura da indústria de energia elétrica, aonde os diversos agentes, sobretudo dos segmentos da geração (G), distribuição (D) e comercialização (Com), busquem uma atuação no mercado de energia, visando permanecer e prosperar num ambiente competitivo, remete as concessionárias de energia a atender os seguintes objetivos gerais:

Desempenho econômico - financeiro – Numa abordagem, simplificada e resumida, pode-se afirmar que este objetivo visa a que o comportamento das finanças provenientes das atividades de suprimento, no caso das concessionárias de geração, reflita os verdadeiros custos marginais de suprimento e outros custos incorridos, assegurando-se o retorno econômico dos investimentos realizados sobre a infra-estrutura de geração e, com isso, se acene para a possibilidade da continuidade dos investimentos para a necessária expansão do parque gerador que atenda, continuamente, a demanda de carga prevista.

No caso das concessionárias de distribuição, este objetivo visa a que o comportamento das finanças, provenientes das atividades de fornecimento, reflita os verdadeiros custos do serviço de distribuição, salvaguardando-se os aspectos de qualidade e confiabilidade do atendimento, assegurando-se o retorno econômico dos investimentos sobre a infra-estrutura da rede de distribuição e acenando-se para a possibilidade da continuidade de investimentos, para a necessária expansão do sistema de distribuição que atenda, continuamente, a demanda dos consumidores.

Denota-se, a partir desta breve caracterização, que em meio a um cenário de mercado de energia elétrica desregulado, aberto e competitivo, o desempenho econômico-financeiro poderá ser alcançado mediante uma atuação que tenha como pauta, acima de tudo, índices de eficiência elevados percebidos pelo consumidor final, tanto nos aspectos energéticos quanto técnicos e econômicos. Tenha-se em conta que um consumidor ideal, supondo-se uma sociedade ativa e participativa como um todo, estará atento a evitar que lhe sejam transferidos os ônus da baixa eficiência e do risco de coalisões entre os fornecedores. Por exemplo, mesmo que o despacho da operação a custos marginais seja característico de sistemas hidrotérmicos, como o sistema brasileiro (SILVA, 2001; FINARDI, 1999), o consumidor pode estar permanentemente exposto a arcar com práticas não transparentes, particularmente do lado dos geradores, contrárias aos pressupostos de um mercado verdadeiramente aberto.

Frente a essas forças de mercado e à possibilidade de seu poder de barganha, as ações de eficiência energética, conservação de energia e gerenciamento do lado da demanda, numa abordagem centrada na relevância dos objetivos particulares dos consumidores, além de subsidiarem aspectos defensivos, subsidiam aspectos ativos da decisão de consumidores quanto a sua participação no mercado de energia elétrica.

Assim, este trabalho insere-se, também, dentro do contexto da busca da avaliação e relevação dos custos incidentes sobre o consumidor e os benefícios usufruídos. A proposta é reforçada a partir, também, da constatação da evidência de que alguns de tais custos e benefícios, associados com os usos em energia, ainda não estão expostos em níveis de envergadura, tal que se favoreça uma adequada percepção pelo consumidor, como agente do setor de energia elétrica.

Fidelidade de consumidores – A desregulamentação da indústria de energia elétrica pode ser, sumária e simplificada, explicada como o desejo de se proporcionar a abertura do setor para a diversificação da participação de variados agentes de mercado (livre concorrência na geração (G), livre acesso à transmissão (T), livre negociação de contratos bilaterais entre geradores e consumidores (Con)), de diferentes estruturas de propriedade (geração estatal, produtores independentes de energia (PIE), autoprodutores (AP)) e de diferentes tipos de fontes de energia (fontes convencionais, geração distribuída (GD) e fontes renováveis).

Esta abertura conduz, necessariamente, a novas relações entre os diversos agentes. A nova configuração das relações pode se estabelecer, tanto entre os agentes dentro de um mesmo segmento quanto entre os de diferentes segmentos. Quer seja, de um modo ou de outro, resultará sempre a necessidade do estabelecimento de novas correlações de interesses tanto no ambiente quanto na intensidade do poder de barganha das diferentes forças.

A busca pela maximização de lucros das organizações num ambiente com essas características eleva, cada vez mais, a importância dos consumidores, conduzindo-se parte significativa dos esforços de *marketing*, nos vários níveis de ofertantes de vetores energéticos (geradoras (G), distribuidoras (D), comercializadoras (Com)), com o objetivo de assegurar a continuidade do relacionamento com o consumidor, através do binômio oferta - consumo de energia elétrica.

Denota-se, uma vez mais, que as respostas dos consumidores, podendo ser propensas à aderências de possíveis alianças, pressupõem que os consumidores “enxerguem” para si, alguma forma de expressão da minimização de seus custos, relacionados com as utilizações da energia elétrica. Uma tal minimização de custos, a favor do consumidor e por ele percebidos, remete o alcance da fidelidade de consumidores para algum mecanismo de expressão da eficiência energética da oferta, que simultaneamente, atenda aos objetivos particulares do ofertante e do consumidor de energia.

É, igualmente, baseado na percepção da importância desta questão, que também se insere este trabalho, através da busca de uma explicitação das variáveis de eficiência energética, junto ao consumidor, no modelo de decisão referente às suas utilizações da energia elétrica.

Aumento do Faturamento – O aumento do faturamento, explicitado através de alguma de suas formas, direta ou indireta, é sem dúvida, o objetivo que tem sido usado como base fundamental da atuação das concessionárias de energia elétrica, quer sejam dos segmentos de geração, transmissão, distribuição ou comercialização. Passando o aumento do faturamento, necessariamente, pelo aumento do consumo de energia pelos consumidores, é trivial que faça parte da expectativa dos consumidores, que um tal aumento do consumo, não necessariamente, implique em acréscimos nas suas “contas de eletricidade”.

Se por um lado, a expectativa do consumidor conduz ao conceito e à prática de um aumento dos serviços de energia, mas não necessariamente ao aumento do consumo de energia, então, o consumidor “encontrará”, na eficiência e conservação de energia, uma contribuição importante para as suas expectativas e para a solução do seu problema.

Do outro extremo estão as concessionárias de energia (geração, transmissão, distribuição, comercialização) para quem, à primeira vista, a busca por este objetivo parece conflitante com os seus objetivos comerciais. Nos dias de hoje, diversos fatos, entre eles a operação dos sistemas elétricos, próxima dos seus limites de capacidade, levam a crer, que umas das decisões, vistas pelas concessionárias como soluções de compromisso que possam atender, simultaneamente, a dois objetivos aparentemente contraditórios sejam, sem grandes dúvidas, aquelas que têm a ver com os investimentos e incentivos em eficiência energética e conservação de energia.

As especificidades da oferta e do consumo de energia tornam, de algum modo e segundo este ponto de vista (aumento do faturamento), os problemas globais, nos âmbitos do planejamento e da operação do setor elétrico, problemas com características “mutuamente divergentes ou excludentes”. A convergência, na visão dos problemas, por parte dos dois principais agentes (ofertantes e consumidores), pode ser conseguida mudando-se a abordagem acerca da visão econômico - financeira da oferta e do consumo de energia, de modo a se contemplarem os verdadeiros custos das externalidades, associados com a geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica.

Tendo-se em vista a importância e a necessidade deste novo equacionamento, este trabalho também contribui para subsidiar conceitos e métodos de planejamento de demandas energéticas, com foco no consumidor e com explicitação de custos e benefícios, que incorporem, além dos custos e benefícios conhecidos geralmente como convencionais, os custos e benefícios em externalidades.

2.2 OBJETIVOS OPERACIONAIS ESPECÍFICOS DE UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA

A partir dos objetivos gerais, discutidos na seção anterior, percebe-se que são as concessionárias os principais agentes que ficam munidos de instrumentos de atuação

importantes, especialmente para o planejamento energético de longo prazo. Entretanto, a materialização dos objetivos de longo prazo é viabilizada através de ações operacionais de médio e curto prazos.

Através do planejamento operacional, os planejadores das concessionárias se orientam na tomada e implementação de decisões específicas. Como requisito, para tais ações, os decisores se subsidiam com informações e dados que lhes permitem examinar e avaliar iniciativas sobre o mercado e outros requisitos comerciais alternativos. Uma discussão detalhada sobre os aspectos comumente visados, a respeito dos objetivos operacionais específicos, é apresentada a seguir.

Aumento do uso do sistema de energia elétrica (SEE) – Os sistemas de energia elétrica, como um todo, possuem geralmente as seguintes propriedades: (i) comportamento não linear; (ii) seus componentes, tais como geradores, linhas de transmissão e transformadores, têm como características, as suas capacidades limites (máximas e/ou máximas e mínimas, dependendo do tipo de elemento do sistema); (iii) apresentam diferentes tipos de perdas de energia; e (iv) são dimensionados para o atendimento da demanda atual e futura.

Associado a essas propriedades pode resultar, em algum ponto e em determinado momento, que uma considerável capacidade do sistema seja ociosa. Considerando, ainda, as particularidades inerentes à operação dos SEE, baixos fatores de carregamento do sistema podem, muitas vezes, implicar em aumentos das diversas perdas nas unidades geradoras, linhas de transmissão e transformadores.

Conseqüentemente, advém das propriedades, características e comportamento do sistema de energia elétrica e de seus componentes que, técnica e operacionalmente, níveis adequados de seus carregamentos, em certos casos, podem requerer o aumento da sua utilização, de modo a se reduzir o impacto das perdas no atendimento da demanda. Em outras palavras, enseja-se que, atendidas as condições de segurança e confiabilidade, a operação ótima dos SEE's, também é alcançada mediante a operação dos seus subsistemas em torno de suas capacidades nominais.

A questão do aumento do uso do SEE também pode ser vista dentro de uma perspectiva de viabilidade econômica, à medida que a expansão do sistema também tem a ver com a

satisfação de taxas e períodos de retorno viáveis sobre os investimentos realizados. Além disso, este objetivo incorpora outros objetivos macros, como por exemplo, o papel da energia elétrica como bem essencial e como instrumento de políticas sociais, através do qual se preza o atendimento de todo o cidadão em qualquer lugar do território nacional.

Postergação da expansão do sistema de energia elétrica (SEE) – A postergação da expansão do SEE, é desejável e aplicável tanto para o subsistema de geração quanto para os subsistemas de transmissão e distribuição. Entretanto, as particularidades inerentes a cada subsistema implicam em que as estratégias para o alcance desse objetivo sejam elementos de problemas tipicamente abordados separadamente, porém, interligados. Além disso, este objetivo pode ser abordado tanto num contexto de planejamento energético quanto de programação energética.

Como objetivo operacional específico do planejamento energético, esta postergação se refere à possibilidade de se otimizar a expansão do SEE adiando-se, para momento apropriado, a construção adicional de novas usinas de geração, novas linhas de transmissão e novas redes de distribuição, sem que seja violado o atendimento da demanda (corte de carga ou carga não atendida) e sob requisitos adequados de confiabilidade e segurança do SEE.

Já, como objetivo operacional específico da programação energética, a abordagem da postergação da expansão é associada, tipicamente, com a postergação da adição de uma unidade geradora no contexto do problema da operação dos SEE's. Esse problema se refere à otimização do despacho da operação, em geral de um sistema hidrotérmico, como o sistema brasileiro, através da implementação de decisões operativas satisfazendo, entre outros aspectos importantes, políticas e mecanismos adequados de alocação de geradores a custos marginais de curto prazo (CMCP).

A partir de uma análise simplificada, vislumbra-se desta descrição, o fato de que este objetivo, visto tanto a partir de um contexto – planejamento energético - quanto de outro - programação energética – busca não onerar os custos, no suprimento e no fornecimento de energia elétrica, de modo a operacionalizar a atuação equilibrada das concessionárias, segundo uma visão de custeio e tarifa.

Particularmente, para o cerne dos objetivos incorporados neste contexto, convergem características consensuais entre concessionárias e consumidores. O entendimento de abordagens, formulações e soluções dos problemas, que conduzem ao alcance destes objetivos, é fundamental para a concertação de ações planejadas e articuladas entre os dois segmentos, o da oferta e o da demanda de energia elétrica. Para tanto, detalhes sobre estas abordagens, suas formulações, técnicas de solução e soluções podem ser encontrados em diversas fontes, entre as quais o Comitê de Revitalização do Modelo do Setor Elétrico (2002), SILVA (2001) e FINARDI (1999).

Nos modelos de planejamento, apesar da eficiência da oferta não ser tratada de modo explícito, pode perceber-se que ela esteja sendo considerada, implicitamente, se atendermos ao fato de tais modelos buscarem o melhor plano e de mínimo custo da expansão do sistema de energia elétrica sob observância de restrições relevantes. Do mesmo modo, nos modelos de despacho, apesar da eficiência energética também não ser tratada explicitamente, pode-se compreender que esteja sendo, implicitamente, se entendermos que a programação da operação busca o despacho de unidades geradoras e os intercâmbios de energia, a custos mínimos da operação hidrotérmica, sob observância de restrições relevantes.

Pode-se entender, também, que numa perspectiva de mercado aberto do setor de energia elétrica, os diversos segmentos da oferta busquem reforçar a importância da explicitação da variável eficiência energética como mecanismo, não só de minimização de seus custos de expansão e de operação, mas também, como mecanismo de competitividade e diferenciador de seus serviços.

Percebe-se, adicionalmente, que a eficiência energética nos segmentos de oferta, estendida de modo a considerar a eficiência no segmento do consumo, eleva ainda mais, a melhora das soluções ensejadas pela oferta, podendo essa melhora de soluções dos segmentos de oferta, ser percebida e transferida para o segmento consumidor.

Igualmente, o próprio segmento consumidor, ao poder avaliar e quantificar a eficiência energética em seus usos-finais, encontrará nela, um mecanismo com duplo valor, por um lado, para a minimização de seus custos e por outro, para a autoproteção frente a possíveis coalisões dos agentes de oferta, pois o mercado é caracterizado de imperfeições.

Mais uma vez, também numa visão destes objetivos, a proposta deste trabalho visa alargar a percepção dos ganhos de eficiência energética, frente ao consumidor final de energia. No conjunto de aspectos importantes, resultantes deste modo de abordagem, encontram-se entre outros, também, o favorecimento à mudança do comportamento de consumidores de modo a contemplarem variáveis de eficiência energética, conservação de energia e gerenciamento do lado da demanda, nas decisões acerca da aquisição e utilização de equipamentos, elementos e dispositivos elétricos.

Redução da dependência de combustíveis críticos – Na geração da energia elétrica, o caráter crítico dos combustíveis permite duas interpretações básicas, nomeadamente:

(i) A natureza crítica dos combustíveis, devida aos efeitos da degradação ambiental. Trata-se da degradação ambiental causada por algumas das fontes primárias (combustíveis fósseis e acondicionamento de resíduos radioativos). As degradações, neste contexto, afetam a disponibilidade e a qualidade das águas, solos e ar, com todas as suas implicações desfavoráveis sobre a vida e a sociedade (BROWN, 2003; JANNUZZI e SWISHER, 1997; FONSECA, 1999; DOS REIS, 2003).

(ii) A natureza crítica dos combustíveis, devida aos seus efeitos na balança comercial (sobretudo de países em desenvolvimento). Algumas nações em desenvolvimento, por exemplo, chegam a gastar mais de 30% de seu orçamento total em empreendimentos energéticos. O Banco Mundial dedica cerca de 25% dos seus empréstimos para projetos energéticos, sendo a maioria, para a geração de energia elétrica. Refira-se, ainda, que parte significativa desse capital não é gasto dentro da própria economia dessas nações, mas sim, em equipamentos e serviços internacionais contratados. A importância dos empréstimos para a energia nos países em desenvolvimento tem sido um fator determinante das crises da dívida externa. Além disso, cada dólar gasto em uma usina é um dólar que não pode ser gasto em saúde, educação, saneamento ou agricultura (ESTADO DO MUNDO, 2003; JANNUZZI e SWISHER, 1997; FONSECA, 1999).

Analisando os impactos da dependência de combustíveis críticos, segundo a perspectiva da degradação ambiental, vislumbra-se viável a necessidade da adoção de soluções, que compartilhadas com as dos modelos tradicionais de oferta de energia, mitiguem tais impactos a custos efetivos. Isto implica no direcionamento para soluções de custo efetivo, dentro do conjunto de soluções disponíveis, em geração de eletricidade, e que estejam

associadas com baixas intensidades energéticas e com fontes primárias limpas. As baixas intensidades energéticas podem ser viabilizadas, favoravelmente, através de modelos de usos-finais energéticos que contemplem o *PIR* nos requisitos do atendimento da demanda.

Analisando os impactos da dependência de combustíveis críticos, segundo a perspectiva da balança comercial, concluímos igualmente, pela necessidade da adoção de soluções que mitiguem seus impactos. Isto também implica em que as soluções base e de custo efetivo, do conjunto de soluções disponíveis, sejam aquelas que apontem para a utilização de baixas intensidades energéticas na geração e de geração de energia, considerando-se o compromisso de se atender a demanda com a inclusão das opções de “geração adicional”, disponíveis do lado da demanda. São elementos dessa “geração adicional” o GLD, a EEn, a CEn, a cogeração, a geração distribuída (GD) e as fontes renováveis. Estas opções são componentes do conjunto de soluções proporcionadas por modelos de usos-finais, de apoio a decisão, baseados no *PIR*. Adicionalmente, nesta perspectiva, faz-se necessário que as fontes de geração proporcionem limites razoáveis de independência das matrizes energéticas das nações.

A análise do objetivo - redução da dependência de combustíveis críticos, segundo as duas principais perspectivas - leva-nos, uma vez mais, a concluir que é, sobretudo junto às utilizações-finais da energia elétrica (industriais, comerciais, públicos e outros) aonde se localizam oportunidades para consideráveis potenciais em economia de energia.

Dada a constatação desta meta - redução da dependência de combustíveis críticos - no contexto do objetivo operacional específico, releva-se novamente, a importância da contribuição desta pesquisa. O lado consumidor, dada a sua importância estratégica para a conservação de energia, muito mais do que meras referências a seu respeito, precisa ser subsidiado de sinergias inovadoras quanto às análises compreensivas e quantitativas. Para tanto, podem ser relevantes os papéis exercidos nesse sentido, por pesquisadores, por diversas modalidades de incentivos proporcionados por concessionárias e agências reguladoras e pelos estímulos e amparos legais avalizados por governos.

Aumento da cota de mercado – Tradicionalmente, o aumento da cota de mercado é uma tendência que as concessionárias de energia buscam em associação com os esforços para aumentar as vendas de energia. Entretanto, o conceito do aumento da cota de mercado é propenso à reformulação quando, para sua causa, são inseridos objetivos em CEn, EEn,

GLD e determinantes da desregulamentação do setor de energia elétrica (salvo poucas exceções, tendência atual em mercados importantes).

É compreensível que o aumento das vendas da energia elétrica, o aumento da cota de mercado e o aumento da conservação da energia elétrica façam parte de um processo permanente em busca de soluções adequadas. Cada solução adequada enquadra-se em algum nível de compromisso entre a satisfação simultânea dos três objetivos os quais têm o consumidor final como alvo balanceador. A Figura 3, por exemplo, representa uma ilustração desse compromisso de objetivos, frente ao desejo de soluções nas quais prevaleçam determinadas características.

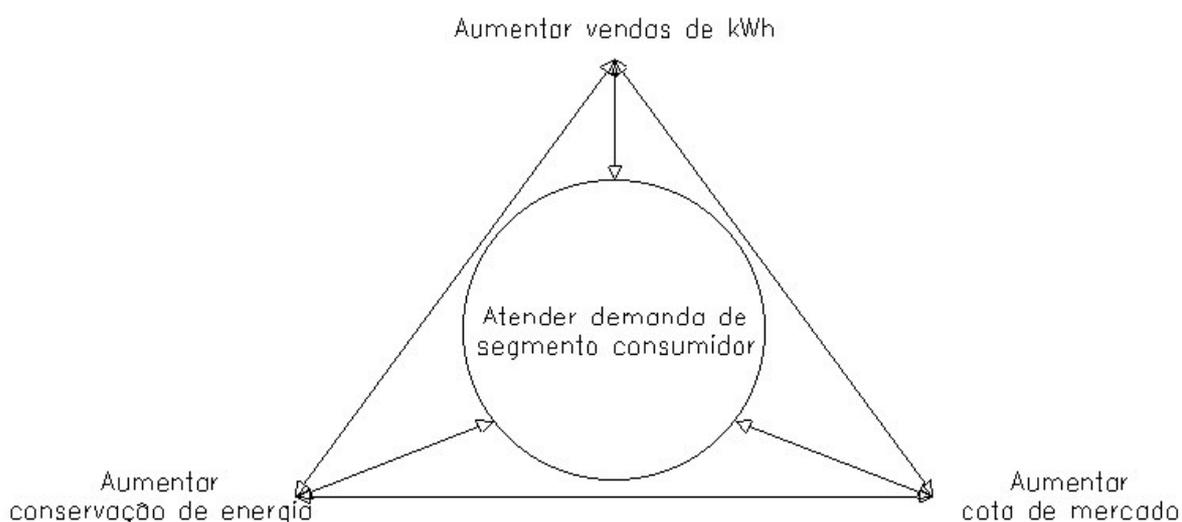


Figura 3 – Compromissos no Atendimento do Consumidor Considerando a CEn num Mercado de Energia Desregulado.

2.3 OBJETIVOS SOBRE A CURVA DE CARGA

O problema principal e imediato da expansão e da operação de um sistema de energia elétrica está, sobretudo, associado com a administração da curva de carga. Essa administração, no seu sentido mais amplo, visa a atender a demanda consumidora, em todo e qualquer momento e ao mínimo custo da operação e da expansão do sistema da concessionária.

Na realização deste objetivo primordial - administração da curva de carga - uma preocupação adicional e paralela da concessionária é com a *segurança* do atendimento. No caso particular do Brasil, aonde se tem um sistema elétrico de grande extensão, interligado, hidrotérmico com predominância hidrelétrica, grande número de usinas com reservatórios plurianuais e localizadas nas mesmas bacias hidrográficas, este objetivo constitui uma das metas permanentes da atuação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Conforme assinala SANTOS (2002), produzir energia elétrica ao menor custo possível, otimizando a geração das usinas hidrelétricas e termelétricas, e ao mesmo tempo transportá-la com a máxima segurança pela rede de transmissão, para que as diferentes empresas distribuidoras a façam chegar aos consumidores, é o grande desafio do ONS. Mais do que isso, é sua missão institucional orquestrar os recursos colocados à sua disposição pelas empresas de geração e transmissão (G&T), em busca do que é melhor para a sociedade. Sem perda da efetividade do objetivo segurança do atendimento e considerando a contemporaneidade dos fatos, a recente crise e que ainda continua assolando o setor elétrico brasileiro tem ressaltado a importância da energia elétrica para todos (SANTOS, 2002).

Denota-se que o mínimo custo operativo está fortemente associado aos aspectos de segurança e confiabilidade do SEE, devendo esses aspectos, serem tratados de forma integrada para que não se coloque em risco o atendimento dos diversos consumidores. É justamente nesta integração aonde a atuação dos agentes envolvidos, tanto no planejamento quanto na operação, não parece ainda ter buscado, com o devido vigor, os recursos adicionais para o atendimento, a confiabilidade e a segurança, através de mecanismos de CEn, EEn, e GLD.

Entendendo-se que essa situação caracteriza uma lacuna cujo efeito é o desperdício de oportunidades potenciais para se dispor de energia abundante, de baixo custo total, sociável e confiável, torna-se relevante aumentar as pesquisas desse âmbito visando-se, tanto a compreensão analítica dos fatores subjacentes de uma política de conservação de energia quanto a elaboração de modelos de planejamento e programação energética e de utilizações finais da energia elétrica.

Relacionado com a constatação acima, através da explicitação da eficiência energética junto com as externalidades, na abordagem do problema da determinação da demanda

consumidora, esta pesquisa representa também uma das sinergias importantes e inovadoras, associadas com a abertura de novos contextos exploráveis, que favoreçam a viabilização da consolidação de outros índices almejados no planejamento e na operação energética.

Alguns estudiosos deste assunto, entre os quais, JANNUZZI e SWISHER (1997) e FLORY *et al.* (1994), questionam a justificativa dos procedimentos do planejamento tradicional, ao pressuporem maiores incertezas às soluções baseadas no lado da demanda quando comparadas às soluções baseadas na oferta, como parte das principais dificuldades do planejamento e da programação energética, para não incluírem os valores da eficiência energética, do gerenciamento do lado da demanda e de outras opções de conservação de energia.

A presunção questionada, além de equivocada, JANNUZZI e SWISHER (1997) a consideram errônea. Para isso, os autores se apóiam, em suas constatações, na observação de que, ao invés disso, existem mais dificuldades e incertezas, relacionadas com as previsões da produção e dos custos da energia elétrica. Apontam ainda para o fato das famosas economias de escala, associadas aos grandes empreendimentos de geração de energia, terem sido derrubadas devido aos fatos como: (i) incertezas em relação ao tempo de construção de grandes usinas, aliadas a variações de juros de financiamentos, que a título de exemplo, resultaram na multiplicação dos custos de usinas projetadas durante recentes duas últimas décadas; (ii) certos impactos ambientais, sendo de difícil previsão antes da execução dos empreendimentos, podem onerar ou mesmo inviabilizar a produção de energia após concluída a construção de determinada usina hidrelétrica (elevado saldo energético, conforme FONSECA (1999)); (iii) preços de insumos e combustíveis afetam o custo de geração termelétrica. Os custos desses insumos e dos combustíveis estão sujeitos a fortes incertezas futuras; (iv) a própria operação do sistema de energia elétrica caracteriza-se de incertezas de vária ordem, sobretudo de hidrologia nas bacias dos reservatórios e do desempenho e manutenção dos equipamentos de geração, transmissão e distribuição (G&T&D).

Comparativamente, do lado da demanda, as maiores dificuldades estão relacionadas, apenas, com a efetiva mensuração dos efeitos da eficiência energética, do gerenciamento do lado da demanda e de outras opções de conservação de energia. Para tanto, impõe-se

conseqüentemente, a necessidade de importantes pesquisas para se compreender, com segurança, fatores como participação de consumidores e a persistência das soluções do lado da demanda (FLORY *et al.*, 1994). Adicionalmente, esta necessidade é reforçada, quando se tem em conta o fato dos debates acerca da conservação de energia em vários países, incluindo-se o Brasil, em sua agenda tradicional, refletirem particularmente, os interesses da oferta.

Uma reflexão profunda a respeito das abordagens e das funções da conservação de energia, da eficiência energética e do gerenciamento da demanda, nos moldes atuais e comumente categorizadas como (GELLINGS, 1996; JANNUZZI e SWISHER, 1997; CAMARGO e BORENSTEIN, 1997): (i) corte da ponta; (ii) preenchimento de vales; (iii) deslocamento de carga; (iv) conservação estratégica; (v) crescimento estratégico da carga; e (vi) curva de carga flexível; leva-nos a concluir que seus preceitos e objetivos são, fundamentalmente, a satisfação de requisitos preestabelecidos dos segmentos da oferta de energia e não os dos segmentos de seu consumo.

Em face desta constatação, o consumidor de energia, como agente ativo do setor, está deficientemente enquadrado na conjuntura de um problema no qual se lhe deveria consagrar um grau de relevância adequado, como contrapartida para a garantia da sua contribuição no alcance de soluções efetivas e duradouras para o problema do atendimento energético.

2.4 AS EXTERNALIDADES E O PROBLEMA DO ATENDIMENTO ENERGÉTICO

Já é consensual a percepção de haver algum tipo de relação entre os itens: (i) necessidade do desenvolvimento social; (ii) necessidade do desenvolvimento industrial; e (iii) necessidade de limites na entropia dos ecossistemas.

Em virtude do último item, a continuidade e a evolução dos dois primeiros esbarra numa expressiva restrição, se for permitido persistir nos padrões e modelos de vida e consumo atualmente em uso.

Relacionado com o manejo sustentável do meio ambiente, a nível da agenda internacional, sabe-se que, por enquanto, ainda não tem sido possível chegar-se a um entendimento universal, passível à implementação eficaz e eficiente. Contudo, desde os anos 60, quando os debates acerca da sustentabilidade começaram a integrar a agenda de organismos multilaterais globais, têm ocorrido avanços significativos visando o fomento de novas políticas aprimoradas que levem ao equilíbrio desses itens de desenvolvimento. Um panorama sobre o estado das discussões e dos avanços mais significativos referentes aos esforços pela busca da sustentabilidade, sem prejuízo do desenvolvimento social e industrial, é apresentado a seguir (MATTOZO, 2002).

Segundo MEADOWS (1972), no estudo *Limites do Crescimento*, se forem mantidos os atuais níveis de industrialização, poluição, produção de alimentos e exploração de recursos naturais, o limite de desenvolvimento do planeta seria atingido, no máximo, em 100 anos, provocando uma repentina diminuição da população mundial e da capacidade industrial. Esta posição não tem sido partilhada pelos agentes da indústria, sobretudo das indústrias desenvolvidas, que em sua ótica, esse tipo de conclusão decretaria tanto o fim do crescimento da sociedade industrializada quanto da trajetória de crescimento dos países em desenvolvimento.

Uma abordagem promissora foi então proposta por STRONG (1973), ao conceituar o ecodesenvolvimento, vinculando-o com as seguintes vias, como determinantes: (i) satisfação das necessidades básicas; (ii) solidariedade com as gerações futuras; (iii) participação da população envolvida; (iv) preservação dos recursos naturais e do meio ambiente; (v) elaboração de um sistema social que garanta emprego, segurança social e respeito a outras culturas; e (vi) programas de educação. A grande contribuição desta proposta foi a abertura de espaço e a criação de um ambiente para a atual tendência rumo a um desenvolvimento sustentável.

A seguir, viria a contribuição da Declaração de Cocoyok, da Organização das Nações Unidas (ONU), com o fundamento de que a causa da explosão demográfica era a pobreza, por via da qual, também se originava a destruição desenfreada dos recursos naturais. Quanto à responsabilidade dos países industrializados, estes contribuíam para a degradação dos mesmos recursos através dos seus característicos altos índices de consumo. Com esta

abordagem, a ONU vislumbrava limites máximos e mínimos nas necessidades de consumo dos recursos naturais, que proporcionam o bem-estar ao indivíduo.

Ainda da ONU, viria a participação na elaboração do Relatório Dag-Hammarskjöld, de 1975, preparado pela fundação de mesmo nome, com a colaboração de políticos e pesquisadores de diversos países. Este relatório pode ser visto como um complemento da Declaração de Cocoyok, afirmando em seu teor, que as potências coloniais concentraram as melhores terras das colônias nas mãos de minorias, forçando populações pobres a usar outros solos, com a conseqüente devastação ambiental.

Tanto a declaração de Cocoyok quanto o relatório Dag-Hammarskjöld, ambos fazem uma abordagem com alguma similaridade – de um lado, a exigência de mudanças nas estruturas de propriedade do campo e do outro, a rejeição dessas mudanças pelos governos dos países industrializados.

No ano de 1987, a Comissão Mundial da ONU para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) apresentou o documento “our common future”, vulgo “Relatório Brundtland”. O relatório estabelece que “o desenvolvimento sustentável é o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazerem suas próprias necessidades”. Contudo, este conceito ainda é objeto de discussões quanto a sua efetividade e eficiência como instrumento para o equacionamento e solução do problema integrado: energia, ecologia e economia (FONSECA, 1999).

Os principais destaques desse relatório, em relação aos anteriores, são: (i) ausência de críticas à sociedade industrial, principal foco dos documentos anteriores; (ii) apelo pela demanda de crescimento tanto em países industrializados quanto em países em desenvolvimento, associando inclusive, a superação da pobreza nestes últimos ao crescimento contínuo dos primeiros. Provavelmente, terá sido em virtude desta moderação que o equilíbrio na aceitação do “Relatório Brundtland”, pela comunidade internacional, tenha sido melhor.

A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, de 1992, vulgo RIO-92, apesar de algumas desavenças e discordâncias que a caracterizaram, sobretudo quanto ao cronograma para a eliminação das emissões de dióxido de carbono (CO₂) da convenção sobre a biodiversidade do acordo do clima, foi um teste à evolução do

interesse mundial para com o futuro do planeta, ao se observar que vários países não mais ignoravam as relações entre o desenvolvimento sócio-econômico e a degradação ao meio ambiente.

A Conferência das Nações sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, de 2002, em Johannesburg/RSA, vulgo RIO+10, destinada, entre outros interesses, principalmente para avaliar o estado do mundo em conformidade à agenda RIO-92, apesar de constatar algum atraso em relação aos compromissos assumidos no passado, basicamente quanto aos níveis de implementação dos diversos mecanismos de desenvolvimento, mostrou grande interesse para com a responsabilidade da energia na preservação do ambiente e no provimento do desenvolvimento. Particularmente, foi intensificado o eco dos apelos para o fomento de usos energéticos limpos e de fontes de energias renováveis para o desenvolvimento e para a proteção e preservação do nosso ecossistema.

Pode-se concluir, da análise dos arranjos internacionais, que atualmente, as negociações a nível mundial, sobre as ações de impacto no domínio da mitigação dos impactos negativos, sobre o ambiente, derivados das atividades humanas e das utilizações tecnológicas, têm uma gestão, de certo modo, em torno do “Protocolo de Kyoto” (WWI, 2003).

A preservação da natureza através da redução de impactos ambientais negativos tem reflexo, direto e indireto, sobre outra importante externalidade, nomeadamente, a externalidade social. Afinal o equacionamento do desenvolvimento tecnológico embasado nos recursos da natureza pressupõe um beneficiado, a sociedade e seus membros. Em função desse equacionamento, o consumidor beneficiário pode ser incluído ou excluído desse processo, melhorando-se ou piorando-se, respectivamente, o custo associado ao desenvolvimento característico (FONSECA, 1999).

Considerando estas interações, configura-se que o ambiente no qual se formatam as decisões de escopo do atendimento da demanda de energia, para o desenvolvimento, deve considerar a preservação e a melhora dos valores sócio-culturais, opondo-se às irracionalidades financeiras e econômicas excludentes. Frequentemente, são apenas estas, as utilizadas como veículos de decisão para as grandes indústrias de geração de energia e de extração e transformação de recursos.

2.5 O PROBLEMA DO ATENDIMENTO ENERGÉTICO E AS SOLUÇÕES DA ANÁLISE INTEGRADA

Perante o quadro de debates detalhado na seção anterior, os pesquisadores ligados ao setor de energia devem desempenhar seu papel preocupando-se com a busca de novos conceitos e práticas para modelos de planejamento energético, de programação energética e de projeção e análise da demanda consumidora da produção dos serviços de energia. Esses novos conceitos e práticas referem-se à integração, nos modelos de usos-finais energéticos, da contribuição para o aumento da disponibilidade de energia, através das opções de eficiência energética (EEn), gerenciamento do lado da demanda (GLD) e conservação de energia (CEn).

Ademais, tais propostas devem poder subsidiar as possibilidades não só de qualificar seus impactos (EEn, CEn, GLD) na demanda de energia como também de quantificá-los. Na viabilização disso e no aprofundamento de seu conteúdo, as externalidades também devem ser consideradas como variáveis explícitas, incorporáveis, de ferramentas analíticas e de modelos matemáticos. Uma consideração neste sentido pode ser estratégica e pode apressar a adoção, com eficácia, do planejamento integrado de recursos (PIR) como prática, não só obrigatória por força do atendimento de legislação pertinente, mas também como mecanismo de otimalidade na obtenção de soluções integradas. Esse tipo de soluções, tipicamente proporciona melhor nível de benefícios e custos efetivos comparativamente às mesmas soluções resultantes da análise convencional.

Visando contribuir nesse sentido, tem validade a metodologia de avaliação de demandas energéticas para usos-finais industriais, proposta neste trabalho. Basicamente, esta proposta descreve, primeiro, a base teórica que permite sustentar a integração da eficiência energética, conservação de energia e gerenciamento do lado da demanda, como recursos adicionais no problema do atendimento da demanda, considerando-se a mitigação das externalidades decorrentes da produção e utilização dessas demandas, sendo depois, na seqüência, proposta uma formulação e solução matemática do problema dentro de um panorama em que são explicitadas as variáveis das externalidades.

Para tanto, no capítulo 3 são realizadas a discussão, a caracterização e a formulação do problema segundo este novo enfoque, tratando especificamente, o problema do

atendimento da demanda energética na indústria como um problema de promoção da conservação de energia. Em seu íterim, esta conservação de energia estende-se à consideração da eficiência energética e do gerenciamento do lado da demanda. Num contexto único, tanto a conservação de energia, como a eficiência energética e o gerenciamento do lado da demanda são interligados com o objetivo crucial da mitigação das externalidades decorrentes da exploração e utilização intensiva da energia elétrica.

2.6 O PROBLEMA DO ATENDIMENTO E OS ASPECTOS DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA

O tradicional vínculo existente entre o desenvolvimento industrial e social com a energia, especialmente a energia elétrica, é geralmente expresso nos modelos econométricos através das variáveis *elasticidade energia - renda* e *elasticidade energia - preço*. A versão genérica de uma modelagem econométrica é baseada na função de produção *Cobb-Douglas* (SWISHER *et al.*, 1997):

$$E = aY^\alpha P^{-\beta} \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta Y} \quad (2.2)$$

$$\beta = \frac{\Delta E}{\Delta P} \quad (2.3)$$

Onde:

E – demanda de energia;

Y – renda;

P – preço da energia;

α - elasticidade energia – renda;

β - elasticidade energia – preço.

Ademais, os modelos baseados nessas elasticidades, freqüentemente formam a base das projeções oficiais das demandas de energia das nações que ainda não têm

institucionalizado o planejamento integrado de recursos (PIR) como mecanismo de planejamento.

Conforme se pode depreender, seu fundamento não provê uma sinalização adequada em relação à conservação, à eficiência e racionalização do uso da energia. Ele sinaliza, sim, para a busca do atendimento energético, considerando um cenário de eficiência energética congelada cujo tamanho se expande ao longo do tempo. A manutenção das estratégias de atendimento, através de vias baseadas nestes princípios, é preocupante dentro das especificidades das realidades presentes tanto na maioria dos países em desenvolvimento, em particular, quanto dos países emergentes e países industrializados, em geral.

A preocupação advém pelo fato de, historicamente, o modelo prever o aumento do consumo de energia para, depois, na seqüência prever a expansão da oferta em vistas ao atendimento desse crescimento da demanda. Relacionado com isso deve-se assinalar a existência de opiniões até muito divergentes quanto à correlação aumento do nível sócio-econômico dos cidadãos e nível de variação da demanda de energia.

Algumas teses sustentam que a elevação do nível sócio-econômico da população repercute na diminuição da demanda de energia através da redução do nível populacional. Do lado oposto, argumenta-se que o aumento dos índices de desenvolvimento implicam no aumento da demanda de energia através do aumento da penetração de processos e tecnologias eletroeletrônicas no dia a dia da população.

Considerando o fato de a atitude tradicional, freqüentemente tender a corresponder à sinalização da tendência da demanda de energia, as políticas energéticas que, afinal estabelecem o desenvolvimento dos sistemas elétricos em todos os segmentos – geração, transmissão, distribuição e utilização – podem não estar sintonizadas com a capacidade de investimento, pressupondo-se o desejo da disponibilidade e da universalização do serviço. Quer dizer, os investimentos para o atendimento do mercado de energia, por natureza, intensivos em capital, tendem a níveis de insustentabilidade quanto a capacidade real de investimento e endividamento dos países em desenvolvimento.

Nesse sentido, estima-se que em torno de 30% do déficit da balança comercial desses países se destine ao pagamento de despesas internacionais em energia (sendo a maior parte

desta despesa, gasta apenas com contratos sobre serviços em energia) (BROWN, 2003; SWISHER *et al.*, 1997).

Em face desse cenário, nesses países, a demanda para atender o mercado de energia pode beneficiar-se grandemente das oportunidades da disponibilidade, confiabilidade e segurança do suprimento, proporcionado pela conservação, eficiência e gerenciamento do lado da demanda. Assim, além das nações disporem de energia com características de viabilidade e efetividade, elas aliviam também, o peso da despesa com energéticos. Com isso, permite-se que recursos resultantes sejam canalizados para outras áreas fundamentais, porém, normalmente deficitárias como a educação e a saúde. Por outro lado, reduzem-se as despesas e os encargos requeridos para as diversas formas de medida, controle e combate aos efeitos danosos sobre o meio ambiente, derivados da queima de combustíveis fósseis e da exploração de fontes primárias.

A comunidade internacional, reconhecendo a importância da contribuição das utilizações eficientes da energia, tem incentivado as nações a contemplar, no planejamento energético, a geração e a utilização limpas da energia com o objetivo de alavancarem a sustentabilidade de suas balanças comerciais, proporcionando uma vida melhor, presente e futura, de suas populações além de ajudarem na mitigação do problema do aquecimento global, sobretudo.

Nacionalmente, no Brasil, por exemplo, se inicia um ciclo de internalização no planejamento do setor elétrico, no segmento da geração, da participação da eficiência energética no atendimento do mercado, numa primeira fase através da explicitação da energia de fontes renováveis. O recém instituído, e em fase de desenvolvimento, Programa Nacional de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), deve ser visto como uma expressão, não só do reconhecimento como também, da efetividade da eficiência energética como variável integrante do planejamento do mercado de energia elétrica, numa visão de sustentabilidade.

Deve ser sensata a expectativa de que este ciclo só poderá ser completo com a inclusão, também, das variáveis das opções de conservação de energia vistas do lado da demanda. O recente racionamento de energia elétrica, no Brasil, e a ocorrência de “blecautes”, pelo mundo afora, colocaram, tanto os agentes do setor quanto os “stackeholders”, frente à

necessidade de o espectro das soluções de atendimento do mercado de energia elétrica contemplar, adicionalmente, recursos de custo efetivo que não sejam o corte de carga.

Com base na evidência desses fatos e em face das expectativas da efetividade dessas soluções, vislumbra-se um campo de pesquisa, ainda incipiente, que poderá ajudar no alargamento das soluções de atendimento do mercado com recursos também colocados a disposição nas utilizações - finais da energia elétrica.

Nesse âmbito, esta abordagem vem no sentido de contribuir no conjunto dos esforços para alcançar-se esse objetivo, ainda que numa visão em que a explicitação de variáveis se circunscreve apenas nos limites do atendimento das necessidades do consumidor. Não obstante, a essência dos sistemas elétricos permite que se vinculem os ganhos da eficiência de uso-final a outros subsistemas do sistema de energia elétrica, desde a geração até ao consumo. O problema está em torno das dificuldades em se criar um ambiente no qual esses ganhos possam fluir e se transferir, mútua e efetivamente, entre esses subsistemas.

2.7 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Foram abordados os aspectos considerados como críticos no tratamento corriqueiro dos problemas do planejamento e da operação dos sistemas de energia elétrica. A abordagem teve como foco central a alocação dos benefícios entre os dois principais agentes do setor de energia elétrica, o concessionário e o consumidor.

Através dessa abordagem foi possível colocar em evidência a importância das opções de eficiência energética, gerenciamento do lado da demanda e conservação de energia, como variáveis que agregam valor nas utilizações finais consumidoras, através da redução de custos induzidos pelo consumo de energia na produção dos serviços energéticos industriais.

Além disso, evidenciou-se que os consumidores de energia, especialmente eletro-intensivos, ao buscarem a implementação dessas opções podem se proteger das possíveis incertezas, associadas aos mercados, imperfeitos por natureza, e à oferta tecnológica da energia elétrica.

As externalidades associadas ao problema do atendimento energético foram realçadas, enquadrando-se a importância da energia na realização do desenvolvimento, devendo-se observar, porém, as restrições que permitam esse desenvolvimento, a luz da sustentabilidade do ecossistema.

Foram analisados os laços existentes entre o problema do atendimento energético e os procedimentos do mercado de energia elétrica. Ao se associar o requisito do desenvolvimento sustentável para as utilizações energéticas, realçou-se a importância da inclusão da eficiência energética, gerenciamento do lado da demanda e conservação da energia, como opções que auxiliam na racionalização dos usos em energia e no alívio da alocação dos recursos das nações, sobretudo das nações em desenvolvimento.

Em vistas dessas constatações reforçou-se, finalmente, a visão de que as soluções da análise integrada, em virtude de suas múltiplas vantagens e benefícios, para o consumidor em particular e para a sociedade em geral, devem continuar fazendo parte das prioridades dos pesquisadores em suas abordagens sobre a demanda de energia consumidora, segura e confiável.

CAPÍTULO 3

3. UMA NOVA ABORDAGEM PARA O PROBLEMA DO POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA

O *potencial de conservação da energia elétrica* pode ser considerado como a diferença entre os níveis da capacidade energética das instalações existentes e os níveis da capacidade energética dessas instalações, resultantes da aplicação de soluções técnico-tecnológicas de uma opção ou da combinação de várias opções de conservação da energia elétrica (eficiência energética, gerenciamento do lado da demanda, cogeração, geração distribuída, energias renováveis).

Os níveis da capacidade energética das instalações existentes dizem respeito às capacidades instaladas dessas instalações, comprometidas com o suprimento das demandas resultantes das utilizações de cargas elétricas e operações atuais dos processos inerentes à transformação ou produção industrial.

Os níveis da capacidade energética das instalações, resultantes da aplicação de soluções técnico-tecnológicas de conservação da energia elétrica, dizem respeito às novas capacidades dessas instalações, balanceadas adequadamente em compromisso ao suprimento das demandas resultantes das utilizações de *cargas elétricas modificadas* e *operações modificadas* dos processos inerentes à transformação ou produção industrial.

As cargas modificadas podem resultar de dois tipos de soluções que acomodam igualmente duas interpretações, nomeadamente:

- (1) *Cargas modificadas* decorrentes da *utilização* de equipamentos, aparelhos e dispositivos consumidores de energia elétrica bem como de sistemas de transmissão e distribuição da energia elétrica atendendo-se, como parâmetro, ao requisito da alta eficiência energética desses elementos ou sistemas.
- (2) *Cargas modificadas* decorrentes da *operação* de equipamentos, aparelhos e dispositivos consumidores de energia elétrica bem como de sistemas de transmissão e distribuição da energia elétrica atendendo-se, como parâmetro, ao requisito da mudança da operação existente para uma nova operação considerada ótima.

As cargas modificadas, do tipo descrito em (1), geralmente resultam a partir de soluções encontradas, basicamente nos paradigmas da *transformação do mercado de energia elétrica*. Portanto, essas soluções estão associadas à estrutura e à inovação tecnológica dos elementos elétricos envolvidos na oferta, transmissão, distribuição e utilização da eletricidade.

Já as cargas modificadas, do tipo descrito em (2), geralmente são resultado de soluções encontradas, basicamente nos paradigmas do *comportamento* de consumidores industriais da energia elétrica. Conseqüentemente, essas soluções estão associadas com as respostas dos consumidores industriais de energia elétrica aos programas de conservação de energia através, sobretudo, da eficiência energética e do gerenciamento do lado da demanda (GLD). Apesar do GLD, neste trabalho, o seu conceito é estendido, subsidiado através da importância do agente consumidor ativo, de modo a contemplar suas iniciativas quanto à redução das intensidades energéticas em prol dos interesses específicos de suas instalações elétricas e processos industriais.

3.1 SERVIÇOS DE ENERGIA E CARGAS MODIFICADAS DAS UTILIZAÇÕES-FINAIS DA ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA

O segmento industrial é o maior consumidor da energia elétrica no Brasil. Além ser responsável pelo consumo de mais da metade da energia elétrica (incluindo a autogeração) também é responsável pelo maior consumo da energia total, situando-se em torno 42%. Os subsetores industriais com maiores níveis de consumo de energia elétrica (superior a 76% do consumo total da energia elétrica na indústria) são os de ferro e aço (27,7%) alimentação (22,6%), papel e celulose (9,4%), química (9,2%), e de alumínio e outros metais não-ferrosos (7,0%) (POOLE e GELLER; 1997).

A Tabela 1 e as Figuras 4 e 5 ilustram a importância do segmento industrial no consumo da energia elétrica no Brasil. Especificamente, a Tabela 1 mostra a importância do segmento através da posição da parcela dos usos-finais industriais na composição do balanço energético nacional (BEN).

SETOR	PETRÓLEO		GÁS NATURAL		CARVÃO		BIOMASSA		ELETRICIDADE		TOTAL	
	10 ³ TEP	%										
Industrial	9798	15,61	1935	61,43	9042	99,19	18783	70,51	10171	49,83	49729	40,74
Não energético	9069	14,45	1034	32,83	74	0,81	595	2,23	0	0	10772	8,83
Comercial	442	0,70	42	1,33	0	0	143	0,54	2559	12,54	3186	2,61
Público	642	1,02	8	0,25	0	0	3	0,011	1819	8,91	2472	2,03
Agropecuário	4237	6,75	0	0	0	0	7	0,026	708	3,47	4952	4,06
Transportes	32758	52,20	42	1,33	0	0	6686	25,10	96	0,47	39582	32,43
Residencial	5805	9,25	89	2,83	0	0	423	1,59	5058	24,80	11375	9,32
TOTAL	62751	100	3150	100	9116	100	26640	100	20412	100	122069	100

Tabela 1 – Perfil do Consumo Final de Energia (1995) no Balanço Energético Nacional (1996) (POOLE e GELLER, 1997)³.

A Figura 4 realça a importância da indústria no consumo final da energia elétrica total, considerando-se a participação de outros setores consumidores.

³ Apesar destas estimativas serem baseadas em pesquisas e dados de 5 – 10 anos atrás a participação dos consumidores provavelmente não se alterou muito. O PROCEL/ELETOBRÁS está consolidando a atualização dos usos-finais em vistas ao melhor entendimento das mudanças que estão ocorrendo no uso da eletricidade no Brasil. 1 TEP = 10,8 Gcal = 45,2 GJ. Coeficiente de transformação física usado: 860 kcal/kWh = 0,08 TEP/MWh. Não estão incluídos os consumos residencial e agropecuário da lenha.

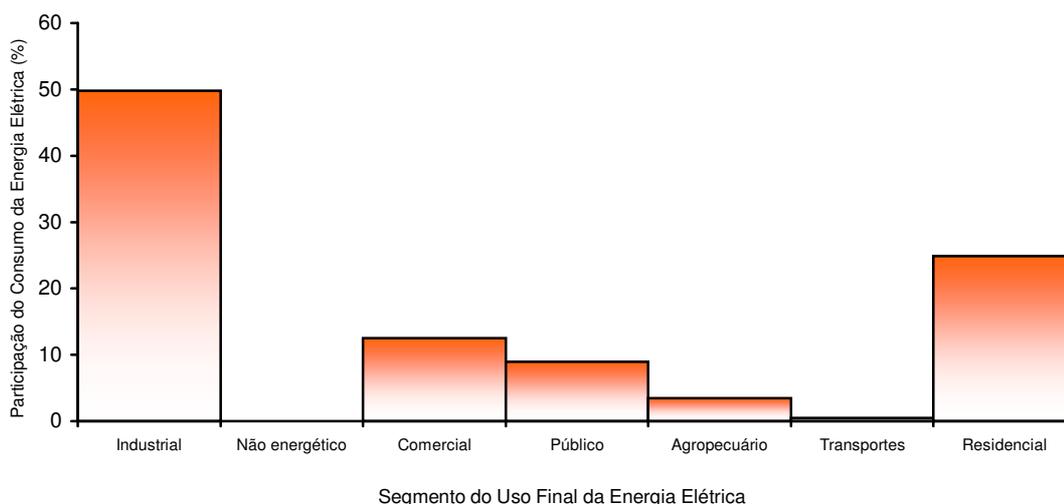


Figura 4 – Participação dos Segmentos Consumidores no Perfil do Consumo Final da Energia Elétrica no Brasil, 1995 (POOLE e GELLER, 1997).

No segmento industrial, as utilizações-finais da energia elétrica, em geral, destinam-se a alguma forma dos seguintes tipos dos serviços de energia: *força motriz, calor, frio e luz*. A Figura 5 ilustra a importância do segmento, através das taxas de participação das cargas de produção dos principais serviços energéticos industriais, na composição do consumo da energia elétrica.

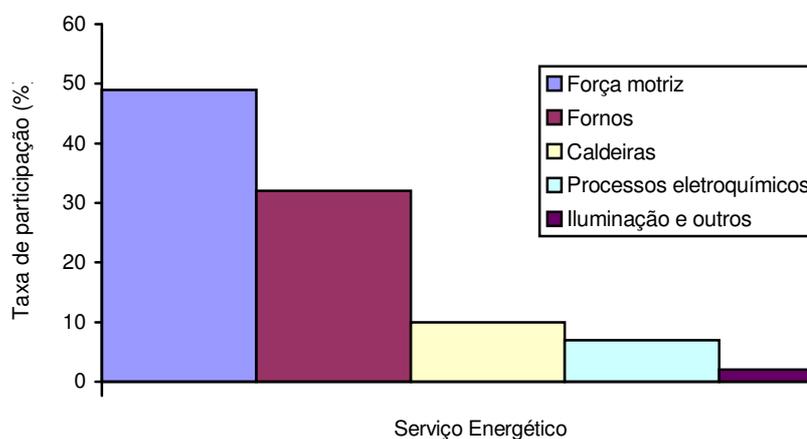


Figura 5 - Participação dos Principais Serviços Energéticos no Consumo da Energia Elétrica Industrial no Brasil (POOLE e GELLER, 1997).

A liderança e a responsabilidade do segmento industrial e das suas cargas de produção dos serviços energéticos, tanto na composição quanto na economia do consumo da energia elétrica, podem ser abstraídas, portanto, a partir dos dados dessas figuras e tabela (Figuras

4 – 5 e Tabela 1). Especificamente à Tabela 1, sem reduzir o interesse em relação às outras cargas, as estimativas mostram a grande importância dos sistemas de motores e de calor no consumo da eletricidade na indústria.

Realce-se ainda, que de acordo com estatísticas da Agência Internacional de Energia, AIE, a participação industrial no consumo da energia elétrica, em geral tem sido expressiva nos balanços energéticos da maioria dos países (da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), industrializados, emergentes e em vias de desenvolvimento).

A composição de uma matriz energética industrial pode ser estratificada, sobretudo em função dos objetivos principais pretendidos num dado estudo. Para o objetivo principal deste - avaliação do potencial de conservação de energia na indústria - a matriz energética industrial pode ser composta atendendo-se, sobretudo a um critério simplificado, baseado na similaridade das cargas utilizadas, já que estas, fundamentalmente, são a razão principal do possível potencial para a economia da energia elétrica na indústria.

Com esta consideração, as várias classes do segmento podem ser incluídas, direta ou indiretamente, em uma das seguintes grandes áreas e principais requisitos percebidos durante a produção dos respectivos serviços de energia:

- (1) *Siderurgia*: Desenvolvendo processos, basicamente ininterruptos no tempo, o setor apercebe-se do peso do insumo eletricidade. Por isso, enfatiza a importância dos custos, da qualidade e da continuidade do atendimento energético. Além desses, o setor também se apercebe e atribui importância aos custos da qualidade dos produtos. Diante da percepção e da importância atribuídas, e em face do papel da energia elétrica na interface dessas variáveis, o setor siderúrgico preocupa-se pela otimização dos custos em energia e em qualidade do produto.
- (2) *Metalurgia, soldagem e metalo-mecânica*: O setor apercebe-se, entre outros, da importância das variáveis custos de manutenção e custos da energia elétrica. Neste sentido, em decorrência dessa percepção e importância, nas atividades de metalurgia e soldagem também existe preocupação com a busca do controle e da otimização desses custos, particularmente os da energia elétrica.

- (3) *Processamento da borracha e de plásticos*: Com um requisito de operação contínua, este setor convive com uma grande exposição aos custos. Entre esses custos, são estrategicamente importantes, os custos da energia elétrica e os custos pelo não atendimentos da demanda. Conseqüentemente, no processamento da borracha e de plásticos é relevante a busca da qualidade sustentável da produção junto com a redução desses custos.
- (4) *Processamento de materiais*: Na produção de seus serviços energéticos o setor de processamento de materiais apresenta sensibilidade em relação às variáveis tempo, custos e qualidade da energia elétrica. Apercebendo-se disso, este setor busca a realização de suas atividades almejando, simultaneamente, tempos úteis efetivos, baixos custos da energia elétrica e maximização da qualidade da energia elétrica.
- (5) *Processamento de celulose e papel*: Na produção de seus serviços energéticos o setor de celulose e papel é sensível às variáveis continuidade do atendimento, qualidade da energia elétrica e qualidade do produto. Em virtude da percepção e da importância atribuída a essas variáveis, no processamento de celulose e papel busca-se, também, a otimização dos custos do atendimento e da continuidade do serviço além dos custos da qualidade dos produtos.
- (6) *Oficinas de máquinas e fabricantes de pequeno e médio portes*: Na produção de seus serviços de energia, estes setores apercebem-se do importante impacto associado aos custos da energia elétrica e à qualidade dos produtos. Para tanto, atribuem especial importância às oportunidades para o controle desses custos sem prejuízo para a qualidade dos seus serviços e produtos.
- (7) *Indústrias de alta tecnologia*: Este setor é um dos que apresentam maior sensibilidade para com as variáveis qualidade da energia elétrica e custos operacionais. Neste contexto, na realização de seus serviços de energia, as indústrias de alta tecnologia buscam a otimização do atendimento com uma boa qualidade da energia elétrica e uma redução dos custos operacionais.
- (8) *Indústria logística*: A indústria logística encara os custos operacionais como um fator de elevada sensibilidade e competitividade na produção dos seus serviços de

energia. Em face dessa percepção as oportunidades para a redução dos custos com a energia elétrica também são valorizadas.

- (9) *Alimentos e bebidas*: O setor de alimentos e bebidas atribui importância e é sensível às variáveis continuidade do atendimento, qualidade dos produtos e tempo. Diante disto o setor também se sensibiliza para com as metas de otimização dos custos em energia elétrica e dos custos de produção.
- (10) *Campus universitários e escolas*: As atividades desenvolvidas nos campi universitários e escolas apresentam características para as quais os custos de operação e manutenção (O&M) têm um comportamento discreto e permanente, em outras palavras, um comportamento de longo prazo. Com isso, os custos O&M também são variáveis estratégicas da sua produção de serviços energéticos. Em face desse comportamento dos custos e da incidência particular da energia elétrica na composição desses custos, configura-se importante a minimização dos custos em energia elétrica no funcionamento deste segmento.
- (11) *Parques temáticos e de diversão*: Na produção de seus serviços, os parques temáticos e de diversão apercebem-se da grande necessidade de uma boa confiabilidade, qualidade da energia elétrica e controle de custos. Para tanto, neste setor afiguram-se plausíveis as oportunidades que otimizem essas variáveis. Na interface dessas variáveis, a importância da minimização dos custos em energia elétrica configura-se apropriada para o alcance das metas da otimização de todo o conjunto.

Conforme já referido, alguns desses segmentos podem não ser exatamente da classe industrial, porém, a importância, a disseminação e a similaridade das cargas usadas favorecem a sua consideração nesses conjuntos. Quer dizer, o ganho em conservação da energia elétrica, a qual tem, como um de seus dados de entrada, a qualidade da energia elétrica, especificamente no concernente aos harmônicos da energia, tanto numa classe quanto na outra, as cargas causadoras são as não-lineares, cuja natureza prolifera na produção dos serviços de energia de ambos segmentos. Neste sentido, a abordagem e as soluções em conservação da energia elétrica, no escopo deste trabalho, podem igualmente ser estendidas aos conjuntos considerados.

Em geral, as principais cargas usadas na produção dos serviços energéticos dos setores enumerados estão indicadas no Quadro 2.

SEGMENTO DE ATIVIDADE	CARGAS ELÉTRICAS E/OU SISTEMAS PREDOMINANTES
Siderurgia	- Fornos Elétricos de Indução; - Fornos Elétricos a Arco; - Laminadores; Transportadores; - Máquinas de Solda a Arco; - Máquinas de Solda a Resistência; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Máquinas de Corte a Plasma; - Motores Compressores; - Máquinas Controladas por Computador; - Sistemas Elétricos Complexos; Painéis Mono e Trifásicos.
Metalurgia, Soldagem e Metalomecânica	- Máquinas de Solda a Arco; - Máquinas de Solda a Resistência; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Máquinas de Corte a Plasma; - Motores Compressores; - Máquinas Controladas por Computador; - Sistemas Elétricos Complexos; Painéis Mono e Trifásicos.
Processamento de Borracha e de Plásticos	- Motores Extrusores de Acionamentos de Freqüência Variável; - Acionamentos Extrusores CC; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Fornos Microondas; - Motores Compressores; - Máquinas Controladas por Computador; - Controles a base de CLP; - Equipamento de Escritório.
Campus Universitários, Colégios e Escolas	- Ar Condicionado de Grande Porte; - Ar Condicionado de Pequeno Porte; - Iluminação Fluorescente; - Iluminação de Descarga de AP; - Acionamentos de Freqüência Variável; - Motores Compressores; - Fontes de Potência com Tensão Modulada por Largura de Pulso; - Equipamento de Laboratório; - Sistemas de Processamento de Dados; - Equipamento de Escritório; - Computadores.
Parques Temáticos e de Diversão	- Motores Compressores; - Compressores de Refrigeração; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Terminais Computadores; - Equipamento de Escritório; - Acionamentos de Freqüência Variável; - Acionamentos de Motores CC; - Fontes de Potência com Tensão Retificada.
Processamento de Celulose e Papel	- Motores CA de Grande Porte; - Motores CA de Pequeno Porte; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Acionamentos de Freqüência Variável; - Motores Compressores; - Fontes de Potência com Tensão Modulada por Largura de Pulso; - Controles de Processos por CLP; - Bobinadeiras; - Enroladores.
Alimentos e Bebidas	- Motores CA de Médio Porte; - Motores CA de Pequeno Porte; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Acionamentos de Freqüência Variável; - Motores Compressores; - Fontes de Potência com Tensão Modulada por Largura de Pulso; - Controles de Processos por CLP; - Fornos Elétricos; - Transportadores.
Processamento de Materiais	- Motores CA de Grande Porte; - Motores CA de Pequeno Porte; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Acionamentos de Freqüência Variável; - Motores Compressores; - Fontes de Potência com Tensão Modulada por Largura de Pulso; - Controles de Processos por CLP; - Aquecimento por Indução; - Aquecimento por Microondas.
Oficinas de Máquinas e Fabricantes de Pequeno e Médio Portes	- Máquinas de Solda a Arco; - Máquinas de Solda a Resistência; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Máquinas de Corte a Plasma; - Motores Compressores; - Máquinas Controladas por Computador; - Equipamento de Escritório; - Sistemas Elétricos Complexos; - Painéis Mono e Trifásicos.
Indústrias de Tecnologia de Ponta	- Acionamentos de Motores com Dispositivos de Variação de Freqüência; - Acionamentos de Motores CC; - Lâmpadas Fluorescentes; - Lâmpadas de Descarga de AP; - Retificadores AC/DC; - Motores CA; - Fontes de Potência com Tensão Modulada por Largura de Pulso; - Controles de Processo por CLP; - Sistemas de Processamento de Dados; - Robótica CA e CC.
Indústria Logística	- Ar Condicionado de Grande Porte; - Ar Condicionado de Pequeno Porte; - Iluminação Fluorescente; - Iluminação de Descarga de AP; - Pequenos Dispositivos Eletrônicos; - Motores CA Trifásicos; - Motores CA Monofásicos; - Sistemas de Refrigeração; - Equipamento de Escritório; Sistemas Elevadores; - Sistemas Transportadores.

CA – Corrente Alternada; CC – Corrente Contínua; CLP – Controlador Lógico Programável; AP – Alta Pressão.

Quadro 2 – Principais Cargas Elétricas da Produção dos Serviços Energéticos Industriais.

Em geral, as correspondentes cargas modificadas da produção de cada tipo de serviço de energia e suas características associadas são apresentadas nas seções seguintes.

3.1.1 Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Força-motriz

A força-motriz, dentro do contexto industrial, é um serviço de energia produzido principalmente através de motores de acionamentos elétricos e servomecanismos. Esses motores podem ser de corrente alternada (MCA) ou de corrente contínua (MCC). Tipicamente, o serviço de energia é retirado, como utilidade, à saída de um sistema mecânico sob a forma de movimento linear (deslocamento), movimento circular (ângulo) ou combinações complexas destes dois movimentos. O sistema mecânico ou mecanismo de produção está interconectado com o motor elétrico através de um sistema de acoplamento que pode assumir diversos tipos, modos e níveis de complexidade. Normalmente, na prática, desde o motor até ao serviço de energia está envolvida uma complexa cadeia de sistemas elementarmente também complexos. Ao sistema como um todo se designa, comumente, sistema de acionamento elétrico. A Figura 6 ilustra um esquema simplificado dessa cadeia de produção do serviço de energia força-motriz, envolvendo os componentes básicos, motor elétrico - dispositivo de acoplamento - dispositivo mecânico.

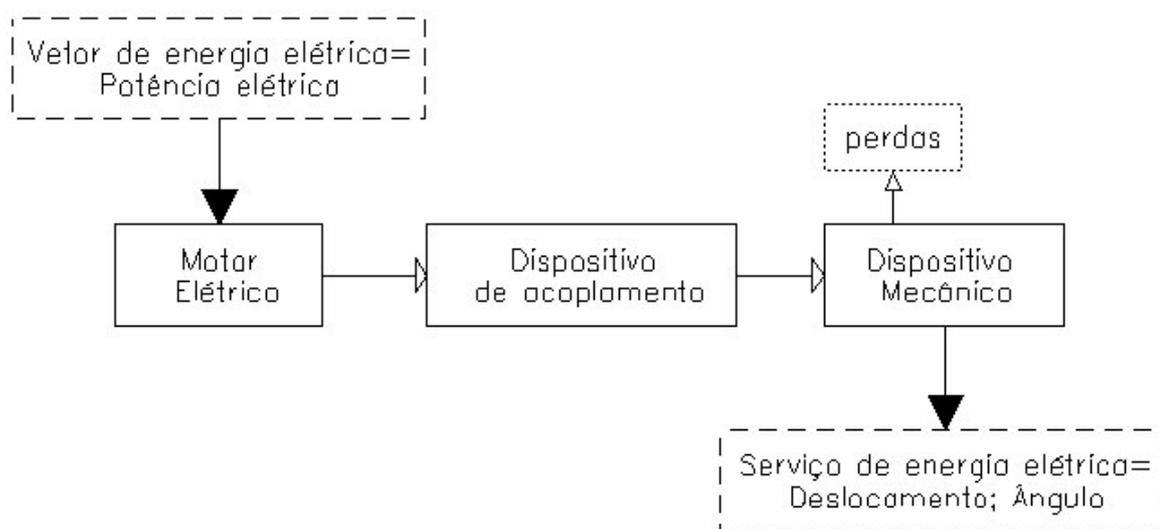


Figura 6 – Esquema Elementar da Cadeia de Produção do Serviço de Energia Força-motriz.

Entendendo-se o rendimento de um dado dispositivo, como a relação entre a energia/potência de saída (P_{sai}), nos seus terminais de saída, e a energia/potência de entrada

(P_{ent}), nos seus terminais de entrada, para a Figura 6 podemos estabelecer um rendimento sistêmico, resultante, composto de três hierarquias de rendimento, sendo cada um, correspondente a cada dispositivo elementar. Ou seja:

$$\eta_{Sist} = \frac{P_{saiSist}}{P_{entSist}} = \frac{P_{saiDmec}}{P_{entMot}} \quad (3.1)$$

$$\eta_{Mot} = \frac{P_{saiMot}}{P_{entMot}} \quad (3.2)$$

$$\eta_{Dacp} = \frac{P_{saiDacp}}{P_{entDacp}} \quad (3.3)$$

$$\eta_{Dmec} = \frac{P_{saiDmec}}{P_{entDmec}} \quad (3.4)$$

E, considerando que:

$$P_{entDacp} = P_{saiMot} \quad (3.5)$$

$$P_{entDmec} = P_{saiDacp} \quad (3.6)$$

Resulta:

$$\eta_{Sist} = \eta_{Mot} \cdot \eta_{Dacp} \cdot \eta_{Dmec} \quad (3.7)$$

Onde:

η_{Sist} = Rendimento (ou eficiência) do sistema;

η_{Mot} = Rendimento (ou eficiência) do motor;

η_{Dacp} = Rendimento (ou eficiência) do dispositivo de acoplamento;

η_{Dmec} = Rendimento (ou eficiência) do dispositivo mecânico;

$P_{entSist}$ = Potência de entrada do sistema, W;

$P_{saiSist}$ = Potência de saída do sistema, W;

P_{entMot} = Potência de entrada do motor, W;

P_{saiMot} = Potência de saída do motor, W;

$P_{entDacp}$ = Potência de entrada do dispositivo de acoplamento, W;

$P_{saiDacp}$ = Potência de saída do dispositivo de acoplamento, W;

P_{entDmec} = Potência de entrada do dispositivo mecânico (mecanismo de produção), W;

P_{saiDmec} = Potência de saída do dispositivo mecânico (mecanismo de produção), W.

O potencial de conservação da energia elétrica a que se refere este estudo restringe-se, por motivos pertinentes, ao escopo eletro-energético da produção dos serviços de energia no setor industrial. Significa que, para o modelo da Figura 6 e Equações (3.1 – 3.7), nossa atenção concentra-se, apenas, sobre o conversor do vetor de eletricidade em serviço de energia, portanto, o motor elétrico cuja eficiência é η_{Mot} , potência de saída P_{saiMot} e, potência de entrada P_{entMot} .

Dentro de uma política e atuação pautadas pela busca da alta eficiência integrada, via PIR, permite-se afirmar que os níveis dos outros termos de eficiência, na Equação (3.7), podem ser elevados e comparativamente maiores que η_{Mot} . Isso pode ser viabilizado pela presunção de que outros setores que integram o planejamento integrado de recursos estão empenhados na maximização/otimização, tanto dos componentes quanto dos processos associados à esses termos.

Particularmente, a eficiência de um processo industrial também é um componente muito importante que deve ser integrado à eficiência da tecnologia para a obtenção da economia em energia elétrica. Com relação a esta pesquisa, o papel da eficiência do processo industrial é levado em conta a partir do pressuposto de que uma vez determinadas e especificadas as cargas eficientes, que otimizam o problema da demanda consumidora, imposta pelas cargas eficientes, a eficiência do processo estará viabilizada através da integração dos devidos procedimentos e ajustes, inerentes a melhora do comportamento das utilizações industriais envolvidas.

Esse aspecto comportamental consiste da complementação da solução, já determinada, através de uma atuação, na operação industrial, que busque a satisfação do mínimo custo da operação. Para esse mínimo custo da operação concorrem as estratégias visando usos e reusos (sempre que aplicável) de matérias primas e insumos e tempos de utilização apropriados aos requisitos de uma demanda em energia elétrica, mínima para o processo, tratando-se este, como um sistema integrado com as respectivas tecnologias.

Admitindo-se isso pode-se, simplificadamente, considerar que:

$$\eta_{\text{Sist}} \cong \eta_{\text{Mot}} \quad (3.8)$$

Este mesmo resultado seria obtido se ao invés das variáveis expressando a potência, fossem usadas, nas expressões (3.1 – 3.6), variáveis expressando a energia, sob o pressuposto da operação do sistema de acionamento elétrico, no tempo, com valores médios de potência.

A transformação do mercado de energia elétrica, atualmente em curso em diversos países, e perseguida como uma das ações fundamentais para o sucesso dos programas de conservação de energia, faz com que ainda convivam juntos, no mercado, os motores convencionais, que denominamos também como motores de padrão eficiência standard (MPES) e os motores de alto rendimento, que denominamos como motores de padrão elevada eficiência energética (MPEE).

Para uma comparação simples, na Tabela 2 são apresentadas amostras de alguns dados técnicos de motores MPEE e MPES, de um dos principais fabricantes de motores elétricos, sediado no Brasil. Essas amostras cobrem as principais faixas de potências e velocidades de motores de indução mais usados, nomeadamente, potências e velocidades pequenas, médias e grandes. Detalhes técnicos completos desses motores estão disponíveis nas referências (PROCEL/ELETROBRÁS, 2003; INMETRO, 2003; WEG, 2001).

PADRÃO: Frequência; N° Pólos; Voltagem Δ/Y⇒MPEE: 60 Hz; 2 Pólos; 380/220 V										
Pn (kW)	In Δ/Y (A)	Cn (N.m)	Cp/Cn	Cm/Cn	Rendimento			Fator de Potência		
					50%	75%	100%	50%	75%	100%
0.75	2.86/1.66	2.05	3.2	3.4	75.0	80.0	81.1	0.65	0.76	0.85
3,0	10,6/6,14	8,05	2,9	3,2	84,3	86,0	86,6	0,73	0,83	0,86
11,0	34,9/20,2	30,0	2,3	3,1	89,7	91,1	91,0	0,84	0,89	0,91
110	343/199	295	2,1	2,9	91,8	93,5	94,5	0,80	0,86	0,89
260	776/449	687	1,7	2,4	91,8	94,3	94,6	0,90	0,92	0,93
PADRÃO: Frequência; N° Pólos; Voltagem Δ/Y⇒MPES: 60 Hz; 2 Pólos; 380/220 V										
Pn (kW)	In Δ/Y (A)	Cn (N.m)	Cp/Cn	Cm/Cn	Rendimento			Fator de Potência		
					50%	75%	100%	50%	75%	100%
0.75	3.18/1.84	2.04	3.4	3.5	65.2	71.0	74.5	0.62	0.75	0.83
3,0	10,9/6,31	8,12	3,0	3,5	81,5	82,5	84,0	0,70	0,80	0,86
11,0	36,2/21,0	29,9	2,6	3,5	87,5	89,5	89,5	0,78	0,85	0,89
110	354/205	295	2,5	2,7	89,0	91,4	92,7	0,82	0,86	0,88
260	851/493	687	1,7	2,4	91,0	92,5	93,2	0,75	0,83	0,86

PADRÃO: Frequência; N° Pólos; Voltagem $\Delta/Y \Rightarrow$ MPEE: 60 Hz; 4 Pólos; 380/220 V										
Pn (kW)	In Δ/Y (A)	Cn (N.m)	Cp/Cn	Cm/Cn	Rendimento			Fator de Potência		
					50%	75%	100%	50%	75%	100%
0,75	2,98/1,73	4,04	2,8	3,0	75,0	78,5	82,6	0,60	0,72	0,80
3,0	11,1/6,43	16,3	2,9	3,1	84,0	86,0	86,5	0,63	0,75	0,82
11,0	36,6/21,2	59,9	2,3	3,0	90,5	91,2	91,7	0,71	0,81	0,86
110	353/204	592	2,5	2,5	93,0	94,5	95,0	0,78	0,83	0,86
260	817/473	1373	2,0	2,1	94,2	95,5	96,0	0,74	0,84	0,87
PADRÃO: Frequência; N° Pólos; Voltagem $\Delta/Y \Rightarrow$ MPES: 60 Hz; 4 Pólos; 380/220 V										
Pn (kW)	In Δ/Y (A)	Cn (N.m)	Cp/Cn	Cm/Cn	Rendimento			Fator de Potência		
					50%	75%	100%	50%	75%	100%
0,75	3,08/1,78	4,06	2,5	2,9	70,0	74,0	78,0	0,64	0,77	0,82
3,0	11,9/6,89	16,4	2,5	2,8	79,5	81,0	82,0	0,61	0,73	0,81
11,0	38,0/22,0	60,0	2,3	2,8	86,8	88,2	88,3	0,70	0,81	0,86
110	353/204	590	2,4	2,5	89,0	91,3	92,0	0,82	0,87	0,89
260	860/498	1381	2,2	2,8	94,0	94,8	94,9	0,76	0,83	0,86
PADRÃO: Frequência; N° Pólos; Voltagem $\Delta/Y \Rightarrow$ MPEE: 60 Hz; 6 Pólos; 380/220 V										
Pn (kW)	In Δ/Y (A)	Cn (N.m)	Cp/Cn	Cm/Cn	Rendimento			Fator de Potência		
					50%	75%	100%	50%	75%	100%
0,75	3,47/2,01	6,06	2,1	2,6	75,0	78,0	81,0	0,47	0,60	0,70
3,00	12,2/7,06	24,4	2,3	2,6	75,0	87,2	87,5	0,55	0,68	0,74
11,0	40,0/23,2	90,8	2,0	2,5	89,0	90,5	90,2	0,63	0,76	0,80
110	363/210	889	2,4	2,4	93,7	94,5	95,0	0,73	0,81	0,84
260	893/517	2057	2,0	2,1	94,0	95,0	95,5	0,67	0,76	0,80
PADRÃO: Frequência; N° Pólos; Voltagem $\Delta/Y \Rightarrow$ MPES: 60 Hz; 6 Pólos; 380/220 V										
Pn (kW)	In Δ/Y (A)	Cn (N.m)	Cp/Cn	Cm/Cn	Rendimento			Fator de Potência		
					50%	75%	100%	50%	75%	100%
0,75	3,77/2,18	6,16	2,9	2,8	68,0	72,0	72,5	0,53	0,64	0,72
3,00	13,0/7,53	24,6	2,5	2,6	76,3	79,0	79,4	0,58	0,69	0,76
11,0	41,6/24,1	90,1	2,1	2,7	88,0	89,0	89,0	0,58	0,71	0,78
110	374/217	889	2,2	2,2	91,0	92,3	93,0	0,69	0,79	0,83
260	910/527	2066	2,0	2,1	93,0	94,7	94,9	0,62	0,73	0,79
PADRÃO: Frequência; N° Pólos; Voltagem $\Delta/Y \Rightarrow$ MPEE: 60 Hz; 8 Pólos; 380/220 V										
Pn (kW)	In Δ/Y (A)	Cn (N.m)	Cp/Cn	Cm/Cn	Rendimento			Fator de Potência		
					50%	75%	100%	50%	75%	100%
0,75	4,10/2,37	8,26	1,9	2,0	68,0	72,0	74,0	0,45	0,57	0,65
3,00	13,1/7,58	32,7	2,4	3,0	84,0	85,0	86,0	0,50	0,64	0,70
11,0	40,4/23,4	120	2,6	3,0	90,0	91,0	91,5	0,60	0,74	0,78
110	378/219	1184	1,4	2,2	94,7	95,4	95,4	0,63	0,74	0,80
260	900/521	2762	1,8	2,0	92,0	94,9	95,2	0,55	0,72	0,80
PADRÃO: Frequência; N° Pólos; Voltagem $\Delta/Y \Rightarrow$ MPES: 60 Hz; 8 Pólos; 380/220 V										
Pn (kW)	In Δ/Y (A)	Cn (N.m)	Cp/Cn	Cm/Cn	Rendimento			Fator de Potência		
					50%	75%	100%	50%	75%	100%
0,75	4,69/2,72	8,36	2,4	2,7	52,1	60,3	65,6	0,43	0,52	0,64
3,00	13,4/7,76	32,3	2,3	2,8	76,2	80,2	81,3	0,53	0,65	0,72
11,0	39,8/23,0	120	2,4	2,8	85,6	87,0	87,3	0,69	0,78	0,83
110	394/228	1184	2,0	2,6	90,0	92,2	92,8	0,62	0,74	0,79
260	901/522	2762	1,9	2,2	91,2	93,0	94,7	0,60	0,72	0,80

Tabela 2 – Dados Técnicos Parciais dos Motores Elétricos de Indução dos Padrões de Eficiência Elevada e Standard (PROCEL/ELETRÓBRÁS, 2003; INMETRO, 2003; WEG, 2001).

Onde, na Tabela 2:

C_n – Torque ou conjugado nominal, N.m;

C_p – Torque ou conjugado de partida, N.m;

C_m – Torque ou conjugado máximo, N.m;

P_n – Potência nominal, kW;

I_n Δ/Y – Corrente nominal em conexão delta/estrela, A;

MPES – Motor de Padrão Eficiência Standard; e

MPEE – Motor de Padrão Elevada Eficiência.

As Figuras 7, 8, 9 e 10 mostram, para os mesmos motores da Tabela 2, os gráficos comparativos dos desempenhos do rendimento e fator de potência de modo a auxiliar na visualização de parte significativa dos possíveis ganhos energéticos latentes nessas características de operação. Para facilitar a comparação as Figuras estão classificadas pelo critério do número de pólos e semelhança da velocidade mecânica desses motores.

As principais conclusões da análise, a partir dessas Figuras, do desempenho do *rendimento* (η) e do *fator de potência* ($\cos \varphi$) dos motores de padrão de eficiência elevada e dos motores de padrão de eficiência standard, são:

a) Pelo parâmetro do *rendimento* (η):

- O rendimento operacional médio dos motores de padrão MPEE é maior que o dos motores de padrão MPES.
- O rendimento operacional individual dos motores de padrão MPEE é maior que o dos motores de padrão MPES.
- O rendimento operacional dos motores de padrão MPEE é crescente, sensivelmente, com o crescimento do nível de carregamento. Este comportamento é indicativo de que ao longo da variação do carregamento existe um nível ótimo de rendimento, equivalente ao carregamento também ótimo do motor elétrico.

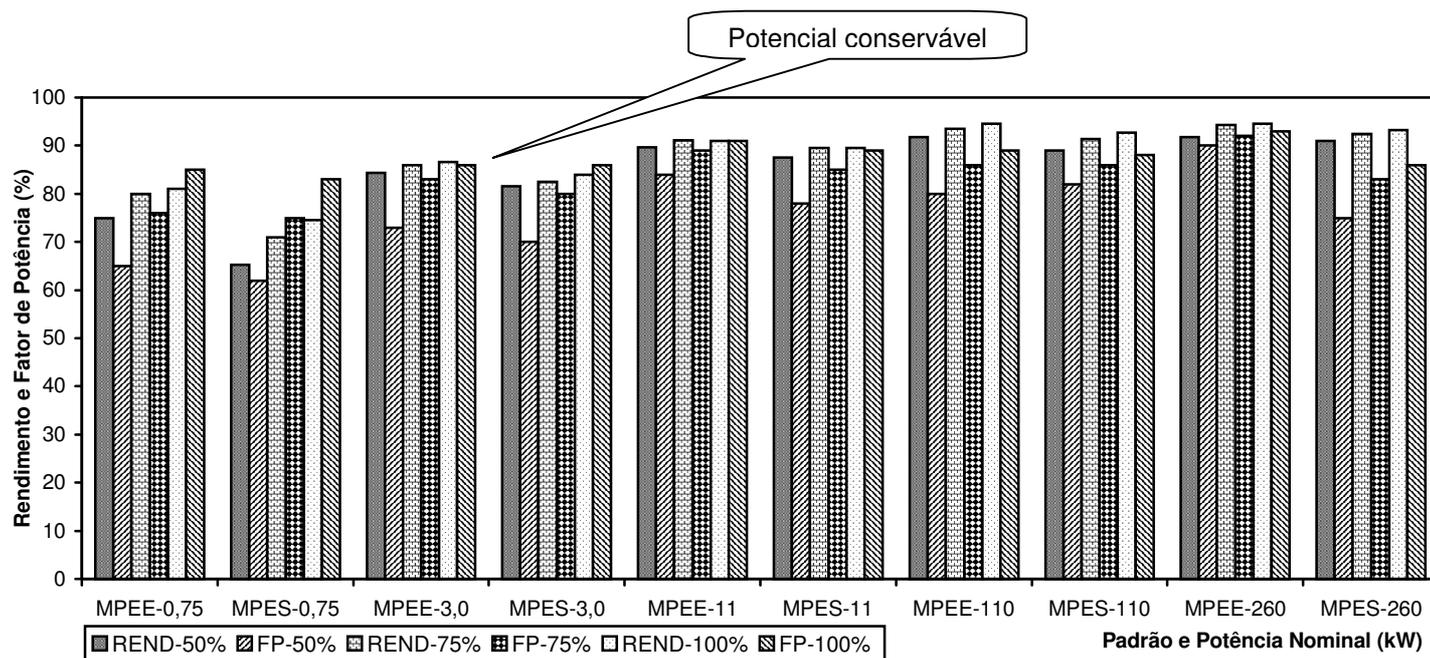


Figura 7 - Comparação do Desempenho do Rendimento e do Fator de Potência dos Motores de Indução Padrão MPEE e MPES, 2 Pólos.

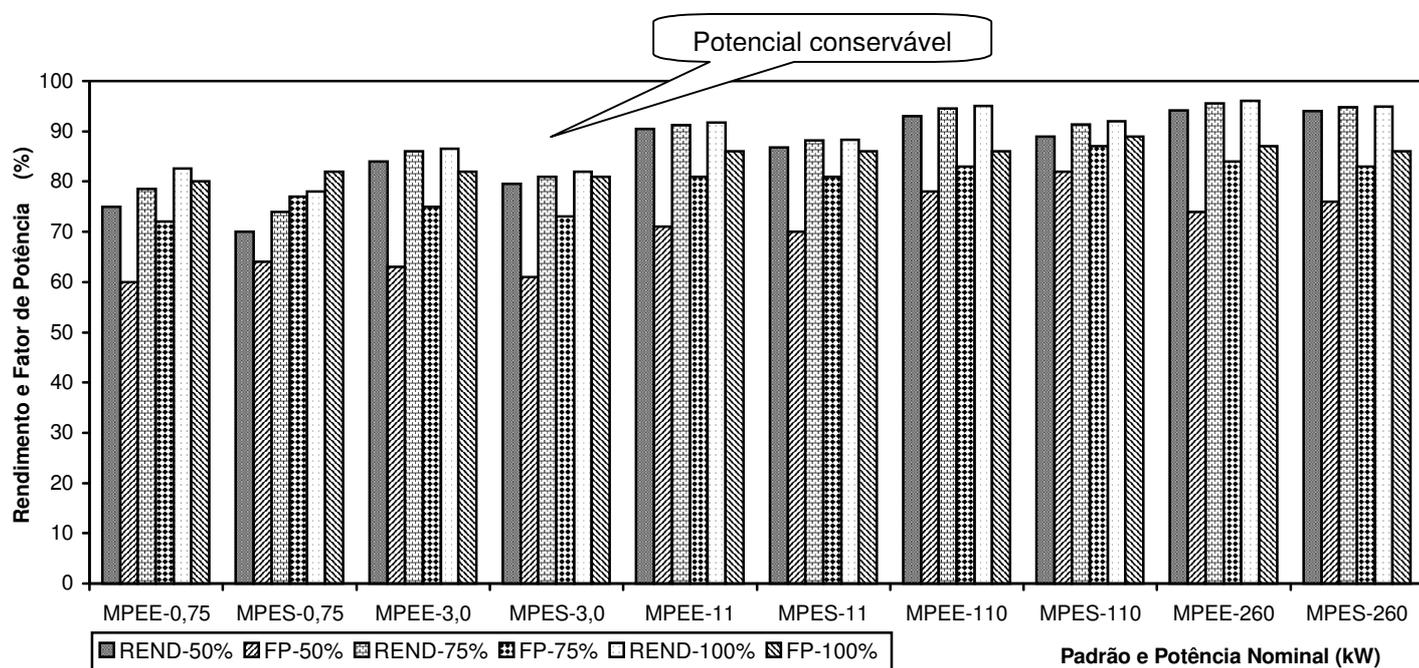


Figura 8 - Comparação do Desempenho do Rendimento e do Fator de Potência dos Motores de Indução Padrões MPEE e MPES, 4 Pólos.

MPEE – XX = Motor Padrão Elevada Eficiência Energética – Potência nominal.

MPES – XX = Motor Padrão Eficiência Standard – Potência nominal.

REND – XX% = Rendimento – carregamento porcentual.

FP – XX% = Fator de potência – carregamento porcentual.

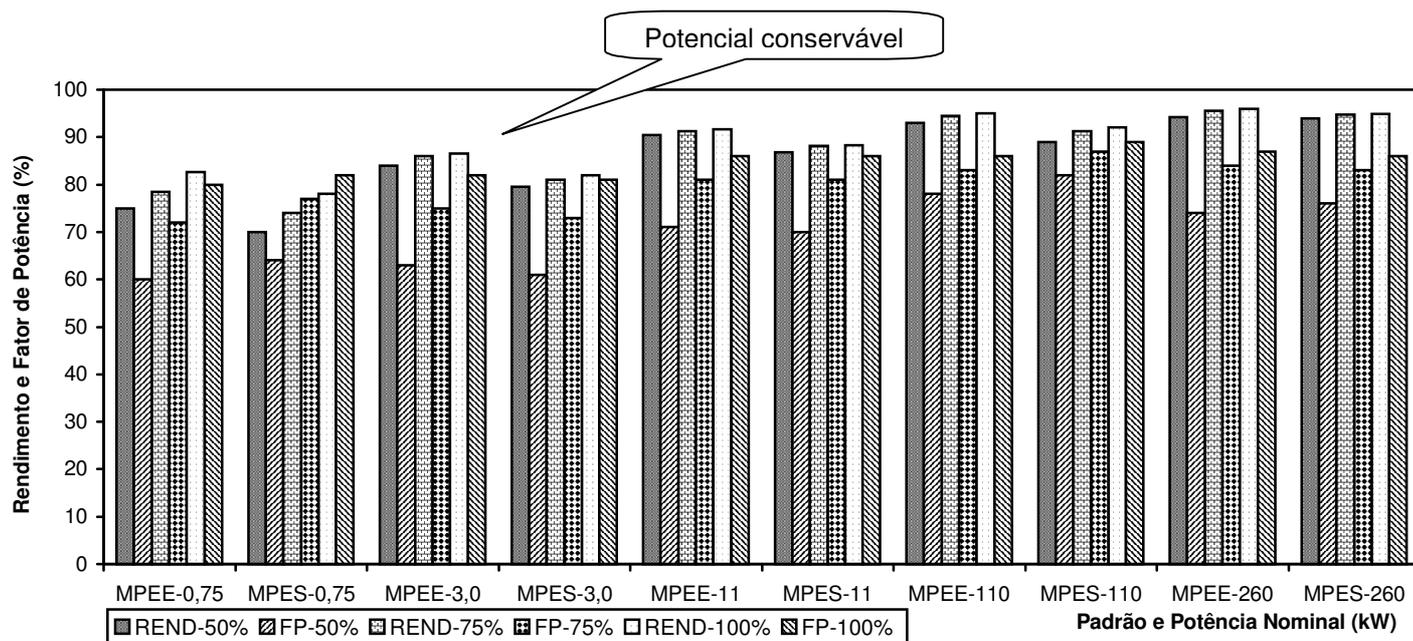


Figura 9 - Comparação do Desempenho do Rendimento e do Fator de Potência dos Motores de Indução Padrões MPEE e MPES, 6 Pólos.

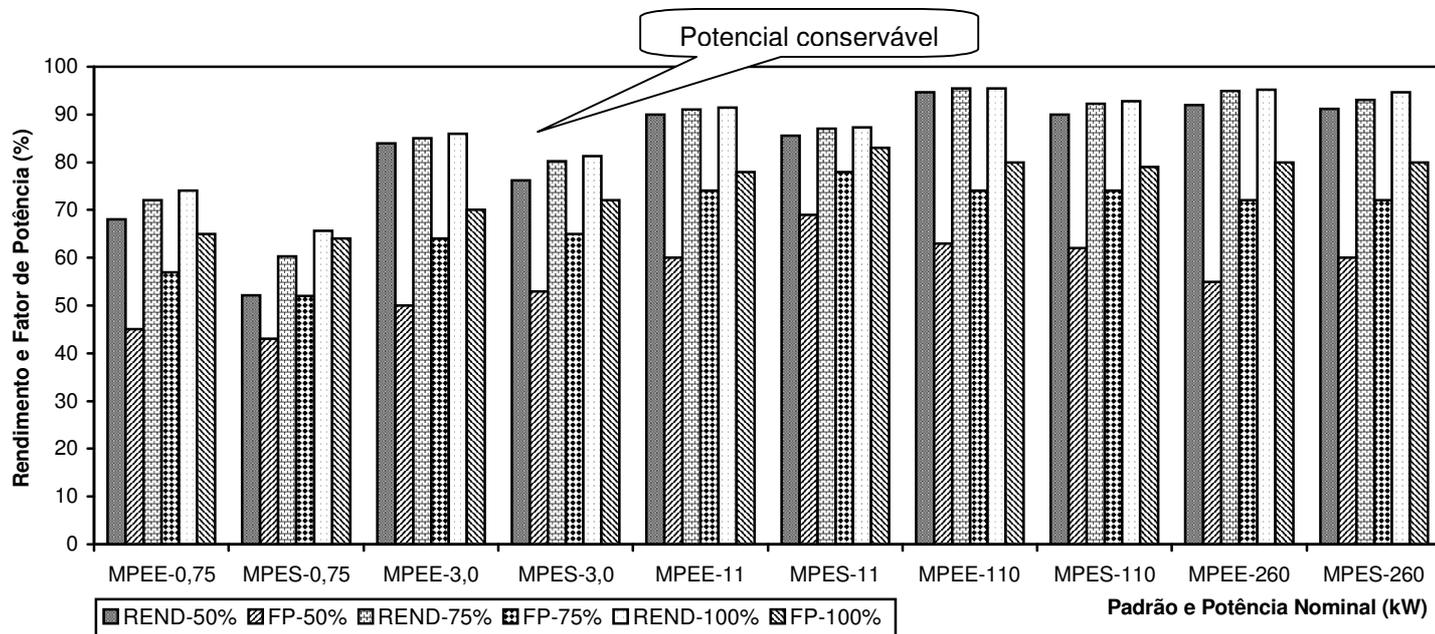


Figura 10 - Comparação do Desempenho do Rendimento e do Fator de Potência dos Motores de Indução Padrões MPEE e MPES, 8 Pólos.

MPEE – XX = Motor Padrão Elevada Eficiência Energética – Potência nominal.

MPES – XX = Motor Padrão Eficiência Standard – Potência nominal.

REND – XX% = Rendimento – carregamento porcentual.

FP – XX% = Fator de potência – carregamento porcentual.

b) Pelo parâmetro do *fator de potência* ($\cos\phi$):

- O fator de potência operacional médio dos motores de padrão MPEE é, aproximadamente, igual ao dos motores de padrão MPES.
- O fator de potência operacional individual dos motores de padrão MPEE é maior que o dos motores de padrão MPES, em algumas potências e menor em outras, geralmente em potências nominais menores.
- O fator de potência operacional dos motores de padrão MPEE é crescente, sensivelmente, com o crescimento do nível de carregamento. Este comportamento sinaliza para o fato de existir, ao longo da variação do carregamento, um nível ótimo do fator de potência, equivalente ao carregamento também ótimo do motor elétrico.

Estas conclusões, associadas aos motores e à sua operação, implicam em benefícios importantes do ponto de vista da conservação da energia elétrica. Entre esses benefícios, destacam-se:

- a) Os incrementos no rendimento implicam diretamente em menores previsões dos níveis da demanda e do consumo de energia.
- b) Os incrementos no fator de potência implicam diretamente na redução do consumo da potência reativa, baixas perdas de energia e baixas perdas de energia adicional devida à importância das energias harmônicas associadas à magnetização dos motores.

Concomitantemente, os efeitos benéficos indiretos, resultantes dos ganhos descritos nos itens a) e b) anteriores, são o menor aquecimento dos motores, circuitos e painéis, implicando isso, no conseqüente aumento da vida útil desses dispositivos e equipamentos e na redução da freqüência e dos custos de manutenção. Assim, essas cargas modificadas são, portanto, uma opção adequada para a consecução dos ganhos em conservação de energia em empreendimentos projetados sem a explicitação da eficiência energética, e correntemente já em operação.

Associado ainda com a análise dos dados da Tabela 2 e das Figuras 7 a 10 constata-se que, tanto os crescimentos do rendimento quanto do fator de potência ocorrem, geralmente, junto com aumentos sensíveis no porte dos motores. Esta é uma questão que remete o problema da

conservação da energia elétrica também para o escopo da tecnologia da construção dos motores elétricos. Não obstante, ao longo dos tempos tem-se observado que a relação potência/volume dos motores elétricos vem apresentando grandes melhorias havendo, entretanto, sinais de que essas melhorias ainda continuarão evoluindo no futuro, conforme pode ser constatado em PROCEL/ELETROBRÁS, 2003; INMETRO, 2003; WEG, 2001; MARTIN *et al.*, 2000.

3.1.2 Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Calor

O serviço de energia para a indústria, na forma de calor, é obtido, entre outras formas, a partir do vetor energia elétrica. O serviço é produzido em conversores apropriados, geralmente fornos e bombas de calor. Essas tecnologias têm seu funcionamento baseado principalmente, ou no *efeito joule* da corrente elétrica ou no *princípio da indução* elétrica.

A produção do serviço de energia calor através da eletricidade é, caracteristicamente, de natureza eletro-intensiva. Dada essa importância e, considerando as principais tecnologias da sua produção, a análise das correspondentes cargas modificadas é desenvolvida separadamente, visando-se contemplar as especificidades de cada principal família tecnológica da produção do serviço de energia termoeletricidade.

3.1.2.1 Fornos Elétricos

Os fornos que operam a base do *efeito joule*, transformando a potência elétrica ativa em calor, geralmente apresentam altos rendimentos nos processos de conversão, desde que o elemento conversor principal (resistência elétrica) seja de boa qualidade e tenha suas características operativas dimensionadas adequadamente para a demanda servida. O alto rendimento, em questão, é aquele no qual se considera a quantidade de calor, normalizado à correspondente potência equivalente, no volume superficial do conversor, como serviço de energia útil (de saída) e a potência elétrica ativa, como vetor elétrico absorvido (de entrada). Entretanto, como o serviço de energia, normalmente não é aproveitado/retirado diretamente sob a superfície do conversor, mas sim, indiretamente em volumes periféricos incrementais do conversor, as características térmicas dos materiais e equipamentos envolvidos na condução e condicionamento do calor têm impactos significativos no valor do rendimento sistêmico.

Boas características térmicas para fornos elétricos, devem orientar-se por dois objetivos, nomeadamente, uma alta condutibilidade do calor dentro do volume interior e uma alta resistividade calorífica para com ambientes estranhos.

Enfatizando, principalmente, a importância da energia elétrica e dos seus componentes associados, nos fornos elétricos, um modelo esquemático elementar para um forno elétrico de *efeito joule* é apresentado na Figura 11.

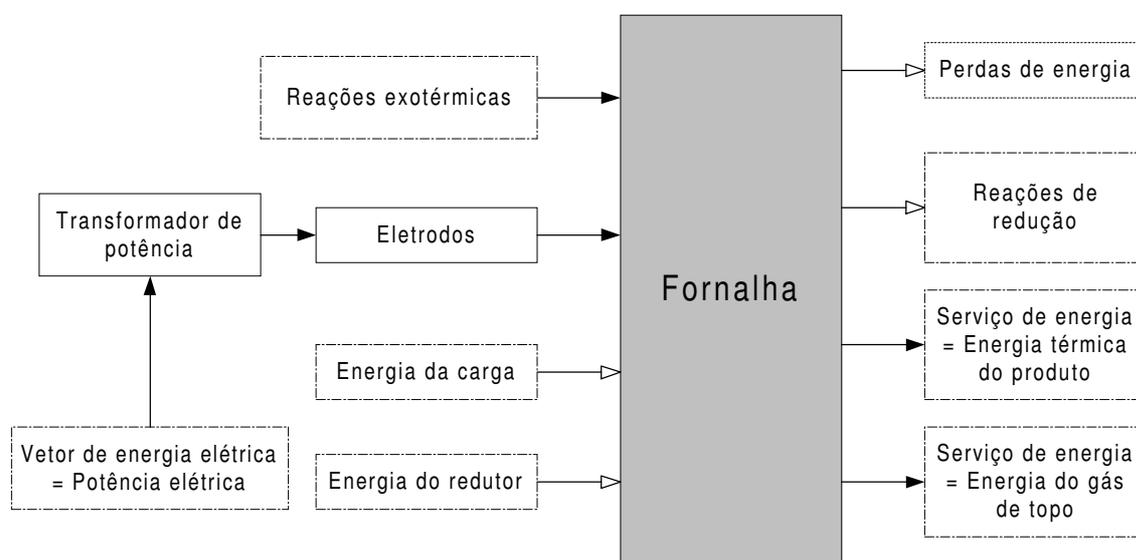


Figura 11 – Esquema Básico da Produção do Serviço de Energia Calor Através de um Forno Elétrico.

A análise da Figura 11 e do balanço energético associado permite identificar que as cargas modificadas, no caso de fornos elétricos, podem resultar a partir de uma atuação centrada em três possíveis conjuntos de parâmetros, nomeadamente:

- (1) Parâmetros operacionais elétricos e eletrometalúrgicos;
- (2) Parâmetros operacionais metalúrgicos; e
- (3) Parâmetros de projeto.

Conforme o Programa Nacional de Combate ao Desperdício Energético, da Eletrobrás, um resumo básico para essas possibilidades de intervenção, consiste da busca pela implementação dos procedimentos descritos a seguir (PROCEL, 1989).

- 1) No âmbito dos parâmetros operacionais elétricos e eletrometalúrgicos – Uma atuação em relação a estes parâmetros envolve:
 - a) Determinar e otimizar as curvas características das seguintes funções:
 - Potência aparente (S) versus corrente de carga (I_c), $S = f(I_c)$;
 - Potência ativa (P) versus corrente de carga (I_c), $P = f(I_c)$;
 - Potência reativa (Q) versus I_c , $Q = f(I_c)$;
 - Fator de potência ($\cos\phi$) versus I_c , $\cos\phi = f(I_c)$; e
 - Resistência ôhmica (R) versus I_c , $R = f(I_c)$.
 - b) Determinar e otimizar a resistência de operação (R_o) e a distribuição do calor; e
 - c) Modelar a interação das variáveis metalúrgicas e elétricas e otimizar a operação desse processo (otimização operacional).
- 2) No âmbito dos parâmetros operacionais metalúrgicos – Uma intervenção direcionada à estes parâmetros envolve:
 - a) Elaborar o balanço térmico; e
 - b) Escolher corretamente a composição e a granulometria da carga.
- 3) No âmbito dos parâmetros de projeto – Os parâmetros de projeto dizem respeito a:
 - a) Escolha da capacidade adequada do forno;
 - b) Escolha de equipamentos com bons índices de robustez (robustez dos equipamentos);
 - c) Dimensionamento adequado do secundário do transformador de alimentação;
 - d) Manuseio adequado da carga;
 - e) Determinar a implantação de instalações complementares; e
 - f) Estudar e decidir pela implantação de opções de automação do processo.

O Quadro 3 fornece alguns potenciais de economias de energia em fornos elétricos a arco submerso obtíveis a partir de algumas das intervenções referidas.

INTERVENÇÃO	ÂMBITO DO PARÂMETRO
	Projeto
Seleção da capacidade adequada do forno	30% no consumo específico de energia
Dimensionamento adequado do secundário	40% de perdas elétricas do forno
Automação adequada do processo	14% do consumo de energia (ou igual aumento da produção)

Quadro 3 – Potenciais de Economia Energética Possível em Fornos Elétricos a Arco Submerso (PROCEL, 1989).

A discussão em torno do serviço de energia calor tem sido em torno do forno elétrico a arco submerso, como tecnologia de geração desse serviço de energia. Contudo, existem outros tipos de fornos elétricos com tecnologia de produção de calor baseada em outras particularidades. Com atenção a isso destacam-se, além dos fornos elétricos a arco submerso, os fornos elétricos a arco direto. Tanto os fornos elétricos a arco submerso quanto os a arco direto podem classificar-se, quanto ao acesso à carga, em fornos abertos, semi-abertos e fechados.

Uma questão de elevada importância, em torno do aumento dos ganhos energéticos associados ao serviço de energia calor, e que também está evidenciada na Figura 11, relaciona-se com a recirculação do gás de topo do alto forno. Basicamente, a recirculação da energia do gás de topo pode resultar em grandes níveis de economia ou conservação de energia. Os ganhos energéticos associados são possíveis através das seguintes opções tecnológicas:

- 1) Reaproveitamento do gás de topo do alto forno para a geração da energia elétrica. Trata-se, geralmente, de uma tecnologia que busca a otimização simultânea de recursos energéticos através da produção combinada de calor e eletricidade, a partir de um único insumo energético de entrada. Para essa finalidade, entre as possíveis alternativas de reaproveitamentos, as mais difundidas são as tecnologias de ciclo combinado, vulgo unidades combinadas de produção de calor e eletricidade. Os ganhos adicionais de energia são da ordem de até o valor da eficiência nominal dos fornos convencionais, sem mecanismo de geração combinada. Com essas cargas modificadas obtêm-se, praticamente, eficiências energéticas totais equivalentes ao dobro das eficiências energéticas das tecnologias convencionais.
- 2) Reaproveitamento do gás na produção, por exemplo, de ferro-ligas do tipo ferro-manganês alto carbono (FeMn-AC) ou ferro-silício-manganês (FeSiMn). Nestes reaproveitamentos, não propriamente utilizando diretamente o vetor eletricidade, o gás de topo de alto forno é destinado para: a) secagem de minérios; b) pré-aquecimento de minérios; c) secagem de fertilizantes; e d) pré-aquecimento da panela. Através dessas aplicações, conseguem-se ganhos adicionais efetivos totais de até em torno de 84% da energia liberada no topo do alto forno convencional, sem reaproveitamento desse gás.

Existe uma grande diversidade de segmentos industriais utilizando em suas operações, processos caracterizados de ciclos - *geração de calor - utilização de serviço de energia calor - geração de calor de processo* - tendo como insumo a energia elétrica. Entre esses segmentos, os mais intensos no consumo da energia elétrica são: siderurgias diversas, metalurgia, papel e celulose, petroquímica, plástico, alimentos e bebidas (HENRIQUE JR. *et al.*; MARTIN *et al.*, 2000; DOS REIS, 2003).

A enorme quantidade desses consumidores eletro-intensivos representa, também, uma boa opção para o potencial de economia da energia elétrica, tanto numa visão de agente consumidor particular, em relação ao sistema concessionário de energia elétrica, quanto de agente produtor independente (PIE) ou autoprodutor de energia elétrica (AP).

Um direcionamento de incentivos (nos âmbitos legal, institucional, acesso às informações e dados técnicos, acesso à rede, etc.) para esses agentes, visando a integração efetiva, em seus sistemas internos, de cargas modificadas desta produção de serviços de energia, pode desempenhar uma importância fundamental para a adição de suas disponibilidades energéticas na oferta de capacidade e de energia elétrica.

O conhecimento e a avaliação da disponibilidade do potencial associado às cargas modificadas do serviço de energia calor pode representar importante impacto sobre a capacidade e energia, com efeitos na demanda e energia contratadas, na auto-suficiência, e na alocação de recursos em energia elétrica em consumidores elegíveis.

3.1.2.2 Bombas Elétricas de Calor

As cargas modificadas para a produção do serviço de energia calor, de bombas elétricas de calor, resultam basicamente, de uma combinação adequada da tecnologia de geração de calor, da tecnologia de isolamento e/ou condução e da tecnologia de bombeamento do calor gerado. Esta combinação otimizada tem como objetivo, a máxima transferência e ao mínimo custo, do calor produzido, desde o gerador de calor (geralmente resistência ôhmica), passando pelo meio condutor térmico (geralmente termoduto) até o ponto da prestação do serviço de energia.

Considerando o modelo básico equivalente de uma bomba de calor, conforme mostrado na Figura 12, depreende-se que a eficiência elétrica do sistema é dominada pelas eficiências do

motor elétrico e do gerador de calor da bomba. Sendo assim, são igualmente válidas para esses motores elétricos, como componentes de cargas modificadas da produção do serviço de energia calor, as discussões e análises sobre motores elétricos, desenvolvidas em seções anteriores, referentes à produção dos serviços de energia força-motriz.

Pressupondo-se uma especificação e seleção adequada de componentes condutores de calor e de componentes isoladores de calor, a eficiência de conversão da energia elétrica em calor, através de resistores ôhmicos, geralmente é alta (no caso, não considerando discussões acerca da viabilidade da substituição da eletricidade na produção de calor).

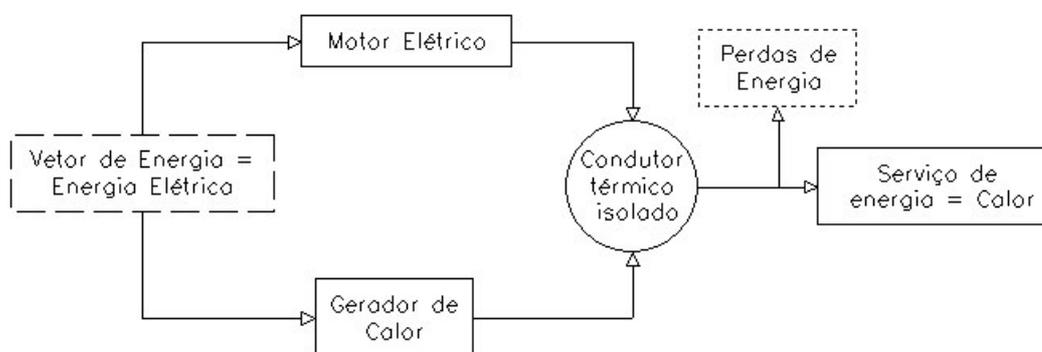


Figura 12 – Modelo Básico de uma Carga Modificada do Tipo Bomba de Calor.

3.1.2.3 Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Aquecimento

O serviço de energia aquecimento a base da eletricidade, tecnologicamente, é suprido através de sistemas cujos modelos físicos são semelhantes ao modelo da Figura 12. A principal diferença diz respeito, principalmente, à finalidade a que se presta o calor gerado. Junto com as particularidades da finalidade do serviço de energia calor, podem estar associadas algumas especificidades tecnológicas que, contudo, não afetam significativamente a tecnologia de geração do calor principal e a eficiência resultante.

Geralmente o serviço de energia aquecimento, na indústria, destina-se a suprir a manutenção de determinados níveis de temperatura requeridos por matérias-primas, produtos e ambientes, enquanto que o serviço de energia calor, normalmente, representa um insumo básico nos processos de transformação.

Em alguns casos, conforme destacado na seção cargas modificadas do serviço de energia calor através de fornos elétricos, o serviço de energia aquecimento, para determinado porte de indústrias ou segmentos industriais, pode resultar de um reaproveitamento da energia que seria desperdiçada como gás de topo ou rejeito de fornos industriais. Neste sentido, no segmento industrial, justifica-se que o serviço de energia aquecimento possa ser tratado de forma agregada junto com os aumentos da eficiência do serviço de energia calor.

3.1.3 Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Ar Condicionado

O modelo físico da produção do serviço de energia ar condicionado é, genericamente, similar ao modelo do serviço de energia força-motriz e, particularmente semelhante ao modelo do serviço de energia calor já discutido. A Figura 13 representa o modelo básico do serviço de energia ar condicionado. Observa-se, a partir dessa figura, que as diferenças fundamentais em relação à Figura 12 (modelo básico da carga modificada bomba de calor) incidem no termoduto e no gerador de frio.

Para cargas modificadas do serviço de energia ar condicionado, as elevadas eficiências do termoduto referem-se à busca e adoção de tecnologias eficientes de condicionamento, condução e isolamento térmica de fluídos refrigerantes em temperaturas moderadas e baixas, diferentemente das cargas modificadas bombas de calor, aonde as elevadas eficiências dessas tecnologias referem-se à condução, acondicionamento e isolamento térmica de fluídos em temperaturas relativamente altas.

Conseqüentemente, satisfeitos os requisitos de ordem não elétrica – requisitos térmicos e fluídos refrigerantes - a economia de energia elétrica é determinada, basicamente, pelo motor elétrico do acionamento do compressor, considerando atendidos os fatores de dimensionamento e especificação de circuitos elétricos e seus controles.

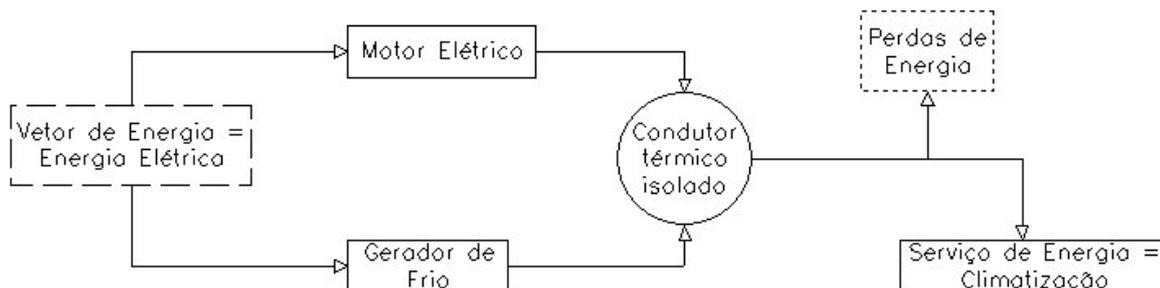


Figura 13 – Modelo Básico de uma Carga Modificada do Tipo Ar Condicionado.

3.1.4 Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Aquecimento - Ventilação - Ar Condicionado

Uma carga modificada, de alta eficiência técnica e econômica, resulta da integração viável de cargas modificadas dos serviços de energia aquecimento, ventilação e ar condicionado. Desta combinação resulta uma só carga modificada que associa, criteriosamente, o aquecimento, ventilação e ar condicionado.

O modelo equivalente dessa carga modificada corresponde, aproximadamente, à associação entre as Figuras 11 e 13, em resultado da qual, é visível a vantagem da eliminação de um dos motores, o que pode levar à otimização, também, do investimento.

Em razão da sazonalidade e da não simultaneidade da demanda desses serviços de energia obtém-se, também, a otimização dos custos de operação, além da característica elevação da eficiência técnica, já anteriormente discutida, no âmbito dos motores elétricos dos acionamentos. A Figura 14 mostra o esquema básico de uma carga modificada combinada dos serviços de energia aquecimento - ventilação - ar condicionado.

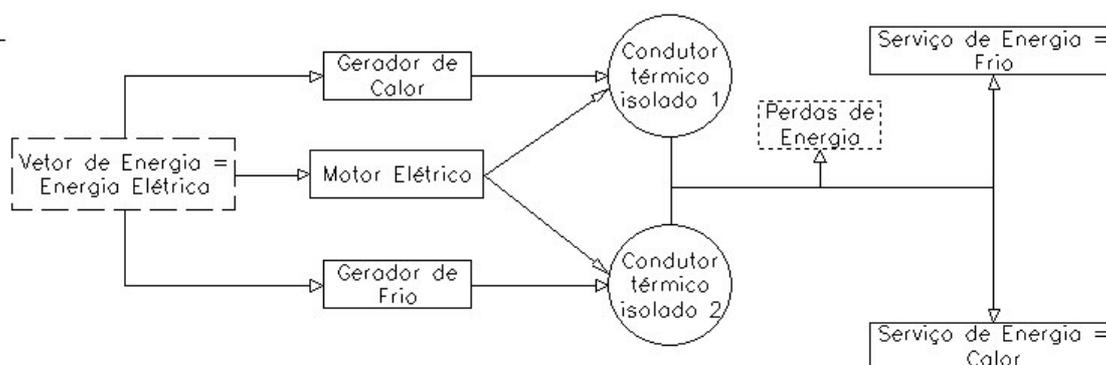


Figura 14 – Modelo Básico de uma Carga Modificada Combinada de Aquecimento – Ventilação - Ar Condicionado.

3.1.5 Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Refrigeração

O modelo básico de cargas modificadas do serviço de energia refrigeração também se assemelha ao modelo de cargas modificadas do serviço de energia ar condicionado, mostrado na Figura 13. Apesar de tais semelhanças, a finalidade de seus serviços de energia, as particularidades das tecnologias de acondicionamento, isolamento, fluídos e condução de fluídos e os detalhes de seus controles são profundamente distintos.

Considerando satisfeitas as condições de implementação e obtenção de altas eficiências dos componentes não elétricos destas cargas modificadas, a elevada eficiência equivalente, de uma carga modificada do serviço de energia refrigeração, depende da eficiência do motor elétrico do acionamento. Para tanto, na produção dos serviços de energia refrigeração, são válidos os fundamentos sobre motores elétricos de acionamentos modificados, já apresentados em seções anteriores.

3.1.6 Principais Cargas Modificadas do Serviço de Energia Iluminação

As grandes corporações industriais utilizam intensamente os serviços de energia iluminação, tanto para o chão de fábrica e galpões quanto para áreas de escritórios. Além disso, o elevado pé direito das edificações industriais aumenta o impacto do serviço de energia iluminação no consumo da energia elétrica industrial. Por isso, é oportuno considerar também, a análise dessas cargas modificadas no contexto do potencial da economia de energia elétrica no segmento industrial.

A iluminação é um serviço de energia, aparentemente obtido com mais simplicidade em comparação com outros serviços de energia, já discutidos. Os diversos tipos de lâmpadas elétricas caracterizam-se, adequadamente, como cargas modificadas, do ponto de vista de suas elevadas eficiências, em função dos critérios da tecnologia da produção de luz usada e da tecnologia de seus equipamentos e acessórios. Geralmente, são tecnologias baseadas em baixos graus de participação de componentes ôhmicos e altos graus de participação de componentes multivapores na produção de luz de origem elétrica.

Não obstante à efetividade dessas cargas modificadas, numa enormidade de aplicações, seus ganhos ainda são desperdiçados em virtude de fatores associados ao âmbito do projeto de iluminação de áreas afins. Portanto é, sobretudo, através de uma interface correta com o projeto que se podem obter as cargas modificadas deste serviço de energia.

A Figura 15 mostra o modelo básico de uma carga modificada do serviço de energia iluminação. Um fator de significativa importância, imprescindível na complementaridade da carga modificada do serviço de energia calor, relaciona-se com as características das luminárias (não representadas explicitamente no modelo da Figura 15). Entretanto, considerando que a eficiência de um serviço de iluminação envolve a efetividade da distribuição de luz nos ambientes úteis, a eficiência resultante, a qual internaliza a redução das perdas de energia, na Figura 15, pressupõe-se a associação do tipo de lâmpada eficiente com a luminária apropriada e eficiente.

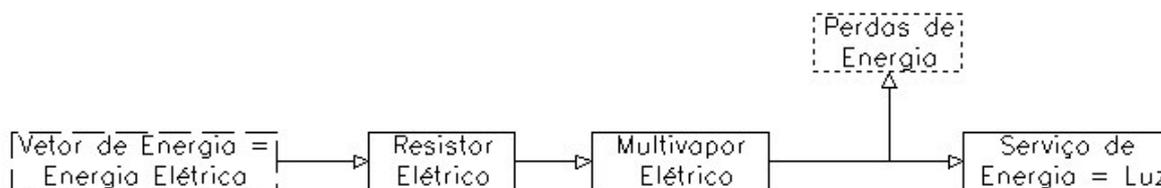


Figura 15 – Modelo Básico de Carga Modificada do Serviço de Energia Iluminação.

No Anexo 1 são ilustrados dados comparativos de opções para cargas modificadas do serviço de energia iluminação. A partir desses dados, associados aos aspectos técnicos de cargas modificadas do serviço de energia iluminação, denotam-se potenciais sinergias de parâmetros técnicos, concordantes com altos ganhos energéticos no provimento do serviço de energia iluminação.

Ao conjunto das eficiências, caracterizadas em termos de cargas modificadas, conforme o paradigma da requerida transformação do mercado de energia elétrica, devem-se incluir as eficiências dos correspondentes sistemas auxiliares de controle da operação, circuitos e canalizações de alimentação das cargas, aonde se juntam, também, as condições de montagem eficiente desses circuitos e canalizações.

No caso das cargas modificadas do serviço de energia iluminação, dada a importância na participação do rendimento sistêmico, devem ser considerados os tipos apropriados de luminárias, os dispositivos auxiliares de alta eficiência como, por exemplo, os reatores de alto fator de potência, não-resistivos, e os correspondentes sistemas de controle, observadas as características particulares dos ambientes e as atividades finais realizadas nesses ambientes.

3.2 OPERAÇÃO MODIFICADA DOS SERVIÇOS DE ENERGIA

Esta seção tem por objetivo agregar, resumidamente, uma discussão complementar a respeito das economias energéticas associadas com a operação das cargas modificadas dos serviços de energia, discutidos em seções precedentes.

A operação modificada é um instrumento de implementação do gerenciamento do lado da demanda (GLD). O GLD, sendo implementado após um estudo e conhecimento das cargas e conseqüente inserção adequada de cargas modificadas, resulta em competitivas economias, tanto de carga (kW) quanto de energia (kWh). Desse modo, uma boa operação modificada age sinergicamente com o conjunto das cargas modificadas.

Não obstante às potencialidades da operação modificada para economizar energia, na prática tem-se observado, em razão de motivos que se enquadram no contexto de barreiras à conservação de energia elétrica (CAMARGO, 1996; JANNUZI e SWISHER, 1997; SWISHER *et al.*, 1997), a tendência de consumidores industriais buscarem estratégias da operação modificada, sem que tal busca seja precedida do imprescindível estudo, decisão e implantação da alta eficiência energética.

Esse comportamento, testemunho da veracidade das barreiras identificadas, caracteriza adicionalmente, um consumidor, de certa forma, ainda cativo ao modelo monopolista, verticalizado e regulado ora em transformação e, como tal, um consumidor com indícios de uma não real percepção de sua exposição aos diversos custos relacionados com a energia elétrica. A percepção real dessa exposição é, fundamentalmente necessária, para apoio e estímulo à tomada de decisões, por parte dos consumidores, ajustadas às transformações requeridas nos usos da energia elétrica e que, finalmente, se possam traduzir em termos de redução das intensidades energéticas nas utilizações finais.

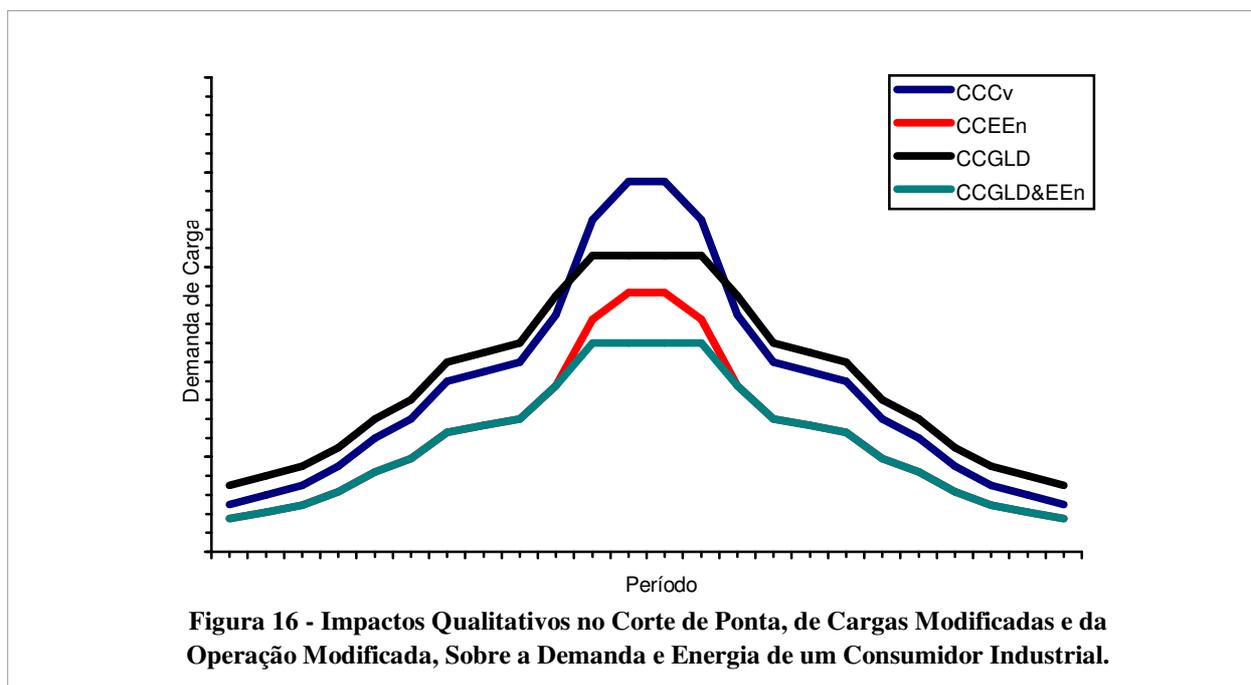
Para todo e qualquer segmento e uso-final, a operação modificada deve ser entendida como toda a seqüência de operações de um sistema ou conjunto de sistemas, estabelecida criteriosamente, objetivando a adequada produção dos serviços de energia ou produção de *commodities*, a um custo-mínimo de desperdício da energia elétrica, e um custo-efetivo do impacto sobre as demandas de carga e de energia junto ao consumidor. Esta deve ser a visão sustentada do GLD num mercado de energia elétrica desregulado, alternativa à visão do GLD tradicional, cuja leitura e significado não coincidem exatamente com esta.

Os impactos conjuntos da operação modificada e das cargas modificadas, sobre as demandas de carga e energia de um consumidor industrial, associados àquelas estratégias de gerenciamento do lado da demanda, e que têm como objetivos relevantes, também, a economia de energia, estão ilustrados nas Figuras 16 – 19.

Ressalte-se, como diferencial, o fato de as estratégias de gerenciamento do lado da demanda nem sempre objetivarem a conservação de energia. A esse propósito, e conforme vem sendo referido, em geral as estratégias do GLD têm sido classificadas entre as seguintes divisões clássicas (SWISHER *et al.*, 1997; JANNUZZI e SWISHER, 1997, CAMARGO e BORENSTEIN, 1997): (i) corte de ponta; (ii) preenchimento de vales; (iii) deslocamento da carga; (iv) conservação estratégica; (v) crescimento estratégico da carga; e (vi) curva de carga flexível.

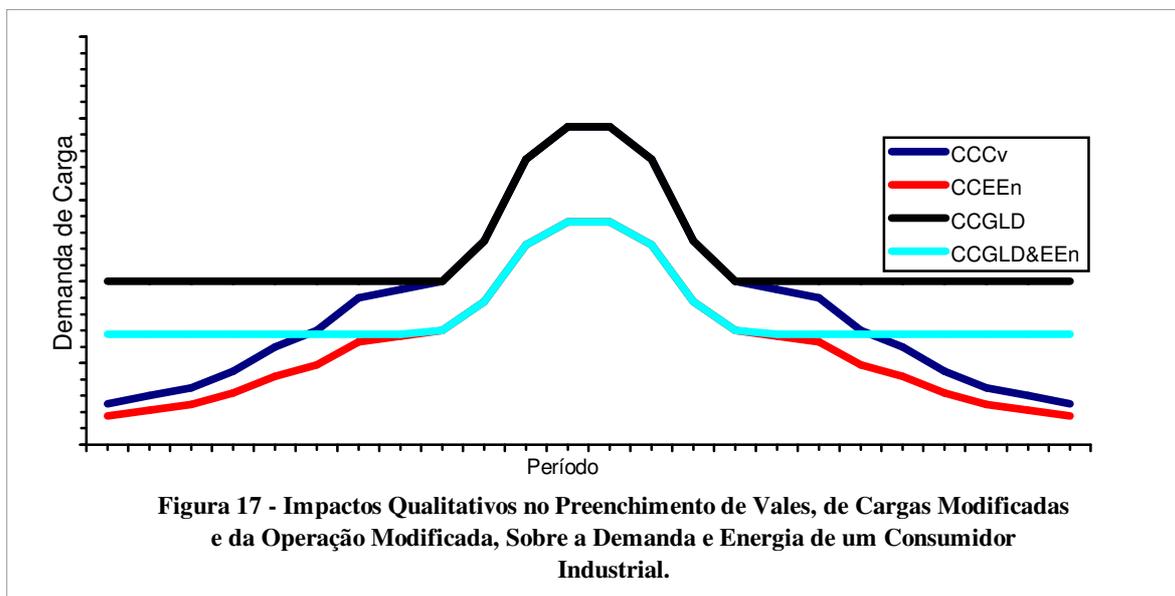
Visando evidenciar e compreender esses impactos são apresentados, nas mesmas figuras (Figuras 16 - 19), de forma qualitativa, as curvas de carga convencional (CCCv), as curvas de carga resultante da ação isolada do GLD (CCGLD), as curvas de carga resultante da ação isolada da eficiência energética (CCEEn) e as curvas de carga resultante da ação conjunta do GLD e da eficiência energética (CCGLD&EEn).

Nessas figuras (Figuras 16 – 19) são mostrados exemplos de impactos de cargas modificadas e de operações modificadas sobre uma hipotética curva de carga pré-existente de um determinado consumidor industrial, no qual podem ser desenvolvidos todos ou parte dos serviços de energia discutidos.

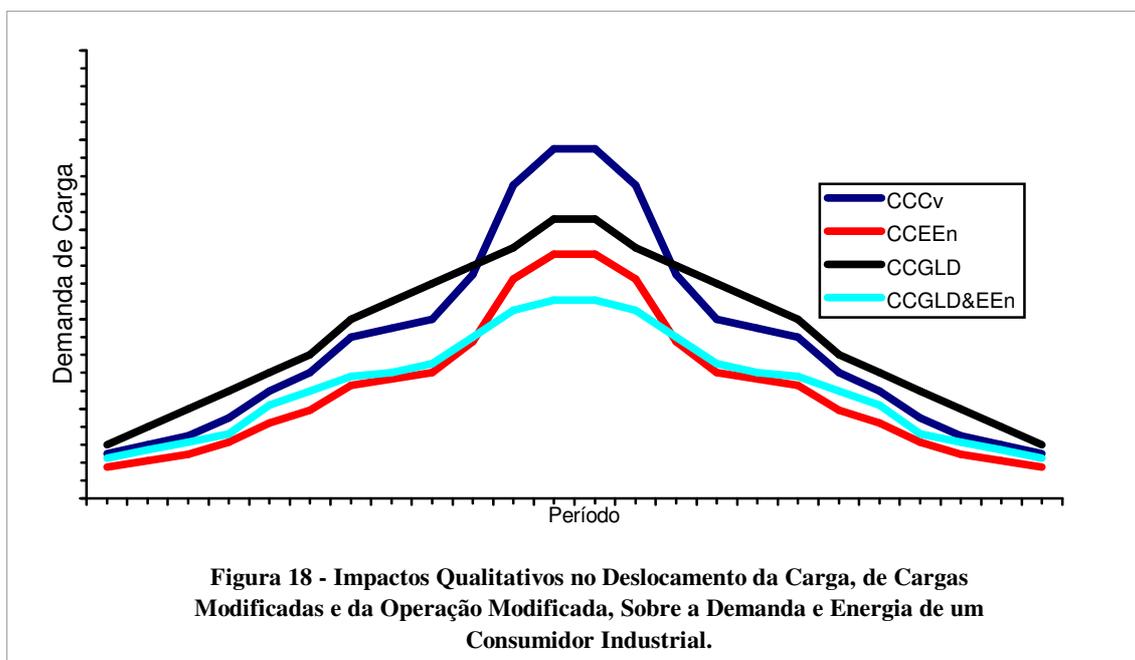


Os impactos mostrados na Figura 16, no âmbito das práticas tradicionais das funções do GLD normalmente usadas, inserem-se no objetivo de *cortar a ponta* do perfil da curva de carga do sistema elétrico consumidor. Refira-se, que esse objetivo, de ordem técnico-operacional (despacho da operação do SE) e econômico-financeiro (planejamento da expansão do SE), é extensível tanto para um quanto para todos os agentes do sistema concessionário interligado, sendo vinculados no caso, através das atribuições e procedimentos dos agentes da geração (G), transmissão (T), distribuição (D) e comercialização (Com). Denote-se, entretanto, que numa visão de economia clássica do sistema elétrico, neste objetivo o consumidor, também como agente do sistema elétrico, não tem seus benefícios particulares explicitamente contemplados.

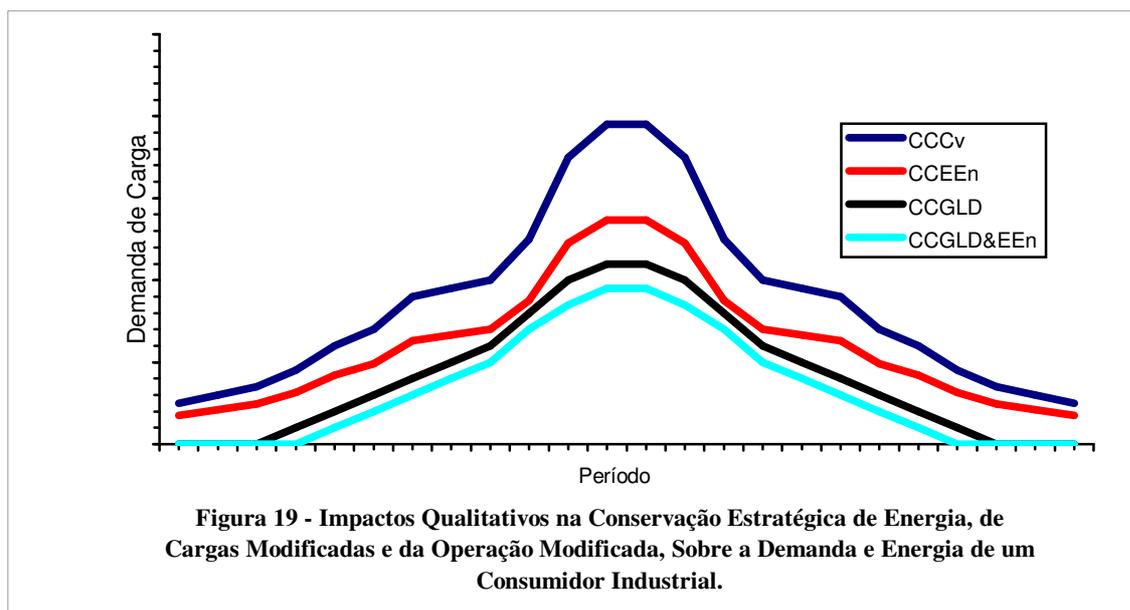
Nesse sentido depreendem-se, mais uma vez, as vantagens dos consumidores industriais se posicionarem por uma busca atuante, em vistas ao atendimento de seus objetivos particulares, através de mecanismos de intervenção em suas curvas de carga, observando simultaneamente, a eficiência energética e o gerenciamento do lado da demanda (curvas CCGLD&EEn das Figuras 16 – 19) no contexto do planejamento e da operação de seus sistemas elétricos.



Na Figura 17 os impactos, no âmbito das práticas tradicionais das funções do GLD normalmente usadas, são comparados com os impactos de ações integradas entre o GLD e a EEn e se inserem no objetivo de *preencher os vales* do perfil da curva de carga do sistema elétrico consumidor.



Na Figura 18 os impactos, no âmbito das práticas tradicionais das funções do GLD normalmente usadas, são comparados com os impactos de ações integradas entre o GLD e a EEn e se inserem no objetivo de *deslocar estrategicamente a carga*, a partir do perfil da curva de carga original do sistema elétrico consumidor.



Na Figura 19 os impactos, no âmbito das práticas tradicionais das funções do GLD normalmente usadas, são comparados com os impactos de ações integradas entre o GLD e a EEn e se inserem no objetivo de *conservar estrategicamente a energia*, a partir do perfil da curva de carga original do sistema elétrico consumidor.

Como se apercebe, a partir das características qualitativas de carga e energia apresentadas, a implementação integrada da eficiência energética (EEn) e do gerenciamento do lado da demanda (GLD) proporciona, para o consumidor industrial, importantes benefícios em demanda, energia e custos. Estes, por sua vez, com reflexos benéficos, diretos e indiretos, na operação e manutenção (O&M) e desenvolvimento da produção associada aos usos finais, a partir de tecnologias elétricas. Além disso, esses benefícios diretos e indiretos são extrapoláveis à racionalidade do uso, à preservação de recursos naturais e à mitigação de

efeitos negativos dos impactos advindos de aplicações tecnológicas com níveis elevados de intensidades energéticas (IE).

Dado que, junto com as cargas e operações modificadas estão associados outros benefícios e vantagens nas utilizações finais da energia elétrica, no Anexo 2 são fornecidos dados adicionais referentes aos diversos tipos de cargas modificadas, enfocando-se as suas denominações, coeficientes técnicos de conversão de vetores de energia, benefícios ambientais e não-energéticos.

3.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram estabelecidos conceitos e bases sobre os quais se deve fundamentar a nova abordagem para o problema do potencial de conservação da energia elétrica no segmento industrial.

Discorreu-se inicialmente, em torno da importância dos consumidores industriais na composição do consumo da energia elétrica dentro do balanço energético. Através disso, ressaltou-se o papel do setor industrial como estratégico para a consecução dos objetivos na redução, tanto do consumo quanto da pressão sobre os projetos de expansão do suprimento através dos modelos tradicionais, para atender o consumo crescente da energia elétrica.

Dentro do segmento industrial foram discutidos tanto os principais serviços de energia produzidos quanto as principais cargas elétricas usadas na produção desses serviços. Nesse contexto, foi realizada uma análise compreensiva sobre a responsabilidade dessas cargas na composição do consumo da energia elétrica industrial. Através dessa análise, evidenciou-se a importância relativa das diversas cargas da produção dos serviços energéticos industriais. As cargas da produção dos serviços de energia do tipo força motriz e do tipo calor, entre outras, mostraram-se como as maiores concentradoras e líderes do consumo da energia elétrica na indústria.

Tomando as cargas, como componentes elementares da formação do elevado consumo da energia elétrica, concluiu-se que a redução dos elevados índices do consumo pode ser obtida mediante a implementação de procedimentos a respeito das cargas elétricas, que concorram para esse objetivo. Para isso, foram estabelecidos conceitos como cargas e operações

modificadas, que sendo explicitadas e incorporadas na produção dos serviços de energia, associam os benefícios da sua alta eficiência energética junto aos benefícios das estratégias do gerenciamento do lado da demanda.

Com as sinergias simultâneas, tanto da eficiência energética quanto do gerenciamento do lado da demanda, tem-se como resultado, impactos significativos sobre os perfis do comportamento da demanda e da energia consumidora do segmento industrial, com o conseqüente impacto da transferência desses benefícios, também para os sistemas concessionários da oferta de energia elétrica.

CAPÍTULO 4

1. CUSTOS DA ENERGIA ELÉTRICA, SUAS FONTES E SOLUÇÕES

Os custos em energia elétrica podem ser divididos em três categorias, a cada uma, correspondendo diferentes fontes de origem. Essas três categorias de custos são (SAWIN, 2003; WWI, 2003; BROWN, 2003):

- 1) Custos de natureza técnica, econômica e financeira;
- 2) Custos de natureza ambiental; e
- 3) Custos de natureza social.

Nos modelos tradicionais de planejamento e usos-finais da energia elétrica (modelo de planejamento/análise tradicional) consideram-se apenas os custos de natureza técnica, econômica e financeira (custos técnico – econômico - financeiros). Já nos modelos de planejamento e de usos-finais integrados (modelos PIR) considera-se, com a mesma prioridade, uma combinação competitiva dos custos técnico – econômico - financeiros, dos custos ambientais e dos custos sociais. Refira-se, que este trabalho enquadra-se nesse conjunto PIR dos modelos de planejamento e utilizações-finais da energia elétrica. Nas seções seguintes é realizada uma discussão sobre esses custos.

4.1 CUSTOS TÉCNICO – ECONÔMICO - FINANCEIROS

Os custos da energia elétrica, numa visão técnica, econômica e financeira, são os custos que advêm de:

1) *Custos dos investimentos* (C_{inv}), sobre a capacidade instalada nos segmentos de geração própria (unidades geradoras), alimentação (subestações transformadoras), distribuição, circuitos, equipamentos e dispositivos de utilização. Incluem-se nestes, os custos decorrentes da necessidade de expandir a potência instalada para atender ao crescimento da demanda dos serviços de energia. Normalmente, estes custos de investimentos sobre a potência instalada têm impactos como custos fixos do sistema elétrico consumidor, comportando-se assim, como custos marginais de longo prazo (CMLP), dentro do processo de produção de uma indústria já instalada e em operação.

2) *Custos de operação e manutenção* (CO&M), nos segmentos de geração própria, alimentação, distribuição, circuitos, equipamentos e dispositivos de utilização. Estes CO&M são custos variáveis e têm impactos na operação da indústria em funcionamento sob a forma de custos marginais de curto prazo (CMCP) no processo produtivo da indústria.

Do ponto de vista do consumidor industrial, os custos pelo desperdício de energia elétrica, dada a sua interação com outras variáveis do sistema elétrico, têm impactos sobre os valores da demanda contratada, da energia contratada, da energia consumida, da energia de substituição ou mesmo de gastos financeiros por medidas emergenciais destinadas a reduzir os riscos de déficit no atendimento durante a produção. Devido a isso, os níveis dessas variáveis, de certo modo, podem expressar a parcela do ônus devido ao desperdício da energia elétrica nas instalações consumidoras. Nesse sentido, essas variáveis podem ser elementos importantes da medição, monitoramento e avaliação, indicativos do quanto pode estar sendo desperdiçado, em energia elétrica, nas instalações e utilizações-finais de consumidores industriais.

No sistema elétrico brasileiro, as modalidades tarifárias disponíveis, aplicáveis a consumidores industriais, em função de sua classe taxam-se, sob critérios específicos, a demanda e a energia contratadas e sobretaxam-se as demandas e as energias excedidas assim como os fatores de potência deficitários, a partir de valores normativos prefixados pelo órgão regulador, a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL (ANEEL, 2000; PROCEL, 2001).

No contexto da busca pela otimização dos serviços de energia, particularmente enfocando a modalidade tarifária, percebe-se, a partir da análise de suas opções, a existência de oportunidades para economizar energia e custos através da inserção de variáveis da estrutura

da inovação tecnológica (MARTINS, 1999; BELZER, 1995) nos modelos de planejamento e utilizações-finais da energia elétrica em consumidores industriais.

As seguintes grandezas características dos sistemas elétricos - *fator de potência, potência reativa, perdas joule, perdas por efeito pelicular (perdas por efeito skin), perdas por efeito proximidade, perdas por correntes parasitas, perdas por histerese, distorções harmônicas, variações de tensão, desequilíbrio entre fases, surtos e transitórios de tensão e variações de frequência* - constituem variáveis físicas diretas que expressam custos naturais associados com a eletricidade, porém, susceptíveis a alguma forma de manipulação.

Significa, que nas utilizações da energia elétrica precisa-se conviver com os níveis naturalmente típicos e/ou admissíveis dessas características, sendo, que para os níveis acima e/ou abaixo dos naturais e/ou admissíveis, torna-se imperativo, explicitar e restringir, adequadamente, as correspondentes variáveis, dentro das metodologias de usos-finais energéticos.

Nas utilizações-finais contemporâneas da energia elétrica são cada vez mais crescentes os impactos das novas tecnologias (predominantemente, tecnologias com operação não-linear em consumidores industriais, comerciais, residenciais e outros), sobre algumas dessas características, sendo então necessária, a adoção de cuidados especiais na engenharia de energia, particularmente de grandes consumidores.

A abordagem da modelagem dessas características foge do escopo deste trabalho, porém, considera-se, que de modo implícito, essas grandezas tenham seus níveis restringidos aos admissíveis em virtude de se tratar, neste trabalho, da modelagem baseada, entre outros, em parâmetros de alta eficiência tecnológica e operacional, na avaliação das demandas de capacidade e de energia elétrica. Sendo assim, nas seções abaixo são apresentadas, apenas, discussões breves elucidando sobre essas características, suas origens e interações com os custos e o consumo da energia elétrica nas utilizações-finais industriais.

4.1.1 Fator de Potência e Potência Reativa

Nas utilizações-finais da energia elétrica, os custos pelo fator de potência ($\cos \phi$) advêm dos baixos fatores de potência, resultantes da operação, com níveis de carregamento muito inferiores aos das potências nominais de equipamentos elétricos, cujo princípio de funcionamento necessita de componente eletromagnética de potência. Conseqüentemente,

equipamentos como motores de corrente alternada (MCA) e transformadores de potência devem ser especificados visando-se à *inovação tecnológica da transformação do mercado*, mediante estudos prévios adequados, de previsão do serviço de energia e da previsão do regime de carregamento. As capacidades desses equipamentos e de seus circuitos devem ser balanceadas, criteriosamente, atendendo-se a essa inovação tecnológica da transformação do mercado de energia elétrica.

Associado com o baixo fator de potência, em inúmeras aplicações resulta em não ser de custo-efetivo a prática de se preverem capacidades de reserva para a expansão futura do serviço ou para a sobrecarga, através do sobredimensionamento dos equipamentos elétricos. Esse custo pelo baixo fator de potência pesa sobre a exploração da rede elétrica consumidora, de três formas, nomeadamente: (i) sobrecarga elétrica inútil do sistema elétrico (SE); (ii) aumento das perdas ativas; e (iii) aumento do custo da demanda e da energia elétrica.

Considerando a natureza e o tipo de cargas, comumente mais usadas na produção dos serviços energéticos industriais, a contribuição para a solução do problema dos custos associados aos baixos fatores de potência e às altas potências reativas, dentro de um contexto de conservação da energia elétrica, pode ser viabilizada, estendendo as abordagens, de modo a incluírem, as potenciais opções proporcionadas pela inovação tecnológica.

Entre as opções possíveis, uma parte significativa resulta do elevado nível de desenvolvimento tecnológico, impulsionado nos últimos tempos, por pesquisas nas áreas da eletrônica de potência e do controle. No conjunto dessas soluções tecnológicas incluem-se, por exemplo, os sistemas de correção do fator de potência e os sistemas de compensação de harmônicos. Esses sistemas de correção devem, no entanto, observar a compatibilidade com os requisitos de qualidade da energia elétrica.

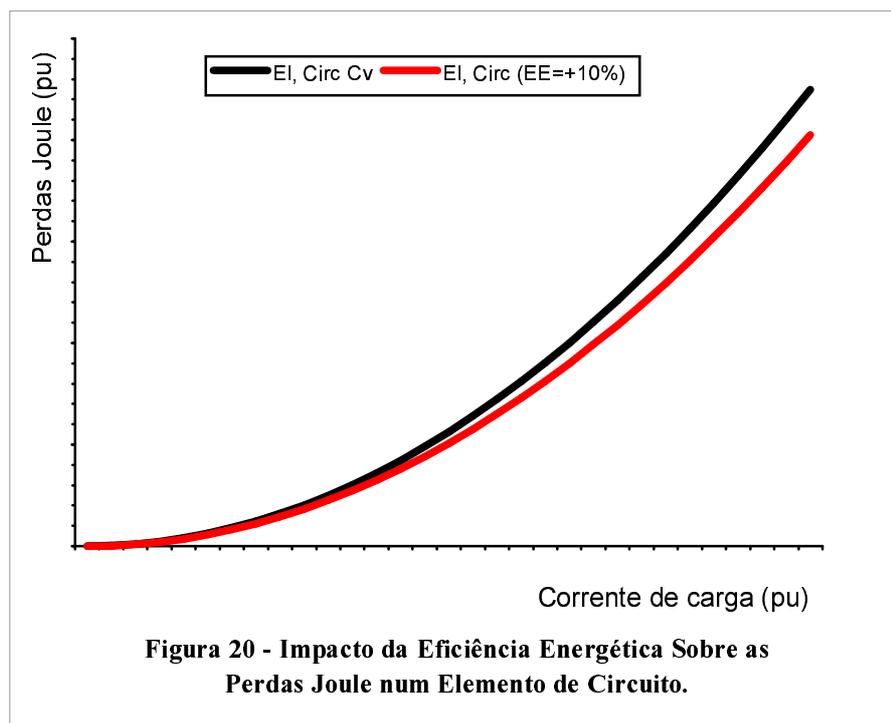
4.1.2 Perdas Joule

As *perdas joule* de energia, apesar de serem naturais com o fluxo da intensidade da corrente elétrica, nas utilizações-finais da energia elétrica para a produção dos serviços de energia desejados, devem ser, objetivamente minimizadas.

Sendo perdas variáveis, crescentes com o quadrado da corrente transportada e possuindo valor internalizado de capacidade para realizar trabalho que, porém se dissipam, simplesmente, em calor nas resistências ôhmicas de componentes e equipamentos pelos quais

a corrente flui, é visivelmente grande o impacto destas perdas, em função dos incrementos das correntes de carga ou de operação.

A Figura 20, por exemplo, mostra a curva característica do comportamento das perdas joule em função da corrente elétrica, depreendendo-se os impactos favoráveis dos incrementos dos parâmetros de eficiência energética sobre as perdas joule.



As perdas joule influem desfavoravelmente sobre as utilizações-finais da energia elétrica de consumidores, principalmente através de dois modos, nomeadamente:

- 1) Redução da potência ativa líquida disponível nos pontos da produção dos serviços de energia. Do ponto de vista do desempenho da operação dos dispositivos, equipamentos e circuitos elétricos, isto caracteriza uma baixa no rendimento do sistema elétrico consumidor.
- 2) Aumento dos níveis de aquecimento dos equipamentos, transformadores, motores, cabos e canalizações elétricas.

Efeitos adicionais, colaterais a esses dois, implicam na necessidade, não conveniente, de ter que se reduzir a demanda da produção dos serviços de energia ou o tempo de vida útil desses elementos. Refira-se, por exemplo, que um acréscimo de temperatura (ΔT) entre 8 e 10% sobre a temperatura admissível (T_{adm}) de uma dada classe de isolamento de motores elétricos

implica, em média, numa redução de sua vida útil em torno de 50% da nominal (WEG MOTORES, 2001).

As perdas por efeito joule, sob determinadas condições, sobretudo associadas à frequência, podem ser intensificadas por outras três fontes de perdas, geralmente não abordadas com a devida profundidade nos projetos de demanda e energia de consumidores industriais. Essas fontes de perdas são: (i) o *efeito proximidade*; (ii) o *efeito pelicular*; e (iii) o *efeito parasita* da corrente elétrica.

O hábito das avaliações das perdas se basear, sobretudo, em especificações conhecidas de condutores elétricos e seus valores da resistência em corrente contínua (RCC), pré-estabelecidos e ajustados à frequências nominais, vulgo resistência em corrente alternada (RCA), torna as oportunidades de projetos potencialmente benéficos, não aproveitadas ou não implementadas sempre que emergem discussões sobre soluções com respeito à redução do consumo da energia elétrica. Devido a isso, perdem-se importantes oportunidades para se identificar e se reduzir perdas de energia elétrica em sistemas de distribuição e circuitos de grandes consumidores industriais e comerciais operando, tipicamente, com cargas pesadas ou distorcidas.

Visando relevar a importância do fato, uma breve discussão é apresentada, a seguir, considerando-se os fenômenos largamente conhecidos e quantificados e que contribuem bastante para as perdas de energia na operação dos sistemas elétricos industriais.

4.1.3 Perdas por Efeito Proximidade

Nas utilizações da energia elétrica aonde as harmônicas da corrente elétrica não são desprezíveis, o efeito proximidade e o efeito *skin* podem comportar-se como potenciais fontes de perdas, tanto em transformadores e indutores quanto em sistemas de distribuição de energia elétrica em CA, constituídos de fios condutores circulares, separados e alojados dentro de eletrodutos fechados.

Se esses efeitos forem tratados como correntes induzidas circulares (correntes parasitas), ou como redistribuições da corrente, sob condições limites, o resultado pode ser uma distribuição de correntes não-uniforme com impacto no aumento das perdas acima das correspondentes, apenas, ao efeito resistivo em CC. Para ilustrar o impacto do efeito proximidade, as Figuras 21 - a) e b) - mostram as distribuições das correntes, típicas no efeito

proximidade, considerando o fluxo da corrente em ambos condutores, de um lado, numa mesma direção, e de outro, em direções opostas, respectivamente.

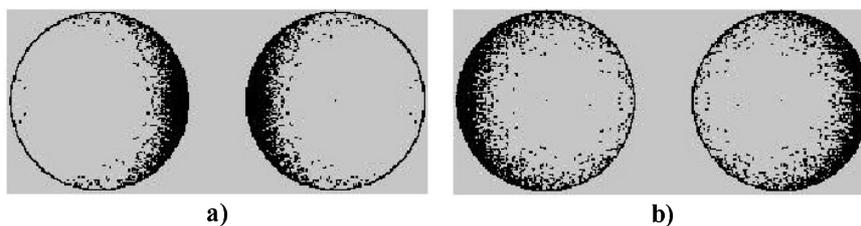


Figura 21 – Ilustrações das Distribuições das Correntes em Condutores Circulares Paralelos:

- a) No *Efeito Proximidade* com o Mesmo Sentido das Correntes.
- b) No *Efeito Proximidade* com Sentidos Opostos das Correntes.

Dentro de um sistema elétrico, as perdas CA, por efeito *proximidade* e por efeito *skin*, manifestam-se nas diferentes partes e estruturas do sistema, nomeadamente condutores, interruptores, eletrodutos, isoladores, sistemas de proteção e enrolamentos de bobinas de quaisquer dispositivos eletromagnéticos. Na eventualidade do efeito proximidade não ser considerado nas avaliações finais da energia elétrica, as perdas de distribuição efetivamente existentes nas instalações podem ser bem mais altas do que as perdas previstas.

Dentro da atual conjuntura energética, pesquisas ainda mais aprofundadas, a respeito desta natureza de perdas, visarão também a incorporação de seus resultados na análise e implementação de projetos energeticamente eficientes.

4.1.4 Perdas por Efeito *Skin*

Através da Figura 22 pode-se ter idéia sobre a distribuição não-uniforme da corrente na massa condutora. Essa distribuição não uniforme, por efeito *skin* da corrente elétrica, causa impacto direto no aumento das perdas de energia nos elementos condutores da eletricidade.

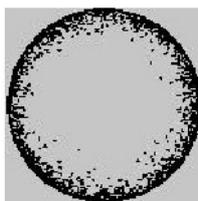


Figura 22 – Ilustração da Distribuição da Corrente num Condutor Circular com *Efeito Skin*.

Os fluxos das correntes harmônicas nas instalações consumidoras aumentam as perdas por efeito *skin* em proporção quadrática do aumento da frequência sobre a frequência nominal da rede. Nesse sentido, as harmônicas, associadas com o efeito *skin*, podem ser responsáveis por expressivas perdas de energia adicionais nos sistemas consumidores que tenham elevado número de cargas não-lineares, como dispositivos de frequência variável, acionamentos CA/CC, retificadores, fornos a arco e de indução, fontes de potência chaveadas, entre outros.

4.1.5 Perdas por Correntes Parasitas

Os efeitos das correntes parasitas não estão limitados, apenas, às aplicações e instalações com frequências elevadas. Até porque, conforme se sabe, mesmo os condutores não percorridos por corrente elétrica experimentam perdas por correntes parasitas quando expostos a campos magnéticos externos variáveis, através da indução mútua. Esses condutores podem ser uma blindagem, invólucro, condutores adjacentes dentro de um painel de distribuição, um transformador ou enrolamentos de máquinas não carregadas.

Desse modo, em qualquer componente de um sistema elétrico contendo alguma estrutura, por exemplo, de aço ou ferro e uma bobina, um fluxo magnético flui nas massas ferromagnéticas como resultado do fenômeno da indução eletromagnética. Dado que o material constitui, essencialmente, circuitos elétricos elementares fechados, a f.e.m induzida causará a circulação de *correntes parasitas*. Os valores dessas correntes dependem dos valores das f.e.m's induzidas e das resistividades dos caminhos elétricos elementares fechados.

As perdas por correntes parasitas manifestam-se sob a forma de calor, contribuindo com isso, para um rápido gradiente máximo da temperatura de operação dos dispositivos. Elas ocorrem em interruptores dos circuitos de manobra e proteção, reatores de lâmpadas, transformadores de potência, dispositivos magnéticos de partida de motores, transformadores de isolamento, relés, contadores, enrolamentos de motores, e em materiais condutores de edifícios próximos aos condutores ativos, como em compartimentos e canalizações elétricas, painéis de distribuição e terminações de circuitos.

4.1.6 Perdas Magnéticas ou de Histerese

Equipamentos e dispositivos de produção de serviços energéticos na indústria, sobretudo os diversos tipos de máquinas elétricas (rotativas, lineares, servomotores), transformadores

estáticos, vários tipos de transdutores baseados em solenóides, entre outros, contêm potenciais fontes de perdas de energia sob a forma de campos magnéticos.

Dentro dos limites normais da tensão e frequência de alimentação e da utilização, de um determinado dispositivo ou equipamento, geralmente as perdas magnéticas podem ser consideradas constantes, não dependendo, portanto, do nível de carregamento das máquinas e dispositivos acionados. Não obstante, a questão do impacto das perdas magnéticas remete a discussão para o âmbito das tecnologias dos materiais e da construção empregues no fabrico de máquinas e dispositivos elétricos.

A Figura 23, por exemplo, ilustra um modelo equivalente de um dispositivo provedor de serviço de energia, com indicação do processo conversor, envolvendo os vetores, serviços de energia e as perdas magnéticas, elétricas e outras. A partir dessa configuração pode ser percebida a elevada importância do mecanismo de acoplamento magnético como elo fundamental da determinação de um nível adequado de energia elétrica necessária à produção do serviço de energia final. Nessa figura, sobre outras perdas, refere-se aos tipos de perdas predominantes, característicos a tipos de serviços de energia específicos, providos por uma dada tecnologia.

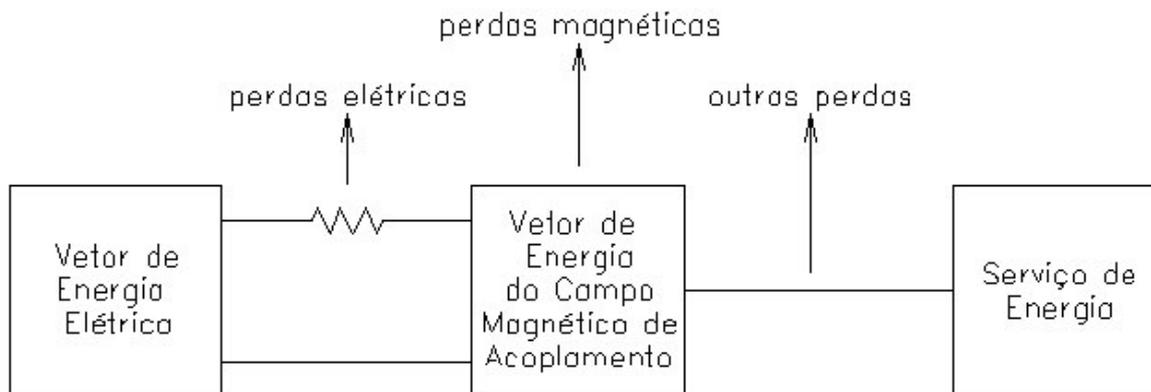


Figura 23 – Perdas de Energia num Modelo de Dispositivo Conversor Genérico.

De entre todas as tecnologias elétricas, as perdas magnéticas são particularmente importantes nos transformadores de potência, distribuição e força. Nesses dispositivos, os dois tipos principais de perdas de energia são as *perdas no núcleo* e as *perdas em carga*. Também denominadas *perdas por histerese*, as perdas magnéticas estão presentes tanto em armaduras de máquinas CA quanto em enrolamentos de transformadores elétricos.

As fontes das perdas e dos custos técnicos da energia elétrica, até agora discutidos, são problemas que podem ser resolvidos buscando-se abordagens e soluções que enfoquem tanto os aspectos de componente quanto de sistema aonde essas fontes se localizam. Entre esses sistemas, em que a abordagem desses problemas é particularmente importante e pode proporcionar benefícios potenciais em economia de energia elétrica, estão as linhas, circuitos e as configurações da distribuição de energia nas utilizações industriais. Uma discussão com respeito à minimização das perdas nesses sistemas é apresentada a seguir.

4.1.7 Perdas nas Linhas e nos Circuitos de Distribuição

Os vários fatores de perdas discutidos, operando em conjunto dentro de eletrodutos de um típico sistema de distribuição industrial, podem aumentar significativamente a resistência aparente em CA dos condutores das instalações. Sendo assim, típicas perdas ôhmicas nos condutores de linhas elétricas de instalações fechadas podem ser, freqüentemente, bem maiores do que os simples valores baseados em catálogos. Junte-se a isso, ainda, o fato das perdas resistivas ocorrerem em todos os componentes condutores dos sistemas de distribuição, e não somente nos fios elétricos.

Os circuitos de distribuição das instalações consumidoras, constituídos de condutores circulares alojados em eletrodutos, favorecem a ocorrência de potenciais perdas de energia por efeito proximidade. Nos pontos de conexão elétrica aonde um sistema fornece energia para um considerável número de cargas operadas através da técnica de modulação por largura de pulsos (PWM) ou quaisquer cargas CA não-lineares, em correntes de carga elevadas e freqüências maiores que as da rede, as perdas por efeito *skin* combinam-se com as perdas por efeito proximidade tornando a RCA em serviço, substancialmente mais alta do que a RCC.

Assim, apenas metodologias apropriadas para a determinação das perdas de energia podem indicar as plataformas sobre quais decisões podem ser tomadas para eliminar ou reduzir, tanto a corrente e perdas em freqüência industrial quanto as correntes e perdas em freqüências harmônicas, ou ambas, num estudo de otimização do consumo e do desperdício da energia elétrica.

4.1.8 Perdas na Distribuição Elétrica em Edifícios Industriais

Em sistemas de distribuição de energia ocorrem diferenças notáveis na relação RCA/RCC dos diversos elementos condutores, especialmente sob condições de carga pesada. Motores,

sistemas de iluminação, condutores, conexões mecânicas, painéis de distribuição, dispositivos de proteção, transformadores, interruptores e todos os circuitos de uso-final experimentam uma variedade de ineficientes aumentos de resistência.

Esses aumentos de resistência elétrica efetiva implicam em sensíveis aumentos das perdas de energia em carga nas instalações elétricas e edifícios industriais, aumentando conseqüentemente, o custo efetivo da energia usada na produção dos serviços de energia.

A identificação e o cálculo da contribuição dos componentes de perdas individuais constitui uma desafiante especialidade em engenharia, requerendo extenso conhecimento e experiência sobre todos os fatores influenciando as eficiências operacionais de cada um desses componentes. O efeito combinado de todas essas perdas é o aquecimento dos materiais, componentes e dispositivos elétricos, limitando-se as disponibilidades de condução e desperdiçando-se energia elétrica. A redução do aquecimento atribuído às perdas de energia é a “moeda” de troca à conservação da energia elétrica nos sistemas de distribuição e edifícios de consumidores industriais.

Os componentes individuais dos sistemas elétricos, entre eles, os condutores elétricos, barramentos, interruptores, disjuntores, sistemas de partida de motores, transformadores, parafusos, porcas, arruelas, tomadas e, sobretudo as diversas cargas propriamente ditas, são responsáveis pelo transporte das correntes demandadas, e como efeito resultante dessa condução, todos eles experimentam radiações de calor.

Através de estudos e intervenções apropriadas é possível reduzirem-se os valores das demandas das correntes que fluem através de todos esses elementos do sistema elétrico. Com isso, as soluções tecnológicas voltadas à conservação de energia podem consistir na redução, para valores previsíveis, da potência absorvida sendo dissipada sob a forma de calor ao longo de todos os pontos de um sistema elétrico consumidor. Denote-se que, atualmente algumas instalações com condutores e circuitos não adequados ou com grande quantidade de equipamentos geradores de harmônicos ainda podem estar emitindo, sob a forma de calor, mais do que 30% da potência total instalada (!). Nesses consumidores, as soluções em conservação de energia podem ser um grande diferencial, a custos efetivos, quanto às despesas totais com a eletricidade.

Entretanto, mesmo em se tratando de instalações novas, com cargas predominantemente lineares e com padrão elétrico aparentemente adequado, a incorporação de tecnologias-solução em conservação de energia, ainda assim, pode proporcionar consideráveis benefícios

associados às utilizações energéticas. Realce-se que, a atividade-chave da previsão de potenciais de conservação de energia elétrica incide, basicamente, na identificação da complexidade do sistema elétrico. Em geral, quanto mais complexo for um determinado sistema elétrico, maiores são os potenciais de conservação de energia latentes, alcançáveis através de metodologias de estudo e soluções compatíveis ao caso.

Quando um estudo em eficiência energética é empreendido, torna-se fundamentalmente importante, buscar-se a combinação realista dos aspectos particulares, determinantes da execução e da operação da instalação elétrica do consumidor, de modo a se projetarem ou se avaliarem os potenciais em conservação de energia, associados às perdas de energia sob a forma de calor, dentro do sistema elétrico.

Portanto, o conjunto das cargas, equipamentos de distribuição, as medições-chave no sistema e nas cargas, além de um sólido conhecimento histórico sobre como todos esses fatores se combinam na composição e determinação da demanda total do sistema, constituem a base das variáveis sobre as quais se modela o problema da conservação de energia em cada consumidor industrial.

Os sistemas elétricos extremamente complexos, antiquados, ou projetados não adequadamente, bem como as instalações elétricas com relativamente elevada proporção de cargas indutivas e/ou equipamentos não-lineares, podem implicar em perdas de calor expressivas. Denota-se assim que os potenciais de conservação de energia, a partir de tecnologias-solução, resultantes da modelagem, formulação e solução do problema do potencial de conservação de energia, devam ter, como pressuposto básico, a identificação e a redução das perdas de energia por aquecimento do sistema elétrico, com base nalgum procedimento inteligente de cancelamento das energias de perdas, reativas e harmônicas.

4.1.9 Qualidade da Energia Elétrica

Uma outra característica, geradora de custos e de desperdícios adicionais nas utilizações da energia elétrica, é a *qualidade da energia elétrica* (QEE). A qualidade da energia elétrica é uma característica agregada contendo vários elementos, tendo cada um, descrição e comportamento próprios.

Os principais componentes da qualidade da energia elétrica, relacionados com o potencial de conservação de energia, são: (i) distorções harmônicas; (ii) quedas de tensão; (iii) surtos e

transitórios de tensão; (iv) variações de frequência; e (v) desequilíbrio de fases. Esses componentes da qualidade da energia elétrica são discutidos a seguir.

4.1.9.1 Perdas por Distorções Harmônicas

Diversos tipos de equipamentos não-lineares têm estado em franca expansão numa parcela considerável das utilizações finais da energia elétrica. Esses equipamentos diferenciam-se bastante das outras classes devido à particularidade da sua demanda, não apenas por corrente reativa, mas também por corrente “distorcida”, geralmente, também denominada “corrente de harmônicos”.

Geralmente os equipamentos mais modernos, em consumidores industriais, são os principais responsáveis por demandas dessas correntes nas redes elétricas das concessionárias de energia elétrica. Frequentemente, muitos equipamentos destinados a reduzir os custos de energia, por seu lado, podem ser causadores, também do aumento da demanda de harmônicos nas instalações. Computadores, fontes de energia ininterrupta (sistemas UPS), sistemas PWM, equipamento de escritório, controladores lógicos programáveis (CLP's), acionamentos CA de frequência variável, acionamentos CA/CC, retificadores, iluminação a arco, aquecimento a arco, aquecimento a indução, todas essas, são cargas contemporâneas determinantes de harmônicos consideráveis.

Considerando que a maior parte da carga elétrica instalada em muitos consumidores é constituída de cargas não-lineares, os custos decorrentes das perdas de energia pelos harmônicos da corrente podem ser bem altos. Em não raras utilizações-finais, parte substancial da conta total de energia elétrica é atribuível, diretamente, à potência harmônica absorvida por essas cargas não-lineares, dissipando-se em calor entre as cargas individuais e os medidores de energia.

Sendo assim, as soluções para este escopo devem considerar a avaliação da quantidade total da corrente harmônica demandada por qualquer circuito e por todo o sistema consumidor. Num circuito/sistema de potência CA típico, a corrente harmônica causa muito mais perdas de energia de efeito joule do que as mesmas perdas correspondentes à corrente ativa ou à corrente reativa. Significa, conseqüentemente, que o cancelamento da corrente harmônica nos circuitos e a sua remoção de toda a instalação elétrica consumidora geram ganhos mais expressivos do que os resultantes do cancelamento, apenas, da corrente reativa. Isto justifica o fato do nível de conservação, *por unidade (p.u)*, associada às soluções baseadas no

cancelamento de harmônicos, poder ser consideravelmente mais alto do que o associado às soluções baseadas no cancelamento da corrente reativa.

Essa possibilidade sugere que os levantamentos de campo, precisos e confiáveis, bases para o provimento de soluções em conservação de energia, na maioria das utilizações-finais da energia elétrica, contendo circuitos com cargas não-lineares, apontem como soluções tecnológicas, à priori, aquelas destinadas ao processamento do cancelamento das correntes harmônicas.

Assinale-se ainda o fato dessas soluções agregarem, adicionalmente, melhorias à qualidade da energia global nas utilizações da energia elétrica do consumidor. Em geral as soluções com esta ênfase visam, basicamente, as utilizações da energia elétrica do segmento industrial. Para tanto, precedendo a incorporação das tecnologias-solução específicas ao problema, exigem-se levantamentos de dados e medições de campo, precisos e confiáveis, de circuitos e cargas, além do seu estudo e análise.

Os benefícios do cancelamento de grande parte das correntes harmônicas veiculam diversos impactos positivos bem além da redução direta dos custos de energia. As soluções ao problema da qualidade de energia, quando implementadas de modo correto, proporcionam melhoras notáveis em praticamente todos os aspectos da interação com a energia elétrica, envolvidos nas operações do consumidor.

Entre essas melhoras, destacam-se: *(i)* o aumento da longevidade e da confiabilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos; *(ii)* o aumento da confiabilidade da operação dos componentes do sistema elétrico, tais como, disjuntores e sensores; *(iii)* a melhoria da operação e o aumento da longevidade dos sistemas de conversão de energia, tais como, unidades de acionamento CA/CC e unidades de acionamento CA de frequência variável; e *(iv)* a melhora da precisão operacional e o aumento da confiabilidade de controladores lógicos programáveis e de outros sistemas de controle. Em geral, todo o equipamento se beneficiará de um fornecimento de energia elétrica mais senoidal e limpa (DHT mínima).

4.1.9.2 Quedas de Tensão

Numa perspectiva da conservação de energia elétrica, as quedas de tensão, com impacto desfavorável neste objetivo, e com efeitos nefastos no desempenho da tecnologia de uso-final, têm sua origem creditada, sobretudo, aos circuitos dos sistemas de transmissão,

distribuição e utilização da energia elétrica e a outros eventos operacionais externos aos terminais de determinada tecnologia de uso-final.

As sinergias nos ganhos de economia de energia, no contexto das quedas de tensão, poderão ser obtidas a partir de ações centradas, principalmente, em cinco domínios: (i) dimensionamento adequado de circuitos elétricos; (ii) especificações e escolhas adequadas de tecnologias dos circuitos e canalizações elétricas; (iii) implantações adequadas das tecnologias elétricas; (iv) operação coordenada e criteriosa das tecnologias elétricas; e (v) gerenciamento adequado dos serviços ancilares associados com as tecnologias de uso-final.

4.1.9.3 Surtos e Transitórios de Tensão

Externamente às instalações elétricas de determinado consumidor, os surtos e transitórios de tensão podem ser gerados por: (i) eventos elétricos intempestivos na rede elétrica interligada; (ii) manobras de capacitores e de linhas, realizadas pelas concessionárias de energia elétrica; e; (iii) partidas e/ou manobras de motores, cargas e equipamentos potentes em consumidores eletricamente próximos.

Internamente, os transitórios e surtos podem ser originados dentro das instalações do consumidor: (i) pelos próprios motores durante os ciclos liga/desliga ou mudanças dos estados de carregamento; (ii) pela iluminação fluorescente e de descarga de alta pressão; (iii) por operações de carga e descarga de equipamentos elétricos; (iv) pela operação dos vários tipos de equipamentos eletro-eletrônicos; e (v) pela operação de capacitores de correção do fator de potência simples.

Não se levando em consideração a participação do sistema elétrico supridor ou fornecedor, que pode ser visto como externo ao lado da demanda, os surtos de tensão têm suas origens, devidas basicamente, às operações de manobra, mudanças de estado e de funcionamento das diferentes cargas de uso-final conectadas nas instalações elétricas consumidoras.

Os transitórios com níveis de tensão elevada, em situações mais favoráveis, terão impactos no encurtamento drástico da vida útil de motores, equipamentos baseados em microprocessadores, componentes semicondutores de estado sólido das fontes de energia chaveadas, capacitores e lâmpadas das instalações consumidoras.

As distorções elétricas causadas por transitórios eletromagnéticos adicionam resistências aparentes aos circuitos elétricos, às chaves de distribuição (disjuntores e chaves

seccionadoras) e transformadores, criando conseqüentemente, cargas térmicas excessivas que, por sua vez, são adicionadas também aos custos da energia elétrica e da manutenção dos dispositivos e equipamentos.

Como fontes de perdas da energia elétrica, a redução ou a eliminação dos surtos e transitórios de tensão e, conseqüentemente, de seus impactos adversos na produção dos serviços de energia, podem ser obtidos, fundamentalmente, através de: (i) implementação de operações de manobra de cargas potentes, observando-se aos critérios de coordenação e simultaneidade, sobretudo em manobras de partida e de desligamento dessas cargas; e (ii) implementação de mudanças dos estados de carregamentos, observando-se a critérios de controle e regulação da dissipação das energias dos campos magnéticos e elétricos associados, sobretudo, às cargas com funcionamento baseado ou acompanhado de predominância de histereses capacitivas ou indutivas. De modo a se alcançar este último objetivo é particularmente importante que sejam usadas tecnologias de usos-finais melhoradas e as tecnologias ancilares de controle e regulação desses fenômenos.

A avaliação do potencial de conservação de energia, considerando esta fonte de custo, pode envolver a contribuição de tecnologias-solução ao problema dos surtos e transitórios de tensão, do tipo supressores de surtos de tensão e de tensões transitórias para sistemas de distribuição de energia elétrica.

4.1.9.4 Variações da Freqüência

Como fontes de custos adicionais, as oscilações indesejadas da freqüência alteram os valores, tanto dos parâmetros reativos (reatâncias indutiva e capacitiva) dos componentes físicos quanto dos componentes de comportamento (conjugado, potência e velocidade), sobretudo de motores CA dos acionamentos elétricos.

Como conseqüências das alterações induzidas em parâmetros reativos podem ocorrer reações no desempenho de motores, com impactos diretos nas suas grandezas de potência, torque e corrente elétrica. Em decorrência dos impactos nessas grandezas, em geral incrementam-se, praticamente, todos os tipos de perdas nos circuitos e nas cargas. Além desse custo vinculado à própria energia elétrica, como insumo, uma extensão adicional de custo associado é aquele que, simultaneamente, resulta do provável incremento das manutenções e da redução da vida útil dos dispositivos e equipamentos sujeitos a essas variações.

A minimização ou eliminação de custos originados por variações da frequência pode ser conseguida por um suprimento/fornecimento ao consumidor, com a concessionária maximizando os índices de atendimento ou, nos casos aplicáveis, por um auto-atendimento cuja geração e usos também maximizem os índices de qualidade da energia autoproduzida, especificamente, no que se refere aos níveis restritivos de variabilidade da frequência da tensão (RESOLUÇÃO DA ANEEL, 2000 *apud* DIAS, 2002).

4.1.9.5 Desequilíbrio de Fases

Os desequilíbrios de fases resultam de uma distribuição não equilibrada dos níveis de carregamento elétrico dos circuitos das diferentes fases de um sistema trifásico consumidor. Como fontes de custos da energia elétrica, os desbalanços entre fases podem causar o surgimento de efeitos elétricos sob a forma de subsistemas de seqüências inversa e nula, relativamente aos subsistemas de seqüência direta, dependendo das especificidades do tipo de conexão e do estado do neutro do sistema elétrico.

O subsistema de seqüência inversa impõe ao sistema elétrico seus correspondentes componentes de tensão, corrente, impedâncias e potências, produzindo os seguintes efeitos: (i) aumento das perdas de energia, devido à sobrecarga inútil dos circuitos elétricos, reduzindo-se por isso, a sua capacidade de carga; (ii) aumento das perdas de energia, devido à sobrecarga inútil dos diversos equipamentos e dispositivos, reduzindo-se por isso, a sua eficiência operacional; (iii) baixo desempenho da operação eletromecânica e aumento do aquecimento dos acionamentos elétricos, com a conseqüente redução da vida útil dos seus componentes.

Além dos inconvenientes citados, dependendo das particularidades das conexões trifásicas do sistema em relação ao neutro do sistema, podem ocorrer correntes elevadas no neutro, que além de implicarem, apenas, em perdas de energia elétrica, podem ocasionar operações intempestivas dos sistemas de controle e proteção inerentes, reduzindo-se a confiabilidade da operação.

Diante desses problemas, tecnologias industriais eficientes, projetos elétricos e operações eficientes das instalações e equipamentos de produção dos serviços energéticos industriais, podem proporcionar a redução ou eliminação dos desequilíbrios de fases e de seus impactos negativos sobre a demanda de energia, a longevidade e o desempenho das tecnologias de produção.

4.2 CUSTOS DAS EXTERNALIDADES

O modelo prevalecente no setor elétrico, em quaisquer de seus segmentos – geração (G), transmissão (T), distribuição (D) e utilização (Ut) – tem atribuído, relativamente, pouca atenção aos *custos das externalidades* associadas à oferta e utilização da energia elétrica. Não obstante aos diversos eventos ocorridos, tanto em inúmeros países e regiões quanto em várias grandes concessionárias de energia elétrica, ambos com impactos desfavoráveis sobre os consumidores de energia, ainda assim, continua-se observando a persistência pela manutenção desse modelo ou a relutância, manifestada sob as mais variadas formas, à transformação efetiva desse modelo para um modelo industrial ajustado aos requisitos do desenvolvimento sustentável.

Entre tantos outros, os eventos-testemunho que ajudam a relevar a insustentabilidade dos custos das externalidades, apenas para citar alguns, destacam-se (WWI, 2003; GEO BRASIL 2002, 2002; BROWN, 2003): (1) Acidente de Three Mile Island, EUA, 1979, no segmento de geração da energia elétrica; (2) Acidente de Chernobyl, Ucrânia, ex-URSS, 1986, no segmento de geração da energia elétrica; (3) Acidente na Plataforma P-36, Brasil, 2001, no segmento de extração da energia primária; (4) Racionamento de energia elétrica, Brasil, 2001, no conjunto integrado dos segmentos G, T, D, Ut; (5) O impacto ambiental e social do mega projeto da usina Três Gargantas, China, no segmento de geração da energia elétrica; (6) A degradação histórica do *habitat*, por carboníferas, Índia, no segmento de extração da energia primária; (7) A degradação histórica do *habitat*, por carboníferas, África do Sul, no segmento de extração da energia primária; (8) Derrame de petróleo bruto pelo petroleiro Katina - P, canal de Moçambique, Oceano Índico, 1982, no segmento do transporte da energia primária; (9) Os deslocamentos de populações e a ruptura do patrimônio sócio-cultural, decorrentes de grandes reservatórios de usinas hidrelétricas, nos segmentos de geração da energia elétrica, em vários lugares do mundo; (10) A indisponibilidade forçada à prática agropecuária de populações, privando-as de sua atividade base e fonte de sustento, nos segmentos de transmissão da energia elétrica, em vários lugares do mundo; (11) A elevação da temperatura média, o degelo de massas polares e a elevação do nível médio dos mares, devidos às elevadas intensidades energéticas, nos vários segmentos, com a conseqüente exposição da humanidade ao risco global; (12) O efeito estufa, devido aos gases liberados nos segmentos da geração e das utilizações da energia elétrica, sem limites de fronteiras, com a exposição da humanidade ao risco global; (13) Chuva ácida, por poluentes

liberados nos segmentos da geração e utilização da energia, impedindo-se parcelas significativas da produção de alimentos, já escassos, para vários lugares e populações; e (14) Poluição atmosférica, por componentes sólidos e gasosos, nocivos ao ambiente e ao homem, nos segmentos da geração termelétrica da maioria dos países.

Relacionado com o último evento pode-se admitir, por enquanto, que o Brasil represente uma exceção rara no mundo, resultante da composição da sua matriz energética, predominantemente hidrelétrica. Não obstante, os atuais planos considerando o aumento da participação da geração termelétrica, como solução à dependência de um único tipo de fonte, podem afetar essa situação relativamente tranqüila (o racionamento 2001/2002 é exemplo inesquecível das conseqüências devidas, também, a essa dependência).

Para SWISHER *et al.* (1997) os custos das externalidades em energia elétrica estão vinculados às seguintes classes de impactos: uso do solo, armazenamento de resíduos, resfriamento de usinas termoelétricas, emissões atmosféricas e gases estufa.

Também no mesmo contexto dos custos das externalidades associadas às explorações e utilizações da energia elétrica, já segundo DOS REIS (2003), todas as externalidades da geração termoelétrica causam impactos negativos, podendo ser classificados como:

Efluentes aéreos - os quais têm como componentes: (i) o dióxido de carbono (CO₂); (ii) os óxidos de enxofre (SO); (iii) o material particulado (MP); e (iv) óxidos de nitrogênio (NO_x).

Efluentes líquidos - resultantes de: (i) sistemas de refrigeração; (ii) sistemas de tratamento de água; (iii) purga de caldeiras; e (iv) líquidos para limpeza de equipamentos.

Outros efluentes - classificados como: (i) efluentes sanitários e de drenagem; (ii) efluentes sólidos; e (iii) cinzas.

Especificamente às usinas nucleares, ressalta-se ainda, o fato de que à situação ambiental, embora se apliquem as restrições dos efluentes citados, o problema dos efluentes aéreos é substituído por imperiosos problemas como a segurança e o manejo do lixo atômico.

Nas referências anteriormente citadas, são fornecidas informações detalhadas, relacionadas a desastres e custos associados com as explorações e utilizações da energia elétrica, além de recomendações para a sua mitigação. A questão energética, tanto do ponto de vista dos segmentos da geração quanto da utilização, é considerada como estratégica para se alcançarem reduções efetivas dos custos das externalidades sobre o ecossistema.

Alguns destaques preocupantes, referentes aos impactos classificados são, por exemplo:

(i) pelo uso do solo - em alguns projetos, a área inundada aproxima-se dos impressionantes $10 \text{ m}^2/\text{W}$ (como por exemplo, a represa de Balbina, próxima à Manaus); (ii) pelo armazenamento de resíduos - os grandes volumes de cinzas originados pela combustão do carvão e o resíduo sedimentado dos equipamentos de controle da poluição do ar criam um problema de armazenamento de resíduos, alguns dos quais são radioativos e altamente tóxicos. Assinale-se, que apesar de extensas pesquisas e programas de demonstração, o depósito de lixo radioativo de usinas term nucleares ainda permanece mal resolvido; (iii) pelo resfriamento - o setor de geração da energia elétrica é considerado como o segundo maior consumidor de água, nos EUA, por exemplo, perdendo apenas para a agricultura. Algumas tecnologias de resfriamento, ao descarregarem água aquecida para o ambiente, causam poluição térmica que, por sua vez, pode causar temperaturas mais elevadas, diminuindo o conteúdo de oxigênio dissolvido na água e provocando perigo para a vida aquática em locais já poluídos por outros agentes; (iv) devido às emissões atmosféricas - o cumprimento de regulamentações de controle de poluição atmosférica tem se tornado a maior despesa das companhias elétricas (sobretudo nos EUA), sendo provável que as restrições ambientais venham a ser os itens mais importantes que condicionarão a operação futura de usinas elétricas; (v) pelos gases estufa - a principal fonte de dióxido de carbono (CO_2) é a queima de combustível fóssil, sendo que as geradoras de energia elétrica contribuem com cerca de 1/3 das emissões globais do carbono. Os respectivos coeficientes médios de emissão são: 24 kg de carbono/GJ de energia gerada, em usinas térmicas a carvão; 20 kg de carbono/GJ de energia gerada, em usinas térmicas a óleo; e 14 kg de carbono/GJ de energia gerada, em usinas térmicas a gás natural.

Os problemas associados aos custos das externalidades deveriam ser resumidos no seguinte: sendo que, associados com a energia elétrica e suas tecnologias (qualquer que seja o segmento), registram-se custos e impactos danosos sobre a pessoa humana, o meio ambiente e o ecossistema em geral, os motivos e os setores que os causam devem prevê-los, equacionando-os em seus modelos, sem perda de sua competitividade no desempenho de suas atribuições.

Outro aspecto fundamental que precisa ser bem internalizado por todos os agentes - governos, concessionárias, consumidores, investidores governamentais e privados, agências reguladoras, estudiosos e pesquisadores - é, basicamente, o seguinte: o enquadramento

apropriado dos custos das externalidades em energia elétrica não significa abrir-se mão dos serviços de energia, que afinal têm sido a chave do desenvolvimento humano, que gradativa e historicamente, tem sido conquistado; pelo contrário, significa sim, que a inteligência humana evoluída, alcançada também com a ajuda desses serviços de energia, deve-se recolocar ao serviço de um novo equacionamento inteligente da cadeia desses serviços. Para tanto, se devem efetivar os mecanismos da convivência de uma sociedade econômica e ecológica, para a qual, baixos níveis de intensidades energéticas são um condicionalismo imperativo.

Os custos das externalidades, especialmente em energia elétrica, aparte as discussões sobre a sustentabilidade nos diversos foros do conhecimento e do saber humano, no âmbito dos modelos de engenharia devem ser estabelecidos entendimentos passíveis de incorporação analítica, baseados no seguinte: as intensidades de energia (IE) estão muito altas e bem acima dos níveis requeridos. Este é o problema fundamental. O interessante, ainda, é a constatação de que essas elevadas intensidades energéticas, presentes em quase todos os elos da cadeia energética, são sim, passíveis de igualmente elevadas diminuições sem, com isso, se afetarem as atividades finais – os serviços de energia.

Associado com os custos das externalidades em energia elétrica, o mundo pode, por exemplo, se beneficiar das experiências da Alemanha que deram bons resultados. Nesse país os esforços em pesquisa e desenvolvimento sobre alternativas energéticas, que despontaram na década de 70, vinham fracassando devido à vários motivos. Todavia, a situação mudou com o acidente da usina de Chernobyl, levantando a opinião pública fortemente contra a energia nuclear e começando uma forte busca por alternativas. Pela primeira vez, o país começava a questionar seu sistema de suprimento de energia. Dois anos depois, a crescente conscientização sobre a mudança climática, refletida pelos aumentos recordes de temperatura e acúmulo de comprovação científica sobre o aquecimento induzido pela atividade humana, acentuou a preocupação da sociedade. Em 1990 foi elaborado, para a nação, um estudo sobre a proteção ao clima da terra, com o objetivo de se desenvolverem novas estratégias para um futuro energético menos arriscado (significando redução da energia nuclear) e menos energia intensiva, sobretudo em carbono. Ainda no final de 1990, em resposta à crescente pressão popular, o governo promulgou uma nova lei energética que obrigava as concessionárias a adquirirem a energia gerada através de todas as tecnologias renováveis em sua área de abastecimento, pagando-se um preço mínimo (no mínimo 90% do preço no varejo, no caso da

energia eólica e solar). Essa lei – conhecida como Lei de Ligação à Rede (LLR) – proporcionou acesso justo e tarifação padronizada para novos recursos renováveis. Esses eventos representaram um rompimento dramático com a regulamentação outrora antiga, pois permitiu a produtores privados venderem sua eletricidade gerada de fontes renováveis às concessionárias a um preço competitivo, impedindo que estas continuassem a obstaculizar o desenvolvimento (SAWIN, 2003).

Assinale-se que a legislação alemã foi inspirada, em parte, por políticas semelhantes bem sucedidas na Dinamarca. Entretanto, existem diversas lições de políticas pelo mundo afora e que têm em comum, esforços pela busca de alternativas energéticas sustentáveis, tanto pelo lado da oferta quanto pelo lado da demanda.

Durante o empenho nessas mudanças, constatava-se que os principais obstáculos que, geralmente vinham impedindo as novas fontes renováveis e as novas tecnologias emergentes de eficiência energética, de impactarem sobre uma parcela significativa de energia em grande parte do mundo, apesar das tremendas vantagens e potenciais dessas opções, seriam: (i) Falta de acesso à rede; (ii) Alto custo das tecnologias; (iii) Falta de informação; e (iv) Políticas governamentais tendenciosas, inadequadas e inconsistentes.

Assim, o sucesso poderia resultar através da implantação de uma variedade de políticas para lidar com todas essas barreiras. Para tanto, destacaram-se cinco categorias básicas de políticas relevantes (SAWIN, 2003): (i) Regulamentos regendo o acesso da capacidade à rede e obrigações de concessionárias; (ii) Incentivos financeiros; (iii) Disseminação de educação e informação; (iv) Envolvimento de *stackholders*; e (v) Normas e licenças industriais.

Os custos das externalidades em energia elétrica podem ser discretizados, tendo em vista contemplar setores e atividades afins. Neste trabalho, os custos das externalidades são agregados em dois grandes grupos, nomeadamente, os custos sociais e os custos ambientais, os quais são abordados nas seções a seguir.

4.2.1 Custos Sociais

Conforme visto na seção anterior, parte significativa dos eventos indesejados, associados aos custos das externalidades, têm incidência de ordem social. Assim, a parcela de custos das externalidades decorrentes da produção dos serviços de energia elétrica, alocada para pagamento pela sociedade, como um todo, e que resulta dos encargos de incidência social

percebidos por essa sociedade, através dos mecanismos do exercício do serviço público, pode ser um caminho para equacionar e quantificar o problema desses custos. Partindo-se deste entendimento, percebe-se que os custos sociais, por sua natureza, incidência e institucionalização a mando de alguma expressão do exercício público, apresentam as seguintes propriedades: (i) não são de fácil incorporação nas estruturas de custos dos diversos agentes; (ii) a incidência dos custos sociais nos agentes não conforma sobre eles a característica de equidade em relação aos seus responsáveis; e (iii) a determinação do seu valor e rateio estará, ainda, longe de refletir o verdadeiro valor dos impactos sociais gerados.

A discussão sobre os custos sociais em energia elétrica configura-se concordante com a nova e moderna visão sobre o vínculo entre a economia e a ecologia (econologia, conforme (BROWN, 2003) que tem, entre outras variáveis, a estabilidade populacional como uma de suas características-chave. Entre seus mecanismos, por exemplo, privilegiam-se investimentos na educação e em fontes de energias renováveis e descentralizadas, em contraposição aos investimentos em gigantescas concessionárias de energia elétrica. A competitividade desses investimentos é constatada por uma pesquisa do Banco Mundial, que revela, que o investimento na educação, particularmente de mulheres jovens, gera um retorno econômico quatro vezes maior do que o investimento em concessionárias elétricas (BROWN, 2003). Constata-se ainda, de acordo com esse pensamento, que nas últimas décadas, cerca de 31 países europeus e o Japão estabilizaram suas populações, minimizando custos sociais sob observância também deste mecanismo (BROWN, 2003). Pode-se depreender a existência de elos entre o desenvolvimento do setor de energia e o desenvolvimento social, mesmo que este seja abordado sob o ponto de vista dos custos das externalidades. Em outras palavras, as alternativas energéticas, quer sejam vistas pelo lado da geração como pelo lado da utilização, também são opções potenciais e de custo efetivo para a postergação de grandes empreendimentos de oferta da energia ajudando, através dessa sinalização, a diminuir os custos sociais, melhorar a sociedade e proporcionar energia elétrica oportuna, duradoura e confiável.

As externalidades sociais em energia elétrica, ao serem abordadas numa perspectiva de alternativas energéticas à oferta convencional, tanto pelo lado da oferta quanto pelo lado da demanda, ganham mais importância pelo fato de endossarem, simultaneamente, as discussões sobre os custos e os benefícios associados. Nesse propósito, significa dizer, que na busca da eficiência energética e de outras formas de redução das intensidades energéticas,

assegurando-se a disponibilidade de energia, no contexto das soluções potenciais, alternativas à oferta convencional, as externalidades sociais dessas soluções geram mais benefícios do que custos.

Conforme assinala SAWIN (2003), seus custos sociais, ambientais e à saúde são substancialmente menores do que os da energia e da tecnologia convencional. Além disso, o consumo limpo e a oferta limpa da energia elétrica, ambas características de soluções típicas em eficiência energética, não se referem apenas à energia e ao meio ambiente, mas também à indústria e ao emprego. Vejamos, a título de exemplo, alguns fatos ocorridos internacionalmente e constatações relevantes sobre benefícios decorrentes da redução das externalidades energéticas com forte impacto social, através das utilizações limpas da energia elétrica (SAWIN, 2003; WWI, 2003).

Na Península *Kintyre de Argyll*, na Escócia, em 2002, as fontes tradicionais de emprego, outrora prósperas (pesca, produção de uísque e indústria têxtil), estavam em declínio, porém a nova energia passou a revitalizar a economia regional, gerando eletricidade suficiente para a sua demanda e proporcionando emprego à população local. As explorações e utilizações da energia limpa vêm proporcionando mais empregos por unidade de capacidade ou produção, ou por dólar gasto, do que as energias e tecnologias convencionais. Estimulam as economias locais ao atrair investimentos e receitas e criam empregos não só locais como também os induzem em outros países.

Na Espanha, dificuldades econômicas e altas taxas de desemprego, em 1994, influenciaram a decisão desse país em investir em alternativas energéticas, sobretudo em tecnologias renováveis. Associados com essas alternativas, muitos dos empregos são de alta tecnologia e de altos salários, requerendo uma variedade de especializações, freqüentemente em regiões rurais ou economicamente combalidas.

Na Alemanha, a indústria eólica criou 40 mil empregos, em comparação aos 38 mil criados com a energia nuclear (a indústria eólica gera 30% da energia elétrica em algumas regiões da Alemanha).

Um estudo recente na Califórnia concluiu que um aumento das tecnologias de eficiência energética no estado criaria quatro vezes mais empregos do que a continuação das atividades da indústria de gás natural.

Na China, os custos ambientais e à saúde, decorrentes da poluição atmosférica, devida principalmente à queima de carvão, totalizaram aproximadamente, 7% do PIB de 1995. O Banco Mundial estima ainda, que sob condições normais, esses custos poderão atingir 13% do PIB da China, até 2020.

Nos países em desenvolvimento, onde milhões de pessoas não têm acesso à energia, fontes de energia renováveis e usos eficientes podem fornecer energia elétrica mais barata e rápida do que a ampliação de linhas de transmissão e a construção de novas usinas e, ao mesmo tempo, ajudar o desenvolvimento econômico.

Os serviços de energia, através das mais variadas formas de eficiência energética, podem proporcionar às comunidades, acesso à educação, água limpa, melhor saúde, comunicações e entretenimento. Esses recursos, por sua vez, melhoram a qualidade de vida, elevam os padrões de vida, aumentam a produtividade e reduzem o potencial de instabilidade econômica e política.

Na Mongólia Central, milhares de pessoas dispõem, hoje, pela primeira vez, de acesso à educação, informação e outros benefícios, devido a televisões e rádios ligados a pequenos sistemas eólicos e solares. Em virtude disso, também, os cidadãos tornaram-se mais produtivos tendo aumentado suas rendas familiares mensais em US\$ 150 (a renda média anual *per capita* do país varia de US\$ 120 a US\$ 240).

Os países em desenvolvimento que investirem em eficiência energética, tanto da oferta quanto da utilização, descobrirão que são ricos em energia, que podem dar um salto sobre as tecnologias sujas das quais os países industrializados dependeram anteriormente, e desenvolver suas economias com fontes e usos limpos, substituindo importações dispendiosas e de longo prazo.

O aumento da demanda global de energia elétrica, previsto entre finais de 90 até 2020 (aumento de 60% da energia total, sendo 70% em energia elétrica, a maior parte nos países em desenvolvimento, devido ao crescimento populacional, à urbanização contínua e à expansão econômica e industrial), se tiver que ser atendido através de combustíveis e tecnologias convencionais representará, ainda mais, maior ameaça ao meio ambiente natural, saúde e bem-estar públicos, e a estabilidade internacional.

Após uma década de estudos, pesquisadores nos Estados Unidos e Europa calcularam que os custos ambientais e à saúde, associados à energia convencional, equivalem a entre 1% e 2%

do PIB da União Européia, e que o preço pago pela energia convencional é substancialmente inferior a seus custos totais, mesmo que nesses custos não sejam incluídos os custos da mudança climática (potencialmente a consequência mais dispendiosa).

Em função das múltiplas vantagens das tecnologias de eficiência, a Força Tarefa de Energia Renovável do Grupo de Oito Países Industrializados (G-8) concluiu, em 2001, que “apesar do custo maior que haverá nas primeiras décadas, medido unicamente em termos dos custos refletidos no mercado, a promoção bem sucedida de renováveis e tecnologias emergentes de eficiência energética, até 2030, se mostrará menos dispendiosa do que a adoção de uma abordagem corriqueira, dentro de qualquer faixa realista da taxa de desconto”.

Considerando as relações existentes entre a água, a energia elétrica e o desenvolvimento, afigura-se relevante associar a situação da água, também, nas discussões sobre as externalidades sociais energéticas. Afinal a energia convencional requer imensa quantidade de água doce. A mineração e a perfuração, tipicamente associadas à construção e operação de grandes usinas termo e hidrelétricas, afetam o meio de vida e a própria existência de povos indígenas em todo o mundo.

Um dos mais recentes relatórios da Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura (UNESCO), sobre a situação mundial da água, aponta para cenários com custos sociais (e ambientais) dramáticos em diversos países, cujas origens, em parte, estão relacionadas com alguma forma de desperdício na produção dos serviços de energia industriais.

Alguns dados do citado relatório da UNESCO são listados a seguir (SOUZA, 2003): (i) Um primeiro cenário sobre escassez, abrangendo 2 bilhões de pessoas sem água em 48 países; (ii) Um segundo cenário sobre escassez, mais pessimista, abrangendo 7 bilhões sem água em 60 nações. Em 2050, a população mundial estimada será de 9,3 bilhões de pessoas; (iii) O nordeste brasileiro é mencionado nas duas projeções, embora o país possua 12% das reservas de água doce do planeta. Nessa região o sistema de abastecimento não consegue garantir água doce todo dia. Num *ranking* de 180 países sobre a quantidade anual de água disponível *per capita*, o Brasil aparece na 25ª posição - com 48.314 m³. Segundo dados do Ministério das Cidades, 92,7% das residências brasileiras têm rede de água potável. Quanto à rede de esgoto, a situação é oposta, apenas 37,7% dos domicílios estão ligados à rede de coleta; (iv) Em todo o mundo, as mudanças climáticas serão responsáveis por 20% do aumento da falta de água. (v) Nos últimos 25 anos, uma série de conferências internacionais têm tratado da questão da

ampliação da rede de abastecimento e saneamento. Uma das metas assumidas pela comunidade internacional, em 2000, e ratificada em 2002, no denominado Rio + 10, em Johannesburg, é de se reduzir à metade a proporção de pessoas, no mundo, que não têm água potável e saneamento básico.

Esses dados sobre a situação da água, em parte, são reveladores de duas fontes de custos, cujos elementos são mutuamente interdependentes: de um lado, os custos sociais pelos serviços de abastecimento e saneamento e os custos ambientais, parcialmente induzidos pelo *déficit* social, mais os custos gerados por atividades industriais. Ou seja, à poluição decorrente da ausência da compensação dos custos sociais somam-se os dejetos industriais, caracterizando-se uma cadeia que está na base da crise da água.

Ainda, conforme esse relatório da UNESCO, de todas as crises sociais e naturais que os seres humanos podem enfrentar, a dos recursos hídricos é a que mais afeta a nossa própria sobrevivência e a do planeta. O aprofundamento do problema da crise de água conduz à identificação de relações intrínsecas com o problema do consumo de energia.

Associado com a mitigação dessa problemática, as agências fiscalizadoras e reguladoras afins têm se alinhado com o compromisso de se adotarem políticas e procedimentos que ajudem a minorar os danos derivados das utilizações de recursos considerados, também, como serviço essencial, como a água e a energia elétrica. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por exemplo, no cumprimento de suas atribuições, dá respaldo ao cumprimento, por parte das concessionárias de energia elétrica brasileiras, de um plano nacional de universalização dos serviços de energia elétrica (LEI N° 10.438, 2002).

A materialização dessa universalização e os elevados custos de implantação envolvidos sinalizam para a importância que é atribuída, pela sociedade, ao ônus social da energia elétrica, bem como ao papel do sistema elétrico como mecanismo de inclusão social e de integração nacional. A Agência Nacional de Águas (ANA) dá respaldo, também, à implementação de modalidades do gerenciamento integrado dos recursos hídricos, que entre seus mecanismos, incluem-se os comitês de bacia e o pagamento de taxas pelos usuários da água, para a produção dos serviços energéticos, entre eles as usinas termelétricas (LEI N° 9.433, 1997). Conforme endossado pela ANA, “a experiência em outros países mostra que, em bacias que utilizam a cobrança, os indivíduos e firmas poluidores reagem internalizando custos associados à poluição ou outro uso da água. A cobrança pelo uso de recursos hídricos, mais do que instrumento para gerar receita, é indutora de mudanças pela economia da água,

pela redução de perdas, pela gestão com justiça ambiental. Isso porque se cobra de quem usa ou polui” (ANA, 2003).

4.2.2 Custos Ambientais

Através da discussão na seção inicial deste capítulo - custos das externalidades - ficou evidente que parte significativa dos eventos associados à esses custos tem incidência de ordem ambiental.

Do mesmo modo que os custos sociais, a parcela dos custos das externalidades decorrentes da produção dos serviços de energia elétrica, alocada para pagamento pela sociedade como um todo, e que resulta dos encargos de incidência ambiental percebidos por essa sociedade, através dos mecanismos do exercício do serviço público, pode ser um caminho para equacionar e quantificar o problema dos custos ambientais em energia elétrica. Partindo-se deste entendimento percebe-se também, que os custos ambientais, assim como os custos sociais, em virtude de sua natureza, incidência e institucionalização, apresentam como propriedades: *(i)* não ser simples a sua incorporação nas estruturas de custos dos diversos agentes; *(ii)* a incidência dos custos ambientais nos agentes não conforma sobre eles a característica de equidade em relação aos seus responsáveis; e *(iii)* a determinação do seu valor e rateio ainda estarão longe de refletir o verdadeiro valor dos impactos ambientais realmente gerados.

Uma das principais dificuldades associadas com a inclusão, avaliação ou rateio efetivos, nos serviços de energia ou processos, dos custos ambientais, deve-se à natureza altamente difusa da extensão dos vetores nocivos, induzidos a partir das fontes em que esses vetores são gerados.

Apesar dessas dificuldades, é significativamente notável a sensibilidade dos agentes, especialmente consumidores industriais, em relação à cobrança de encargos a título de compensação de custos por danos ambientais causados sobre a sociedade, pelo exercício de suas atividades particulares. Essa sensibilidade diz respeito ao consenso que vem sendo construído quanto ao significado, papel, abrangência, protagonistas e valores ajustados à natureza e dimensão desse problema.

Considerando os danos à água, como exemplo das externalidades ambientais, a sensibilidade dos agentes em relação à minimização desses custos pode ser percebida a partir da situação

no Brasil, que parece semelhante à de outros países: “a idéia não é absurda...., as empresas já pagam taxas de meio ambiente ao governo federal, por meio do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), e ao governo estadual, via Secretaria Executiva de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (SECTAM), mas é necessário ouvir a sociedade” (ELÉTRICA, 2003).

Conforme referido ao longo da discussão sobre os custos das externalidades sociais, essa constatação também é concordante com a atuação da Agência Nacional de Águas (ANA) ao pautar-se, no âmbito da agenda do gerenciamento dos recursos hídricos, segundo o princípio de que “em função de condições de escassez em quantidade e ou qualidade, a água deixou de ser um bem livre e passou a ter valor econômico. Esse fato contribuiu com a adoção de novo paradigma de gestão desse recurso ambiental, que compreende a utilização de instrumentos regulatórios e econômicos, como a cobrança pelo uso dos recursos hídricos” (ANA, 2003).

Nesse sentido desempenham papel particularmente importante os órgãos reguladores e fiscalizadores, cuja ação se deve pautar pela busca do equilíbrio entre os interesses das organizações particulares e os interesses da sociedade. Assim, entende-se que os procedimentos das agências reguladoras e fiscalizadoras de recursos essenciais e públicos, susceptíveis a danos por atividades tecnológicas, visem buscar a partilha e a transferência, também para a sociedade, dos benefícios e custos associados às explorações desses recursos.

BROWN (2003), presidente do “Worldwatch Institute” (WWI) e do “Earth Policy Institute” (EPI), na sua mais recente obra “Eco-Economy: Building an Economy for the Earth”, é categórico quanto à posição das variáveis que devem nortear os rumos de uma nova e compatível economia. A esse respeito, ele afirma que “a economia global está fora de sincronia com o ecossistema da terra, como evidenciam os pesqueiros em colapso, as florestas em decadência, os desertos em expansão, os solos em erosão e os lençóis freáticos em exaustão. Isto também pode ser observado na mudança do clima global, à medida que as temperaturas em elevação causam mais tempestades destrutivas, derretimento de geleiras e aumento do nível oceânico”.

Frente aos impactos adversos constatados são visivelmente notáveis as dificuldades de alocar estes custos, de forma quantificada, aos legítimos protagonistas que os causam. Advém disso, em parte, a figura do conceito alternativo conhecido como custo total ou global contrabalançado com o correspondente benefício total ou global, ou seja, uma avaliação de custo/benefício que tenha como protagonista a sociedade como um todo.

Apesar das dificuldades para internalizar os valores dos custos das diferentes formas de degradação ambiental na produção dos serviços de energia, algumas propostas, nesse sentido, têm sido adiantadas. Entre elas fazem parte os métodos dos coeficientes dos fatores de emissão diretos e indiretos, incorporados em pacotes de modelos de contabilidade ambiental, como o “Environmental Data Base” (STOCKHOLM ENVIRONMENT INSTITUTE, 1993 *apud* SWISHER *et al.*, 1997). Basicamente, os coeficientes dos fatores de emissão compõem uma base de dados, que multiplicados pelas quantidades de energia suprida, a partir das diferentes fontes de energia, resultam nas emissões totais para cenários de metodologias PIR. Geralmente as emissões diretas das usinas termelétricas representam a principal preocupação, mas é também possível contabilizar os efeitos indiretos, como as emissões produzidas em toda a cadeia energética, incluindo-se a utilização, por consumidores, da energia elétrica produzida a partir de diferentes fontes primárias.

Outra metodologia, visando o mesmo objetivo da contabilização dos custos ambientais, é citada por DOS REIS (2003). Nessa metodologia a energia elétrica gerada, em função da fonte primária que a origina, corresponde um escore de impacto ponderado e normalizado, o qual é determinado a partir do tipo de poluente emitido (CO₂, NO_x, SO_x, etc.) e da natureza do alvo degradado (ar, solo, água, etc.).

TOLMASQUIM *et al.* (2002) também propõem diversas metodologias para a valoração de danos ambientais e sociais causados pelo setor elétrico. Considerando, principalmente projetos de geração hidrelétricos, termelétricos e hidrotérmicos, eles fazem propostas analíticas para o setor elétrico valorar os danos ao ambiente e à sociedade na elaboração desses projetos. Basicamente, as metodologias permitem estimar, em valores monetários, os danos causados, como funções de características como população, biodiversidade, fauna, localização e tipo de empreendimento.

Através de um modelo de apoio à decisão, baseado em análise multicritério, SICA (2003) propõe uma metodologia para a internalização e mensuração de variáveis qualitativas de cunho social, político, ambiental e econômico. É uma proposta orientada no sentido de compensar falhas de regulamentação, conduta e desempenho do sistema de mercado de energia, incluindo-se empreendimentos no setor elétrico.

Em geral, como mecanismos estratégicos, os custos das externalidades associadas às utilizações da energia elétrica podem ser mitigados por uma atuação centrada, basicamente, nas seguintes duas opções:

1. *O desenvolvimento da eficiência energética e de outros mecanismos de conservação de energia nos diversos segmentos estruturais do setor energético existentes.* Nesta opção incluem-se todas as ações de identificação e implementação de reduções e eliminações das diversas fontes de perdas, postergando-se assim, e a custos efetivos, os investimentos geralmente elevadíssimos, demandados pelas metodologias convencionais da oferta de energia elétrica. Observe-se, que uma atuação neste sentido também é concordante com os requisitos dos diversos modelos de planejamento do setor elétrico destacando-se, entretanto, como mérito, o fato de estarem sendo incorporados, de forma reestruturada, os sistemas fiscais na composição dos custos no mercado da oferta de energia elétrica. Como refere BROWN (2003), a chave para a estruturação da economia é a reestruturação do sistema fiscal, para forçar o mercado a falar a verdade ecológica. Concomitantemente, cita “Øystein” Dahle, ex-vice presidente da “Exxon” para a Noruega e Mar do Norte, atual presidente do conselho de administração do “Worldwatch Institute”, ao afirmar que o socialismo desmoronou porque não permitiu que os preços revelassem a verdade econômica e que o capitalismo poderá desmoronar porque não permite que os preços revelem a verdade ecológica.

2. *O incremento, continuamente mais agressivo, do desenvolvimento das fontes de energia renováveis, reutilizáveis e limpas.* A atuação segundo esta opção também se alinha com os modelos dos diversos planejamentos do setor eletro-energético, veiculando como destaque, a reestruturação da composição da matriz energética, aumentando a participação efetiva das fontes energéticas com viabilidade econômica e ecológica. Com efeito, ao observarmos as taxas de crescimento, nos últimos anos, destas novas fontes de energia, somos levados a concluir que o setor eletro-energético vive um período de: (i) substituição de modelos de oferta baseados em fontes de energia fósseis, extensamente difundidos; (ii) transição por modelos de oferta baseados em fontes de energia fósseis, porém menos poluentes; e (iii) preparação para, finalmente, a adoção de modelos de oferta baseados em fontes limpas.

A grande importância da necessidade da incorporação dos custos das externalidades nos modelos de avaliação da energia elétrica, em todos os segmentos, desde a geração à utilização, pode ser percebida também a partir dos dados da Tabela 3, que fornece os custos da eletricidade, com e sem as externalidades, em função das, ainda principais, fontes de energia primárias.

Fonte de Energia Primária	Custos de Geração¹ (centavos de dólar por kWh)	Custos Externos² (centavos de dólar por kWh)	Custos Totais (centavos de dólar por kWh)
CARVÃO/LIGNITA	4,3 – 4,8	2,0 – 15,0	6,3 – 19,8
GÁS NATURAL (NOVO)	3,4 – 5,0	1,0 – 4,0	4,4 – 9,0
NUCLEAR	10 – 14	0,2 – 0,7	10,2 – 14,7
BIOMASSA	7,0 – 9,0	1,0 – 3,0	8,0 – 12,0
HIDRÁULICA	2,4 – 7,7	0 – 1,0	2,4 – 8,7
FOTOVOLTÁICA	25,0 – 50,0	0,6	25,6 – 50,6
EÓLICA	4,0 – 6,0	0,05 – 0,25	4,05 – 6,25

¹ Para Estados Unidos e Europa. ² Custos ambientais e à saúde em 15 países da Europa.

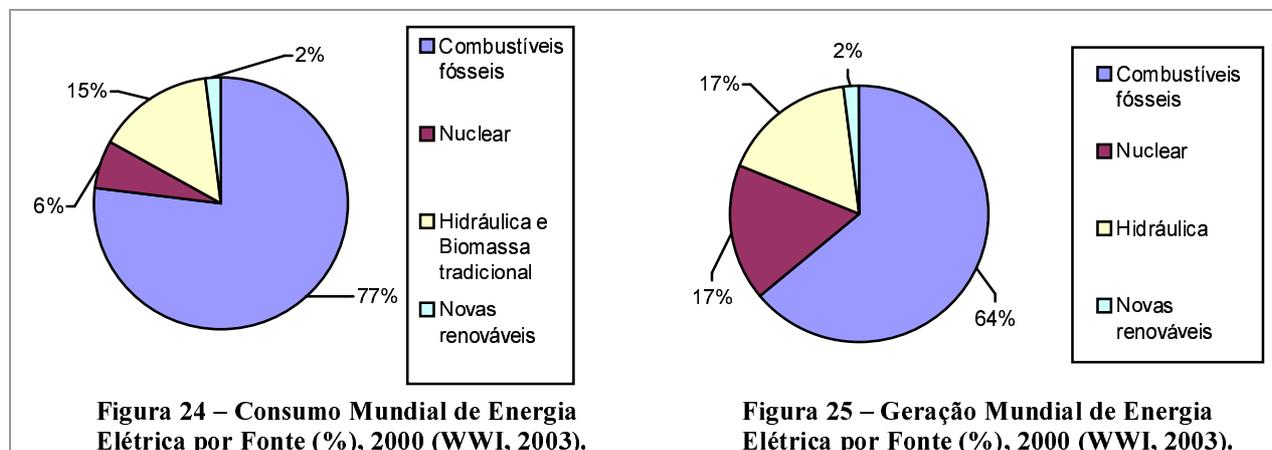
Tabela 3 – Custos da Energia Elétrica, Com e Sem Custos das Externalidades (WU ZONGXIN *et al*, 2001 *apud* SAWIN, 2003 e WWI, 2003).

4.3 ENERGIA ELÉTRICA LIMPA E MITIGAÇÃO DOS CUSTOS DAS EXTERNALIDADES

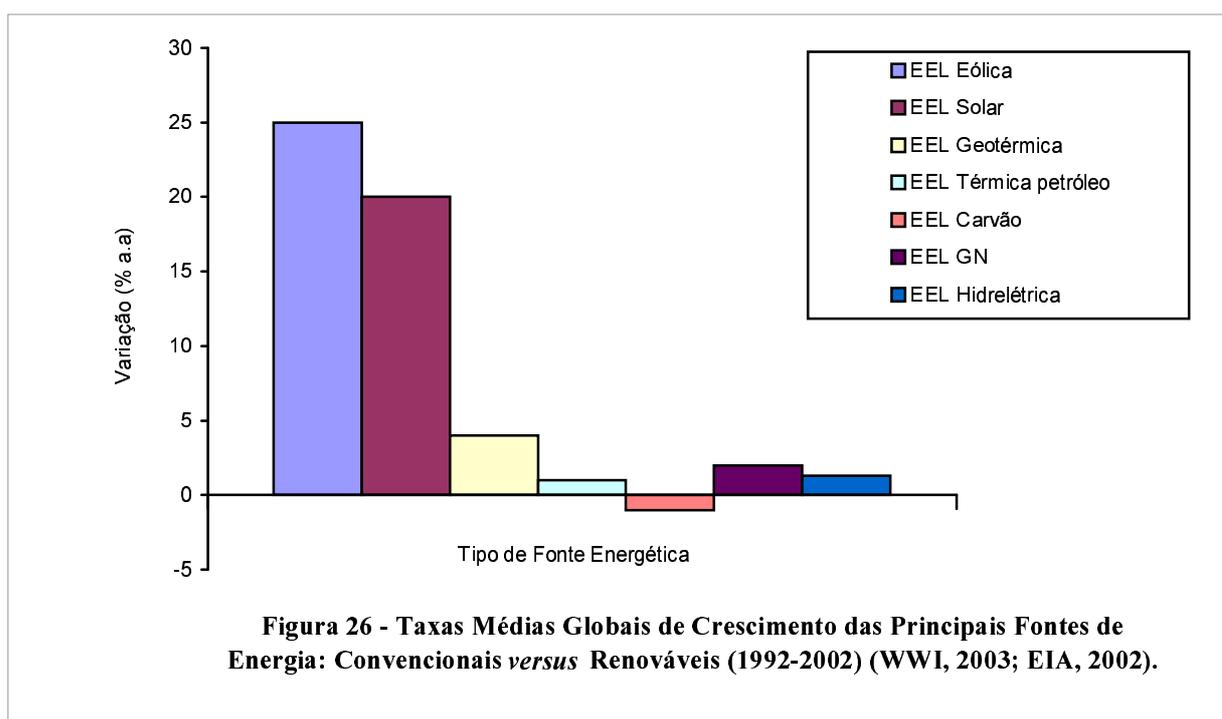
Desde os anos 70 e 80 à atualidade, tanto as tecnologias renováveis de geração quanto as tecnologias emergentes industriais de uso-final, têm melhorado significativamente nos âmbitos das variáveis desempenho operacional e custo. Algumas estão experimentando taxas de crescimento e avanço tecnológico, outrora só comparáveis à indústria eletrônica. Os mercados globais de energia limpa superaram US\$ 10 bilhões em 2001, e deverão ultrapassar US\$ 82 bilhões, até 2010, com grandes corporações entrando nesse mercado. Embora o custo de algumas tecnologias ainda seja motivo de preocupação, está se reduzindo rapidamente devido aos avanços tecnológicos, experiência, automação industrial e economias de escala através do aumento do volume de produção (WWI, 2003; SAWIN, 2003).

Considerando-se relativamente pouco, o tempo decorrido desde que se começou a atribuir importância à reformulação dos usos energéticos visando-se um contexto mais limpo e sustentável, pode-se constatar que os dados das Figuras 24 a 26 confirmam a realidade de estarmos vivendo a dinâmica de uma transição energética, a partir de um histórico duradouro

de produção e consumo da energia elétrica, aprisionado às fontes primárias fósseis e nucleares, através de grandes empreendimentos tecnológicos e intensivos em energia.



Os gráficos das Figuras 24 e 25 mostram, respectivamente, a situação do consumo e da oferta da energia elétrica global em função dos tipos de fontes energéticas primárias. Não obstante ainda à baixa participação da energia renovável, tanto na geração quanto na utilização, comparativamente ao potencial possível, com base nas informações dessas figuras, percebe-se o relativamente grande avanço da produção e consumo da energia elétrica de fontes mais limpas, que têm ocorrido nos recentes últimos anos.



Já, a Figura 26 mostra o quão expressivo tem sido, nos recentes últimos anos, o aumento da participação da energia elétrica de fontes mais limpas. Esse aumento na oferta implicará, sobre o lado da demanda, no correspondente aumento do consumo limpo, o que agregará mais valor às utilizações finais limpas, através da redução das intensidades energéticas por via de mecanismos da eficiência energética.

De acordo com o “Relatório do Worldwatch Institute sobre o avanço em direção à uma sociedade sustentável” (WWI, 2003), de 1995 a 2000, a geração mundial de eletricidade eólica quase quadruplicou, uma taxa de crescimento só vista no *boom* da indústria da informática. Esse fato realça a tendência em direção à uma sociedade disposta para uma convivência ambiental e energeticamente limpa, ou seja, uma sociedade que deseja os serviços de energia através da energia elétrica que atenda, simultaneamente, ao equilíbrio sustentável dos requisitos econômicos e ecológicos.

A Tabela 4 ilustra o estado da oferta de energia elétrica a partir de fontes limpas, no caso, a energia eólica. Mostrando o que pode ser o caminho, percebe-se a partir da comparação desses dados, o nível de sucesso dessas fontes e do impacto no sistema de energia elétrica de algumas nações que têm encarado “muito seriamente” o desafio pelo suprimento limpo, econômico e energeticamente sustentável.

País ou Estado	Geração Eólica Atual (%)
Dinamarca	15
Alemanha	3,75
Schleswig-Holstein (norte Alemanha)	19
Espanha	2
Navarra (Espanha)	22
PE, CE, MG, PA, SC (Brasil) ¹ :	0,03

¹ não estão incluídos projetos do PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia.

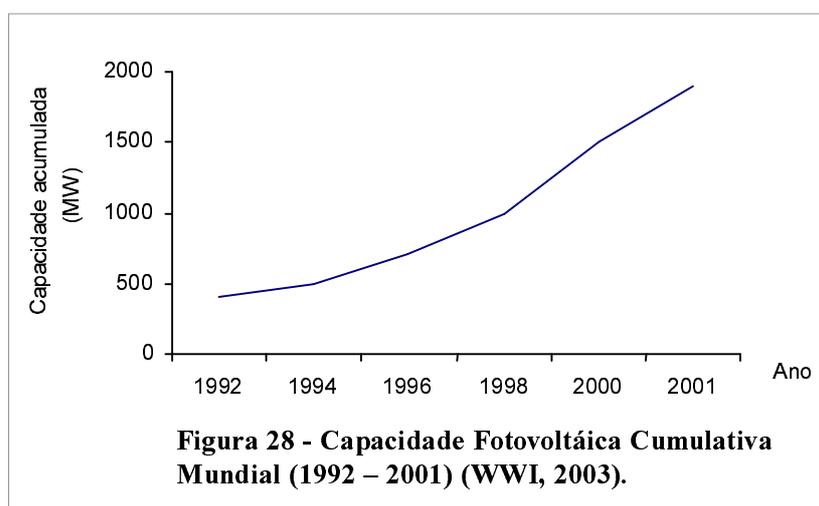
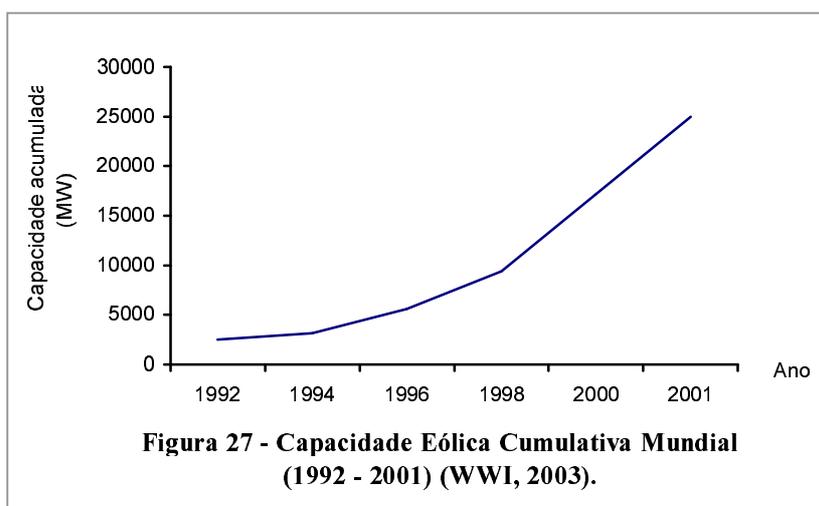
Tabela 4 – Participação Elétrica de Origem Eólica na Matriz Geradora de Regiões Selecionadas (2003) (WWI, 2003; ANEEL, 2003).

Os dados, na Tabela 5 e nas Figuras 27 e 28, são ilustrativos de que o setor elétrico em vários países, já dispõe de indicadores satisfatórios quanto à efetividade das opções da geração renovável para consubstanciar o planejamento da oferta da energia elétrica nacional considerando, entre outras fontes, por enquanto a eólica e a fotovoltaica (por exemplo, a União Européia planeja uma meta de 22% das necessidades européias, através de energias renováveis até 2010).

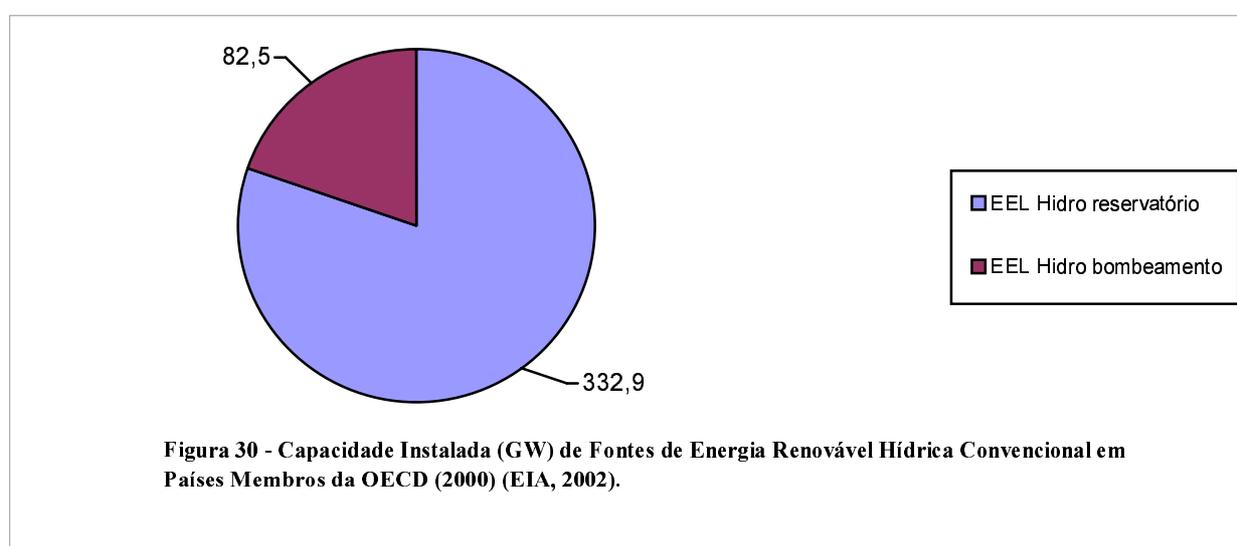
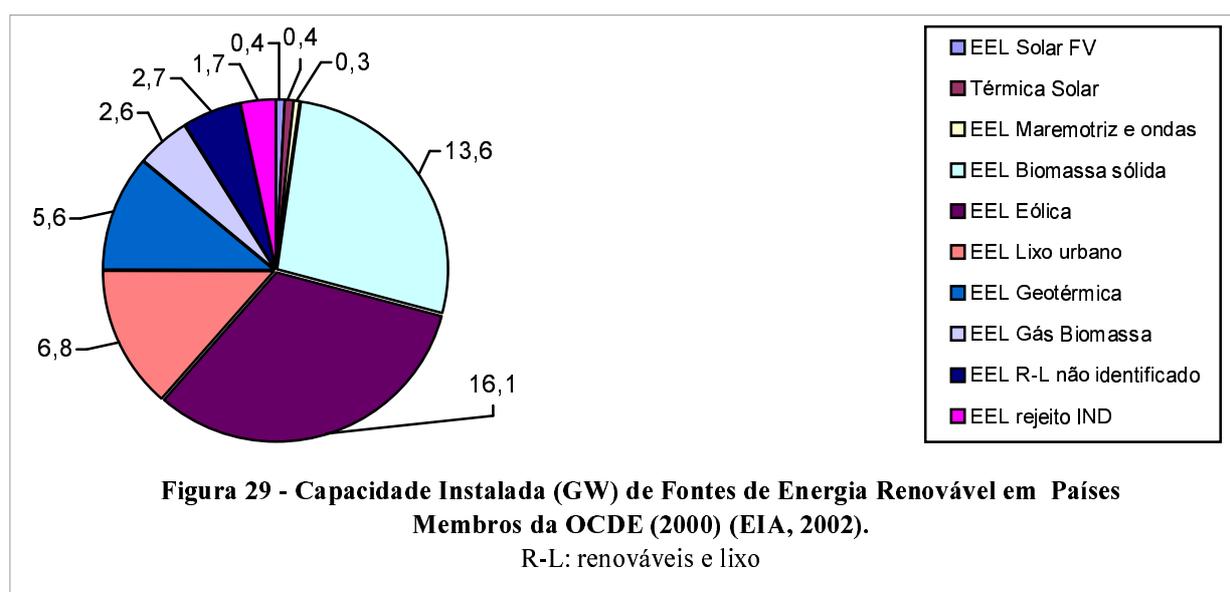
País ou Estado	Geração eólica adicional planejada (MW)	Horizonte
França	+ 5.000 MW	até 2010
Argentina (patagônia)	+ 3.000 MW	até 2010
Reino Unido (Mar do Norte)	+ 1.500 MW	nd
China	+ 2.500 MW	até 2005
União Européia	+ 60.000 MW	até 2010
SC – Laguna (Brasil)	+ 39,6 MW	até 2005

Tabela 5 – Participação Elétrica de Origem Eólica na Matriz Geradora de Alguns Países – Previsão (IEA, 2002; WWI, 2003; ANEEL, 2003).

Globalmente, o que se espera é que as barreiras identificadas, que obstaculizam o desenvolvimento de fontes limpas e de utilizações eficientes da energia elétrica, visando-se a sustentabilidade em energia elétrica, sejam eliminadas, permitindo-se o avanço crescente e ininterrupto da integração de suas diversas opções nos sistemas elétricos nacionais.



Revelando o que pode ser a nova tendência mundial, a Figura 29 mostra a expressiva e rápida evolução, durante a ainda recente última década, da participação dos mais variados tipos de energias renováveis na oferta da energia elétrica em países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Por outro lado, a dimensão da geração renovável através da geração hidrelétrica convencional (grandes hidrelétricas de reservatório e de bombeamento), nos países membros da OCDE, está patente na Figura 30. Esses países, com um passado e tradição energética baseada geralmente em grandes usinas hidrelétricas, termelétricas fósseis, nucleares e usos intensivos, no ano de 2000 sua capacidade elétrica instalada total comportava cerca de 18 – 19% de fontes de energias renováveis (IEA, 2002), o que não deixa de ser reflexo de mudanças em direção à um futuro energético caracterizado de fontes e consumos limpos em energia elétrica.



Abstraem-se dessas soluções em energia e mitigação dos custos das externalidades energéticas, duas sinergias sociais, benéficas e muito importantes, ajustáveis com a lógica das políticas dos governos.

No primeiro impacto inclui-se o contingenciamento de recursos para o consumo não racional de energia e conseqüente efetivação desses recursos para as áreas sociais, tradicionalmente menos assistidas, demandantes de volumosos recursos financeiros e, porém com expressivamente grande importância social. Na segunda sinergia incluem-se, entre outros, particularmente a geração de empregos, sobretudo em fazendas eólicas, os aumentos da renda por *royalties* da geração eólica, a fixação de populações e o aumento da receita fiscal, auxiliando-se a evitar problemas colaterais resultantes dos êxodos populacionais em busca de algum equilíbrio sócio-econômico.

Corroborando com a nova composição econômica e ecológica da capacidade de geração, vários segmentos da indústria (siderurgia, papel e celulose, alimentos e bebidas, etc.) podem tirar proveito do enorme potencial de cogeração, a custos comprovadamente efetivos e com enormes benefícios na nova visão das externalidades. Ressalte-se, em organizações industriais é sabido que o item custos, entre outros, tem sido o preceito básico mais importante, comumente usado em análises para a viabilização das decisões de investimento e operação. Conseqüentemente, a minimização de custos de investimento e operação é um dos processos permanentemente procurados pelas organizações, de modo a que seus produtos e serviços se mantenham competitivos dentro de um ambiente em que prolifera o poder de barganha de outras forças de mercado.

Entretanto, a visão moderna do papel e lucro empresarial faz com que as variáveis sobre as quais devem assentar as estratégias de minimização de custos, sejam aquelas que objetivando máximos rendimentos resultem, simultaneamente, no menor custo incidente sobre o agente social. Então, concordante com este modelo, junto a outros objetivos latentes, as empresas industriais poderão encontrar, em associação com a busca do potencial de energia conservável, uma opção poderosa na maximização de seus rendimentos dentro de um ambiente que considera o lucro social juntamente com o tradicional lucro econômico (SAWIN, 2003; FONSECA, 1999).

Uma discussão competente e detalhada a este respeito, leva à constatação de que a administração empresarial encara, normalmente, com relativa impotência as hipóteses de tornar eficaz a redução de custos através de mecanismos assentes na diminuição de custos com a energia envolvida na produção de serviços planejados. Por sua vez, essa relativa impotência pode ser explicada como sendo devida também, à ineficácia e inconsistência das abordagens normalmente disponibilizadas. Apesar dessas abordagens estarem alcançando grandes e importantes avanços, ainda não podem ser consideradas como cobrindo o nível de diversidade e complexidade acerca dos questionamentos que se colocam sobre os problemas em energia.

Nesse sentido, a investigação de novas abordagens à luz dos novos paradigmas sobre energia, economia e ecologia, objetivando a adoção e a utilização da conservação de energia, da eficiência energética e do gerenciamento do lado da demanda no dia a dia das organizações industriais, ainda continuará sendo oportuna, como requisito primordial do planejamento integrado de recursos. Ademais, a consideração explícita dos custos e benefícios associados, ambientais e sociais, eleva a importância desse tipo de abordagens.

O potencial de conservação de energia só pode ser captado adequadamente, através de métodos de solução que consideram os possíveis contextos em que se inserem as variáveis principais que exprimem as manipulações da eficiência energética e de outros mecanismos de redução da demanda. Esses contextos são designados como *cenários de eficiência energética* ou simplesmente, *cenários de eficiência*. Uma discussão sobre esses cenários é realizada na seqüência.

4.5 CENÁRIOS DE POTENCIAIS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Um cenário eficiente (cenef) pode ser obtido através da implementação de alguma medida nos usos-finais, ou através de um conjunto de melhorias em vários usos-finais e segmentos. Existem vários tipos de cenários eficientes, dos quais, os mais importantes são os *cenários técnicos* (ceneftc), *cenários econômicos* (cenefec) e *cenários de mercado* (cenefmc).

Outros tipos de cenários podem envolver o nível de crescimento dos serviços de energia, as estratégias do lado de oferta ou outros parâmetros. Nas seções seguintes é feita uma discussão sobre os cenários técnico, econômico e mercantil, partindo-se de um cenário base ou cenário congelado (JANNUZZI e SWISHER, 1997; SWISHER *et al.*, 1997).

4.4.5 Potencial de Eficiência Energética Congelada

O cenário de eficiência congelada (cenefcg) pode ser visto como um cenário que caracteriza o provimento dos serviços de energia, considerando que a intensidade energética média para cada atividade não variará depois de um dado período de referência. Um julgamento simples a este respeito, faz-nos constatar que este cenário de eficiência congelada não é plenamente realista. Isso se deve ao fato de que mesmo sem grandes esforços futuros em melhorias na eficiência, as intensidades energéticas geralmente apresentarão algum declínio como resultado, simplesmente, da saída de serviço dos equipamentos velhos e menos eficientes e sua substituição por modelos cada vez mais novos. Conseqüentemente, o uso de energia elétrica com eficiência congelada indica, de modo simplificado, o crescimento dos serviços de energia indexado ao nível presente de serviços e consumo de energia elétrica. Refira-se que o conceito sobre o nível do serviço de energia, para inúmeras atividades, é um assunto complexo. Uma das razões para essa dificuldade está no fato dos serviços de energia poderem ser expressos através de várias e diferentes unidades de medida. Ademais, alguns serviços de energia tais como o cozimento, o entretenimento eletrônico ou as atividades de escritório são de difícil definição numa base totalmente quantitativa. Assim, a indexação destas quantidades ambíguas nas medidas do consumo de energia presente num cenário de eficiência congelada simplifica o problema da construção do cenário.

Num cenário congelado assume-se, geralmente, que as tendências atuais, com respeito à expectativa dos usos da energia e penetração de equipamentos, serão mantidas sem nenhuma política de mudanças. É importante notar que em países onde o PIR ainda não é prática corriqueira, este tipo de cenário coincide com o das previsões oficiais. Assim, uma grande incoerência e desvantagem na utilização de uma previsão oficial como cenário de referência é de que ele não possa fornecer detalhes suficientes para o desenvolvimento da segmentação dos usos-finais ou para a determinação das eficiências de uso-final.

Uma abordagem ainda mais simplificada, para estabelecer um cenário base de uso-final, é aquela que considera um *cenário de eficiência congelada estática*. Em um tal cenário, a intensidade energética (IE) é mantida constante ao longo das análises, desde o período de referência até o horizonte em estudo. Porém, uma abordagem levemente mais complexa, conhecida como *cenário de eficiência congelada dinâmica* ou *cenário do novo modelo congelado*, permite a substituição do equipamento retirado, por modelos novos e mais eficientes já existentes no mercado, mas não permite “enxergar” novas tecnologias que

doravante ainda não existam no mercado no início do estudo. Assim, num cenário de eficiência congelada dinâmica, a intensidade energética média pode ser reduzida ao longo do tempo, por exemplo, até ao nível da intensidade energética média de novas tecnologias disponíveis no mercado no período base.

4.4.5 Potencial de Eficiência Energética Técnica

O potencial com base em cenários técnicos considera todos os avanços técnicos possíveis, realizáveis sobre todos os equipamentos, construções e processos que possam ser introduzidos até ao ano em estudo. Assim, este tipo de potencial pode ser caracterizado de duas formas, nomeadamente: (i) um tipo de cenário que considera a hipótese das economias energéticas que poderiam ser alcançadas se todos os sistemas pudessem ser convertidos imediatamente, e; (ii) outro tipo de cenário, no qual são consideradas as economias que poderiam ser alcançadas se apenas os sistemas sendo retirados fossem substituídos por sistemas mais eficientes.

Outra forma de abordar este tipo de potencial é distinguindo um *potencial de eficiência energética teórica*. Por exemplo, é dedutível, que se toda a energia absorvida por um motor elétrico fosse convertida em energia útil (sem perdas no ferro, cobre, suplementares e outras) o fator de potência e o rendimento do motor e do resto do sistema, poderiam ser maiores que os dos melhores motores atualmente disponíveis e muito maiores que os dos motores convencionais. Igualmente, se toda a energia absorvida por uma lâmpada elétrica fosse convertida em luz sem perdas de calor, a eficiência da lâmpada poderia ser maior que a das melhores lâmpadas existentes atualmente, e bem maior que a da maioria de lâmpadas convencionais comercializadas. Os ganhos de eficiência, caracterizados segundo este raciocínio, são igualmente aplicáveis a transformadores de energia, cabos, entre outros componentes e equipamentos elétricos.

O potencial técnico de eficiência energética pode ser definido como o ganho na eficiência energética de uso-final que poderia resultar se as tecnologias mais eficientes, conhecidas atualmente, pudessem atender a totalidade da saturação do mercado durante o seu ciclo de vida, estimado entre 10 e 20 anos (EPRI, 1990). Esta definição é específica só à tecnologia, sabido que melhorias adequadas nos projetos de edificações, instalações ou sistemas podem, em diversos casos, reduzir muito mais as necessidades em energia do que apenas pelos melhoramentos nos equipamentos. Na realidade, o potencial de eficiência técnica é

continuamente mutante, acompanhando a inovação tecnológica e as novas tecnologias sendo disponibilizadas.

Há que se ressaltar, que pelo fato da atual disponibilidade de novas tecnologias conhecidas, depender do que esteja sendo a visão de valor do mínimo custo efetivo, viável para a implantação dessas tecnologias, pode induzir-se alguma dificuldade na distinção entre o potencial de eficiência técnica e o potencial de eficiência econômica, discutido a seguir.

4.4.3 Potencial de Eficiência Energética Econômica

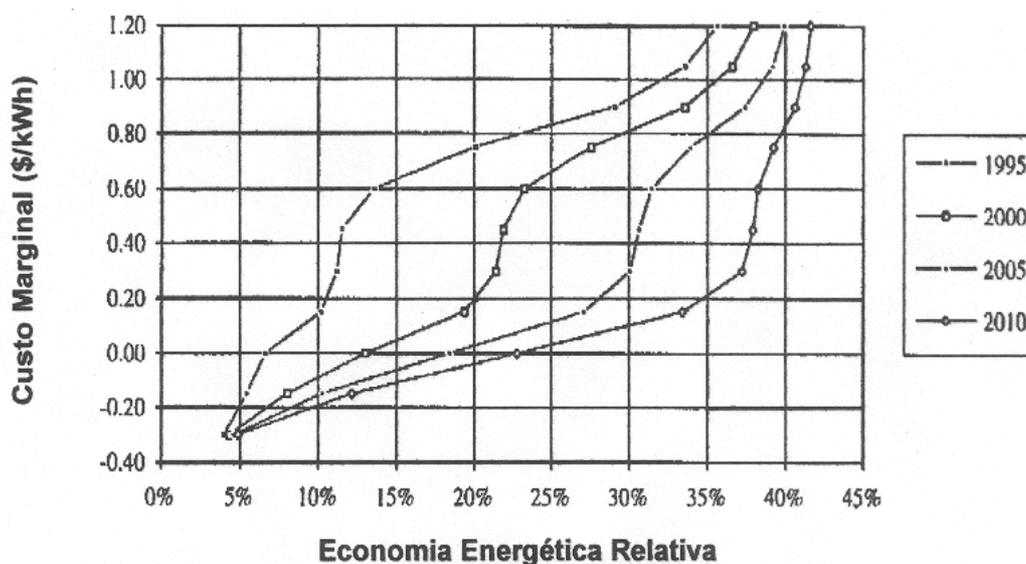
Os cenários de potencial econômico envolvem apenas as alternativas que satisfaçam alguma condição de custo efetivo. As opções do lado da demanda são filtradas e a composição do cenário inclui somente, aquele tipo de medidas que satisfazem a um dado critério de efetividade de custo. Esse critério deve atestar se uma dada medida é considerada benéfica para a sociedade, consumidores, concessionária, ou qualquer outro agente realizando o PIR. Os custos referentes às opções do lado da oferta são considerados, podendo-se incluir os custos ambientais e outros custos das externalidades.

Conseqüentemente, o potencial econômico de eficiência energética (pefenec) é o ganho em eficiência energética que pode resultar a partir da máxima utilização das tecnologias de custo efetivo. Depreende-se que esse potencial é uma função do critério de efetividade de custo selecionado, baseado no período de retorno, taxas de juros ou custo da energia evitada. Ganhos de eficiência mais ambiciosos, usualmente podem ser identificados com o teto de custo mais elevado. Com base neste conceito, este potencial tem sido estendido para dentro do escopo da teoria dos custos marginais⁴ da conservação de energia.

Para ressaltar o conceito sobre custos marginais da conservação de energia, na Figura 31 é mostrado um exemplo de curva de custo marginal para o potencial de eficiência energética referente ao setor de serviços de um país escandinavo (SWISHER *et al.*, 1997). Nessa figura, a economia energética relativa representa o percentual da energia em iluminação que pode ser economizado a um determinado custo marginal, tendo como parâmetros, quatro anos diferentes. A referência para as economias é o consumo resultante da implantação, em todas

⁴ À semelhança dos modelos do planejamento tradicional da oferta de energia, neste contexto particular, estas curvas, algumas vezes, são designadas também como “curvas de suprimento” da energia evitada.

as instalações novas e “retrofits”, depois do ano 90, de equipamentos com a mesma eficiência energética média daquele ano.



\$/kWh = unidade monetária por kWh

Figura 31 – Exemplo Prático de Curvas de Custo Marginal da Conservação de Energia no Setor de Iluminação Pública (adaptado de SWISHER *et al.*, 1997).

O consumo de referência, na Figura 31, aumenta com o tempo. A um dado nível de custo marginal, as economias de energia incluem os efeitos da implementação de todas as soluções de eficiência energética com um custo da energia conservada menor que o nível do custo marginal. Por exemplo, no ano 2000, uma redução em 20% no uso da energia em iluminação comercial pode ser obtida a um custo menor ou igual a \$ 0,20/kWh.

O potencial conservado, a custos negativos, é sustentado pelo fato dos custos de manutenção evitados superarem os custos iniciais da tecnologia, ainda que estes custos de investimento em tecnologias mais eficientes sejam normalmente mais elevados que os seus semelhantes convencionais. Os maiores percentuais de economia, possíveis à relativamente elevados custos marginais, podem estar subestimados nas correspondentes análises de usos-finais. Isto porque esses estudos estão baseados em análises de engenharia direcionadas para medidas a serem implementadas no imediato ou no curto prazo. Assim, medidas para esses horizontes, muitas vezes podem não captar ações que podem parecer como sendo de não-custo efetivo sob condições econômicas correntes à época do estudo. Conseqüentemente, se informações

adicionais sobre tais medidas pudessem ser antecipadas, então, essas economias provavelmente seriam obtidas a custos marginais menores.

4.4.5 Potencial de Eficiência Energética de Mercado

Diversas razões podem ser encontradas para justificar o fato de nem todas as medidas de custo efetivo poderem ser implementadas com sucesso, através da eficiência energética, gerenciamento do lado da demanda ou outros programas de conservação de energia. Cite-se, a título de exemplo, que não obstante os motores de indução de alta eficiência constituírem uma opção de custo efetivo frente aos motores de indução convencionais, nem todos os consumidores industriais com acionamentos eletromecânicos estarão dispostos a instalá-los em suas fábricas. Sendo assim, o *potencial de cenário de mercado* visa capturar o volume percebido de economia que efetivamente pode ser alcançado.

Quando os custos das externalidades não são levados em consideração, as soluções em eficiência energética, gerenciamento do lado da demanda e conservação de energia têm, geralmente, como suas principais restrições, os custos da tecnologia, os custos operacionais e administrativos, e a viabilidade técnica e institucional dessas medidas. Por exemplo, determinada tecnologia mais eficiente pode não ser apropriada para algumas implementações, no que respeite ao seu custo ou, essa tecnologia pode apresentar limitações de ordem estética ou funcional. Por exemplo, as lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs) que não podem ser usadas em circuitos com “dimmers” ou em salas com lustres decorativos.

Assim como a transformação do mercado de energia, requerida para a expansão da conservação de energia e da eficiência energética, o alcance do potencial de mercado total, entre outros requisitos e condições, também está condicionado à elasticidade temporal. Assim, uma penetração plena no mercado, das soluções tecnológicas que promovam a conservação de energia, pode não ser atingida na maioria dos casos. Diversas experiências têm atestado que, mesmo com fortes incentivos, as novas tecnologias têm demandado tempo para capturar uma larga parcela de mercado, e que os programas para substituir tecnologias existentes têm sido restringidos por recursos de implementação destinados a servir toda a população de consumidores elegíveis. Devido a isso, surge então a figura do *potencial de eficiência energética de mercado alcançável* (pefemca).

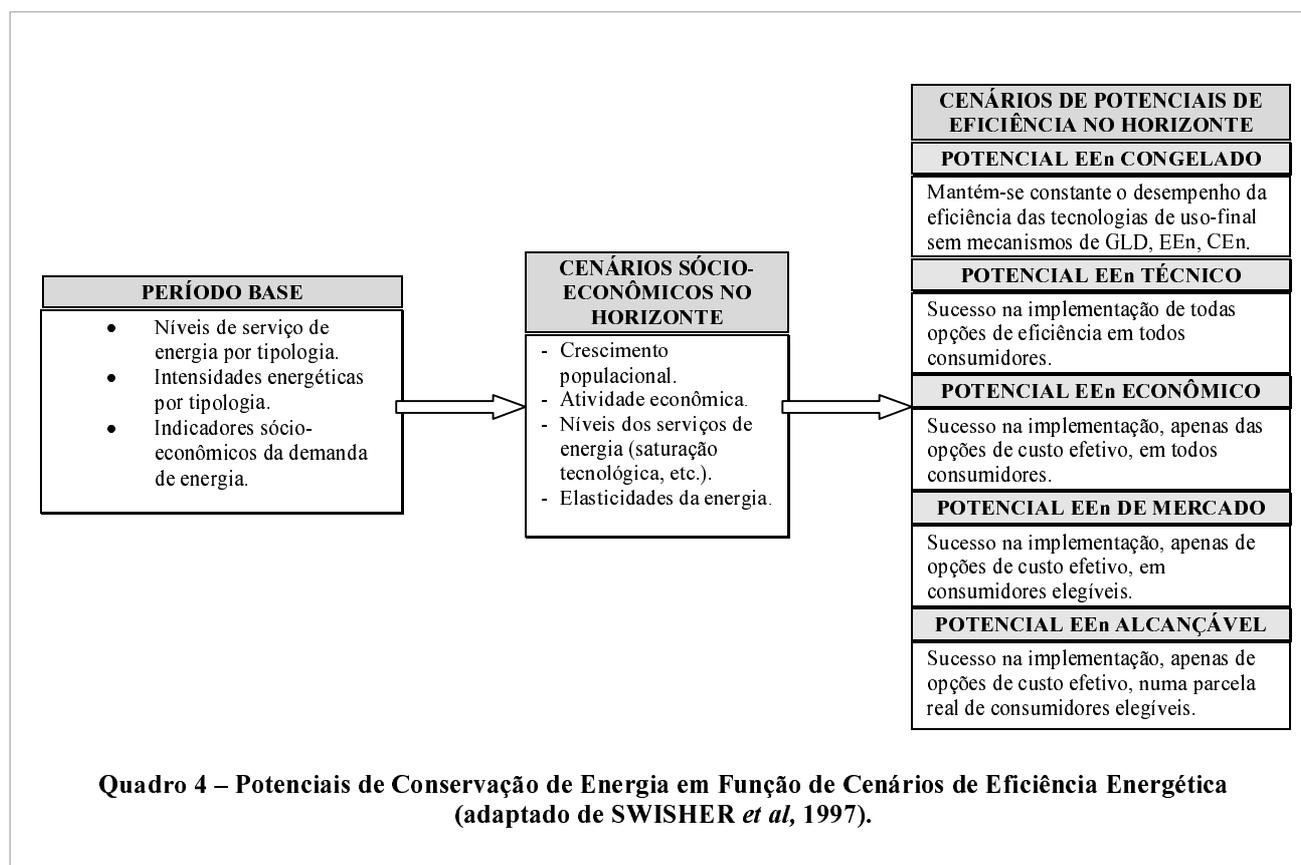
4.4.5 Potencial de Eficiência Energética de Mercado Alcançável

Devido às imperfeições dos fatores objetivos ou subjetivos que envolvem a tomada de decisão sobre a implementação da eficiência energética e de outros mecanismos de economia energética nos consumidores, o potencial surge como sinônimo do potencial de eficiência energética cuja obtenção, à priori, está assegurada pela sinalização positiva de consumidores identificados, já dispostos para a adoção de tecnologias e soluções de eficiência energética em suas instalações.

Nesse sentido, o potencial de eficiência energética de mercado alcançável inclui uma fração incremental e crescente do potencial de mercado total ao longo do tempo. Esse potencial é uma função do tempo, tipo de programas, instituições envolvidas e critério de efetividade de custo técnico-econômico. Um cenário de potencial de mercado alcançável visa, conseqüentemente, capturar os ganhos de eficiência energética disponíveis a mercê de programas reais, sob condições de taxas de retorno e restrições à penetração de mercado ao longo do tempo, para instalações e equipamentos existentes.

O sucesso na atração de potenciais participantes para a implantação deste tipo de cenário é continuamente influenciado pelos estímulos atrativos oferecidos, grau de acessibilidade aos mecanismos de implementação e vários outros incentivos disponíveis. Em geral, a compensação mercadológica, sob a forma de créditos fiscais, *rebates* e pagamentos, subsidia investimentos em tecnologias e processos eficientes, atraindo a adesão de consumidores para este cenário.

O Quadro 4, adaptado de SWISHER *et al.* (1997), ilustra um resumo dos cenários em que se fundamentam os potenciais de eficiência energética descritos, a mercê das utilizações finais de consumidores de energia elétrica.



4.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Foram abordados os custos da energia elétrica, através da sua divisão em custos técnico – econômico – financeiros e custos das externalidades. Por sua vez os custos das externalidades foram subdivididos e analisados como custos ambientais e custos sociais. Em cada categoria se procurou associar os custos às correspondentes fontes causadoras e às soluções ou ações para a sua mitigação na produção de serviços energéticos industriais.

Ficou exposto o fato de alguns custos técnico - econômicos terem que ser percebidos como gerenciáveis. Visando-se a sua mitigação, as soluções podem consistir da utilização de mecanismos envolvendo melhorias dos processos de produção dos serviços de energia, utilização de tecnologias emergentes e inovação tecnológica baseada em alta eficiência energética.

Foi levantado o fato dos custos das externalidades não estarem sendo incorporados apropriadamente, com a devida profundidade, dentro da atuação corriqueira da produção industrial dos serviços de energia. O fato das externalidades não refletirem uma alocação fiscal apropriada, quanto ao dano causado pelo consumo intensivo da energia elétrica, foi realçado como constituindo uma das principais dificuldades para induzir a incorporação efetiva de opções tecnológicas de conservação e eficiência energética em consumidores industriais.

Apesar de várias propostas analíticas existentes verificou-se que as determinações de procedimentos, através das agências reguladoras e fiscalizadoras de serviços como a energia e água, quanto a danos causados sobre os recursos ecológicos pelas atividades tecnológicas, são mecanismos úteis para induzir à mudança de comportamento em direção à uma sociedade econômica e ecologicamente sustentável.

Verificou-se, também, que os custos das externalidades ao serem mitigados através de mecanismos de energia limpa, tanto na produção quanto na utilização, dão lugar a um conjunto de benefícios sociais (melhoras em emprego, informação, qualidade de vida, educação, saúde e entretenimento), o que permite encarar também os esforços em transição do modelo energético, como indutores à redução dos custos sociais associados às práticas tradicionais.

CAPÍTULO 5

5. PROBLEMA DO POTENCIAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NO SEGMENTO INDUSTRIAL PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO

Endossado também pela Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO), o desenvolvimento atual e futuro deve ocorrer sob condições de proporcionar o atendimento das necessidades atuais sem comprometer o das gerações futuras – *desenvolvimento sustentável*. Orienta ainda para a expectativa de que a satisfação das necessidades das gerações futuras seja melhor que a das gerações atuais. Para isso, as gerações atuais precisam tomar uma decisão que sinalize uma trajetória compatível através de mecanismos tecnológicos que proporcionem um desenvolvimento limpo (UNIDO, 1998).

De modo a se alcançar esse objetivo às tecnologias e aos processos energéticos reserva-se um papel particularmente importante, dado serem, os seus processos de conversão de vetores, a essência da determinação das intensidades energéticas que, em última análise, são transferidas a partir das fontes primárias naturais. Durante essa realização os ciclos de conversão vão alterando a proporção da alocação das diferentes naturezas dos vetores envolvidos, ambos sob alguma forma de energia.

Nessa cadeia é imprescindível a natureza e a função estratégica da eletricidade, de um lado, como insumo básico das tecnologias e dos processos e, de outro, como recurso com elevado

custo de capital econômico e ecológico. Nesse contexto, a partir do modelo tradicional correntemente usado no planejamento da demanda energética, os recursos financeiros resultantes, necessários ao atendimento dos planos de expansão da oferta, têm sido muito elevados e, freqüentemente, bem acima da capacidade de investimentos disponíveis nas nações e nas instituições multilaterais internacionais. Em virtude disso, a sociedade atual tem convivido em ambiente de contínuo endividamento, em capital econômico e ecológico, para suporte ao setor energético.

Nesse sentido, apesar de notáveis desenvolvimentos, alguns bem explorados no capítulo anterior, a atitude mais prevalecente ainda está na contramão do ensejo de um desenvolvimento sustentável, devido a fatores como: *(i)* a elevadíssima demanda por recursos exigidos para a energia faz falta para expandir a universalização da educação e da saúde; e *(ii)* as elevadíssimas intensidades com que os recursos de algumas energias primárias são extraídos e transformados desequilibram os ecossistemas; *(iii)* os ecossistemas em não equilíbrio não sustentam o homem nas mais diversas vertentes das suas necessidades cotidianas.

Nesse panorama, contribuições importantes para soluções efetivas ao problema e para ajustar-se à trajetória para um desenvolvimento sustentado, podem ser encontradas através de procedimentos baseados no planejamento integrado de recursos energéticos (PIR), cujos resultados para o atendimento energético são a utilização como recursos efetivos: *(i)* da eficiência energética; *(ii)* do gerenciamento pelo lado da demanda; *(iii)* das fontes de energia renováveis; *(iv)* da conservação de energia; *(v)* das utilizações racionais; *(vi)* da reutilização e recirculação de insumos; *(vii)* da reciclagem de materiais.

A abordagem desenvolvida neste trabalho faz parte desse escopo de medidas e tem sua inovação consagrada na modelagem do atendimento em energia elétrica como um problema global que internaliza, simultaneamente, as variáveis técnico – econômicas e as variáveis técnico - ecológicas. Este encaminhamento não tem sido praticado nas utilizações da energia elétrica, aonde essas variáveis técnico - ecológicas têm sido tratadas, simplesmente, como custos externos.

Conforme abordado no Capítulo 4, existem elos entre custos ambientais e sociais induzidos e as utilizações da energia elétrica que induzem esses custos. Nesse sentido, por exemplo, os dados da Figura 32 podem ser enquadrados num cenário de planejamento integrado de recursos, associados com os recursos em energia elétrica. Nessa figura evidencia-se o

histórico sobre gastos com os principais programas de saúde ambiental no Brasil, durante o quinquênio 1995 – 1998. A partir dela é visível um típico comportamento incremental com tendência positiva, nas variáveis desses programas. Assim, esse comportamento pode revelar sinais quanto à necessidade de uma abordagem estratégica baseada no gerenciamento integrado de recursos, de modo a serem encontradas soluções simultâneas e sustentáveis aos problemas de ambos os setores. A exemplo do que aconteceu na Mongólia Central, aonde a universalização do atendimento energético, ao privilegiar os mecanismos de energias limpas, registrou impactos positivos elevados tanto em energia quanto nas variáveis sociais como saúde, bem estar, educação e emprego (WWI, 2003).

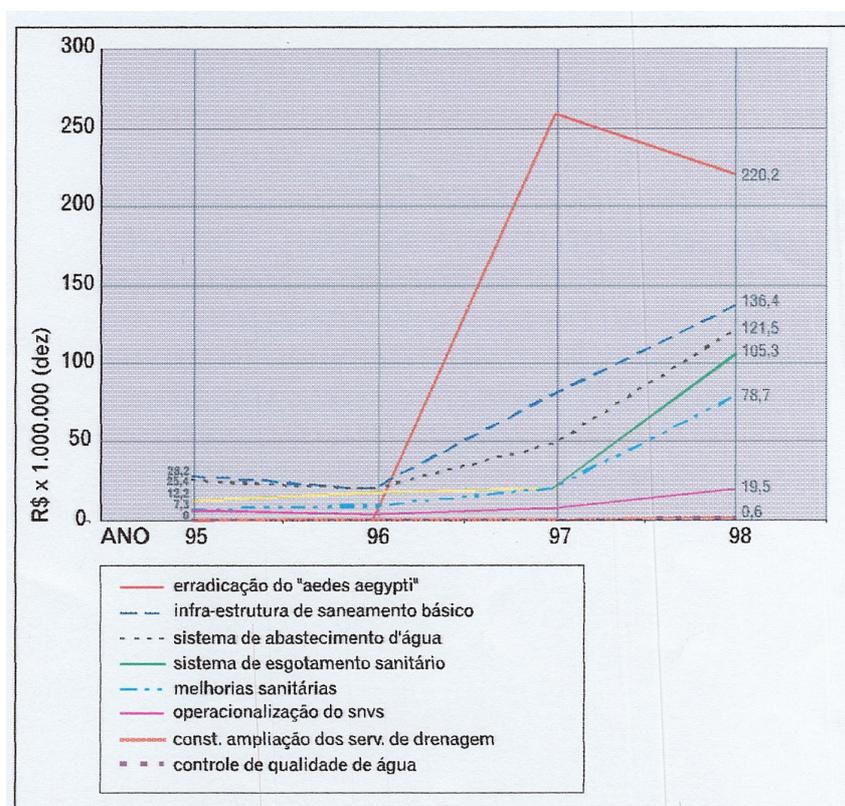
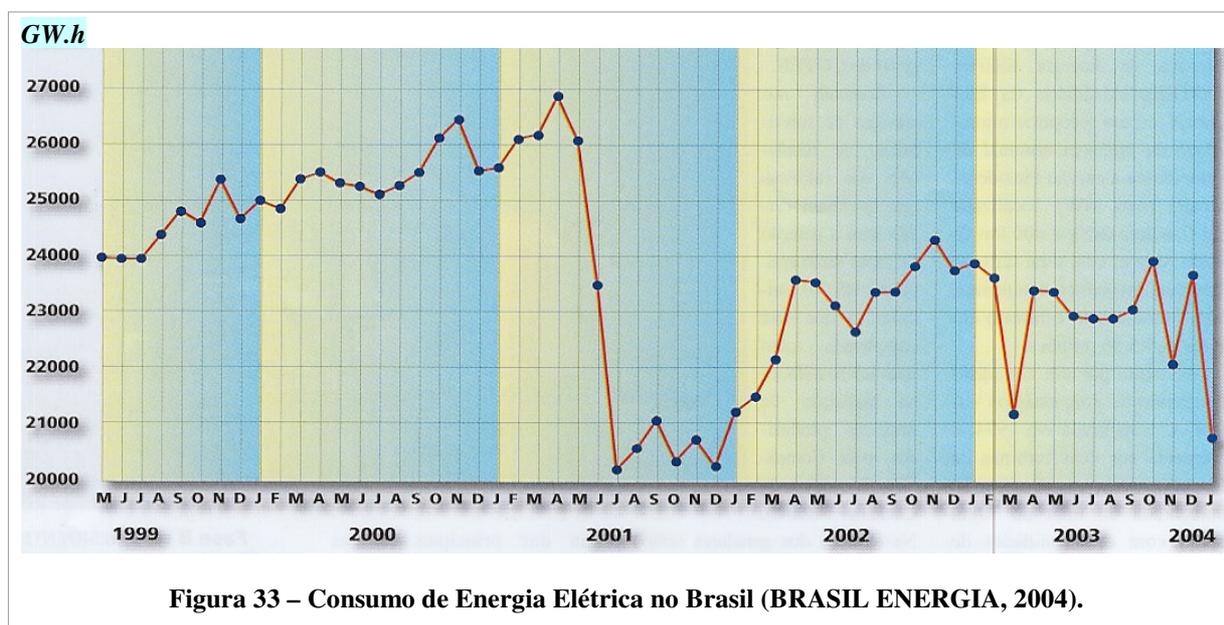


Figura 32 – Dados dos Gastos com os Principais Programas de Saúde Ambiental no Brasil (1995 – 1998) (Ministério da Saúde, 1998 *apud* GEO Brasil 2002, 2002).

Já, na Figura 33 é apresentado um gráfico mostrando o histórico do consumo de energia no Brasil. Ainda com relação à esse consumo, para se atender a um crescimento moderado da economia brasileira, a partir da situação atual, de uma economia ainda não aquecida, são necessários investimentos no segmento da expansão da oferta de energia elétrica, da ordem de 6 bilhões de reais ao ano durante os próximos anos (BRASIL ENERGIA, 2004).



Assim, as duas figuras (Figuras 32 e 33) são exemplos elucidativos da possibilidade de existência de correlações envolvendo investimentos pesados em setores essenciais, e cujos atendimentos se mostram não poder continuar sendo mantidos através das abordagens tradicionais. Essas tendências podem, assim, caracterizar comportamentos não sustentáveis das exigências do desenvolvimento, vistas a partir da atualidade. Para tanto, requerem-se para a sua reversão, novas formulações políticas e analíticas relativas à alocação de valores, tanto no domínio econômico – financeiro quanto ecológico.

Nesse sentido, a análise integrada de recursos é um procedimento compatível para a obtenção de soluções apropriadas aos cenários de restrições econômicas e ecológicas típicas aos dias de hoje. As tendências e as demandas sobre os investimentos para os setores energético e social, exemplificados através das Figuras 32 e 33, são semelhantes nos países em desenvolvimento, sendo o PIR uma boa opção para soluções de custo efetivo aos problemas energéticos desses países.

Tanto em países desenvolvidos quanto nos emergentes, como por exemplo, os países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), de acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), esses também precisam considerar o PIR para

fazerem frente às suas demandas presentes e futuras (IEA, 2002; IEA, 2003). Nesse gerenciamento, reconhecida a importância que a indústria elétrica e de outros setores desempenham em relação aos problemas da poluição (MAARTIN (LBNL) *et al.* (ACEEE), 2000; TOLMASQUIM *et al.*, 2000; WWI, 2003), o papel dos modelos de engenharia deve constituir uma parte fundamental na avaliação analítica e compreensiva das soluções mitigadoras.

Agindo de modo a contemplar essa envolvente os modelos, nos vários segmentos que integram o problema do atendimento energético, estarão moldando relações mais corretas entre o homem e o resto do ecossistema, do qual o próprio homem faz parte, sem prejuízo ao consumo das *commodities* tecnológicas e industriais.

Realçando o elo energia – ambiente, estima-se que mais de 80% das emissões são causadas pela queima de combustíveis fósseis, sendo a maior parte para a produção de energia elétrica. Dessa forma, as reduções que o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática⁵ recomenda não serão possíveis sem uma melhora rápida e significativa na eficiência energética nos sistemas de usos - finais e de oferta de energia (WWI, 2003).

Conforme citado em GEO BRASIL/2002 (2002), ao se referir à Convenção sobre a Diversidade Biológica (CDB), abordada na ECO 92, o conceito de gestão integrada de recursos naturais é fundamental para se regular a relação social e individual do homem com a natureza, destacando-se as dimensões ecológica, ambiental, social, política, demográfica, cultural, institucional e espacial. As estratégias básicas da gestão dos recursos naturais têm repercussão sobre a saúde dos seres vivos e, portanto, da saúde humana. Nelas, ressalta-se a garantia de alimento saudável e de medicamento.

Vislumbra-se assim, que existe um estreito portal de oportunidades para se sair em busca de um mundo mais sustentável, no qual a crescente demanda por energia seja atendida sem sacrifício das necessidades das gerações atuais e futuras, nem do meio ambiente natural (SAWIN, 2003).

⁵ Órgão formado por cerca de dois mil cientistas e economistas que assessoram as Nações Unidas sobre mudança climática.

5.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

De um modo geral, uma determinada atividade industrial pode ser descrita como um conjunto de processos de transformação realizados através de uma cadeia de meios tecnológicos, adequadamente articulados com a intervenção de meios humanos e demandando algum tipo de energia para a produção de serviços de energia sob a forma de bens manufaturados ou *commodities*. Em virtude da eletricidade apresentar diversas vantagens competitivas em relação à outras formas de energia, freqüentemente, ela tem sido a forma mais apropriada e favorável na operação de diversas indústrias.

De um ponto de vista eletro-energético, visando-se apenas o atendimento de objetivos técnico – econômico - financeiros de uma entidade industrial particular, para os limites de interesse deste trabalho, a produção de uma determinada entidade industrial pode ser modelada através de um balanço energético simplificado, da seguinte forma:

$$[CG_p] + [CD_{in}] - [CE_{out}] = [UL] + [CL] + [VL] + [SL] \quad (5.1)$$

Onde:

$[CG_p]$ - Matriz das capacidades geradas próprias totais, de diferentes fontes, incluindo as respectivas perdas de geração;

$[CD_{in}]$ – Matriz das capacidades importadas totais, de diferentes fontes (entenda-se também, contratadas de uma concessionária), incluindo perdas de transmissão e distribuição;

$[CE_{out}]$ - Matriz das capacidades exportadas totais, de diferentes fontes (entenda-se também, fornecida para uma rede externa à indústria);

$[UL]$ - Matriz dos serviços de energia totais das utilizações-finais;

$[CL]$ - Matriz das capacidades de energia perdida total, devida às perdas constantes;

[VL] - Matriz das capacidades de energia perdida total, devida às perdas variáveis;

[SL] - Matriz das capacidades de energia perdida total, devida às perdas suplementares e outras.

Todos os elementos destas matrizes devem estar normalizados à uma grandeza-base comum ou estar a valores presentes à vista referidos à uma mesma base monetária.

Uma alternativa para elaborar este balanço é começar da energia útil, agregando sequencialmente, dados referentes às eficiências envolvidas nas cadeias de produção, transporte, distribuição e transformação ou conversão. Referido aos usos-finais, o cálculo dessas eficiências distingue principalmente duas etapas, sendo uma, a que ocorre quando um mesmo vetor energético é convertido em outro tipo de vetor de energia final e outra, a que ocorre no fluxo de um mesmo vetor energético até ao provimento de bens ou serviços desejados (serviços de energia).

Considere-se, por exemplo, a cadeia de eventos associados à um sistema elétrico, compreendendo unidades geradoras térmicas de uma concessionária, um sistema de transmissão, um sistema de distribuição e um grande consumidor industrial siderúrgico enquadrado na classe A de atendimento e que possui unidades de geração própria de ciclo combinado do tipo *bottoming*.

Em função da eficiência estática existente em cada subsistema do conjunto, da eficiência dinâmica da operação dos subsistemas, da eficiência dos equipamentos e materiais envolvidos desde a geração até a entrega da energia nos pontos da produção dos serviços de energia, resultará nestes, um maior ou menor aproveitamento da eletricidade, contabilizada a partir das fontes de fornecimento. Neste sentido, um balanço energético tendo como base a energia útil, requer dados detalhados, tanto sobre as tecnologias de usos-finais quanto sobre as tecnologias de geração, transporte e distribuição e sobre a forma como essas tecnologias são usadas.

A formulação matemática do problema procura explorar, basicamente duas potencialidades, resultando-se num modelo com características estendidas e bem inovadoras sobre o modelo técnico – econômico - financeiro anterior (modelo tradicional ou convencional). Essas duas potencialidades são:

1. Explorar, tirando proveito do balanço energético descrito (equação 5.1), os potenciais existentes nas variáveis mais relevantes associadas à produção dos serviços de energia na indústria. Neste sentido, os termos à direita, na equação (5.1), podem ser decompostos com o objetivo particular de representar, explicitamente, os principais segmentos de consumidores e usos energéticos finais industriais, buscando-se evidenciar, nomeadamente:
 - a) As variáveis referentes aos principais segmentos de consumidores industriais;
 - b) As variáveis relativas aos principais usos-finais industriais, classificados e expressos em função dos principais tipos de indústrias existentes;
 - c) As principais variáveis referentes aos serviços de energia desejados; e
 - d) As principais perdas associadas com a produção dos serviços de energia afins, em função dos tipos de indústrias e dos tipos dos serviços de energia.

Nesse sentido, então, considerando que:

$$[CF]_{\text{ind}} = [UL] + [CL] + [VL] + [SL] \quad (5.2)$$

$[CF]_{\text{ind}}$ passa a ser entendida, como a componente matricial industrial do consumo da energia elétrica.

Detalhando, em termos de seus componentes, a matriz $[CF]_{\text{ind}}$ resulta na forma:

$$[CF]_{\text{ind}} = [CF]_{\text{ind1}} + [CF]_{\text{ind2}} + [CF]_{\text{ind3}} + \dots + [CF]_{\text{indn}} \quad (5.3)$$

Onde $[CF]_{\text{indi}}$ é a matriz de usos-finais da indústria do tipo i ; $\forall i = 1, \dots, n$, sendo n , o número de indústrias em estudo.

Cada termo, no segundo membro da equação (5.3), pode ser colocado de modo a explicitar os serviços de energia mais as perdas de energia decorrentes da conversão de vetores na produção dos serviços de energia proporcionados.

Portanto:

$$\begin{aligned}
 [CF]_{\text{indi}} = & \left[[cf]_{\text{mot}_{ca}} + [cf]_{\text{mot}_{cc}} + [cf]_{\text{forno}} + [cf]_{\text{ar cond}} + [cf]_{\text{calor}} + [cf]_{\text{refg}} + [cf]_{\text{ar comp}} + [cf]_{\text{ilum}} + \Lambda \right]_i \\
 & + \left[[pfc]_{\text{mot}_{ca}} + [pfc]_{\text{mot}_{cc}} + [pfc]_{\text{forno}} + [pfc]_{\text{ar cond}} + [pfc]_{\text{calor}} + [pfc]_{\text{refg}} + [pfc]_{\text{ar comp}} + [pfc]_{\text{ilum}} + \Lambda \right]_i + \\
 & + \left[[pfv]_{\text{mot}_{ca}} + [pfv]_{\text{mot}_{cc}} + [pfv]_{\text{forno}} + [pfv]_{\text{ar cond}} + [pfv]_{\text{calor}} + [pfv]_{\text{refg}} + [pfv]_{\text{ar comp}} + [pfv]_{\text{ilum}} + \Lambda \right]_i + \\
 & + \left[[pfs]_{\text{mot}_{ca}} + [pfs]_{\text{mot}_{cc}} + [pfs]_{\text{forno}} + [pfs]_{\text{ar cond}} + [pfs]_{\text{calor}} + [pfs]_{\text{refg}} + [pfs]_{\text{ar comp}} + [pfs]_{\text{ilum}} + \Lambda \right]_i
 \end{aligned}$$

$$\forall i = 1, \Lambda, n \in \{\text{CEn_EEn}\} \quad (5.4)$$

Sendo:

$[cf]$ - Matriz de *serviços de energia* por cada tipo carga;

$[pfc]$ - Matriz de *perdas constantes* por cada tipo de carga;

$[pfv]$ - Matriz de *perdas variáveis* por cada tipo de carga;

$[pfs]$ - Matriz de *perdas suplementares* por cada tipo de carga;

Os índices e sub-índices dos termos representam:

mot_{ca} - Cargas do tipo motores de corrente alternada (MCA);

mot_{cc} - Cargas do tipo motores de corrente contínua (MCC);

forno - Cargas do tipo fornos elétricos;

ar cond - Cargas do tipo ar-condicionado;

calor - Cargas do tipo calor;

refg - Cargas do tipo frio;

ar comp - Cargas do tipo ar-comprimido;

ilum - Cargas do tipo iluminação;

{CEn_EEn} – Conjunto de indústrias integrantes do estudo em conservação e eficiência de energia.

2. Explorar, estendendo o balanço energético descrito (equação 5.1), os eventos econômicos resultantes das degradações ambientais e sociais associadas àquilo que é entendido como o objetivo central da atividade industrial, ou seja, degradações associadas aos eventos econômicos da produção de bens e serviços e que têm como um de seus resultados a geração destas degradações, porém, não efetivamente mensuradas e contabilizadas nos serviços energéticos da indústria. Nesta nova visão, o balanço energético (equação 5.1) transforma-se, de um modelo do tipo *técnico – econômico – financeiro* (refletindo o modelo tradicional), em um modelo *técnico – financeiro – ecológico* de usos-finais energéticos (refletindo o modelo PIR). Assim, o novo modelo de balanço energético de uma entidade industrial considerando, simultaneamente, as variáveis de valor econômico e ecológico, é:

$$\begin{aligned} [CG_p] + [CD_{in}] - [CE_{out}] + [CCREDS] + [CCREDA] = \\ = [UL] + [CL] + [VL] + [SL] + [EDS] + [EDA] \end{aligned} \quad (5.5)$$

Onde:

[CCREDS] – Matriz das capacidades por medidas de controle e redução de impactos sociais, gerados pela produção dos serviços de energia (contidos na matriz UL).

[CCREDA] – Matriz das capacidades por medidas de controle e redução de impactos ambientais, gerados pela produção dos serviços de energia (contidos na matriz UL).

[EDS] – Matriz de valores equivalentes dos danos sociais decorrentes da produção dos serviços de energia (contidos na matriz UL).

[EDA] – Matriz de valores equivalentes dos danos ambientais decorrentes da produção dos serviços de energia (contidos na matriz UL).

Os restantes termos do balanço (5.5) mantêm o mesmo significado e interpretação quanto no modelo do balanço energético (5.1).

Para as utilizações finais industriais torna-se muito apropriado integrar nos modelos de engenharia, os fundamentos conceituais e as variáveis expressando aspectos de interesse para com a eficiência energética, a conservação de energia e o gerenciamento do lado da demanda. As matrizes CCREDS, CCREDA, EDS e EDA são particularmente importantes na satisfação deste propósito, porque representam uma alternativa explícita das variáveis relevantes de um modelo PIR.

As equações (5.2) e (5.4) precisam agora ser modificadas de modo a refletirem, também, a incorporação das variáveis dos eventos econômicos representados pelos termos matriciais CCREDS, CCREDA, EDS e EDA do novo balanço energético econômico e ecológico (equação 5.5).

Essas equações (5.2 e 5.4) transformam-se em novo formato, conforme exposto a seguir:

- A equação matricial agregada (5.2) transforma-se na Equação (5.6), seguinte:

$$[CF]_{\text{ind}} = [UL] + [CL] + [VL] + [SL] + [EDS] + [EDA] \quad (5.6)$$

A equação matricial desagregada (5.4) transforma-se na Equação (5.7), seguinte:

$$\begin{aligned} [CF]_{\text{indi}} = & \left[[cf]_{\text{mot}_{ca}} + [cf]_{\text{mot}_{cc}} + [cf]_{\text{forno}} + [cf]_{\text{ar cond}} + [cf]_{\text{calor}} + [cf]_{\text{refg}} + [cf]_{\text{ar comp}} + [cf]_{\text{ilum}} + \Lambda \right]_i \\ & + \left[[pfc]_{\text{mot}_{ca}} + [pfc]_{\text{mot}_{cc}} + [pfc]_{\text{forno}} + [pfc]_{\text{ar cond}} + [pfc]_{\text{calor}} + [pfc]_{\text{refg}} + [pfc]_{\text{ar comp}} + [pfc]_{\text{ilum}} + \Lambda \right]_i \\ & + \left[[pfv]_{\text{mot}_{ca}} + [pfv]_{\text{mot}_{cc}} + [pfv]_{\text{forno}} + [pfv]_{\text{ar cond}} + [pfv]_{\text{calor}} + [pfv]_{\text{refg}} + [pfv]_{\text{ar comp}} + [pfv]_{\text{ilum}} + \Lambda \right]_i \\ & + \left[[pfs]_{\text{mot}_{ca}} + [pfs]_{\text{mot}_{cc}} + [pfs]_{\text{forno}} + [pfs]_{\text{ar cond}} + [pfs]_{\text{calor}} + [pfs]_{\text{refg}} + [pfs]_{\text{ar comp}} + [pfs]_{\text{ilum}} + \Lambda \right]_i \\ & + \left[[eds]_{\text{mot}_{ca}} + [eds]_{\text{mot}_{cc}} + [eds]_{\text{forno}} + [eds]_{\text{ar cond}} + [eds]_{\text{calor}} + [eds]_{\text{refg}} + \right]_i \\ & \quad \left[[eds]_{\text{ar comp}} + [eds]_{\text{ilum}} + \Lambda \right]_i \\ & + \left[[eda]_{\text{mot}_{ca}} + [eda]_{\text{mot}_{cc}} + [eda]_{\text{forno}} + [eda]_{\text{ar cond}} + [eda]_{\text{calor}} + [eda]_{\text{refg}} + \right]_i \\ & \quad \left[[eda]_{\text{ar comp}} + [eda]_{\text{ilum}} + \Lambda \right]_i \end{aligned}$$

$$\forall i = 1, \Lambda, n \in \{CEn_EEn\} \quad (5.7)$$

O modelo (5.7) apresenta três características de grande notabilidade, nomeadamente:

1. Elevada *dimensionalidade*, traduzida pelo grande número e segmentação de indústrias eletro-intensivas e grande diversidade da classificação de cargas elétricas de uso final;
2. Elevada *desagregabilidade*, traduzida pelo grande número de variáveis explícitas em estudo; e
3. *Multi-objetividade*, traduzida pelo atendimento a requisitos técnicos, econômicos, financeiros, sociais e ambientais da produção dos serviços de energia.

A eficácia da análise deste modelo impõe a necessidade de um sistema de gestão integrada, baseado em sistemas de informações nos quais estejam permanentemente combinados sistemas de gestão técnico-econômicos e sistemas de gestão técnico-ecológicos, como por exemplo, um sistema de gestão ambiental, do tipo proposto por FERREIA (2003) em seu trabalho “Contabilidade Ambiental: Custos Ambientais – Uma Visão de Sistema de Informações”.

As tecnologias para a conservação de energia, eficiência energética e gerenciamento do lado da demanda devem continuar se aprimorando, procurando se alinhar com as crescentes constatações referentes à conformidade das tecnologias e processos industriais com as leis termodinâmicas, particularmente no que tange à produção de níveis de serviços de energia compatíveis por cada unidade de vetor de energia elétrica convertido (ROSS e STEINMEYER, 1990; MARTIN *et al.*, 2000; SAWIN, 2003).

A esse respeito é oportuno referir que, a nível da comunidade científico – técnico - tecnológica ainda não se tem uma universalidade do entendimento da avaliação da eficiência energética, existindo basicamente duas correntes conceituais. Contudo, as duas correntes têm em comum um aspecto muito valioso – tanto uma quanto a outra sustentam a existência, nas atividades tecnológicas, de potenciais energéticos conserváveis. Elas diferem, fundamentalmente, quanto ao método de avaliar os níveis de potenciais de eficiência que ainda podem ser alcançados.

Uma implementação baseada em uma das correntes conduz à potenciais considerados próximos da saturação tecnológica enquanto que a implementação de outra das correntes conduz à potenciais considerados ainda distantes da saturação tecnológica (SAWIN, 2003). A corrente que pressupõe níveis de eficiência alcançáveis, já próximos da saturação pode ser

considerada como sendo de *avaliação conservadora* e a que considera que os níveis alcançáveis ainda são distantes da saturação tecnológica pode ser considerada como sendo de *avaliação otimista*. Nos conceitos a seguir apresentados considera-se uma avaliação intermédia às duas, que produz um efeito prático próximo ao da avaliação conservadora.

Designando a relação entre o nível de serviço de energia adequado e o nível do vetor de energia transformado (na obtenção do nível de serviço de energia), como a constante (ou coeficiente) de serviço de energia eficiente, pode-se então escrever:

$$\text{Constante do Serviço de Energia Eficiente} = \frac{\text{Serviço de Energia Eficiente}}{\text{Vetor de Energia Convertido}}$$

ou, simplesmente:

$$CSEE = \frac{SENEF}{VEC} \quad (5.8)$$

Onde:

CSEE – Constante do serviço de energia eficiente;

SENEF – Serviço de energia eficiente;

VEC – Vetor de energia convertido.

Por outro lado, em geral todo e qualquer dispositivo que recebe energia elétrica através dos seus terminais de entrada, transformando-a em alguma outra forma de energia útil, disponível através dos seus pontos de saída, possui seu *rendimento*, expressando a relação entre estas duas formas de energia envolvidas no processo de conversão. Uma das possibilidades para expressar este rendimento, é com base nos valores das potências e perdas:

$$\text{Rendimento do Dispositivo} = \frac{\text{Potência de Saída}}{\text{Potência de Entrada}}$$

$$= \frac{\text{Potência de Entrada} - (\text{Perdas fixas} + \text{Perdas variáveis} + \text{Perdas suplementares})}{\text{Potência de Entrada}}$$

$$= \frac{\text{Potência de Saída}}{\text{Potência de Saída} + (\text{Perdas fixas} + \text{Perdas variáveis} + \text{Perdas suplementares})}$$

ou, simplesmente:

$$\begin{aligned} RE &= \frac{PS}{PE} = \frac{PE - (CL + VL + SL)}{PE} \\ &= \frac{PS}{PS + (CL + VL + SL)} \\ &= 1 - \frac{CL + VL + SL}{PE} = 1 - KD \end{aligned} \quad (5.9)$$

Onde:

RE – Rendimento do dispositivo ou elemento;

PS – Potência de saída;

PE – Potência de entrada;

KD – Constante de desperdício ou de perdas.

A expressão (5.9) tem sido a equação básica geral usada nos procedimentos clássicos de análise da operação e do dimensionamento de elementos e dispositivos em cálculos elétricos, podendo aparecer sob diferentes modificações para refletir parâmetros característicos das particularidades dos modelos desses elementos e dispositivos. Com base nas expressões (5.8) e (5.9), pode-se afirmar o seguinte:

- a) As tecnologias clássicas, sendo geralmente caracterizadas por elevados níveis de perdas e, conseqüentemente, baixos rendimentos, demandam maiores níveis de vetores de energia para prover menores quantidades de energia útil comparativamente às tecnologias baseadas na eficiência energética sob as mesmas condições de vetores de entrada; e

- b) Quanto maior for o coeficiente do serviço de energia eficiente, $CSEE$, maior será o rendimento e, conseqüentemente, maiores serão os serviços de energia obtidos a partir de relativamente menores níveis de vetores energéticos.

Com base nas afirmativas a) e b), anteriores, reconsiderando a expressão (5.5), a expressão (5.7) pode ser reescrita de modo a refletir:

1. As recomendações das leis termodinâmicas;
2. Os novos padrões tecnológicos de equipamentos orientados para a produção de serviços de energia com elevados níveis de eficiência energética;
3. As especificações de novos padrões de referência nas utilizações da eletricidade; e
4. A conduta operacional compatível com os requisitos do gerenciamento do lado da demanda e da eficiência energética.

Levando-se em conta que em cada termo, no segundo membro da equação (5.7), estão incorporados os serviços de energia finais desejados e as eficiências maximizadas (alcançáveis), adequadas aos padrões modernos das tecnologias já existentes e, sobretudo emergentes, orientadas à eficiência energética e à conservação de energia, (cenário de potencial de eficiência energética técnica), podemos reescrever a expressão (5.7) em relação a cada uso-final de uma unidade industrial específica, assim:

$$\begin{aligned}
 CF_{ind} = & [CSEE \cdot VEC]_{mot_{cA}} + [CSEE \cdot VEC]_{mot_{cc}} + [CSEE \cdot VEC]_{forno} + [CSEE \cdot VEC]_{ar\ cond} \\
 & + [CSEE \cdot VEC]_{calor} + [CSEE \cdot VEC]_{refg} + [CSEE \cdot VEC]_{ar\ comp} + [CSEE \cdot VEC]_{ilum} + \Lambda]_i \\
 & + [EDA]_{mot_{cA}} + [EDA]_{mot_{cc}} + [EDA]_{forno} + [EDA]_{ar\ cond} \\
 & + [EDA]_{calor} + [EDA]_{refg} + [EDA]_{ar\ comp} + [EDA]_{ilum} + \Lambda]_i \\
 & + [EDS]_{mot_{cA}} + [EDS]_{mot_{cc}} + [EDS]_{forno} + [EDS]_{ar\ cond} \\
 & + [EDS]_{calor} + [EDS]_{refg} + [EDS]_{ar\ comp} + [EDS]_{ilum} + \Lambda]_i \\
 & \forall i = 1, \Lambda, n \in \{CEn_EEn\}
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

Onde, i representa cada unidade industrial de um dado segmento industrial, sendo os termos, referentes a cada tipo de carga final nas unidades industriais em estudo.

Para um conjunto diversificado de segmentos industriais, uma forma genérica e compacta para expressar a equação (5.10) é:

$$CF_{\text{ind}} = \sum_{i,j=1}^{n,m} \left[[CSEE \cdot VEC]_{ij} + [EDA]_{ij} + [EDS]_{ij} \right]$$

$$\forall i = 1, \Lambda, n \text{ e } \forall j = 1, \Lambda, m \in \{CEn_EEn\} \quad (5.11)$$

Onde:

j - contador dos tipos dos serviços de energia em cada unidade industrial;

i - contador de unidades industriais de um determinado tipo de indústria;

$\{CEn_EEn\}$ - conjunto de indústrias no projeto/programa de efficientização energética.

O modelo matricial (5.11) avalia a capacidade da energia elétrica necessária para o atendimento dos serviços de energia desejados, para um condomínio industrial diversificado, observando-se à satisfação dos seguintes aspectos:

1. *No domínio técnico - econômico:*

- a) Alta eficiência energética;
- b) Gerenciamento pelo lado da demanda; e
- c) Baixas intensidades energéticas.

Sendo os objetivos deste domínio, concordantes com os padrões tecnológicos avançados e com processos de produção ajustados com o gerenciamento da carga.

2. *No domínio técnico - econômico:*

- a) Impactos ambientais percebidos; e
- b) Impactos sociais percebidos.

Sendo que os impactos ambientais e sociais são aqueles creditados aos usos da energia na produção dos correspondentes serviços de energia ou *commodities*, os objetivos deste domínio são particularmente concordantes com o desenvolvimento industrial sustentável e com a conservação de recursos.

Em resumo, a combinação simultânea dos dois conjuntos de objetivos, domínios 1) e 2) anteriores, é concordante com o planejamento integrado de recursos (PIR), um critério de planejamento que deve ser consolidado em todas as metas, tanto tecnológicas quanto sociais e ambientais, e que pode ser o teste da racionalidade técnica para um desenvolvimento sustentado.

5.2 METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

A formulação sugerida na equação (5.11), sobre o problema do potencial de energia conservável no segmento industrial para um desenvolvimento sustentável, é muito abrangente pelo fato de envolver vários tipos de serviços de energia, sendo que esses serviços são, igualmente, obtidos a partir, tanto de vários e diferentes dispositivos elétricos quanto de várias e diferentes unidades industriais. Por outro lado, o número de indústrias em estudo num determinado espaço geográfico, normalmente, também pode ser maior, tanto no que se refere ao número de unidades de uma mesma indústria quanto à diversidade dos tipos de indústrias. Neste sentido depreende-se que a formulação básica proposta, em virtude de apresentar como uma de suas características principais, um número elevado de variáveis, ele conforma um problema de grande dimensão. Decorre disso a necessidade da formulação precisar ser encaminhada através de métodos apropriados em que se viabilize a sua resolução.

Para tanto, analisando o modelo (5.11) podemos admitir algumas simplificações, nomeadamente:

- a) Desagregar dos serviços de energia, as perdas fixas da sua produção;
- b) Desagregar dos serviços de energia, as perdas variáveis da sua produção;
- c) Desagregar dos serviços de energia, as perdas suplementares e outras da sua produção; e

- d) Considerar que as perdas variáveis da produção dos serviços de energia podem apresentar um limite superior considerado ótimo, determinado pela operação ótima do dispositivo, e ainda, que esse limite representa a perda variável da operação da carga em todos os pontos (em geral, atributo não conservador na faixa de operação da maioria dos dispositivos elétricos).

Dadas essas simplificações, estabelecem-se condições que conduzem à obtenção de um problema matemático expresso através de um modelo linear. Tal expressão tem características sugestivas para um tratamento adequado de modo a ser solucionado através de algoritmos específicos a problemas de *programação linear (PL)*.

De modo a viabilizar-se o encaminhamento da equação (5.11), adequando-a aos métodos de solução de problemas de programação linear, torna-se necessário o estabelecimento da *função-objetivo (FO)* e das principais restrições relevantes ao objetivo pretendido e à formulação proposta. Para isso, é necessário que sejam definidos o critério de efetividade de custo e o adequado conjunto de *restrições* relevantes, compatíveis com a complexidade e dimensão do problema. Neste sentido, a *função-objetivo* e as *restrições* do modelo são:

Função-objetivo: A função-objetivo visa a minimização dos custos dos vetores de energia elétrica necessária ao provimento de níveis adequados dos serviços de energia nas mais expressivas utilizações finais de consumidores industriais. Esses custos dos vetores de energia incluem, conforme vem sendo referido, os tradicionais *custos técnico-econômicos* e os inovadores *custos técnico-ecológicos*.

Restrições: As restrições relevantes consideradas neste modelo são:

- 1) Restrições de atendimento dos serviços de energia;
- 2) Restrições de desperdício energético;
- 3) Restrições de disponibilidade energética;
- 4) Restrições técnico-tecnológicas;
- 5) Restrições de mercado;

- 6) Restrições econômicas;
- 7) Restrições sociais; e
- 8) Restrições ambientais.

A descrição e a interpretação de cada conjunto destas restrições é apresentada a seguir.

1. *Restrições de atendimento energético* – Estas restrições visam orientar o problema a procurar por soluções de atendimento que satisfaçam à produção requerida dos serviços energéticos ensejados pela indústria, através da operação tecnológica das cargas de uso-final e do processo produtivo com a máxima eficiência energética.
2. *Restrições do desperdício energético* – Visam que a produção dos serviços energéticos pelas cargas elétricas seja realizada atendendo-se à um teto máximo de perdas de energia, concordantes com os menores níveis possíveis de desperdício energético em cada uso-final da indústria. Esses níveis são limitados por valores superiores de desperdício energético, proporcionado pela inovação tecnológica e tecnologias emergentes disponíveis (potencial de eficiência energética técnica).
3. *Restrições técnico-tecnológicas* – Estas restrições têm como finalidade assegurar que a solução do problema envolva aquelas tecnologias de alta eficiência energética já fabricadas e disponíveis no mercado tanto em termos de *kits* quanto de componentes complementares. Este tipo de restrições procura forçar a disponibilidade e compatibilidade de novas tecnologias frente às tecnologias similares já existentes.
4. *Restrições de mercado* – As restrições de mercado têm como objetivo permitir que a solução do problema atenda também aos níveis de saturação do mercado por tecnologias de usos-finais eficientes. Por outro lado, estas restrições procuram também forçar a aumentos dos níveis de penetração de novas tecnologias com eficiência aumentada, ou seja, em outras palavras, as restrições de mercado internalizam os esforços de busca pela transformação do mercado de energia elétrica.
5. *Restrições econômicas* – Visam assegurar que a solução do problema envolva tecnologias eficientes de custo efetivo que impliquem, para um horizonte prefixado, numa remuneração atrativa dos investimentos atuais realizados em tecnologias de eficiência

energética. Estas restrições favorecem o alcance de soluções em que os benefícios proporcionados por novas tecnologias de eficiência energética sejam maiores que os custos derivados do uso continuado de tecnologias convencionais.

6. *Restrições sociais* – Estas restrições têm como objetivo assegurar que a solução do problema promova a função social, simultaneamente com a racionalidade no uso dos recursos energéticos necessários assegurando-se, porém, o desenvolvimento dos serviços de energia através de atividades tecnológicas. Procura-se, preferivelmente, que os usos tecnológicos não incidam negativamente sobre o agente social. Do mesmo modo, estas restrições podem ser entendidas como orientadoras para soluções do problema em direção à resultados que revertam os benefícios da eficiência e conservação de energia em sinergias que promovam a melhoria social, tanto através da racionalização do uso de recursos primários quanto da destinação dos recursos conservados para outras áreas sociais carecendo de investimentos.

7. *Restrições ambientais* – As restrições ambientais visam a obtenção de soluções para o problema, tal que os impactos ambientais associados à energia elétrica para a operacionalização das novas tecnologias eficientes sejam bem menores que os decorrentes do uso continuado de tecnologias convencionais. As restrições ambientais favorecem o alcance de soluções associadas a tecnologias e processos que induzam a baixos níveis de emissões degradantes e de intensidades energéticas que os dos equivalentes convencionais. Em outras palavras, estas restrições ajudam a prover um atendimento energético mais limpo.

8. *Restrições de disponibilidade* – Estas são restrições cuja finalidade é assegurar soluções da produção dos serviços de energia necessários com o desempenho adequado dos recursos de capacidade existentes nas instalações industriais. Estas restrições forçam a obtenção do equilíbrio sistêmico entre os vetores energéticos, as energias nos processos de conversão e os serviços de energia gerados, mediante uma utilização melhorada das capacidades disponíveis.

Com estas definições da função-objetivo e das correspondentes restrições, podemos formular o problema, matematicamente e de modo completo, nos seguintes termos:

1) – *Função-objetivo:*

$$\min \sum_{i,j=1}^{n,m} [[CSEE \cdot VEC]_{ij} + [EDA]_{ij} + [EDS]_{ij}] \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.12)$$

sujeito a:

2) - *Restrições de atendimento dos serviços energéticos:*

$$fue_{ij} \cdot VEC_{ij} \geq SEN_{ij} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.13)$$

3) - *Restrições de desperdício energético:*

a) para cargas individuais

$$fpe_{ij} \cdot VEC_{ij} \leq VEC_{ij}^{\text{supEE}} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.14)$$

b) para o sistema

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} fpe_{ij} \cdot VEC_{ij} \leq VEC_i^{\text{supEE}} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.15)$$

4) - *Restrições de disponibilidade energética:*

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} VEC_{ij} \leq Cap_{inst}^i \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.16)$$

5) - *Restrições técnico-tecnológicas:*

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} c_{ij} VEC_{ij} \geq C_{ij}^{\text{t-conv}} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.17)$$

6) - *Restrições de mercado:*

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} p_{ij} VEC_{ij} \geq P_{ij} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.18)$$

7) - *Restrições econômicas:*

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} t_{ij} VEC_{ij} \leq T_{ij} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.19)$$

8) - *Restrições sociais:*

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} h_{ij} VEC_{ij} \geq H_{ij} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.20)$$

9) - *Restrições ambientais:*

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} e_{ij} VEC_{ij} \leq E_{ij} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.21)$$

Onde:

$CSEE$ - Constante de serviço de energia eficiente;

VEC - Vetor de energia convertido;

SEN_{ij} – serviço de energia do tipo j da unidade industrial i .

fpe_{ij} – fator de perda de energia na carga j da indústria i ;

fue_{ij} – fator de utilização de energia na carga j da indústria i ;

VEC_{ij} - Vetor de energia convertido no uso-final j da unidade industrial i ;

VEC_{ij}^{supEE} - Limite superior eficiente do vetor de energia convertido no uso-final j da unidade industrial i ;

VEC_i^{supEE} - Limite superior eficiente do vetor de energia convertido no conjunto das utilizações da unidade industrial i .

Cap_{inst}^i - Capacidade instalada na unidade industrial i ;

c_{ij} – Coeficiente de custo unitário da tecnologia eficiente no uso-final j da unidade industrial i ;

- $C_{ij}^{t\text{-conv}}$ - Custo da tecnologia convencional no uso-final j da unidade industrial i ;
- p_{ij} - Coeficiente de custo unitário do nível de penetração no mercado da tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;
- P_{ij} - Nível de penetração de mercado alcançável (saturação) para a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;
- t_{ij} - Coeficiente da taxa de desconto unitário para a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;
- T_{ij} - Nível da taxa de desconto atrativa para a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;
- h_{ij} - Coeficiente de custo social unitário associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;
- H_{ij}^{sup} - Nível do custo social justo (disposição ao custo social) associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;
- e_{ij} - Coeficiente de custo ambiental unitário associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;
- E_{ij}^{sup} - Nível do custo ambiental justo (disposição ao custo ambiental) associado com a tecnologia de uso-final j da unidade industrial i ;
- i - Contador de unidades industriais;
- j - Contador de usos-finais energéticos;
- {CEn_EEn} - Conjunto conservação e eficiência de energia (constituído de usos-finais eletroenergéticos e de unidades industriais em estudo);
- EDA_{ij} - Valor do ambiente, equivalente ao custo econômico real, resultante da exploração dos recursos do ambiente para gerar e fornecer o vetor de energia elétrica para o uso-final j da unidade industrial i ;

EDS_{ij} – Valor social, equivalente ao custo econômico real, resultante da demanda de serviços sociais provocados ou não atendidos devido às explorações de recursos naturais para gerar e fornecer o vetor de energia elétrica para o uso-final j da unidade industrial i .

Esta formulação, conforme se depreende, tem como principais propriedades elevada complexidade e dimensionalidade. Visando atenuar dificuldades inerentes a isso, sem comprometer os objetivos principais, as restrições (5.17, 5.18 e 5.19) podem ser relaxadas sob o argumento de serem um subconjunto das restrições e variáveis técnico-econômicas. Essas restrições, além de parte delas, de certo modo continuarem na formulação do problema (através das restrições 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16), comumente têm sido o foco das abordagens tradicionais.

Nesse sentido, através da relaxação dessas variáveis e restrições se tem, como resultado, uma formulação alternativa, que denominamos de formulação reduzida. Apesar de, com isso, se reduzirem os tipos de cenários de eficiência abrangidos pela abordagem, não se afeta o caráter central e inovador da proposta, ou seja, a inclusão de variáveis e restrições de sustentabilidade das utilizações energéticas expressas, no caso, pelas variáveis e restrições das externalidades ambientais e sociais (restrições 5.20 e 5.21).

5.3 METODOLOGIA E SOLUÇÃO REDUZIDA

Conforme referido anteriormente, tanto a abordagem plena quanto a correspondente formulação, caracterizam um problema de grande dimensão e complexidade. A essas características soma-se ainda a complexidade inerente à disponibilidade dos dados requeridos para sustentar as estratégias de solução do problema. Do ponto de vista dos dados é oportuno assinalar o fato de cada um dos conjuntos das restrições daquele modelo, à luz da transformação do mercado de energia elétrica, constituir objeto de estudos e pesquisas objetivando internalizar suas variáveis e valores nos modelos de análise e avaliação de demandas energéticas dessa transformação.

Então, como forma de diminuir o grau dessa complexidade sem, contudo, se afetar o nível de abrangência do foco central da proposta, uma metodologia de solução reduzida é adotada, a

qual é apresentada a seguir. Essa metodologia reduzida resulta da relaxação de algumas restrições e variáveis da formulação original do problema e, tipicamente presentes nas formulações tradicionais. A sua relaxação também é justificável, considerando-se a problemática conhecida como *barreiras à conservação de energia*, aonde a literatura especializada (GELLINGS, 1996; SAWIN, 2003; FLORY *et al.*, 1994; MARTIN *et al.*, 2000) considera cada barreira como objeto de estudo que continua, ainda, necessitando de mais abordagens e avaliações.

Entre essas barreiras destacam-se as tecnológicas, as do comportamento de consumidores, as legal regulatórias, as do acesso à rede elétrica, as tarifárias, as distorções no conhecimento, as de insuficiência profissional, as financeiras e as barreiras de mercado frente à plenitude do problema em eficiência energética e conservação de energia.

Então, face às incertezas dessas variáveis, também determinantes dos potenciais de conservação de energia, sem perda de seu objetivo central e de sua abrangência às externalidades, o modelo proposto pode ser formulado e resolvido atendendo-se, apenas, aos seguintes conjuntos de restrições fundamentais, expressos na formulação original e plena:

1. Restrições de atendimento dos serviços energéticos;
2. Restrições de desperdício energético;
3. Restrições de disponibilidade energética;
4. Restrições sociais; e
5. Restrições ambientais.

Considerando-se a caracterização do problema e os fundamentos apresentados para a relaxação de parte de suas restrições e variáveis, o modelo matemático resultante torna-se:

1) – *Função - objetivo*:

$$\min z(i) = \min \sum_{i,j=1}^{n,m} \left[[CSEE \cdot VEC]_{ij} + [EDA]_{ij} + [EDS]_{ij} \right] \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.22)$$

Sujeito a:

2) - *Restrições de Atendimento dos Serviços de Energia:*

$$(fue_{ij} \cdot VEC_{ij}) \geq SEN_{ij} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.23)$$

3) - *Restrições de Desperdício de Energia:*

$$(fep_{ij} \cdot VEC_{ij}) \leq VEC_{ij}^{sup EE} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.24)$$

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} fpe_{ij} \cdot VEC_{ij} \leq VEC_i^{sup EE} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.25)$$

4) - *Restrições de Disponibilidade Energética:*

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} VEC_{ij} \leq Cap_{inst}^i \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.26)$$

5) - *Restrições Sociais:*

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} h_{ij} VEC_{ij} \geq H_{ij}^{sup} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.27)$$

6) - *Restrições Ambientais:*

$$\sum_{i,j=1}^{n,m} e_{ij} VEC_{ij} \leq E_{ij}^{sup} \quad \forall i, j \in \{CEn_EEn\} \quad (5.28)$$

As restrições, variáveis, coeficientes e recursos deste modelo reduzido mantêm o mesmo significado e papel quanto na formulação do modelo pleno, previamente discutido na seção 5.2. Conseqüentemente, podemos concluir que o problema de conservação de energia no segmento industrial para o desenvolvimento sustentado é definido e estabelecido pela função-objetivo, conforme a expressão (5.22) e pelo conjunto de restrições, de acordo com as inequações (5.23) – (5.24) – (5.25) – (5.26) - (5.27) e (5.28).

A fundamentação das variáveis e coeficientes da função-objetivo deste modelo é apresentada a seguir.

1 - Termos da função - objetivo do tipo $[CSEE \times VEC]$

Estes termos representam os custos decorrentes, meramente dos eventos técnico - econômicos da produção tecnológica dos serviços de energia através da operacionalização de tecnologias e processos que, para isso, consomem energia elétrica. Portanto, podem ser considerados como fazendo parte dos custos técnicos do modelo.

Entre as tecnologias e processos que induzem a estes custos concorrem juntas, tanto as tecnologias e processos convencionais quanto de eficiência energética elevada, proporcionada pelas tecnologias emergentes e inovação tecnológica.

A produção decorrente da operação que, por sua vez, induz esse tipo de custo, pode ser encarada como um evento técnico - econômico (EVEC). Nesse sentido, considerando as características técnicas, tecnológicas e de inovação tecnológica podemos propor, alternativamente, a seguinte equação, como expressão de um custo para a valorização econômica da produção tecnológica dos serviços de energia.

$$EVEC = CSEE \cdot VEC = TCEPS \cdot TCESE \cdot CUTE \cdot SEN \quad (5.29)$$

Onde:

EVEC - Valor econômico da produção tecnológica dos serviços de energia, R\$;

CUTE - Custo unitário equivalente da tarifa de energia, (R\$/BTU);

TCEPS - Taxa de conversão do vetor energia primária/vetor de energia elétrica ou secundária, (BTU/kWh);

TCESE - Taxa de conversão do vetor energia elétrica/serviço de energia, kWh/unidade(SEN). (unidade(SEN) = unidade correspondente ao serviço de energia);

SEN - Serviço de energia desejado, unidade(SEN).

Depreende-se, portanto, que esse custo técnico ou evento técnico-econômico é, finalmente, função do nível desejado do serviço de energia, o qual pode ser obtido através das

particularidades específicas dos tipos das fontes de energia e das tecnologias finais utilizadas na indústria.

2 – Termos da função – objetivo do tipo [EDA]

Esses termos, na função – objetivo, representam os custos das externalidades ambientais induzidas pela produção tecnológica dos serviços de energia da indústria, através de cargas, que para a produção desses serviços consomem energia elétrica. Assim, esses termos podem ser interpretados como a valorização econômica equivalente dos danos ambientais, devidos às utilizações tecnológicas da energia elétrica. Portanto, eles compõem as variáveis técnico - ecológicas ambientais deste modelo de engenharia de uso – final.

No contexto das externalidades ambientais, considerando a estrutura tecnológica, as características técnicas, a inovação tecnológica e a natureza dos recursos primários da cadeia de conversão eletroenergética até a produção do serviço de energia, podemos propor a equação (5.30), como expressão para a valorização econômica dos custos das externalidades induzidas pela produção tecnológica dos serviços de energia.

$$EDA = CURE \cdot TEPO \cdot TCEPS \cdot TCESE \cdot SEN \quad (5.30)$$

Onde:

EDA - Valor econômico equivalente do dano ambiental, R\$;

CURE - Custo unitário de redução das emissões poluentes, (R\$/ton(poluente));

TEPO - Taxa de emissão de poluentes pela tecnologia de geração ton(pol)/BTU;

TCEPS - Taxa de conversão do vetor energia primária/vetor de energia elétrica ou energia secundária, (BTU/kWh);

TCESE – Taxa de conversão do vetor energia elétrica/serviço de energia, kWh/unidade(SEN); (unidade(SEN) = unidade correspondente ao serviço de energia).

SEN - Quantidade do serviço de energia, unidade(SEN).

Percebe-se a partir da função multivariável, conforme a Equação 30, que a valorização econômica das externalidades ambientais causadas pela produção tecnológica dos serviços de energia industriais depende da estrutura tecnológica da oferta e da utilização da energia, da natureza da fonte primária de energia e, finalmente, é determinada pelo nível do serviço de energia desejado.

Ainda no âmbito dos custos das externalidades ambientais em energia elétrica, TOLMASQUIM *et al.* (2000) sugerem que, inicialmente, o dano causado pelas emissões de CO₂ provenientes de cada categoria de termelétrica seja calculado através do produto da taxa de emissão de CO₂ para cada categoria de empreendimento *n* (quantidade de poluentes por ano), durante o período de vida útil destas, pelo valor adotado de US\$ 20 por tonelada de carbono emitido. Nesse caso aplica-se, simplesmente, a seguinte equação de custeio:

$$VD_{CO_2n} = US\$ 20/tC \cdot \sum E_{CO_2n} \quad (5.31)$$

Onde:

VD_{CO_2n} – valor do dano causado face ao aquecimento global provocado pelas emissões de dióxido de carbono provenientes de cada categoria de empreendimento (em bases monetárias);

E_{CO_2n} – Emissões totais de dióxido de carbono de cada categoria de empreendimento (*n*) durante a sua vida útil;

tC – toneladas de carbono.

Por sua vez, no mesmo contexto, sobre os custos de redução das emissões dos gases do efeito estufa, em “The Prototype Carbon Fund (PCF)”, o Banco Mundial apresenta o seguinte quadro (Quadro 5) sobre as estimativas e custos em negócios das emissões no âmbito dos mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL) e de implementação conjunta (MIC) do Protocolo de *Kyoto* (GUIMARÃES, 2000).

Estimativas dos custos de redução de emissões sem trocas	\$67 - \$584/tC
Ponto de equilíbrio nos preços	\$20 - \$50/tC
Estimativa do valor global a ser negociado	\$14 - \$65 bi/ano
Estimativa realista do valor global a ser negociado	\$10 - \$20 bi/ano
Preços competitivos para reduções de emissões de qualidade	\$20/ tC
Preço-meta	\$4 - \$5/tC
Quantidades a serem trocadas (cada ano, entre 2008/2012)	0,7 – 1,3 mi-tC/ano

Quadro 5 – Estimativas dos Custos de Redução das Emissões e dos Negócios das Emissões de Dióxido de Carbono (GUIMARÃES, 2000).

3 – Termos da função – objetivo do tipo [EDS]

Os termos *EDS*, na função – objetivo, exprimem os custos das externalidades sociais induzidos pela necessidade do consumo de energia elétrica imposto pelas tecnologias de uso - final na produção dos serviços de energia na indústria. Estas variáveis são, então, do contexto das externalidades sociais do consumo da energia elétrica, e expressam o valor econômico equivalente do dano social induzido pelas utilizações da energia elétrica na indústria.

A energia elétrica, disponível na carga de utilização final para conversão em serviço de energia, depende da estrutura tecnológica da oferta, da utilização e da natureza da energia primária. Todavia, TOLMASQUIM *et al.* (2000) sugerem, ademais, que o setor elétrico atribua, também, valor ao dano causado à saúde humana por empreendimentos termoelétricos com base na Equação 5.32, seguinte:

$$VDSH_{s,n,p} = VM_n \cdot \sum (\Delta S_{s \text{ SO}_2, n \text{ (mortes)}} + \Delta S_{s \text{ PM}, n \text{ (mortes)}}) + VMB_n \cdot \sum (\Delta S_{s \text{ SO}_2, n \text{ (doenças)}} + \Delta S_{s \text{ PM}, n \text{ (doenças)}}) \quad (5.32)$$

Onde:

$VDSH_{s,n,p}$ – Valor total do dano causado à saúde humana durante a vida útil de um empreendimento (n) numa área de dispersão atmosférica (s) com uma densidade demográfica (p) (em bases monetárias).

VM_n – Valor atribuído à vida humana (em bases monetárias).

VMB_n – Valor atribuído à morbidade (em bases monetárias).

$\Delta S_{s,i,n}(\text{doenças})$ – Doenças provocadas pela variação na concentração do poluente (i) sobre a população residente na área de influência da dispersão (s) de uma categoria de empreendimento termelétrico (n) (em bases monetárias).

$\Delta S_{s,i,n}(\text{mortes})$ – Mortes provocadas pela variação na concentração do poluente (i) sobre a população residente na área de influência da dispersão (s) de uma categoria de empreendimento termelétrico (n) (em bases monetárias).

Considerando, então, os aspectos tecnológicos da oferta e utilização da energia elétrica, a natureza dos recursos primários dessa energia mais os impactos sociais, sob a forma de custos à saúde induzidos pela necessidade do consumo de energia para a produção dos serviços energéticos na indústria, um modelo para a determinação do valor econômico equivalente do dano social é conforme a expressão (5.33), seguinte:

$$\begin{aligned} EDS &= CUVM \cdot TEPO \cdot TCESE \cdot TCEPS \cdot SEN + CUVMB \cdot TEPO \cdot TCESE \cdot TCEPS \cdot SEN \\ &= TEPO \cdot TCESE \cdot TCEPS \cdot SEN(CUVM + CUVMB) \end{aligned} \quad (5.33)$$

Onde:

EDS - valor econômico equivalente ao dano social, R\$;

$CUVM$ – Valor da vida humana atribuível à poluição R\$/ton(poluente);

$CUVMB$ – Valor da morbidade humana atribuível à poluição R\$/ton(poluente);

$TEPO$ – Taxa de emissão do poluente pela tecnologia de geração, ton(pol)/BTU;

$TCESE$ - taxa de conversão do vetor de energia elétrica/serviço de energia, kWh/unidade (SEN);

TCEPS - taxa de conversão do vetor energia primária/vetor de energia elétrica ou energia secundária, BTU/kWh.

SEN - quantidade do serviço de energia, unidade (SEN).

Constata-se assim, que a valorização econômica do dano social depende das seguintes variáveis:

1) Variáveis com impacto na mortalidade humana: – Valor da vida humana atribuível à poluição (*CUVM*); Taxa de emissão de determinado poluente nocivo pela tecnologia de geração (*TEPO*); Taxa de conversão do vetor de energia elétrica/serviço de energia (*TCESE*); Taxa de conversão do vetor energia primária/vetor de energia elétrica ou energia secundária (*TCEPS*); e Quantidade do serviço de energia (*SEN*).

2) Variáveis com impacto na morbidade humana: - Valor da morbidade atribuível à poluição (*CUVMB*); Taxa de emissão de determinado poluente nocivo pela tecnologia de geração (*TEPO*); Taxa de conversão do vetor de energia elétrica/serviço de energia (*TCESE*); Taxa de conversão do vetor energia primária/vetor de energia elétrica ou energia secundária (*TCEPS*); e Quantidade do serviço de energia (*SEN*).

Compatível com as variáveis da expressão (5.33), o Quadro 6 fornece alguns dados referentes aos custos incorridos nas admissões hospitalares resultantes de doenças respiratórias no Brasil. Com relação aos dados desse quadro, TOLMASQUIM *et al.* (2000) são cautelosos, chamando atenção para que as estimativas de gastos com as internações realizadas pelo Sistema Único de Saúde brasileiro (SUS), devidas à poluição atmosférica, sejam vistas como tendo um valor baixo (estimativas muito conservadoras) em decorrência, principalmente, dos baixos e defasados valores pagos pelo SUS para essas internações.

MÉDIA DE ESTADIA HOSPITALAR	CUSTO MÉDIO DE ESTADIA	TAXA DE PERDA DE SALÁRIO DIÁRIO	CUSTO DE CADA ADMISSÃO HOSPITALAR POR DOENÇA RESPIRATÓRIA
14,8 dias	R\$ 263 por internação	R\$ 40 por dia de atividade restrita	R\$ 855,00 = (263,00 + 14,8 x 40)

Quadro 6 – Dados dos Custos da Admissão Hospitalar Devidos às Doenças Respiratórias (SALA, 1999 *apud* TOLMASQUIM *et al.*, 2000).

Nos Quadros 7, 8, 9, 10 e 11 são mostrados dados sobre variações de doenças e mortes decorrentes das variações nas quantidades das emissões dos diferentes poluentes associados também à produção de energia elétrica.

Estudo/Cidade, Região, País, Data	Eventos/pessoas)/(µg/m ³)		
	Limite superior	Estimativa central	Limite inferior
SCHWARTZ and MARCUS. London, U.K. Série temporal 1958-1972 (adaptado de OSTRO).	3,1.10 ⁻⁶	3,1.10 ⁻⁶	2,9.10 ⁻⁶
PAGIANNAKOS and PARKER. Ontario, Canada. Série temporal 1976 – 82 (adaptado de OSTRO).	1,6.10 ⁻⁵	9,8.10 ⁻⁶	4,9.10 ⁻⁶
SCHWARTZ and DOCKERY. Steubenville, Ohio. Séries temporais.	1,0.10 ⁻⁵	6,0.10 ⁻⁶	4,0.10 ⁻⁶
SCHWARTZ. Birmingham AL. Série temporal.	1,3.10 ⁻⁵	1,1.10 ⁻⁵	1,0.10 ⁻⁵
DOCKERY et al. St. Louis. Série temporal.	2,3.10 ⁻⁵	1,6.10 ⁻⁵	1,4.10 ⁻⁵
POPE et al. Utah Valley, UT.	1,8.10 ⁻⁵	1,6.10 ⁻⁵	1,4.10 ⁻⁵
SCHWARTZ and DOCKERY. Philadelphia PA. Série temporal.	1,5.10 ⁻⁵	1,3.10 ⁻⁵	1,0.10 ⁻⁵
FAIRLEY. Santa Clara County CA. Série temporal 1980 – 86 (adaptada de OSTRO).	1,6.10 ⁻⁵	1,2.10 ⁻⁵	7,0.10 ⁻⁶
OZKAYNAK and THURSTON. 100 met. Áreas nos EUA. Estudos cruzados, 1980. (adaptada de OSTRO).	2,2.10 ⁻⁵	1,6.10 ⁻⁵	1,0.10 ⁻⁵
ECO Northwest. Canadá (in ROSA & SCHECHTMAN, 1996) – média de 1987 a 1993.	-	1,0.10 ⁻⁶	-
POPE et al. 151 cidades dos EUA, 1996.	6,3.10 ⁻⁵	4,2.10 ⁻⁵	2,3.10 ⁻⁵
OSTRO et al. Chile, 1996 (assume que 0,55 das partículas totais em suspensão são PM10).	2,2.10 ⁻⁵	1,1.10 ⁻⁵	0,6.10 ⁻⁵
MENDES, ANA. São Paulo, 1983 a 1991.	-	1,6.10 ⁻⁵	-
SALA, 1999 (São Paulo).	1,56.10 ⁻⁵	1,2.10 ⁻⁵	0,66.10 ⁻⁵

Quadro 7 – Estudos e Dados Referentes à Variação da Mortalidade com a Variação de 1 µg/m³ de PM10 (TOLMASQUIM *et al.*, 2000).

Estudo/ Data	Doença	(Evento/pessoa)/(µg/m ³)		
		Limite superior	Estimativa central	Limite inferior
OSTRO, 1994	Bronquite crônica em adultos.	9.3.10 ⁻⁶	6.1.10 ⁻⁵	3.0.10 ⁻⁵
	Sintomas respiratórios diversos (tosse, desconforto na garganta, irritação nos olhos).	0,2555	0,1679	0,0803
	Visitas de emergência.	3,54.10 ⁻⁴	2,373.10 ⁻⁴	1,17.10 ⁻⁴
	Ataques de asma.	0,1971	0,0584	0,3285
	Dias de trabalho parados.	0,09125	0,0584	0,0292
	Admissão em hospital por problemas respiratórios.	1,75	1,204	6,57
	Bronquite aguda em crianças.	0,0024	0,0016	0,0008
ECO Northwest. 1987 e 1993.	Bronquite.	-	3,6.10 ⁻⁴	-
	Doenças agudas.	-	7,0.10 ⁻⁶	-
SALA, 1999 (São Paulo)	Admissão em hospital por doenças respiratórias.	-	2,45.10 ⁻⁵	-
	Dias de atividades restritas por doenças respiratórias	0.09	0,057	0,04

Quadro 8 – Estudos e Dados Referentes à Ocorrência de Doenças com a Variação de 1 µg/m³ de PM10 (TOLMASQUIM *et al.*, 2000).

Estudo/ Data	Evento	(Evento/pessoa)/(µg/m ³)		
		Limite superior	Estimativa central	Limite inferior
HATZAKIS et al. Série temporal 1972 – 82. Atenas.	Mortalidade.	$1,32 \cdot 10^{-5}$	$5,23 \cdot 10^{-6}$	$2,18 \cdot 10^{-6}$
SCHWARTZ et al. Série temporal. Harvard.	Sintomas respiratórios /1000 crianças /dia.	0,026	0,018	0,010
SCHWARTZ et al. Série temporal. Los Angeles.	Desconforto na garganta /adulto /ano.	0,015	0,010	0,005
ECO Northwest. 1987 e 1993.	Pneumonia.	-	$5,0 \cdot 10^{-4}$	-

Quadro 9 – Estudos e Dados Referentes à Ocorrência de Mortes e Doenças com a Variação de 1 µg/m³ na Concentração de SO₂ (TOLMASQUIM *et al.*, 2000).

Estudo/ Data	Evento	(Evento/pessoa)/(µg/m ³)		
		Limite superior	Estimativa central	Limite inferior
KINNEY and OZKAYNAK. - 1991. 1992.	Mortalidade.	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,2045 \cdot 10^{-3}$	0
THURSTON et al. – 1992.	Admissões em hospital por problemas respiratórios.	$19 \cdot 10^{-6}$	$13,7 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$
WHITTMORE and KORN (1980). STOCK et al. (1988).	Ataques de asma.	0,520	0,188	0,106
OSTRO and ROTHSCHILD (1989).	Dias de trabalho parados.	$7,4 \cdot 10^{-2}$	$4,67 \cdot 10^{-2}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$
KRUPNICK et al. (1990)	Sintomas respiratórios agudos.	0,204	0,137	0,07

Quadro 10 – Estudos e Dados Referentes à Ocorrência de Mortes e Doenças com a Elevação da Concentração de Ozônio (TOLMASQUIM *et al.*, 2000).

ESTUDOS	PAÍS	VALOR DA VIDA (USD 1989)
ARNOULD-NICHOLS (1983)	EUA	870.000
DILLINHARN (1979)	EUA	550.000
OLSON (1981)	EUA	9.680.000
SMITH, R. (1974)	EUA	10.220.000
SMITH, R. (1975)	EUA	4.500.000
THALER ROSEN (1976)	EUA	780.000
VISCUSI (1978)	EUA	3.950.000 – 5.320.000
VISCUSI (1981)	EUA	9.540.000 – 14.990.000
MARIN-PSACHAROPOULOS (1982)	UK	4.090.000
VEIJANOVSKI (1980)	UK	8.450.000 – 11.440.000
NEEDLERMAN (1979)	UK	320.000 – 1.790.000

Quadro 11 – Valor Estatístico da Vida Baseado em Estudos de Risco Ocupacional (SALA; 1999 *apud* TOLMASQUIM *et al.*, 2000).

No Apêndice 2 são mostrados dados adicionais sobre poluentes, morbidade, mortalidade e custos que podem ser relacionados com as explorações da energia elétrica e, por isso, também contextualizados nas avaliações dos valores econômicos equivalentes aos danos à saúde, induzidos pelos aumentos das intensidades energéticas nos usos - finais da energia elétrica.

A solução proporcionada por este modelo permite ao analista/decisor pesquisar, através da manipulação dos dados e resultados do modelo, em cada iteração, a obtenção progressiva da melhora de *tradeoffs* numa determinada indústria. Essas melhorias em *tradeoffs* podem ser alcançadas mediante uma intervenção nos seguintes âmbitos:

- (i) Metas em eficiências ou custos de conversão dos vetores energéticos necessários à produção dos serviços de energia através de tecnologias industriais apropriadas;
- (ii) Capacidade energética instalada na indústria;
- (iii) Metas de desperdício energético na produção dos serviços de energia da indústria;
- (iv) Metas de degradação social permitida na produção dos serviços de energia; e
- (v) Metas de degradação ambiental permitida na produção dos serviços de energia da unidade industrial.

Esses *tradeoffs* manifestam-se sob a forma de impactos diretos nos recursos, custos e benefícios associados à decisão tomada, contemplando simultaneamente, os investimentos em tecnologia e em conservação, e os investimentos na utilização sustentável dos recursos do ambiente e da sociedade através da minimização de seus respectivos custos. Destaque-se o fato de a inspeção para a obtenção de determinados *tradeoffs* ser versátil, podendo ser plena - abrangendo, onde aplicável, a todo o problema - ou ser, simplesmente restrita - abrangendo: (i) - a eficiência de um tipo ou de todo o conjunto dos serviços energéticos produzidos através de tecnologias; (ii) - a eficiência do manejo ambientalmente correto das energias primárias necessárias ao provimento da eletricidade, supridora dos serviços de energia; e (iii) - a eficiência do manejo socialmente correto das energias envolvidas na produção dos serviços de energia.

O procedimento para isso é baseado em técnicas de análise de sensibilidade entre: (i) - a minimização de custos totais necessários ao provimento de todos os serviços de energia, incluindo-se nesses custos, os custos ambientais e os custos sociais; (ii) - a capacidade instalada existente para o atendimento; (iii) - o limite superior eficiente dos vetores energéticos permitidos para a produção dos serviços de energia; (iv) - o limite superior permitido para o nível de degradação social associado à produção dos serviços de energia através de tecnologias industriais; (v) - o limite superior permitido para o nível de degradação ambiental associado à produção dos serviços de energia através de tecnologias industriais.

A operacionalização dessas inspeções é possibilitada através dos procedimentos matemáticos, a seguir mostrados e incorporados no pacote de otimização (fazendo parte dele) da metodologia de solução.

- *Inspeção pela melhora das eficiências energéticas da tecnologia, do manejo ambiental e do manejo social:*

$$ITER(K+1) \rightarrow (\forall VEC(i,j))_K = 0 \rightarrow \left[\frac{\partial(z(i))'}{\partial(CSEE(i,j))} \right]_K \quad \therefore [VEC(i,j) \neq 0 \in z(i)]_{k+1} \quad (5.34)$$

- *Inspeção pela melhora do nível de atendimento e desperdício energético permitido na produção dos serviços de energia da indústria:*

$$ITER(K+1) \rightarrow (\forall FOLGA(VEC_{(i,j)}^{\sup EE}))_K \neq 0 \rightarrow \left[\frac{\partial(z(i))'}{\partial(VEC_{(i,j)}^{\sup EE})} \right]_K \quad \therefore [FOLGA(VEC_{(i,j)}^{\sup EE}) = 0]_{k+1} \quad (5.35)$$

- *Inspeção pela melhora do nível de eficiência da utilização da capacidade energética instalada para a produção dos serviços de energia da indústria:*

$$ITER(K+1) \rightarrow (\forall FOLGA(Cap_{inst}^i))_K \neq 0 \rightarrow \left[\frac{\partial(z(i))'}{\partial(Cap_{inst}^i)} \right]_K \quad \therefore [FOLGA(Cap_{inst}^i) = 0]_{k+1} \quad (5.36)$$

- *Inspeção pela melhora do nível de eficiência permitido no manejo ambientalmente correto da produção dos serviços de energia da indústria:*

$$ITER(K+1) \rightarrow (\forall FOLGA(H_{(ij)}^{\sup}))_K \neq 0 \rightarrow \left[\frac{\partial(z(i))'}{\partial(H_{(ij)}^{\sup})} \right]_K \quad \therefore [FOLGA(H_{(ij)}^{\sup}) = 0]_{k+1} \quad (5.37)$$

- *Inspeção pela melhora do nível de eficiência permitido no manejo socialmente correto da produção dos serviços de energia da indústria:*

$$ITER(K+1) \rightarrow (\forall FOLGA(E_{(ij)}^{\sup}))_K \neq 0 \rightarrow \left[\frac{\partial(z(i))'}{\partial(E_{(ij)}^{\sup})} \right]_K \quad \therefore (FOLGA(E_{(ij)}^{\sup}))_{k+1} = 0 \quad (5.38)$$

- *Inspeção pela melhora do custo total dos vetores energéticos através da melhora nos limites superiores eficientes de desperdício energético:*

$$ITER(K+1) \rightarrow (\forall VEC_{(i,j)}^{\sup EE})_K \rightarrow \left[\frac{\partial(z(i))'}{\partial(VEC_{(i,j)}^{\sup EE})} \right]_K \quad \therefore z(i)_{k+1} = z(i)_k - (\ddot{A}z_i^{\sup int})_k \quad (5.39)$$

- *Inspeção pela melhora do custo total dos vetores energéticos através da melhora nos limites superiores eficientes da capacidade energética instalada da indústria:*

$$ITER(K+1) \rightarrow (\forall VEC_{(i)}^{\sup EE(ind)})_K \rightarrow \left[\frac{\partial(z(i))'}{\partial(VEC_{(i)}^{\sup EE(ind)})} \right]_K \quad \therefore z(i)_{k+1} = z(i)_k - (\ddot{A}z_i^{\sup ind})_k \quad (5.40)$$

- *Inspeção pela melhora do custo total dos vetores energéticos através da melhora nos limites superiores da degradação socialmente correta das utilizações finais da energia:*

$$ITER(K+1) \rightarrow (\forall H_{(ij)}^{\sup})_K \rightarrow \left[\frac{\partial(z(i))'}{\partial(H_{(ij)}^{\sup})} \right]_K \quad \therefore z(i)_{k+1} = z(i)_k - (\Delta z_{(ij)}^{\sup int})_k \quad (5.41)$$

- *Inspeção pela melhora do custo total dos vetores energéticos através da melhora nos limites superiores da degradação ambientalmente correta das utilizações finais da energia:*

$$ITER(K+1) \rightarrow (\forall E_{(ij)}^{\sup})_K \rightarrow \left[\frac{\partial(z(i))'}{\partial(E_{(ij)}^{\sup})} \right]_K \quad \therefore z(i)_{k+1} = z(i)_k - (\Delta z_{(ij)}^{\sup ind})_k \quad (5.42)$$

5.4 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O modelo do problema é resolvido, essencialmente, através de um algoritmo de otimização linear que considera a função-objetivo, definida e estabelecida pela expressão (5.22) e pelo conjunto de restrições, definidas e estabelecidas pelas inequações (5.23) – (5.24) – (5.25) – (5.26) – (5.27) e (5.28).

A implementação computacional do modelo do problema de conservação de energia no segmento industrial para o desenvolvimento sustentado, em vistas à sua solução, obedece ao fluxograma apresentado na Figura 34. As rotinas dos algoritmos de otimização fazem parte do pacote computacional LINDO for *Windows* (LINDO.EXE/PC 6.1, 2000).

A implementação é realizada, na seqüência, para dois casos, envolvendo: (i) Um estudo de caso didático, que além dos resultados da implementação mostra, detalhadamente, a determinação da função – objetivo, restrições e recursos do modelo matemático; e (ii) finalmente, outro estudo de caso real para efeito de validação da metodologia.

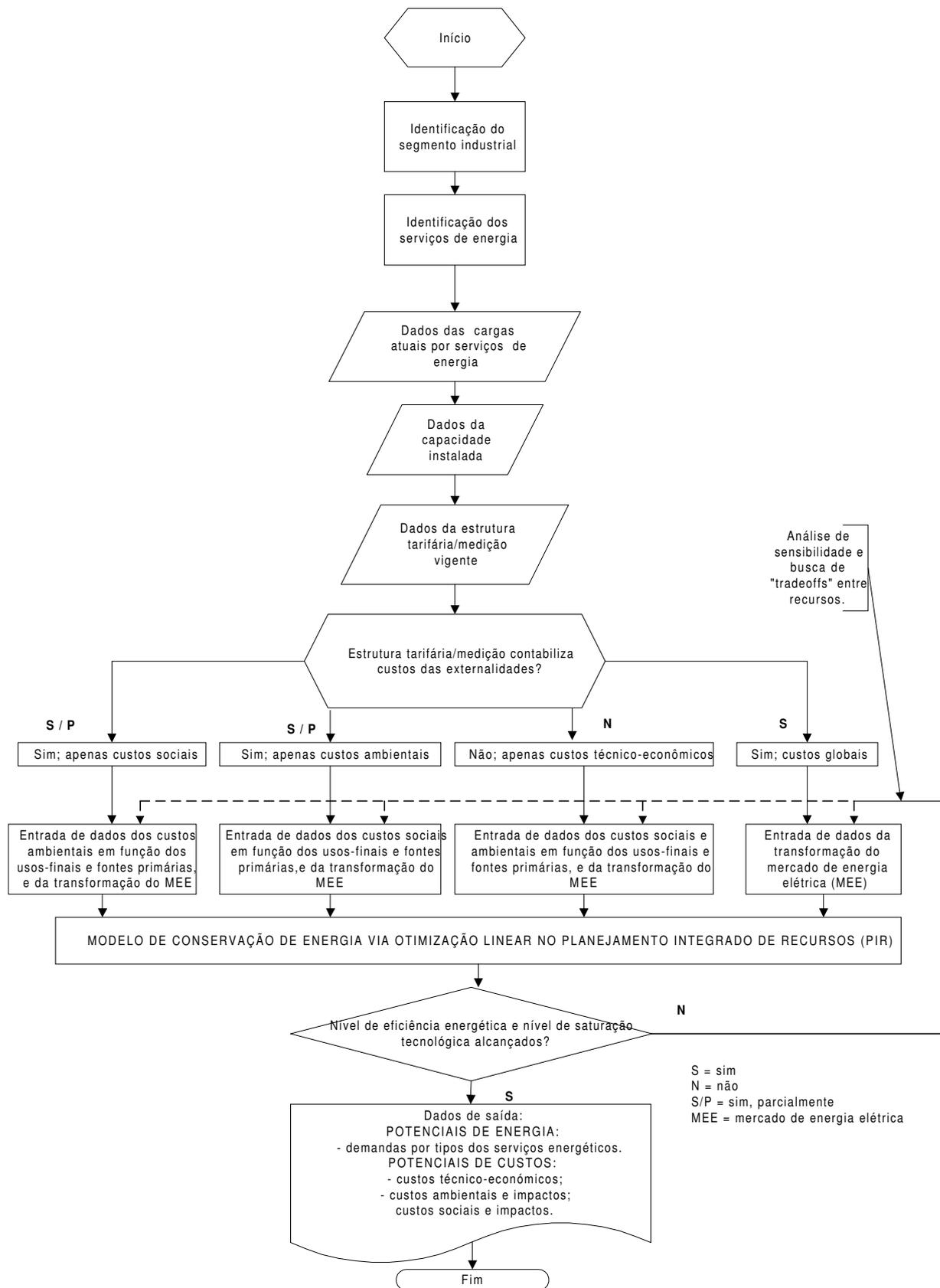


Figura 34 – Fluxograma da Metodologia de Solução do Problema do Potencial de Conservação de Energia no Segmento Industrial para o Desenvolvimento Sustentado.

5.5 ESTUDO DE CASO

A conceituação teórica, a formulação matemática, a metodologia de solução e a implementação computacional são materializadas nesta seção. Para tanto são abordados dois casos, sendo um estudo de caso, representando um sistema exemplo didático, de pequeno porte, para efeito de demonstração e outro, um sistema real de porte considerável, para efeito de validação.

No exemplo didático são considerados dois tipos de serviços de energia industriais, tipicamente eletro-intensivos. Já, no sistema real é considerada uma indústria de porte considerável, aonde são desenvolvidos os mais diversos tipos de serviços de energia industriais, buscando-se com isso, aproximar a implementação para o campo de aplicação realista.

5.5.1 Estudo de Caso: Exemplo Didático

Descrição do sistema didático: O sistema elétrico didático de uma unidade industrial do ramo siderúrgico, tipicamente eletro-intensivo, apresenta uma configuração conforme a Figura 35 e dados da Tabela 6.

A indústria é suprida regularmente, através de uma rede elétrica da concessionária de energia, mediante os termos contratuais de uma modalidade tarifária específica podendo, em condições particulares, ser atendida parcialmente, através de uma unidade de geração própria.

A concessionária de energia é parte integrante de um sistema interligado hidrotérmico, sendo que a região própria da concessionária caracteriza-se por uma geração predominantemente térmica.

A metodologia proposta para o potencial de conservação de energia para o desenvolvimento sustentado é aplicada para avaliar/apurar os custos e os níveis de demanda e energia envolvidos, no escopo da sustentabilidade associada às utilizações da energia elétrica na produção de serviços energéticos siderúrgicos. O objetivo visado é a análise compreensiva da

demanda, do consumo de energia e apoio à tomada de decisão para a implantação de medidas de eficiência e conservação de energia nas instalações consumidoras.

A avaliação decorre da necessidade da gerência da indústria dispor de dados para a compreensão analítica de suas utilizações, visando à tomada de decisões para intervenções no gerenciamento de investimentos e de operações com vistas à redução das intensidades energéticas atuais. A gerência entende que as intensidades energéticas ótimas nas operações de sua indústria devem ser aquelas que permitem a produção planejada da indústria, ao mínimo custo, tanto da energia elétrica quanto dos impactos ambientais e sociais derivados dessa energia elétrica. Ou seja, para a empresa - teste, em análise, não há barreiras quanto à percepção e aceitação de que as suas atividades industriais se devem ajustar a uma exploração tecnológica que objetive além da minimização apenas dos custos técnicos em energia elétrica, a minimização também dos custos das externalidades induzidas.

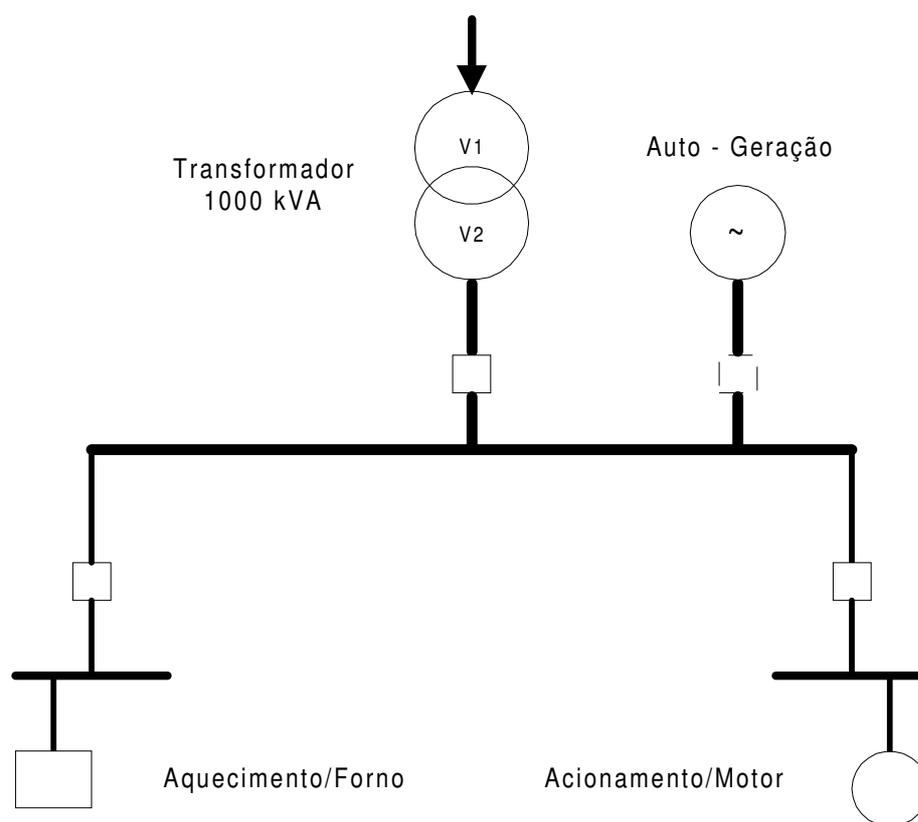


Figura 35 – Exemplo Didático de um Sistema Elétrico de uma Indústria Siderúrgica.

Tipo de serviço de energia	Unidade de medida	Nível de serviço	Tipo de carga
Aquecimento/calor.	t ³	100	Forno elétrico
Força motriz	kW	1500	Motor elétrico

³ tonelada de aço produzido, como serviço de energia do forno.

Tabela 6 – Dados das Cargas do Sistema Industrial Didático.

Considerando o sistema didático (Figura 35) e os correspondentes dados (Tabela 6), determinam-se os valores dos coeficientes e recursos a serem inseridos no modelo matemático (expressões (5.22) – (5.23) – (5.24) – (5.25) – (5.26) – (5.27) e (5.28)), conforme o seguinte:

} Custos técnicos da produção tecnológica dos serviços de energia, (*EVEC*), de acordo com a Equação (5.29), a seguir reescrita:

$$EVEC = CSEE \cdot VEC = TCEPS \cdot TCESE \cdot CUTE \cdot SEN$$

Sendo os valores dos termos da equação, conforme a Tabela 7, seguinte.

	TIPO DE SERVIÇO DE ENERGIA			
	AQUECIMENTO		FORÇA MOTRIZ	
	Variável: SEN_{Aqui}		Variável: SEN_{Fm}	
	Tecnologia EEn (SEN_{Aqui}) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. (SEN_{Aqui}) (j = numérico)	Tecnologia EEn (SEN_{Fmi}) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. (SEN_{Fmj}) (j = numérico)
<i>TCEPS</i> (BTU/kWh-EE)	10.342	10.342	10.342	10.342
<i>TCESE</i> (kWh-EE/unid-SE)	30 kW/ton	206	1,05	1,109
<i>CUTE</i> (R\$/BTU)	0,0000324	0,0000324	0,0000324	0,0000324
<i>EVEC</i> (R\$/unid-SE)	10,052	69,027	0,351	0,372

Unid-SE = unidade do serviço de energia

Tabela 7 – Dados dos Custos *EVEC* da Função – Objetivo.

} Custos técnicos equivalentes das externalidades ambientais da produção tecnológica dos serviços de energia, (*EDA*), conforme a Equação (5.30), a seguir reescrita:

$$EDA = CURE \cdot TEPO \cdot TCEPS \cdot TCESE \cdot SEN$$

Sendo os valores dos termos da equação, conforme a Tabela 8, seguinte.

	TIPO DE SERVIÇO DE ENERGIA			
	AQUECIMENTO		FORÇA MOTRIZ	
	Variável: $SEN_{A_{qu}}$		Variável: SEN_{F_m}	
	Tecnologia EEn ($SEN_{A_{qui}}$) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. ($SEN_{A_{quj}}$) (j = numérico)	Tecnologia EEn ($SEN_{F_{mi}}$) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. ($SEN_{F_{mj}}$) (j = numérico)
<i>CURE</i> (R\$/tCO ₂)	60	60	60	60
<i>TEPO</i> (tCO ₂ /BTU)	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$
<i>TCEPS</i> (BTU/kWh)	10.342	10.342	10.342	10.342
<i>TCESE</i> (kWh-EE/unid-SE)	30	206	1,05	1,109
<i>EDA</i> (R\$/unid-SE)	0,670	4,603	0,0235	0,0248

tCO₂ – tonelada de CO₂Tabela 8 – Dados dos Custos *EDA* da Função – Objetivo.

)} Custos técnicos equivalentes das externalidades sociais da produção tecnológica dos serviços de energia, (*EDS*), conforme a Equação (5.33), a seguir reescrita:

$$EDS = CUVM \cdot TEPO \cdot TCESE \cdot TCEPS \cdot SEN + CUVMB \cdot TEPO \cdot TCESE \cdot TCEPS \cdot SEN \\ = TEPO \cdot TCESE \cdot TCEPS \cdot SEN(CUVM + CUVMB)$$

Sendo os valores dos termos da equação, conforme a Tabela 9, seguinte.

	TIPO DE SERVIÇO DE ENERGIA			
	AQUECIMENTO		FORÇA MOTRIZ	
	Variável: $SEN_{A_{qu}}$		Variável: SEN_{F_m}	
	Tecnologia EEn ($SEN_{A_{qui}}$) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. ($SEN_{A_{quj}}$) (j = numérico)	Tecnologia EEn ($SEN_{F_{mi}}$) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. ($SEN_{F_{mj}}$) (j = numérico)
<i>TEPO</i> (tCO ₂ /BTU)	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$
<i>TCESE</i> (KWh-EE/unid-SE)	30	206	1,05	1,109
<i>TCEPS</i> (BTU/kWh)	10.342	10.342	10.342	10.342
<i>CUVM</i> (R\$/CO ₂)	0,0602	0,0602	0,0602	0,0602
<i>CUVMB</i> (R\$/tCO ₂)	0,000003764	0,000003764	0,000003764	0,000003764
<i>EDS</i> (R\$/unid-SE)	0,0006726	0,00462	0,0000235	0,0000249

Tabela 9 – Dados dos Custos *EDS* da Função – Objetivo.

Substituindo os dados das Tabelas 6 a 9 nos correspondentes termos da função - objetivo (5.22) e restrições (5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28), resulta a formulação matemática aplicada ao sistema didático, reproduzida abaixo, com a finalidade de reforçar a visualização e facilitar o entendimento da implementação.

1) *Função - objetivo:*

$$\begin{aligned} & MIN(0,351 \cdot SenFmA + 0,372 \cdot SenFm1 + 10,052 \cdot SenAqua + 69,027 \cdot SenAqul) \\ & + (EdaFmA + EdaFm1 + EdaAqua + EdaAqul) \\ & + (EdsFmA + EdsFm1 + EdsAqua + EdsAqul) \end{aligned} \quad (5.43)$$

Sujeito a:

2) *Restrições de atendimento dos serviços energéticos:*

$$\begin{bmatrix} SenFmA + SenFm1 \\ SenAq1 + SenAq2 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 1500 \\ 100 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

3) *Restrições de desperdício energético (nas cargas individuais):*

$$\begin{bmatrix} EenFmA \\ EenFm1 \\ EenAqua \\ EenmFm2 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0,0525 \cdot SenFmopt \\ 0,05545 \cdot SenFmopt \\ 1,50 \cdot SenAquopt \\ 10,30 \cdot SenAquopt \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

4) *Restrições de disponibilidade energética:*

$$(1,05 \cdot SenFmA + 1,109 \cdot SenFm1 + 30,0 \cdot SenAqua + 206 \cdot SenAqul - EenFmA - EenFm1 - EenAqua - EenAqul) \leq 4500 \quad (5.46)$$

$$(1,05 \cdot SenFmA + 30,0 \cdot SenAqua - EenFmA - EenAqua) \leq 4500 \quad (5.47)$$

$$(1,109 \cdot SenFm1 + 206 \cdot SenAqul - EenFm1 - EenAqul) \leq 4500 \quad (5.48)$$

5) *Restrições ambientais:*

$$\begin{bmatrix} EdaFmA \\ EdaFm1 \\ EdaAqua \\ EdaAqul \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0,0235 \cdot SenFmopt \\ 0,0248 \cdot SenFmopt \\ 0,67 \cdot SenAquopt \\ 4,603 \cdot SenAquopt \end{bmatrix} \quad (5.49)$$

6) *Restrições sociais:*

$$\begin{bmatrix} EdsFmA \\ EdsFm1 \\ EdsAqua \\ EdsAqul \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 0,0000235 \cdot SenFmopt \\ 0,0000249 \cdot SenFmopt \\ 0,0006726 \cdot SenAquopt \\ 0,00462 \cdot SenAquopt \end{bmatrix} \quad (5.50)$$

Nas Tabelas 10 – 12 são mostrados os resultados obtidos a partir da simulação computacional.

Serviço de energia quantidade	Solução ótima		Solução não – ótima		Potencial de energia conservável	
	EP absorvida		EP absorvida		EP conservável	
	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h
Força motriz 1500 kW	16,250	4777,5	17,222	5063,27	0,972	285,77
Calor/Aquecimento 100 t	31,025	9121,35	213,046	62635,52	182,021	53514,174
Total	47,275	13898,85	230,268	67698,79	182,993	53799,994

Tabela 10 – Solução do Sistema Didático: Energia Primária (EP) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.

Serviço de energia quantidade	Solução ótima		Solução não – ótima		Potencial de energia conservável	
	EEL absorvida		EEL absorvida		EEL conservável	
	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h
Força motriz 1500 kW	5,355	1575	5,656	1663,5	0,3009	88,5
Calor 100 t	10,200	3000	70,04	20600	59,84	17600
Total	15,555	4575	75,696	22263,5	60,141	17688,5

Tabela 11 – Solução do Sistema Didático: Energia Elétrica (EEL) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.

	Solução ótima		Solução não - ótima		Potencial de redução do custo	
	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais
Custo (R\$/h)	1531,70	1634,13	7460,66	9584,53	5928,96	7950,40

Tabela 12 – Solução do Sistema Didático: Custo da Solução e Potencial de Redução do Custo com a Solução Ótima.

Os resultados da simulação permitem concluir, principalmente, o seguinte:

A produção dos serviços de energia da indústria pode ser realizada, tanto através das tecnologias convencionais quanto das tecnologias de eficiência energética. Entretanto o custo em energia elétrica e em energia primária é menor quando a produção for realizada através de tecnologias de eficiência energética.

A solução idealmente ótima e que reflete melhor o potencial de eficiência energética técnica e que pode ajudar a acelerar a transformação do mercado é, conseqüentemente, a solução que aponta para a produção dos serviços de energia através de tecnologias de eficiência energética sem induzir a custos adicionais das externalidades.

Se for definido um limite marginal dos custos das externalidades ambientais e sociais a produção dos serviços de energia através de tecnologias de eficiência energética pode funcionar como um indutor para a implementação da eficiência energética nas instalações consumidoras, em virtude do intervalo aumentado entre as capacidades efetivas existentes nas instalações e as capacidades limites que tornassem compulsória a inclusão dos custos das externalidades no custo total do consumo de energia elétrica.

Os custos das externalidades ambientais e sociais são maiores com o uso das tecnologias convencionais e causam maior impacto sobre o custo total da energia, comparativamente a produção dos mesmos serviços através de tecnologias de eficiência energética.

Numa instalação consumidora podem ser definidas metas de eficiência que permitam o gerenciamento do consumo de energia através da integração gradativa das tecnologias com eficiência melhorada que forem entrando no mercado.

Dadas as vantagens, quanto ao desempenho em energia das tecnologias de eficiência energética sobre as convencionais, um estudo simultâneo com os custos de investimento, geralmente mais altos para as tecnologias de eficiência energética, pode revelar retornos viáveis dos investimentos através das economias resultantes no consumo de energia. Associe-se a isso, ainda, o fato das tecnologias de eficiência energética virem registrando reduções significativas nos custos de investimento, como resultado dos avanços tecnológicos e benefícios em economias de escala.

Outra particularidade, também interessante, está no fato de que em decorrência das características aleatórias associadas com o desenvolvimento, a produção e a oferta de produtos de inovação tecnológica, particularmente daqueles orientados ao uso eficiente da energia elétrica, ser possível explorar, incrementalmente a solução proporcionada, de modo a se refletirem os novos avanços tecnológicos e operacionais que forem ocorrendo no campo da transformação do mercado de energia elétrica. Associado à esta vantagem, a solução possibilita ainda a avaliação compreensiva e quantitativa dos dados de custos necessários para a elevação de benefícios, expressos através da obtenção de determinados níveis de eficiência tecnológica com o emprego dessas tecnologias e ações eficientes.

O valor dos custos das externalidades ambientais e sociais, em função das utilizações tecnológicas da energia, está associado com os limites do consumo e do custo da energia disponível para o atendimento de todas as necessidades da indústria. Por exemplo, se o crescimento dos serviços não puder ser atendido através da capacidade existente, mais a “energia adicional” das opções da eficiência tecnológica e da eficiência da operação, a demanda resultante pela expansão da oferta deve ser entendida como indutora do aumento do valor das externalidades ambientais e sociais das utilizações da energia elétrica. Assim, a partir desse nível de variação o consumo de energia deveria ser pago, adicionando-se as correspondentes parcelas dos valores das externalidades ambientais e sociais.

5.5.2 Estudo de Caso: Sistema Real

O caso real consiste de um sistema industrial siderúrgico. A configuração e as características básicas do sistema elétrico dessa indústria são apresentadas na Figura 36, de modo simplificado.

Os dados detalhados das cargas elétricas do sistema real são mostrados no Anexo 3. Os gráficos, nas Figuras 37 a 41, sintetizam a classificação dos serviços de energia realizados através das correspondentes cargas elétricas industriais.

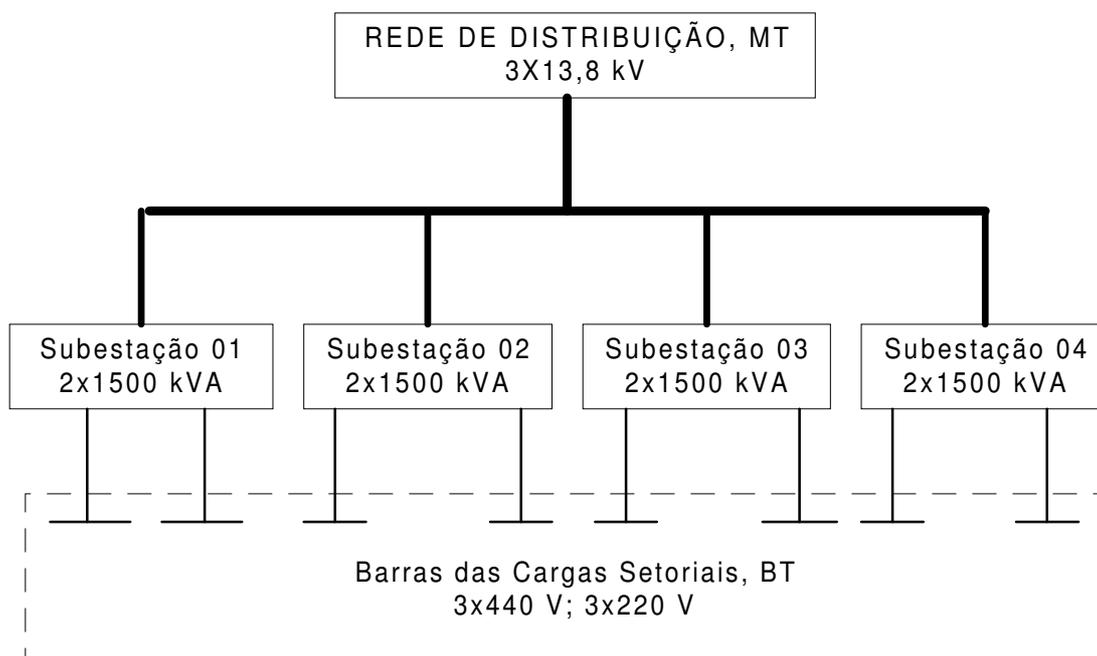
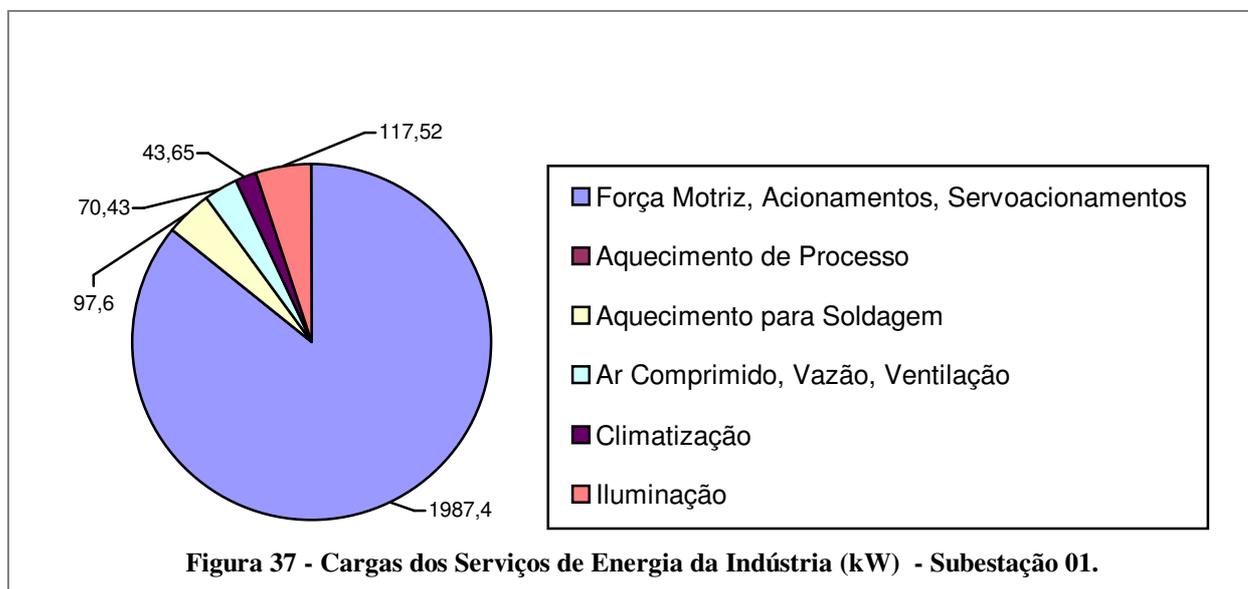
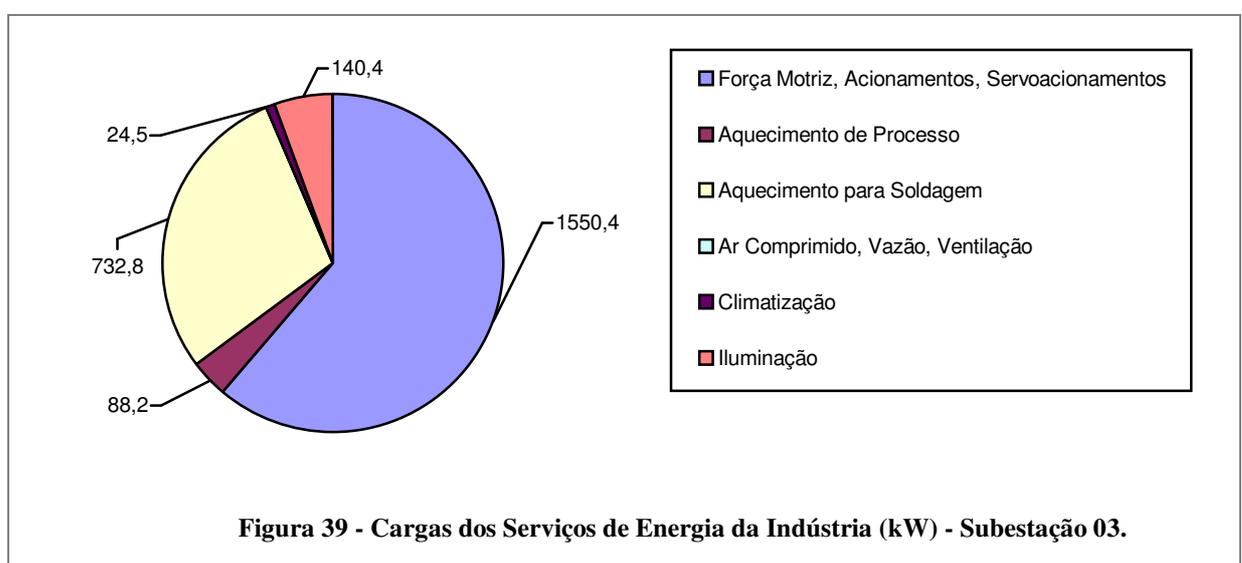
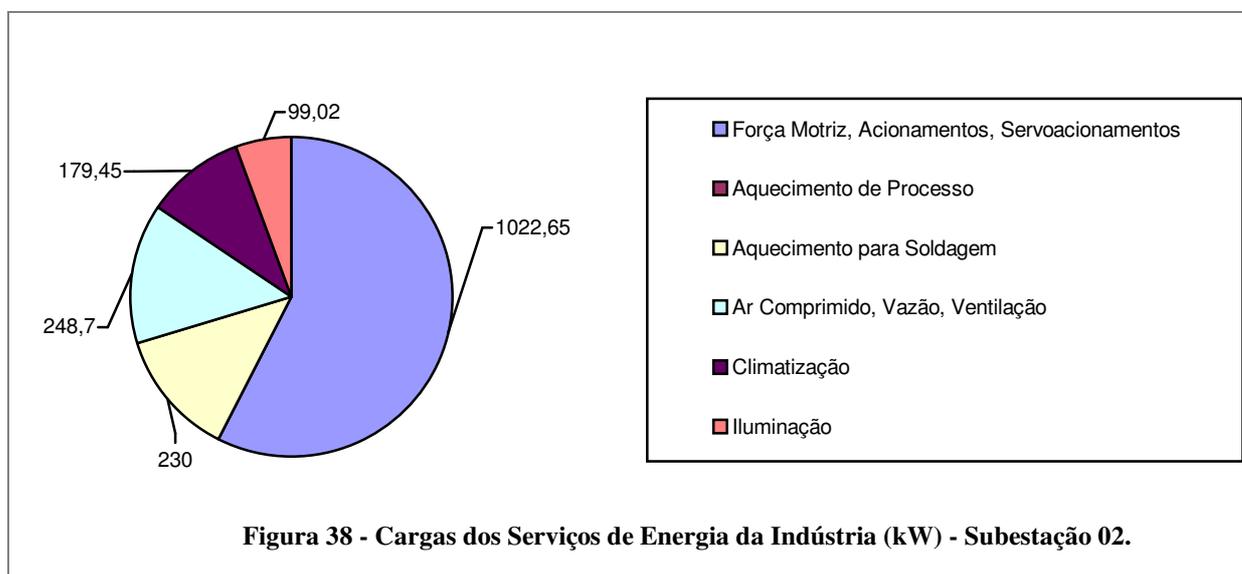
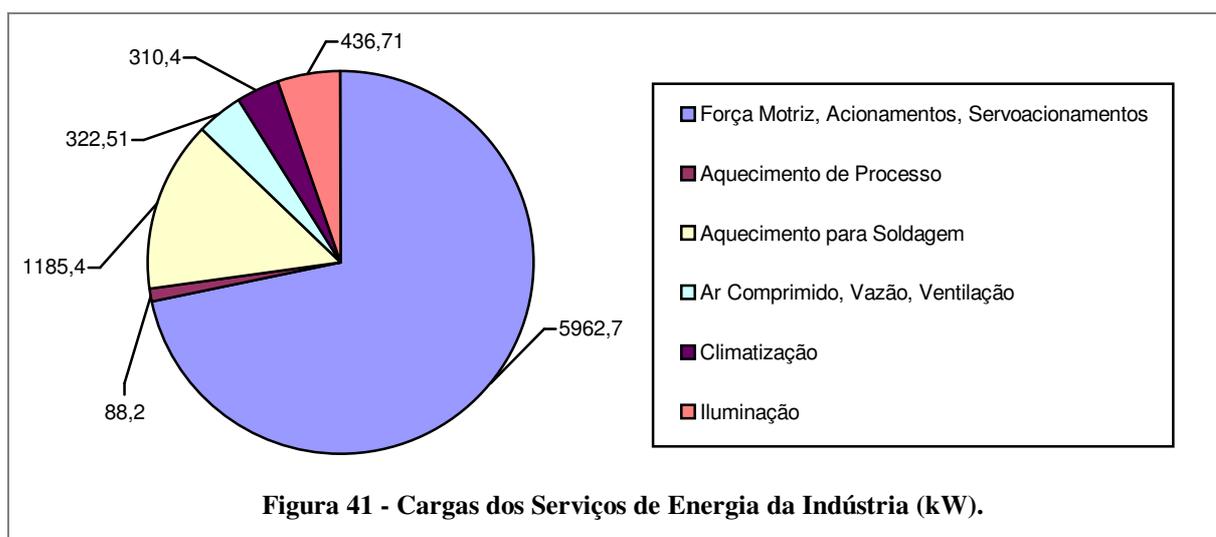
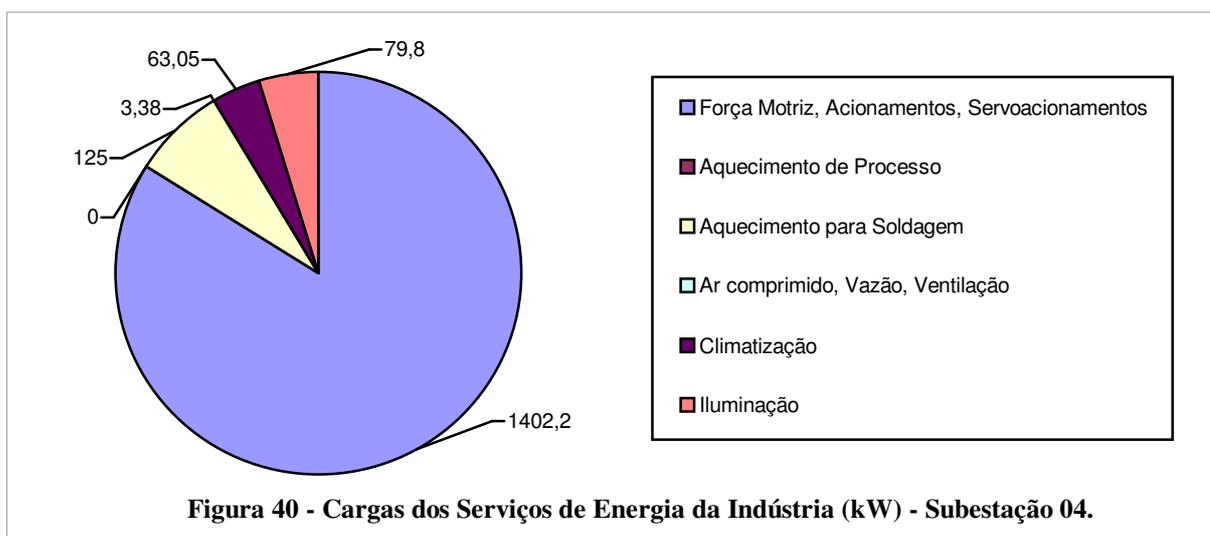


Figura 36 – Configuração do Sistema Elétrico da Indústria Real.







Nas Tabelas 13 - 24 são mostrados os resultados da simulação computacional do sistema industrial real.

Serviço de energia quantidade	Tecnologia eficiente		Tecnologia convencional		Potencial de energia conservável	
	EP absorvida		EP absorvida		EP conservável	
	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h
Força motriz 1987,4 kW	21,53	6329,82	22,82	6709,08	1,29	379,26
Aquecimento p/ soldagem 97,6 kW	1,20	352,80	1,44	423,36	0,24	70,56
Ar comprimido, vazão, ventilação 70,43 kW	0,774	227,56	0,972	285,77	0,198	58,21
Climatização 43,65 kW	0,451	132,59	0,546	160,52	0,095	27,93
Iluminação 117,52 kW	1,22	358,68	4,87	1431,78	3,65	1073,1

Tabela 13 – Solução do Sistema Real – Subestação 01: Energia Primária (EP) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.

Serviço de energia quantidade	Tecnologia eficiente		Tecnologia convencional		Potencial de energia conservável	
	EEL absorvida		EEL absorvida		EEL conservável	
	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h
Força motriz 1987,4 kW	7,10	2086,77	7,49	2204,03	0,390	117,26
Aquecimento p/ soldagem 97,6 kW	0,395	116,24	0,475	139,57	0,080	23,33
Ar comprimido, vazão, ventilação 70,43 kW	0,255	74,87	0,319	93,88	0,064	19,01
Climatização 43,65 kW	0,156	45,83	0,179	52,76	0,023	6,93
Iluminação 117,52 Kw	0,404	118,70	1,600	470,74	1,196	352,04

Tabela 14 – Solução do Sistema Real – Subestação 01: Energia Elétrica (EEL) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.

	Solução ótima		Solução não - ótima		Potencial de redução do custo	
	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais
Custo (R\$/h)	815,54	870,17	992,90	1059,17	177,36	189,00

Tabela 15 – Solução do Sistema Real – Subestação 01: Custo da Solução e Potencial de Redução do Custo com a Solução Ótima.

Serviço de energia quantidade	Tecnologia eficiente		Tecnologia convencional		Potencial de energia conservável	
	EP absorvida		EP absorvida		EP conservável	
	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h
Força motriz 1022,65 kW	11,08	3257,52	11,74	3451,56	0,660	194,04
Aquecimento p/ soldagem 230 kW	2,83	832,02	3,40	999,60	0,570	167,58
Ar comprimido, vazão, ventilação 248,7 kW	2,73	802,62	3,43	1008,42	0,700	205,80
Climatização 179,45 kW	1,95	573,30	2,24	658,56	0,29	85,26
Iluminação 99,02 kW	1,03	302,82	4,1	1205,40	3,070	902,58

Tabela 16 – Solução do Sistema Real – Subestação 02: Energia Primária (EP) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.

Serviço de energia quantidade	Tecnologia eficiente		Tecnologia convencional		Potencial de energia conservável	
	EEL absorvida		EEL absorvida		EEL conservável	
	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h
Força motriz 1022,65 kW	3,65	1073,78	3,86	1134,12	0,21	60,34
Aquecimento p/ soldagem 230 kW	0,931	273,93	1,12	328,90	0,189	54,97
Ar comprimido, vazão, ventilação 248,70 kW	0,899	264,37	1,13	331,52	0,231	67,15
Climatização 179,45 kW	0,641	188,42	0,737	216,90	0,096	28,48
Iluminação 99,02 Kw	0,340	100,01	1,35	396,63	296,62	296,62

Tabela 17 – Solução do Sistema Real – Subestação 02: Energia Elétrica (EEL) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.

	Solução ótima		Solução não - ótima		Potencial de redução do custo	
	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais
Custo (R\$/h)	632,47	674,79	807,29	861,17	174,82	186,38

Tabela 18 – Solução do Sistema Real – Subestação 02: Custo da Solução e Potencial de Redução do Custo com a Solução Ótima.

Serviço de energia quantidade	Tecnologia eficiente		Tecnologia convencional		Potencial de energia conservável	
	EP absorvida		EP absorvida		EP conservável	
	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h
Força motriz 1550,4 Kw	16,80	4939,20	17,80	5233,20	1,00	294
Aquecimento de processo 88,2 kW	0,91	267,54	6,22	1828,68	5,31	1561,14
Aquecimento p/ soldagem 732,8 kW	9,02	2651,88	10,83	3184,02	1,81	532,14
Climatização 24,5 kW	0,26	76,44	0,303	89,08	0,043	12,64
Iluminação 140,4 kW	1,47	432,18	5,81	1708,14	4,34	1275,96

Tabela 19 – Solução do Sistema Real – Subestação 03: Energia Primária (EP) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.

Serviço de energia quantidade	Tecnologia eficiente		Tecnologia convencional		Potencial de energia conservável	
	EEL absorvida		EEL absorvida		EEL conservável	
	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h
Força motriz 1550,4 Kw	5,53	1627,92	5,85	1719,39	0,32	91,46
Aquecimento de processo (2,94 t) 88,2 kW	0,300	88,2	2,06	605,64	1,76	517,44
Aquecimento p/ soldagem 732,8 kW	2,97	872,76	3,56	1047,90	0,59	175,14
Climatização 24,5 kW	0,087	25,46	0,0996	29,31	0,0126	3,85
Iluminação 140,4 kW	0,482	141,77	1,91	562,27	1,43	420,50

Tabela 20 – Solução do Sistema Real – Subestação 03: Energia Elétrica (EEL) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.

	Solução ótima		Solução não - ótima		Potencial de redução do custo	
	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais
Custo (R\$/h)	921,24	982,88	1130,70	1192,69	209,46	209,81

Tabela 21 – Solução do Sistema Real – Subestação 03: Custo da Solução e Potencial de Redução do Custo com a Solução Ótima.

Serviço de energia quantidade	Tecnologia eficiente		Tecnologia convencional		Potencial de energia conservável	
	EP absorvida		EP absorvida		EP conservável	
	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h
Força motriz 1402,2 Kw	15,19	4465,86	16,10	4733,40	0,910	267,54
Aquecimento p/ soldagem 125 kW	1,54	452,76	1,85	543,90	0,310	91,14
Ar comprimido, vazão, ventilação 3,38 kW	0,0371	10,91	0,0466	13,70	0,0095	2,79
Climatização 63,05 kW	0,685	201,39	0,788	231,67	0,103	30,28
Iluminação 79,8 kW	0,833	244,90	3,30	970,20	2,467	725,30

Tabela 22 – Solução do Sistema Real – Subestação 04: Energia Primária (EP) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.

Serviço de energia quantidade	Tecnologia eficiente		Tecnologia convencional		Potencial de energia conservável	
	EEL absorvida		EEL absorvida		EEL conservável	
	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h	(MBTU/h)	KWh/h
Força motriz 1402,2 kW	5,01	1472,31	5,29	1555,04	0,28	82,73
Aquecimento p/ soldagem 125 kW	0,506	148,88	0,608	178,75	0,102	29,87
Ar comprimido, vazão, ventilação 3,38 kW	0,0122	3,59	0,0153	4,51	0,0031	0,92
Climatização 63,05 kW	0,225	66,20	0,259	76,21	0,034	10,01
Iluminação 79,8 kW	0,274	80,60	1,09	319,66	0,816	239,06

Tabela 23 – Solução do Sistema Real – Subestação 04: Energia Elétrica (EEL) Absorvida em Função da Tecnologia e Potencial Conservável com a Solução Ótima.

	Solução ótima		Solução não - ótima		Potencial de redução do custo	
	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais	Sem custos sociais e ambientais	Com custos sociais e ambientais
Custo (R\$/h)	591,07	630,66	715,61	763,37	124,54	132,71

Tabela 24 – Solução do Sistema Real – Subestação 04: Custo da Solução e Potencial de Redução do Custo com a Solução Ótima.

5.5.3 Conclusões Sobre os Resultados Obtidos

A primeira constatação é de que todos os serviços de energia são tecnologicamente realizados, significando isso, que as cargas elétricas são atendidas e a atividade da indústria não é interrompida em decorrência da solução obtida.

A segunda conclusão é de que os custos das externalidades ambientais ocorrem no sistema em virtude das utilizações da energia elétrica. Entretanto, eles se comportam como variáveis marginais. O gradiente de variação dos custos das externalidades ambientais é maior que o dos custos das externalidades sociais. Isso se deve à natureza dos dados usados para suprir o modelo. Enquanto as emissões poluentes são associadas, mais facilmente, com algumas fontes de geração de energia, a relação desses poluentes com a degradação da saúde das pessoas ainda não está bem quantificada, requerendo-se entretanto, ser aprofundada com o devido cuidado e relevância.

Devido ao comportamento marginal dos custos das externalidades urge sugestivo propor-se, para fins da sua inclusão no custo total do consumo da energia elétrica da indústria, a necessidade de se estabelecerem limites de variabilidade a serem encarados como faixas em que, não necessariamente, devem ser oneradas as demandas e energias, por falta da implementação de estudos em eficiência energética no atendimento da demanda consumidora. A partir de um teto desses limites os custos das externalidades seriam compulsoriamente incluídos no custo total da energia elétrica.

Através da solução depreende-se sugestivo, também, que no caso da indústria precisar expandir a capacidade contratada, a proposta de expansão deve ser antecedida de um estudo de potencial de conservação de energia para o desenvolvimento sustentado, que comprove, através da solução, a situação dos custos técnicos em relação aos limites marginais dos custos das externalidades ambientais. Em condições desfavoráveis da escassez de recursos energéticos, as expansões comprovadamente necessárias, se induzirem ao atendimento através de recursos energéticos de oferta não renováveis, conformariam a obrigatoriedade da cobrança da parcela dos custos ambientais.

Quanto aos custos das externalidades sociais, a interpretação é semelhante a dos custos das externalidades ambientais. Neste caso, também, a essência do comportamento destes custos

deve ser vista como marginal. Sendo definidos os seus limites, a “faixa livre” dos custos não implicaria na inclusão de seus valores no custeio total do consumo de energia elétrica. Acima do teto marginal, se estabeleceria a obrigatoriedade da adição desse custo no consumo total de energia. Igualmente, os projetos de expansão da capacidade de atendimento da demanda consumidora devem ser atestados através de um estudo prévio do potencial de conservação de energia para o desenvolvimento sustentado, especialmente em cenários de escassez de recursos primários em energia elétrica.

Entretanto, ressalte-se a importância do fato de que a existência dos custos das externalidades ambientais e sociais, como custos marginais, na formatação do consumo de energia elétrica, numa perspectiva da socialização, universalização e *commodity*, não obstante ao requisito da ultrapassagem de tetos para consubstanciar o custeio compulsório, sistematizar na operação da indústria, a aplicação permanente dos estudos de conservação de energia para o desenvolvimento sustentado deve nortear a atuação responsável de todos os usuários da energia elétrica.

5.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Foram apresentados os fundamentos sobre a metodologia de solução do problema do potencial de conservação de energia para o desenvolvimento sustentado. Basicamente, o problema foi estruturado, matematicamente, como um problema de programação linear, com uma dimensão mais ampla de restrições. Com vistas à viabilização da sua solução o espectro de variáveis e restrições foi relaxado, tendo-se como resultado, uma formulação com um número relativamente menor de variáveis e restrições cobrindo, contudo, custos técnicos em energia e custos das externalidades ambientais e sociais, derivados do consumo da energia elétrica.

O problema, então, com uma formulação reduzida, foi implementado para um sistema didático, de pequeno porte, e para um sistema elétrico industrial real, com uma configuração que atende a diversos tipos de serviços de energia industriais.

A análise dos resultados, em ambos sistemas, foi realizada. A partir dessas análises revelou-se, que a explicitação de objetivos do atendimento energético junto com a estrutura

tecnológica baseada em tecnologias convencionais e de eficiência energética, permite explorar os potenciais de conservação de energia reduzindo-se, com isso, o consumo de energia, tanto primária quanto elétrica.

Ficou evidente, também, que a inclusão dos custos das externalidades, além de apenas ajudar a quantificar esses custos, pode operar como indutor para a potencialização da conservação e da eficiência energética, ao orientar para a utilização da eficiência energética como fator do aumento de intervalos em relação a possíveis tetos de consumo que possam ser definidos como compulsórios na composição do custo total pelas utilizações da energia elétrica, não eficientes.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos, a partir desta proposta para a avaliação do potencial de conservação de energia para o desenvolvimento sustentado, permitem concluir o seguinte:

1) Já existem disponíveis no atual mercado de energia elétrica diversas opções tecnológicas a custo efetivo, para a produção dos vários serviços de energia industriais. Essa disponibilidade também é indicativa de que a *transformação do mercado de energia elétrica* é um fato com o qual os agentes estão comprometidos e, por isso, continuará em expansão. Porém, a efetividade dos benefícios veiculados por ela só poderá ser revertida para o bem dos consumidores, se estes dispuserem de meios analíticos que permitam mensurar suas variáveis na modelagem de suas decisões, tanto de investimento quanto de operação. Daí a necessidade da explicitação das variáveis de conservação de energia na previsão da demanda de energia de consumidores industriais, especialmente.

2) O papel indispensável dos serviços de energia para o desenvolvimento social implicando, necessariamente, na expansão progressiva destes para atender à esse desenvolvimento, deve implicar também, na expansão progressiva do consumo de recursos energéticos primários, porém, é imperioso o manejo sustentável desse aumento do consumo. Disso resulta a necessidade da explicitação das variáveis de sustentabilidade ambiental no manejo das energias primárias fornecidas pelos ecossistemas, na previsão da demanda da energia de consumidores industriais, especialmente. Os limites do manejo ambiental, adequados e ajustados à produção dos serviços de energia e às políticas de sustentabilidade

devem ser, criteriosamente regulamentados, afim de que sejam usados em estudos analíticos, compreensivos e quantitativos da previsão da demanda de energia elétrica.

3) Aqueles serviços de energia produzidos na indústria e que resultem na imposição de fluxos das diversas formas de demandas, acima “do que seja sustentável” do ponto de vista dos custos com a prevenção e tratamento de doenças relacionadas, devem ser onerados pelos correspondentes custos induzidos. Seria um indicativo de um caminho quanto a uma alocação fiscal comprometida com a efetiva valoração dos recursos energéticos primários impostos pelo aumento desses serviços e que nortearia a indústria na oferta de produtos de consumo sustentáveis. Assim como no manejo ambiental, os limites do manejo social também devem ser criteriosamente regulamentados, afim de que sejam usados em estudos analíticos, compreensivos e quantitativos da previsão da demanda de energia elétrica.

4) Deriva das constatações 2) e 3), anteriores, ser de fundamental importância, o aprofundamento da abordagem dos custos das externalidades socioambientais dentro do contexto do problema das tarifas em energia elétrica, objetivando-se a transformação do mercado de energia elétrica.

5) Os serviços de energia industriais podem fornecer sinergias à sustentabilidade de suas próprias demandas de energia se considerarem, nas estratégias da produção de seus serviços energéticos, quando aplicável, insumos recicláveis e/ou reutilizáveis.

6) As demandas de energia industrial podem fornecer sinergias para a auto sustentabilidade se as indústrias integrarem, nas estratégias de produção de seus serviços energéticos, sempre que aplicável, a recuperação de energias descartadas no processo e a cogeração.

7) As indústrias, na produção de seus serviços de energia, podem dar seu contributo à sustentabilidade do atendimento energético se considerarem, sempre que viável, a extensão à produção de energia a partir de fontes renováveis dentro das estratégias de autoprodução e geração distribuída de energia.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

O elevado acervo nacional e internacional, acerca da abordagem da temática em energia e sustentabilidade, evidencia uma grande preocupação da sociedade moderna, relacionada com os padrões de consumo que não observam, adequadamente, as condições do equilíbrio requerido para a vida sustentável do ecossistema. Porém, especificamente nos modelos de engenharia de uso-final, o acervo técnico pode ser considerado ainda carente, sendo necessário seu aprofundamento e expansão de modo a cobrir os diversos níveis e graus de estudos em energia elétrica. Nesse contexto, associados diretamente com o estudo desenvolvido nesta tese, sugerem-se os seguintes desdobramentos:

- 1) Desenvolvimento da metodologia de solução de modo a considerar-se todo o conjunto de restrições e variáveis do modelo completo, usando-se técnicas multicritério.
- 2) Desenvolvimento da formulação e da metodologia de solução, como um problema de programação linear, de modo a viabilizá-lo como um problema de programação inteira-mista.
- 3) Desenvolvimento do aprimoramento de metodologias de quantificação dos coeficientes, eficiências e níveis energéticos da produção dos serviços de energia industriais correlacionados com equivalentes econômicos das variáveis sócio-ambientais.
- 4) Extensão dos estudos sobre as tarifas em energia elétrica visando incorporar nas suas diversas modalidades as parcelas dos custos marginais referentes às variáveis ambientais e sociais.
- 5) Estudos com o envolvimento de equipes multidisciplinares em ciências de engenharia elétrica, do ambiente e da sociedade, visando-se o provimento de bancos de dados afins, inter-relacionados nos âmbitos dos seus campos de estudo e que se complementem mutuamente.
- 6) Em consumidores industriais eletro - intensivos afigura-se necessária uma nova agenda sobre as atribuições da funcionalidade das áreas de energia, utilidades, operação e manutenção em relação às áreas administrativas e financeiras, na formatação de modelos para a tomada de decisões operacionais e de investimentos industriais, de modo a enquadrarem corretamente, neles, a contribuição merecida da eficiência energética e de outras opções de conservação de energia.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: TÉCNICAS USADAS NOS ESTUDOS DE PROJEÇÃO DA DEMANDA EM ENERGIA ELÉTRICA

1. MÉTODOS DE EXTRAPOLAÇÃO

Os métodos de extrapolação baseiam-se em registros de seqüências observadas ao longo do tempo sobre as grandezas relevantes, tais como as contas ou as vendas anuais aos consumidores, para prever os valores futuros do consumo de energia. Nestes métodos pressupõe-se um compromisso de que o crescimento futuro será uma continuação de um padrão discernível do crescimento passado. Metodologias específicas incluem tarifas compostas crescentes, determinação matemática de curvas características crescentes e uso de grafos de dados históricos. Tanto quanto os fatores associados ao crescimento sejam estáveis ao longo do tempo, o método pode produzir resultados aceitáveis. As principais desvantagens do método são: (i) os fatores de influência do crescimento não são identificados explicitamente; e (ii) os efeitos isolados dos fatores de influência do crescimento sobre a previsão não podem ser identificados (GELLINGS, 1996).

2. MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Os métodos estatísticos baseiam-se na identificação de correlações entre a demanda de energia e variáveis determinantes. Os métodos de correlação incluem diagramas de grafos,

correlações simples e múltiplas e modelos simples e complexos. Os resultados obtidos a partir destas técnicas, especialmente dos métodos mais sofisticados, não podendo ser aceitos de modo simples e direto, devem ser avaliados no intuito da relevância teórica e técnica, provendo-se daí, valiosos subsídios para o entendimento das causas do crescimento passado e das variações nesse crescimento. O resultado disso é a compreensão clara que se abstrai acerca dos fatores que afetam o crescimento bem como da importância relativa desses fatores.

Numa abordagem estatística estabelece-se estritamente, a confiança em correlações interligando as vendas ou compras de energia e demanda com variáveis independentes. Afim de que uma previsão seja elaborada, projeções dessas variáveis independentes são incorporadas nas relações históricas. Na utilização destes métodos, aconselha-se para a importância de se observarem cuidados especiais, de modo a se evitar a tomada de decisões, a partir de correlações espúrias que tenham um elevado nível de significância estatística, porém, nenhuma interação lógica (GELLINGS, 1996).

3. MÉTODOS ECONOMÉTRICOS E DE USOS-FINAIS

Enquanto, para o planejamento do setor de energia, se apoiava em métodos de previsão baseados em tendências, outros dois grupos de métodos alternativos para a previsão foram emergindo e adotados. Esses métodos são, os métodos econométricos agregados e os métodos de engenharia de uso-final. O interesse por métodos econométricos despontou quando se evidenciou, claramente, a necessidade de que as concessionárias precisavam contabilizar os impactos de fatores como os preços de energia sobre a demanda de energia (elasticidades). Já, os métodos de engenharia de uso-final foram adotados como meio de resposta para a contabilização do impacto de cada dispositivo ou sistema que consome energia elétrica. De há uns tempos recentes, vem adquirindo um reconhecimento crescente o fato de que para inúmeras aplicações em energia uma integração dos dois métodos configura-se mais apropriada. A partir dessa integração, obtêm-se os métodos econométricos e de usos-finais (GELLINGS, 1996).

4. MÉTODOS ECONOMÉTRICOS

Nos métodos econométricos faz-se uma combinação entre a teoria econômica e as técnicas estatísticas para gerar sistemas de equações para a previsão de energia e demanda. O

método começa pela estimação de relações causais entre uma variável dependente – por exemplo, o consumo de energia - e um conjunto de variáveis independentes – fatores relevantes que influenciam o consumo de energia. Geralmente, as relações são estimadas através da aplicação do método dos mínimos quadrados ordinário ou outros métodos mais sofisticados para séries temporais ou dados agregados. Sendo estabelecida uma relação, a inserção de previsões das variáveis independentes nas equações conduz a projeções da variável dependente, no caso, o consumo de energia elétrica.

Uma das principais vantagens desta abordagem é permitir a avaliação explícita dos impactos separados das variações de fatores, como preços da energia, renda, população, atividade econômica e outras variáveis independentes, sobre a variável dependente. Conseqüentemente, este método revela-se particularmente importante na avaliação dos efeitos prováveis das várias opções de políticas. Nesta afirmativa pressupõe-se necessariamente, que os elementos de tais políticas tenham sido incluídos corretamente como variáveis independentes na elaboração do modelo econométrico de previsão. Não obstante, sua desvantagem principal está na necessidade e na freqüência de se assumir implicitamente, que as relações estabelecidas nos dados das séries temporais históricas e/ou nos dados cruzados irão persistir num horizonte futuro, próximo ou previsto.

5. MÉTODOS ECONOMÉTRICOS AGREGADOS

Neste método, uma equação simples, representando a demanda total de energia, ou um conjunto de equações, representando a demanda de energia nos diferentes setores, é especificado como uma função de variáveis-chave de natureza econômica, temporal, ou específicas a determinados setores de interesse. No seu foco principal, através destes métodos procura-se enfatizar tipicamente, os impactos dos preços da energia e da renda (saídas de *commodities*, no caso dos setores comercial e industrial), com outras variáveis percebidas como condicionantes de respostas dos consumidores às mudanças nos preços e na renda. Deste modo, são elaborados e obtidos dados agregados para um período histórico recente, sendo os parâmetros das equações, estimados através de técnicas de regressão padrão. Visando obter-se previsões, as equações são avaliadas usando-se os valores projetados das variáveis independentes e os coeficientes estimados a partir de técnicas de regressão. O tipo de equações varia desde uma função linear simples até sistemas complexos de equações expressando a demanda. Em princípio, estas equações resultam a

partir de formas de modelos que objetivam minimizar os custos de produção (GELLINGS, 1996).

6. MÉTODOS DE USOS-FINAIS

Os modelos de usos-finais têm como base alguma forma de desagregação das diversas utilizações da energia elétrica pelos vários segmentos consumidores como o industrial, o comercial, o residencial, o público, o agropecuário, entre outros. Por exemplo, no segmento industrial, cada tipo de atividade demandando algum nível de eletricidade, supostamente expressivo, é identificado a priori, sendo depois, determinado o correspondente consumo de energia.

Uma estrutura básica de um modelo de uso-final, para a produção de determinado serviço final, é, por exemplo:

$$CEUF_i = NCUF_i \times CEpUF_i \quad (A1.1)$$

A aplicação da Equação (A1.1), para os principais usos-finais dos segmentos consumidores, permite determinar a energia requerida para todo o sistema, como:

$$CETS = \sum_{ji} CEUF_{ji} ; \quad \forall j \in m; \forall i \in n \quad (A1.2)$$

Onde:

$CEUF_{ji}$ – Consumo de energia para o uso-final i do segmento j ;

$NCUF_i$ – Número de consumidores com o uso-final i ;

$CEpUF_j$ – Consumo de energia por uso-final i ;

$CETS$ – Consumo de energia total do sistema;

i – Identificador do tipo de uso-final;

j – Identificador do segmento consumidor;

m – Quantidade de segmentos consumidores;

n – Quantidade de usos-finais.

Percebe-se que esta abordagem apresenta uma característica que pode ser considerada como sendo fortemente apelativa ao associar diretamente o consumo da energia elétrica

com as utilizações da eletricidade. Desta forma, estes modelos de engenharia ou modelos de uso-final materializam intuitivamente, a noção segundo a qual, a energia é usada como um meio intermediário para a obtenção de um serviço desejado como, por exemplo, movimento, calor, luz, frio, etc. Este entendimento representa, de certa forma, uma questão de crucial importância que requer uma atenção especial dentro das discussões visando a otimização nas utilizações da energia elétrica.

Na modelagem, através desta metodologia, o foco é sobre as quantidades físicas de dispositivos elétricos, por exemplo, o número projetado de motores elétricos de indução, de fornos elétricos da indústria, de sistemas de refrigeração industrial, etc. Conseqüentemente, o modelo, tipicamente começa por admitir que o consumo total de energia é igual a soma das energias consumidas pelos tipos de carga e classes consumidoras. Procedendo-se desta forma, o modelo pode ser expresso através do produto de termos representando: (i) o número de dispositivos elétricos em cada tipo de carga; (ii) uma medida da capacidade de uso da energia do dispositivo; (iii) uma medida do fator de utilização do dispositivo. Para isso, uma expressão matemática alternativa pode ser:

$$CED = s \times n_c \times P \times t \quad (A1.3)$$

Onde:

CED – Consumo de energia do dispositivo-tipo, kWh;

s – Saturação no número de dispositivos por consumidor;

n_c – Número de consumidores;

P – Potência requerida pelo dispositivo-tipo, kW;

t – Tempo de utilização do dispositivo, h.

Denota-se, também, que esta metodologia considera algum grau de detalhe, relativamente elevado. Este nível de detalhe constitui uma característica relevante que pode ser aproveitada como base para a apuração das influências externas sobre a projeção dos níveis de demanda e energia bem como para a avaliação da compatibilidade desses níveis. Por exemplo, os efeitos dos padrões de eficiência energética dos dispositivos sobre os programas de conservação de energia ou o impacto do consumo ou da comercialização de energia sobre a conservação de energia versus o planejamento energético num dado horizonte, podem ser avaliados diretamente. Não obstante este fato, de reconhecido valor, o elevado nível de detalhe, ao requerer extensas informações acerca do número de usos-

finais, dos níveis de suas utilizações e das particularidades das classes consumidoras, contrasta com o alto custo associado com a obtenção dessas informações. Este destaque afigura-se como a principal desvantagem deste método.

Associados aos métodos de usos-finais estão os modelos de simulação da engenharia de uso-final, cujas primeiras implementações começaram nos anos 60 com os programas computacionais AXCESS e E³ da American Gas Association (GELLINGS, 1996). Cada um desses programas permitia simulações físicas da energia requerida em edifícios comerciais, sob premissas de satisfação a requisitos de aquecimento ambiental, de refrigeração e do aquecimento da água, além de permitirem a avaliação da cogeração.

Por volta dos anos 70 a mesma metodologia passou a adotar e a incorporar uma novidade pouco difundida, até então, apenas uma curiosidade, designada como conservação e gerenciamento da carga. Contando com esta nova característica, esses modelos foram usados para avaliar diversas alternativas tecnológicas individuais durante os anos seguintes. O salto mais significativo viria a partir dos anos 80, quando a metodologia passou a destacar-se como uma ferramenta de grande valor para avaliar alternativas tecnológicas potenciais em estudos de casos isolados. Não obstante, em pouco tempo de uso, um aspecto estratégico viria a revelar-se omissivo e conferindo à metodologia uma imperfeição relevante – a não consideração de mudanças no comportamento de consumidores, como resultado de suas respostas a fatores que impactam as utilizações da energia elétrica.

Na Figura 43 são mostrados os elementos genéricos de um modelo de simulação da engenharia de uso-final. Observa-se que todos os dispositivos, processos, ou sistemas (modelo físico) relacionados com a energia podem ser descritos e representados sob a forma de um balanço energético.

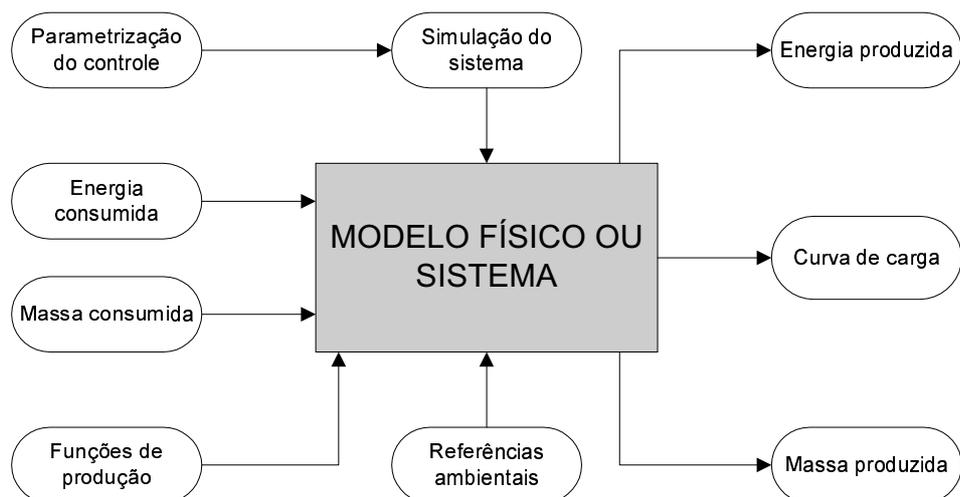


Figura 43 – Modelo de Simulação da Engenharia de Uso-Final (GELLINGS, 1996).

Em tal balanço os vários tipos e níveis de energia, representando o conteúdo calorífico ou a energia térmica, as energias cinética, potencial e mecânica e a energia bruta da matéria, na forma de hidrocarbonetos, são dados de entrada do sistema, com todas as grandezas reduzidas à mesma unidade. De igual modo, a energia, a massa e a demanda de energia elétrica são dados de saída dessa simulação.

A operação do modelo físico é baseada em alguma simulação do controle, do estado da operação e dos parâmetros de intensidade. A simulação também depende de funções de produção e de modelos de processos, os quais relacionam a produção com as necessidades de energia e atendimento de requisitos ambientais (GELLINGS, 1996).

7. MÉTODOS ECONOMÉTRICOS E DE USOS-FINAIS INTEGRADOS

As abordagens de engenharia, com foco centrado, apenas em fatores físicos, podem conduzir ao equívoco da omissão da necessidade da imposição de novos usos-finais além da omissão de outros efeitos muito importantes, tais como, por exemplo, o impacto do aumento dos preços de energia como medida para forçar a adesão de consumidores às ações de conservação de energia. Em virtude disto, uma forte tendência, nos métodos de previsão, é o esforço de pesquisadores e especialistas no sentido de se incorporar a característica comportamental nos modelos de usos-finais. A inclusão das características de comportamento conduz ao tipo de abordagem conhecido como método econométrico. Um modelo comportamental ou econométrico, da demanda de energia elétrica, projeta o

consumo em função da resposta de consumidores a variáveis econômicas, como preço e renda. Neste tipo de simulação assume-se que para todo o comportamento do consumidor existe um modelo econométrico que represente esse comportamento. Para tanto existe uma grande gama de variáveis podendo ser identificadas e incorporadas nestes modelos. Essas variáveis podem corresponder desde aquelas que expressam o nível de emprego local até as que expressam o nível de produto interno bruto (PIB). Ao se considerarem, de modo integrado, os aspectos físicos e comportamentais do consumo de energia, obtém-se um único modelo que proporciona uma análise mais compreensiva de tantos e diversos fatores de influência que encobrem a demanda de energia.

Esses modelos econométricos e de usos-finais integrados são modelos de projeção estratégicos, que combinam elementos de usos-finais e abordagens econométricas. Neste sentido, esses modelos contêm a característica detalhista das abordagens de uso-final mais a característica comportamental das abordagens econométricas. Mais especificamente, as projeções dos usos da energia e da penetração de mercado são baseadas em relações econométricas, extraídas de uma teoria da escolha do consumidor e da análise da decisão de investimento. As referidas relações são sensíveis aos custos de energia, às características de desempenho das tecnologias e a diversas outras características dos consumidores.

O grau de detalhe desses modelos coloca o planejador frente a um quadro mais compreensivo acerca do mercado de energia atual e projetado. Ademais, a resposta de consumidores e os mecanismos de aceitação embutidos neles permitem ao planejador explorar vários cenários futuros resultantes de diferentes estratégias de preços, mudanças na renda, na estrutura tecnológica ou nas variáveis econômicas. Alguns destes modelos de projeção estratégicos não apenas projetam o montante requerido da energia anual e da demanda de ponta, como também as curvas de carga horárias para condições médias e pesadas. Conforme colocado, na discussão sobre metodologias de usos-finais, o maior nível de detalhe requerido por estas abordagens impõe a necessidade de um grande volume de dados. Esta necessidade, associada a um considerável esforço na elaboração e desenvolvimento da metodologia, representam as maiores desvantagens dos métodos de projeção estratégicos (GELLINGS, 1996).

8. MÉTODO DE PROJEÇÃO DA CURVA DE CARGA

Além de se projetar o consumo de energia anual ou mensal e a demanda de ponta necessita-se dispor de dados quanto à forma das curvas de carga esperadas. Entende-se por projeção da forma da curva de carga a previsão de demandas horárias esperadas para dias típicos e atípicos e para meses selecionados de um horizonte, geralmente um ano.

Assim como na previsão da carga em geral, dois tipos de abordagens têm sido usados na previsão da forma da curva de carga – abordagens baseadas no uso-final e abordagens econométricas ou estatísticas.

Nas abordagens de uso-final, as curvas de carga, para os segmentos consumidores e para o sistema, são construídas a partir das curvas de carga das várias utilizações finais da energia elétrica. Já, nas abordagens estatísticas, a forma da curva de carga do sistema é expressa, tipicamente, através de uma série de equações de regressão que levam em conta a hora do dia, o dia da semana e o tempo. Em análises subseqüentes, os coeficientes dessas equações são associados a variáveis econômicas que explicam o seu comportamento ao longo do tempo, com isso, sendo depois usadas para prever as formas das curvas de carga para os horizontes planejados (GELLINS, 1996).

9. MÉTODOS DA ACEITAÇÃO OU PENETRAÇÃO DE MERCADO

Particularmente, a avaliação das opções de gerenciamento do lado da demanda (GLD) exige das metodologias de previsão de energia o cumprimento de alguns requisitos especiais. Tais requisitos referem-se à necessidade da explicitação clara dos seguintes elementos, tendo-se em vista a facilitação da avaliação: (i) nível de detalhe da previsão; (ii) distinção entre penetração de mercado, estoque de atividades ou equipamentos que usam energia e a intensidade de utilização; e (iii) favorecimento à análise da curva de carga ao invés da demanda de ponta, apenas.

A importância destes elementos advém dos seguintes fatos: (i) O nível de detalhe torna-se importante em virtude da grande maioria de ações do lado da demanda se destinar a mudar os níveis das utilizações e/ou os padrões de utilizações finais específicas. O detalhe necessário permite ao planejador identificar as aplicações potencialmente importantes, visto dispor-se de uma imagem mais completa, atual e projetada, do consumo de energia. (ii) A distinção entre o nível de utilização e a penetração ou estoque de mercado é

igualmente importante do ponto de vista dos programas poderem ter como foco apenas um ou outro aspecto. Mesmo considerando ações do lado da demanda, objetivando simultaneamente, o nível de consumo e o nível de estoque, a segregação de objetivos continua necessária porque os fatores que influenciam o consumo de um lado ou o estoque de outro, também são diferentes. (iii) O foco na forma da curva de carga torna-se adequado considerando-se que o objetivo pleno do GLD pode ser visto como sendo o de alterar o comportamento da curva de carga de um dado sistema elétrico consumidor. Deste modo, a inserção da habilidade de previsão da forma da curva de carga dentro do modelo de previsão da carga é uma característica bem desejável. Além disso, as projeções da demanda de ponta apenas, não se afiguram suficientes, em virtude de uma variedade de procedimentos ser elaborada tendo-se em vista objetivos sobre a curva de carga, como sejam, o *deslocamento da carga*, o *preenchimento de vales*, o *corte da ponta*, etc. (CAMARGO e BORENSTEIN, 1997; SWISHER *et al.*, 1997).

APÊNDICE 2: ASPECTOS SOBRE MORBIDADE E MORTALIDADE ASSOCIADOS COM EMISSÕES POLUENTES DA VALORIZAÇÃO ECONÔMICA DOS DANOS SOCIAIS INDUZIDOS POR ATIVIDADES TECNOLÓGICAS.

Na ausência de dados nacionais precisos para a estimativa tanto dos valores das taxas de mortalidade quanto das taxas de morbidade humana atribuíveis às explorações eletroenergéticas, uma possibilidade é a de se recorrer aos dados da região metropolitana de São Paulo, onde existem estudos mais detalhados. A adaptação dos dados desses estudos permite compor os dados apresentados no Quadro 12, seguinte:

População sofrendo dos efeitos da poluição atmosférica	Aumento da morbidade por problemas respiratórios com o aumento da poluição	Aumento da mortalidade por problemas respiratórios com o aumento da poluição
17.000.000 de pessoas	20 – 25% do total dos atendimentos	10 – 12% do total de mortes

Quadro 12 – Dados para Estimativa das Taxas de Morbidade e das Taxas de Mortalidade Associadas com as Explorações Energéticas (Laboratório de Pesquisa de Poluição Atmosférica da Universidade de São Paulo (USP) *apud* GEO 2002, 2002).

Dados apropriados para suprir o modelo de avaliação proposto deveriam mostrar a ponderação dessas taxas associadas com as doenças, sobretudo respiratórias, decorrentes

de poluentes químicos ambientais e industriais da queima de combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica e da produção de *commodities* nos segmentos industriais.

Iniciativas de trabalhos que podem ajudar a quantificar com precisão as taxas de morbidade e de mortalidade causadas por variáveis associadas ao atendimento energético, e por isso, ajudar a indústria elétrica e os potenciais consumidores finais a incorporar os custos sociais nas matrizes de seus planos, são aqueles que buscam relacionar a distribuição diferencial das condições materiais de vida no espaço, com a distribuição diferencial da morbi-mortalidade. Nesse sentido pode-se citar, por exemplo, PEITER e TOBAR (1998) *apud* GEO BRASIL 2002 (2002), que demonstram, por meio de análises de correlação entre a dispersão de poluentes originários da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e dados sócio-ambientais, que os grupos de baixa renda ocupam as áreas mais poluídas no município de Volta Redonda no Rio de Janeiro.

Entre os poluentes químicos industriais, pelos seus impactos negativos à saúde humana, destacam-se os agrotóxicos, o chumbo e o mercúrio (GEO BRASIL 2002, 2002). A poluição atmosférica é outro dos fatores que provocam doenças em milhões de pessoas. Citam-se elevados registros de óbitos por causas respiratórias, principalmente nas regiões metropolitanas, o que pode ser um indicativo indireto da importância do comprometimento da qualidade do ar como causa de adoecimento.

Recentemente, o Ministério da Saúde vem trabalhando na construção de um modelo de vigilância que permitirá correlacionar condições de saúde com a qualidade do ar. Os resultados esperados poderão, num futuro próximo, permitir um conhecimento mais detalhado sobre o perfil epidemiológico das doenças respiratórias e de sua relação com os tipos e níveis de poluição atmosférica.

Segundo a GEO BRASIL (2002), no Brasil, seguramente, grande parte das doenças e mortes por problemas respiratórios nos últimos anos está associada à deterioração da qualidade do ar, sobretudo nas grandes cidades. Assinala-se ter havido, entre 1970 e 2000, um aumento substancial da emissão de poluentes (variação de até +200% de dióxido de enxofre (SO₂), variação de até +500% na emissão de hidrocarbonetos). Estes gases, junto com a fumaça negra emitida pelos veículos, podem contribuir para o aumento das doenças respiratórias.

Também têm sido relatados aumentos nos níveis de chumbo encontrado no ambiente, sendo que a causa disso é atribuída às atividades humanas. E para esse efeito tem sido

considerado como fonte mais comum da contaminação ambiental pelo chumbo a via aérea que se estabelece através da queima de combustível e lixo sólido, formando aerossóis, e através de processos industriais a vapor. Isso, em geral, resulta numa população exposta ao chumbo através do ar ambiente, alimentos, água, solo e poeiras. Ademais, algumas exposições mais importantes ocorrem como resultado do trabalho nas indústrias, contaminando moradias em ambientes urbanos, principalmente em locais próximos às fontes emissoras.

Para exemplo de citação da preocupação com esta extensão do problema, a Universidade Federal da Baía (UFBA) e o Centro de Estudos da Saúde do Trabalhador e Ecologia Humana (CESTEH/FIOCRUZ) têm desenvolvido estudos envolvendo vários aspectos da contaminação humana e ambiental pelo chumbo e suas conseqüências para a saúde. Os resultados desses estudos têm mostrado claramente a contaminação dos trabalhadores e a dispersão do poluente chumbo, a partir das indústrias, comprometendo a qualidade ambiental das áreas circunvizinhas e colocando em risco a saúde das populações residentes nessas áreas. Pelas legislações de diversos países a intoxicação resultante da contaminação pelo chumbo é considerada uma doença profissional.

Pelo importante significado e importância que representa é oportuno ressaltar que, na última década, dois marcos vieram contribuir para a emergência de um novo modo de pensar: (i) o primeiro está relacionado com a valorização da importância da terra; e (ii) o segundo está relacionado ao diagnóstico da gravidade dos problemas ambientais acumulados, e que projetados para um futuro não muito distante, poderiam inviabilizar não apenas o modelo de desenvolvimento econômico, como também a própria sobrevivência da espécie humana.

O reconhecimento da interdependência entre saúde, desenvolvimento econômico, qualidade de vida e condições ambientais, vem sendo superado pela consciência de que a capacidade de interferência humana desenvolve um papel contundente no equilíbrio e na evolução de sistemas complexos. Isto significa constatar as possibilidades e as responsabilidades decorrentes da capacidade de intervenção da sociedade humana sobre o seu destino e o da vida no planeta como um todo. Esses fatos representam grandes conquistas na direção de uma maior autonomia e integração sociedade – natureza que, não obstante, por outro lado, em diversas regiões do mundo esbarra na tendência atual das políticas das nações, que configuradas pela fase da globalização que atravessamos, é

promovido um afastamento das necessidades e aspirações dos grupos populares. Nesses termos, a saúde e as condições de vida somente têm sua relevância, quando referenciadas ao nível do lugar e das pessoas, onde deverão ser equacionadas na conformidade dos recursos aí existentes (GEO BRASIL 2002, 2002).

Conforme a Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos EUA (EPA), as emissões poluentes do dióxido de carbono estão associadas com a morbidade e mortalidade humanas, através dos níveis de concentração e duração da exposição humana à esses níveis, em conformidade com os dados dos Quadros 13 e 14, seguintes.

Concentração do Dióxido de Carbono (%)	Tempo de Exposição	Efeitos Sobre Humanos
17 – 30	De até 1 minuto.	Perda de atividade minuciosa e controlada, perda de consciência, convulsões, coma, morte.
> 10 – 15	De 1 minuto até vários minutos.	Vertigem, sonolência, contração severa de músculos, perda de consciência.
7 – 10	Poucos minutos.	Perda de consciência, próximo da inconsciência.
	De 1,5 minutos até 1,00 hora	Dor de cabeça, aumento dos batimentos cardíacos, rapidez da respiração, vertigem, suando.
6	1 – 2 minutos	Perturbações na audição e na visão.
	≤ 16 minutos	Dor de cabeça, dispnéia.
	Várias horas	Tremores.
4 – 5	Dentro de alguns minutos.	Dor de cabeça, vertigem, aumento da pressão sanguínea, dispnéia desconfortável, incômodo.
3	1 hora.	Dor de cabeça moderada, suado, e dispnéia em repouso.
2	Várias horas.	Dor de cabeça de horas, dispnéia em esforço moderado.

Quadro 13 – Efeitos Perigosos Sobre a Saúde Humana de Altas Concentrações de Dióxido de Carbono (EPA, 1991).

Concentração do Dióxido de Carbono no Ar (% pelo Volume)	Limite Máximo de Exposição (minutos)
0,5	Indefinido.
1,0	Indefinido.
1,5	480
2,0	60
3,0	20
4,0	10
5,0	7
6,0	5
7,0	Menor que 3

Quadro 14 – Tempo de Tolerância Fisiológico para Várias Concentrações de Dióxido de Carbono (COMPRESSED GAS ASSOCIATION *apud* EPA, 1991).

APÊNDICE 3: DADOS ADICIONAIS DOS TERMOS DOS CUSTOS *EVEC*, *EDA* E *EDS*, DA FUNÇÃO – OBJETIVO, DA PRODUÇÃO DOS DIVERSOS SERVIÇOS DE ENERGIA

	TIPO DE SERVIÇO DE ENERGIA			
	AQUECIMENTO		FORÇA MOTRIZ	
	Variável: SEN_{Aqu}		Variável: SEN_{Fm}	
	Tecnologia EEn (SEN_{Aqui}) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. (SEN_{Aqj}) (j = numérico)	Tecnologia EEn (SEN_{Fmi}) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. (SEN_{Fmj}) (j = numérico)
<i>CURE</i> (R\$/tCO ₂)	60	60	60	60
<i>TEPO</i> (tCO ₂ /BTU)	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$
<i>TCEPS</i> (BTU/kWh)	10.342	10.342	10.342	10.342
<i>TCESE</i> (kWh-EE/unid-SE)	30 (/t)	206 (/t)	1,05 (/kW)	1,109 (/kW)
<i>EDA</i> (R\$/unid-SE)	0,670 (/t)	4,603 (/t)	0,0235 (/kW)	0,0248 (/kW)
<i>EVEC</i> (R\$/unid-SE)	10,052424 (/t)	69,0266448 (/t)	0,35183484 (/kW)	0,371604607 (/kW)

TIPO DE SERVIÇO DE ENERGIA				
	ILUMINAÇÃO		AR CONDICIONADO	
	Variável: SEN_{Ilu}		Variável: SEN_{Arc}	
	Tecnologia EEn (SEN_{Ilu_i}) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. (SEN_{Ilu_j}) (j = numérico)	Tecnologia EEn (SEN_{Arc_i}) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. (SEN_{Arc_j}) (j = numérico)
<i>CURE</i> (R\$/tCO ₂)	60	60	60	60
<i>TEPO</i> (tCO ₂ /BTU)	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$
<i>TCEPS</i> (BTU/kWh)	10.342	10.342	10.342	10.342
<i>TCESE</i> (kWh-EE/unid-SE)	0,00000714 (/Lm)	0,0000286 (/Lm)	0,0000968 (/BTU)	0,000117 (/BTU)
<i>EDA</i> (R\$/unid-SE)	1,59543E-07 (/Lm)	6,39065E-07 (/Lm)	2,16299E-06 (/BTU)	2,61436E-06 (/BTU)
<i>EVEC</i> (R\$/unid-SE)	2,39248E-06 (/Lm)	9,58331E-06 (/Lm)	3,24358E-05 (/BTU)	3,92045E-05 (/BTU)
TIPO DE SERVIÇO DE ENERGIA				
	AR COMPRIMIDO		SOLDA POR AQUECIMENTO	
	Variável: SEN_{Arp}		Variável: SEN_{Saq}	
	Tecnologia EEn (SEN_{Arp_i}) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. (SEN_{Arp_j}) (j = numérico)	Tecnologia EEn (SEN_{Saq_i}) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. (SEN_{Saq_j}) (j = numérico)
<i>CURE</i> (R\$/tCO ₂)	60	60	60	60
<i>TEPO</i> (tCO ₂ /BTU)	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$
<i>TCEPS</i> (BTU/kWh)	10.342	10.342	10.342	10.342
<i>TCESE</i> (kWh-EE/unid-SE)	1,063 (/kW)	1,333 (/kW)	1,191 (/t)	1,43 (/t)
<i>EDA</i> (R\$/unid-SE)	0,023752655 (/kW)	0,029785785 (/kW)	0,026612806 (/kW)	0,031953243 (/kW)
<i>EVEC</i> (R\$/unid-SE)	0,35619089 (/kW)	0,446662706 (/kW)	0,399081233 (/t)	0,479165544 (/kW)

Tabela 25 – Dados dos Custos *EDA* e *EVEC* da Produção dos Serviços de Energia.

	TIPO DE SERVIÇO DE ENERGIA			
	ILUMINAÇÃO		AR CONDICIONADO	
	Variável: SEN_{Ilu}		Variável: SEN_{Arc}	
	Tecnologia EEn ($SEN_{Ilu(i)}$) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. ($SEN_{Ilu(j)}$) (j = numérico)	Tecnologia EEn ($SEN_{Arc(i)}$) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. ($SEN_{Arc(j)}$) (j = numérico)
TEPO (tCO ₂ /BTU)	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$
TCESE (KWh-EE/unid-SE)	0,00000714 (/Lm)	0,0000286 (/Lm)	0,0000968 (/BTU)	0,000117 (/BTU)
TCEPS (BTU/kWh)	10.342	10.342	10.342	10.342
CUVM (R\$/CO ₂)	0,0602	0,0602	0,0602	0,0602
CUVMB (R\$/CO ₂)	0,000003764	0,000003764	0,000003764	0,000003764
EDS (R\$/unid-SE)	$1,70136E-10$ (/Lm)	$6,41448E-10$ (/Lm)	$2,17106E-09$ (/BTU)	$2,62411E-09$ (/BTU)
	TIPO DE SERVIÇO DE ENERGIA			
	AQUECIMENTO		FORÇA MOTRIZ	
	Variável: SEN_{Aqu}		Variável: SEN_{Fm}	
	Tecnologia EEn ($SEN_{Aqu(i)}$) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. ($SEN_{Aqu(j)}$) (j = numérico)	Tecnologia EEn ($SEN_{Fm(i)}$) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. ($SEN_{Fm(j)}$) (j = numérico)
TEPO (tCO ₂ /BTU)	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$
TCESE (KWh-EE/unid-SE)	30 (/t)	206 (/t)	1,05 (/kW)	1,109 (/kW)
TCEPS (BTU/kWh)	10.342	10.342	10.342	10.342
CUVM (R\$/CO ₂)	0,0602	0,0602	0,0602	0,0602
CUVMB (R\$/CO ₂)	0,000003764	0,000003764	0,000003764	0,000003764
EDS (R\$/unid-SE)	0,0006726 (/t)	0,00462 (/t)	0,0000235 (/kW)	0,0000249 (/kW)
	TIPO DE SERVIÇO DE ENERGIA			
	AR COMPRIMIDO		SOLDA POR AQUECIMENTO	
	Variável: SEN_{Arc}		Variável: SEN_{Saq}	
	Tecnologia EEn ($SEN_{Arc(i)}$) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. ($SEN_{Arc(j)}$) (j = numérico)	Tecnologia EEn ($SEN_{Saq(i)}$) (i = alfabético)	Tecnologia Conv. ($SEN_{Saq(j)}$) (j = numérico)
TEPO (tCO ₂ /BTU)	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$	$3,601 \times 10^{-8}$
TCESE (KWh-EE/unid-SE)	1,063 (/kW)	1,333 (/kW)	1,191 (/kW)	1,43 (/kW)
TCEPS (BTU/kWh)	10.342	10.342	10.342	10.342
CUVM (R\$/CO ₂)	0,0602	0,0602	0,0602	0,0602
CUVMB (R\$/CO ₂)	0,000003764	0,000003764	0,000003764	0,000003764
EDS (R\$/unid-SE)	$2,38412E-05$ (/kW)	$2,98969E-05$ (/kW)	$2,67121E-05$ (/kW)	$3,20724E-05$ (/kW)

Tabela 26 – Dados dos Custos EDS da Produção dos Serviços de Energia.

ANEXOS

ANEXO 1: PARÂMETROS TÉCNICOS DE CARGAS MODIFICADAS DO SERVIÇO DE ENERGIA ILUMINAÇÃO

TECNOLOGIA⇒ PARÂMETRO↓	Vapor de Sódio	Fluorescente Compacta	Fluorescente Comum	Vapor Mercúrio	Multivapor Metálico	Incandescente; Halógena; Mista
Eficiência luminosa (Lm/W)	80 - 150	50 - 85	55 - 104	45 - 55	20 - 100	10 - 22
Fator de potência (qualidade)	médio - alto	baixo - alto	médio - alto	médio - alto	médio - alto	alto
Potência unitária (W)	70 - 1000	5 - 36	14 - 110	80 - 1000	70 - 2000	15 - 250
Vida útil (h)	14000 - 28000	3000 - 12000	7500 - 20000	- 24000	3000 - 15000	750 - 10000
Carga térmica (qualidade)	baixa	baixa	baixa	média	baixa	alta

Tabela 27 - Comparação dos Parâmetros de Desempenho para Cargas Modificadas do Serviço de Energia Iluminação (PROCEL/ELETRONBRAS, 2002; INMETRO, 2002; GE, 2002; OSRAM, 2002).

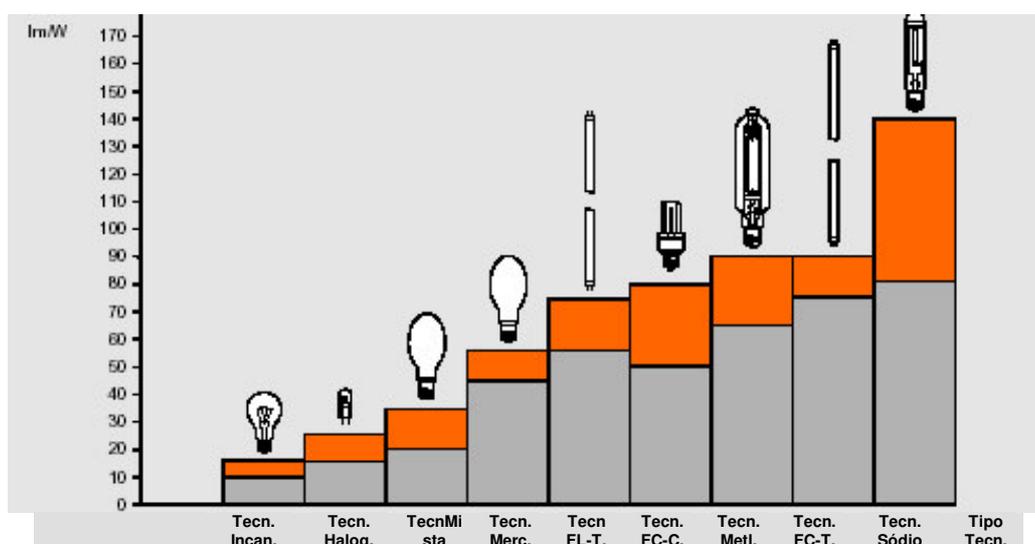


Figura 43 - Ilustração das Eficiências Energéticas das Principais Tecnologias do Serviço de Energia Iluminação (OSRAM, 2002).

- ◆ - Faixa de variação possível, da eficiência energética coberta pela tecnologia de iluminação.
- ◆ - Faixa de variação da eficiência energética, não coberta pela tecnologia de iluminação.

Tecn. Incan. – Tecnologia de iluminação do tipo incandescente; Tecn. Halog. – Tecnologia de iluminação do tipo halógena; Tecn. Mista – Tecnologia de iluminação do tipo mista; Tecn. Merc. – Tecnologia de iluminação do tipo mercúrio; Tecn. FL-T – Tecnologia de iluminação do tipo fluorescente tubular; Tecn. FC-C – Tecnologia de iluminação do tipo fluorescente compacta circular; Tecn. Metl. – Tecnologia de iluminação do tipo vapor metálico; Tecn. FC-T – Tecnologia de iluminação do tipo fluorescente compacta tubular; Tecn. Sódio – Tecnologia de iluminação do tipo sódio.

ANEXO 2 - DADOS RELEVANTES DA CONVERSÃO TECNOLÓGICA, SERVIÇOS DE ENERGIA, BENEFÍCIOS AMBIENTAIS E OUTROS BENEFÍCIOS NÃO - ENERGÉTICOS DE CARGAS MODIFICADAS INDUSTRIAIS.

INDÚSTRIA	SERVIÇO DE ENERGIA	CARGA MODIFICADA	CSEE (TEEn/TConv) (MBTU/MWh)	CSEE (TEEn/TConv) (BTU/kWh)
<ul style="list-style-type: none"> • Aplicações industriais para indústrias em geral. 	Processos de manufatura, processos de geração de energia, outros.	Sensores e controles de processos; Sistemas modernos de controle de processos usando sensores avançados e sistemas de controle baseados no conhecimento ou lógica <i>fuzzy</i> .	8,243 / 8,503	8.243 / 8.503
<p>Benefícios ambientais: Plausíveis, em virtude de emissões reduzidas e rendimento melhorado.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significantes, em virtude de tempos mortos reduzidos, custos de manutenção reduzidos e rendimento melhorado. • Qualidade dos produtos: Significantes, em virtude de reduzidas interrupções da produção. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Aplicações industriais para indústrias em geral. 	Calor de processo; frio de processo.	Integração de processos; Tecnologias emergentes com processos integrados.	6,750 / 8,111	6.750 / 8.111
<p>Benefícios ambientais: Plausíveis, em virtude de intensidades energéticas reduzidas.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Plausíveis, em virtude da possibilidade de diminuir “engarrafamentos” nas linhas de produção. • Qualidade dos produtos: Plausíveis. 				

<ul style="list-style-type: none"> • Aplicações industriais para indústrias em geral. 	Tratamento de esgoto e água.	Membranas para tratamento e regeneração de esgoto e água; Membranas para regeneração e limpeza do esgoto industrial.	8,889/11,111	8.889/11.111
<p>Benefícios ambientais: Consideráveis, devidos à diminuição do uso da água.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Plausíveis, em virtude da regeneração da água e das propriedades químicas e da redução da manutenção. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Aplicações industriais para indústrias em geral. • Estações de tratamento de esgoto. 	Tratamento de esgoto e água.	Tratamento anaeróbico de esgoto.	5,632 / 8,612	5.632 / 8.612
<p>Benefícios ambientais: Significantes, derivados da reduzida produção de dejetos; em algumas aplicações o nível de demanda de oxigênio bioquímico (BOD) pode ser reduzido significativamente.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Outros benefícios: Plausíveis, atribuíveis ao projeto compacto, o que reduz a área útil e à simplicidade de projeto. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Usos industriais para indústrias em geral. 	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado.	Tecnologia de aquecimento – ventilação – ar condicionado (HVAC) em instalações de alta tecnologia; Melhoria de sistemas HVAC em indústrias de alta tecnologia.	6,042 / 8,542	6.042 / 8.542
<p>Benefícios ambientais: Redução das intensidades energéticas.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Plausíveis. • Outros benefícios: Plausíveis, em virtude da segurança melhorada dos empregados, resultante da filtragem melhorada. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Indústrias em geral. 	Iluminação.	Projetos de iluminação avançados; Luz do dia com a substituição de luz “com dimmer” por luz de descarga de alta intensidade (HID).	1,710 / 8,495	1.710 / 8.495
<p>Benefícios ambientais: Redução das intensidades energéticas.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Plausível, devido à melhoria da qualidade da iluminação aumentar o desempenho dos trabalhadores. • Qualidade dos produtos: Plausível, em virtude da menor penumbra e melhor destaque das cores melhorar a inspeção dos produtos. • Outros benefícios: Significativos, em virtude de ganhos adicionais em tarefas iluminadas; carga HVAC reduzida; partida rápida. 				

• Indústrias em geral.	Iluminação.	Tecnologias de iluminação avançada; Substituição de luz a bulbo fluorescente por luz a bulbo de descarga de alta intensidade (HID).	4,231 / 8,516	4.231 / 8.516
<p>Benefícios ambientais: Intensidades energéticas reduzidas.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Plausível, em virtude da qualidade de iluminação, melhorada, aumentar o desempenho dos operadores. • Qualidade dos produtos: Plausível, em virtude de pouco ofuscamento e melhor rendimento de cor melhorar a qualidade da iluminação para a inspeção dos produtos. 				
• Indústrias em geral.	Cogeração.	Microturbinas a gás; Substituição de parcela da eletricidade contratada da rede.	8,415 / 10,200	8.415 / 10.200
<p>Benefícios ambientais: Limitados, decorrentes da possibilidade do aumento das emissões locais e incertezas quanto a energia da rede ser ou não mais limpa do que a geração local.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significantes, em virtude de a confiabilidade melhorada poder proporcionar o aumento do tempo útil. • Qualidade dos produtos: Significantes, em virtude de a qualidade de energia poder proporcionar a melhora na qualidade de aplicações sensíveis. • Outros benefícios: Plausíveis, pela possibilidade de permitir a expansão do sistema consumidor sem requerer tanto o aumento da eletricidade contratada da rede quanto o corte da ponta. 				
• Indústrias em geral.	Cogeração.	Células de combustível; Substituição de parte da eletricidade contratada da rede.	0,007/10,200	7.000/10.200
<p>Benefícios ambientais: Significativos, em virtude das baixas ou nenhuma emissões de nitratos (NOx).</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Plausíveis, em virtude de a confiabilidade aumentada poder induzir a economias de custo adicionais. • Qualidade dos produtos: Plausíveis, resultantes da qualidade de energia elevada. 				
• Indústrias em geral.	Cogeração.	Tecnologias de regeneração avançadas; Substituição de parte da eletricidade da rede.	0,0065 / 10,200	6.500 / 10.200
<p>Benefícios ambientais: Limitados, associados ao aumento das emissões locais e dúvidas a respeito de essa energia ser mais limpa do que a energia fornecida pela rede concessionária.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significativos, em virtude de o aumento da confiabilidade poder conduzir ao aumento do tempo útil. • Qualidade dos produtos: Significativos, em virtude de a qualidade de a energia melhorada poder melhorar a qualidade dos produtos em aplicações sensíveis. • Outros benefícios: Plausíveis, decorrentes da possibilidade de expansão sem aumento da contratação da eletricidade da rede e sem corte da carga de pico. 				

• Indústrias em geral.	Cogeração.	Turbinas CHP avançadas; Substituição de parte da eletricidade da rede por geração combinada com boiler a gás natural (GN).	0,0024 / 12,860	2.4000 / 12.860
<p>Benefícios ambientais: Significativos, em virtude das elevadas eficiências implicarem numa melhor utilização dos combustíveis.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significativos, em decorrência de poucos cortes no atendimento devidos aos desligamentos da rede. • Qualidade dos produtos: Significativos, pela elevada confiabilidade no atendimento da carga. 				
Indústrias em geral.	Força motriz. Acionamentos.	Lubrificantes avançados; Substituição de lubrificantes convencionais a base de petróleo por lubrificantes sintéticos avançados.	8,269 / 8,538	8.269 / 8.538
<p>Benefícios ambientais: Significativos, decorrentes da diminuição do volume de dejetos lubrificantes lançados ao ambiente.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significativos, resultantes do reduzido desgaste do equipamento e tempos de serviço estendidos, acompanhados de economias de trabalho e de tempos mortos. • Qualidade dos produtos: Plausível, resultante da confiabilidade elevada do equipamento. 				
• Indústrias em geral.	Força motriz. Acionamentos.	Acionamentos de relutância comutada; Motor de relutância comutada com equipamento de controle integral substituindo um motor de indução em acionamentos de velocidade ajustável.	8,445 / 8,444	8.445 / 8.444
<p>Benefícios ambientais:</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Plausíveis, em virtude da precisão do controle de velocidade possibilitar o aumento da produção dos equipamentos. • Qualidade dos produtos: Significativos, em virtude de a maior precisão do controle de velocidade possibilitar baixas taxas de defeitos dos produtos. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Siderurgia (Ferro e aço). • Alumínio. • Alimentos e bebidas. • Papel e celulose. • Plástico e borracha. • Refino. • Cimento. • Vidro. • Química. • Serralharia e corte. 	Ar-comprimido. Vazão de água. Força-motriz.	<i>Motores e acionamentos;</i> <i>Bombas de eficiência elevada;</i> aplicação de sistemas e componentes de bombeamento adequados para a otimização da operação e minimização de perdas.	7,059 / 8,563	7.059 / 8.563

<p>Benefícios ambientais: Redução das intensidades energéticas.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significativos, em virtude da operação mais estável do sistema. • Qualidade dos produtos: Significativos, em virtude do fluxo consistente, permitindo uma operação de processo mais estável. • Outros benefícios: Plausíveis em virtude da possibilidade da redução da relação Volume/Potência dos equipamentos liberando mais espaços.

<ul style="list-style-type: none"> • Siderurgia (Ferro e aço). • Alumínio. • Alimentos e bebidas. • Papel e celulose. • Plástico e borracha. • Refino. • Cimento. • Vidro. • Química. • Serralharia e corte. 	<p>Ar comprimido. Vazão de água. Força-motriz.</p>	<p><i>Motores e acionamentos; Sistemas de motores otimizados:</i> aferição de condições operacionais para sistemas de bombeamento, ventilação e movimento existentes com o objetivo de se ajustar a demanda real do processo com o nível real de produção.</p>	<p>6,809 / 8,621</p>	<p>6.809 / 8.621</p>
--	--	--	----------------------	----------------------

<p>Benefícios ambientais: Redução das intensidades energéticas. Velocidade reduzida de ventiladores pode reduzir a poluição sonora no ambiente.</p> <p>Benefícios sociais: Significativos, em virtude da velocidade reduzida da ventilação poder reduzir o nível de exposição ao ruído dos trabalhadores.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significativos, em virtude de uma melhor adequação do acionamento elétrico com a demanda poder melhorar o processo e liberar mais capacidade para expansão. • Qualidade dos produtos: Significativos, em virtude de uma melhor adequação do acionamento elétrico com a demanda poder melhorar o controle do processo.

<ul style="list-style-type: none"> • Siderurgia (Ferro e aço). • Alumínio. • Alimentos e bebidas. • Papel e celulose. • Plástico e borracha. • Refino. • Cimento. • Vidro. • Química. • Serralharia e corte. 	<p>Ar comprimido. Vazão de água. Força-motriz.</p>	<p><i>Motores e acionamentos; Diagnóstico de motores:</i> sensores internos ou externos e sistemas de monitoramento para verificar o estado operacional dos motores.</p>	<p>/ 8,523</p>	<p>/ 8.523</p>
--	--	--	----------------	----------------

<p>Benefícios ambientais: Benefícios diretos não plausíveis, porém, os benefícios indiretos podem ser significativos.</p> <p>Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Possibilidade do aumento dos tempos ativos implicando no aumento da produção anual. • Qualidade dos produtos: Plausíveis, em virtude do aumento dos tempos ativos poder reduzir as flutuações da produção. • Outros benefícios: Plausíveis, em virtude da possibilidade de se evitar expansões das instalações, de capital, decorrentes do aumento da produção.

<ul style="list-style-type: none"> • Siderurgia (Ferro e aço). • Alumínio. • Alimentos e bebidas. • Papel e celulose. • Plástico e borracha. • Refino. • Cimento. • Vidro. • Química. • Serralharia e corte. 	<p>Ar-comprimido. Vazão de água. Força-motriz.</p>	<p><i>Motores e acionamentos;</i> <i>Gerenciamento de sistemas de ar-comprimido:</i> Implementação de planos de gerenciamento para minimizar a necessidade energética do sistema e reduzir perdas e usos indesejados.</p>	<p>6,398 / 8,530</p>	<p>6.398 / 8.530</p>
<p>Benefícios ambientais: Redução das intensidades energéticas. Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significantes, em virtude da melhora na operação do sistema e do aumento da estabilidade da pressão. • Qualidade dos produtos: Plausíveis, em virtude do controle mais preciso da pressão poder permitir o desempenho melhorado do equipamento. • Outros benefícios: Significativos, em virtude de se poder evitar a necessidade da compra de mais compressores ou permitir o desligamento de compressores existentes resultando na redução de custos de O&M e economia desses valores. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Siderurgia (Ferro e aço). • Alumínio. • Alimentos e bebidas. • Papel e celulose. • Plástico e borracha. • Refino. • Cimento. • Vidro. • Química. • Serralharia e corte. 	<p>Ar-comprimido. Vazão de água. Força-motriz.</p>	<p><i>Motores e acionamentos;</i> <i>Compressores com controle avançado:</i> Uso de compressores de ar com controles microprocessados como alternativa aos controles convencionais.</p>	<p>8,245 / 8,537</p>	<p>8.245 / 8.537</p>
<p>Benefícios ambientais: Redução das intensidades energéticas. Benefícios não-energéticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significativos, em virtude do controle avançado da pressão aumentar a disponibilidade da capacidade e melhorar a operação do equipamento. • Qualidade dos produtos: Plausível, em virtude do controle preciso da pressão poder melhorar o desempenho do equipamento. • Outros benefícios: Significativos, em virtude de se evitar a necessidade da compra de mais compressores ou poder permitir o desligamento de compressores existentes resultando em custos de O&M reduzidos e economia de seus valores. 				
<ul style="list-style-type: none"> • Siderurgia. • Alumínio. • Alimentos e bebidas. • Papel e celulose. • Plástico e borracha. • Refino. • Cimento. • Vidro. • Química. • Serralharia e corte. 	<p>Ar-comprimido. Vazão de água. Força-motriz.</p>	<p>Motores e acionamentos; Projetos avançados de acionamentos de velocidade ajustável: Substituição ou <i>retrofit</i> de tecnologias de acionamentos de velocidade ajustável por projetos avançados.</p>	<p>8,364 / 8,511</p>	<p>8,364 / 8,511</p>

Benefícios ambientais: Redução das intensidades energéticas. Benefícios não-energéticos: <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significativos, em decorrência da melhora na confiabilidade do motor, resultante da diminuição do estresse mecânico. • Qualidade dos produtos: Sensível, em virtude da melhora do controle dos processos. 				
Alumínio.	Calor de processo.	Projetos de células eficientes; Projetos de retrofit de células eficientes.	6,803 / 8,515	6.803 / 8.515
Benefícios ambientais: Significativos, decorrentes das emissões reduzidas de fluorcarbonos. Benefícios não-energéticos: <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significativos, pela possibilidade de reduzir consideravelmente os custos de produção. 				
Ferro e aço	Calor de processo.	Fornos a arco elétrico avançados.	4,856 / 8,394	4.856 / 8.394
Benefícios ambientais: Plausíveis, em virtude do volume de gás reduzido e limpeza mais fácil. Benefícios não-energéticos: <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significante, em virtude do ajuste de tempo reduzido e consumos reduzidos de eletrodos e refratários. • Qualidade dos produtos: Melhora na flexibilidade da carga de alimentação. 				
Ferro e aço.	Calor de processo.	Substituição da fundição contínua por fundição de contato direto.	1,000 / 8,738	1.000 / 8.738
Benefícios ambientais: Plausíveis, em virtude da redução do nível das emissões poluentes. Benefícios não-energéticos: <ul style="list-style-type: none"> • Produtividade: Significativos, derivados da redução do tempo de produção e da redução dos custos de capital. • Qualidade dos produtos: Plausíveis, derivados da melhora nas propriedades superficiais. 				

Quadro 15 - Dados da Conversão Tecnológica, Serviços de Energia e de Benefícios Ambientais e Não Energéticos de Cargas Modificadas Industriais (Adaptado de Martin *et al.*, 2000 (LBNL, ACEEE)).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVIM, C. F.; 2003. **Projeto: Fornecimento de Instrumentos de Avaliação de Emissões de Gases de Efeito Estufa Acopladas a uma Matriz Energética**. Convênio Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT e Economia e Energia - e&e – ONG. Brasília, DF, Brasil. Disponível: <http://www.mme.gov.br>.
- ANA (Agência Nacional de Águas); 2003. **Gestão das Águas. Cobrança do Uso de Água**. Disponível: <http://www.ana.gov.br/gestaorechidricos/cobrança>; nov., 2003.
- ANEEL; 2003. **Autorizada Construção de Usina Eólica em Santa Catarina**. In: BOLETIM ENERGIA N° 069. Disponível: <http://www.aneel.gov.br>; 26-março, 2003.
- ANEEL; 2000. Resolução 456 da Agência Nacional de Energia Elétrica - **Estabelece as modalidades tarifárias e fixa os percentuais das tarifas convencional e horo-sazonais**. Publicada no Diário Oficial em 29 de novembro, Brasília DF.
- ANEEL; 1999. Resolução ANEEL n. 261, de 3 de setembro de 1999. **Regulamenta a obrigatoriedade de aplicação de recursos das concessionárias de energia elétrica em ações de combate ao desperdício de energia elétrica e pesquisa e desenvolvimento tecnológico do setor elétrico para o biênio 1999/2000**. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasil. 06 set.
- AYRES, ROBERT U.; 2003. **A Energia que Desperdiçamos**. World-Watch: Revista Bimensal do Worldwatch Institute WWI. UMA Editora: Salvador, BA. Vol. 14. N° 6. Pags. 30-39. Brasil.
- BELZER, D. B.; 1995. **Energy Use and Intensity in the Industrial Sector, 1972 – 1991**. In: *American Council for an Energy Efficient Economy*. 1995 Summer Study of Energy Efficiency in Industry. august 1-4: Grand Island, New York. Disponível: <http://www.etde.org/etdewb>.
- BELLARMINE, G. T.; 2000. **Load Management Techniques**. *IEEE Trans. on PAS*.
- BILLINTON, R.; LAKHANPAL, D. **Impacts of Demand-Side Management on Reliability Cost/Reliability Worth Analysis**. *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, New York, v. 143, n° 3, p. 225-231, may 1996.
- BRASIL ENERGIA; 2004. **Negócios. Consumo de Energia no Brasil**. *Brasil Energia*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, n° 281, abril 2004, pág. 57.
- BROWN, L. R.; 2003; Earth Policy Institute; 2003. **ECO-ECONOMIA: Construindo uma Economia para a Terra**. 1ª Edição. UMA (Universidade Livre da Mata Atlântica) Editora: Salvador, Baía, Brasil. Disponível: <http://www.wwiuma.org.br>, 2 mar.
- CAMARGO, C. Celso B.; NASSAR, Sílvia M.; CUNHA, Cristiano Almeida; 1999. **Administração do Consumo de Energia Elétrica em Residências: Um Estudo de Caso Utilizando Questionários**. *RAP – Revista de Administração Pública*, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, vol. n° 33, n° 3, 160-174, maio/junho.

- CAMARGO, C. Celso de BRASIL; BORENSTEIN, C. RAUL; 1997. **O Setor Elétrico no Brasil – Dos Desafios do Passado às Alternativas do Futuro**. 1ª Edição. Porto Alegre: Editora Sagra.
- CAMARGO, C. C. de BRASIL; 1996. **Avaliação do Potencial de Conservação de Energia Elétrica de Consumidores Residenciais**. Doutorado. Tese. Engenharia de Produção e Sistemas. UFSC. Florianópolis, SC, Brasil.
- CHEN, J.; LEE, F. N.; BREIPOHL, A. M., ADAPA, R.; 1995. **Scheduling Direct Load Control to Minimize System Operational Cost**. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 10, nov.
- COHEN, A. I.; WANG, C. C.; 1988. **An Optimization Method for Load Management Scheduling**. *IEEE Transactions on Power Systems* PWRS, New York v. 3, nº 2.
- COHEN, A. I.; PATMORE, J. W.; OGLEVEE, D. H.; BERMAN, R. W.; AYERS, L. H.; HOEARD, J. F.; 1987. **An Integrated System for Load Control**. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. PWRS-2, nº 3, august.
- COMITÊ DE REVITALIZAÇÃO DO MODELO DO SETOR ELÉTRICO; 2002. - Relatório de Progresso nº 2; Documento de Apoio B; **Configuração Oferta x Demanda; Proposta Metodológica**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DSM REVIEW, 1999. **GLOSSARY: DEMAND-SIDE MANAGEMENT TERMS**.
- DIAS, G. A. D.; 2002. **Harmônicas em Sistemas Industriais**. 2ª Edição. Editora EDIPUCRS: Porto Alegre, RS, Brasil.
- DOS REIS, L. B.; 2003. **Geração de Energia Elétrica: Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade**. 1ª Edição. Editora Manole: São Paulo, SP.
- ELÉTRICA.; 2003. **Taxa Ambiental Preocupa Empresários**. In: *Elétrica – Notícias da Elétrica*. Brasil. Disponível em: <http://www.eletrica.com.br>, 22 fev.
- ELETOBRÁS/PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica -; 2001. **Manual de Tarifação da Energia Elétrica**. 1ª Edição. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível: <http://www.fiesp.org.br>, maio.
- EPA – United States Environmental Agency; 1991. Carbon and Carbon Dioxide. **Table 3. Causes of Injuries and/or Death Associated with Carbon Dioxide Discharges After 1975**. Disponível: <http://www.epa.org>, fev.
- **Carbon and Carbon Dioxide**. Disponível: <http://www.epa.org>, fev.
- **APPENDIX B – Overview of Acute Health Effects. PART I: Acute Health Effects of Carbon Dioxide. PART II: Effects of Added Carbon Dioxide at Low Concentrations**. Disponível: <http://www.epa.org>, fev.
- EPRI - Electric Power Research Institute –; 1990. **Efficient Electricity Use. Estimates of Maximum Energy Savings**. EPRI/CU.
- FERREIA, A. de S.; 2003. **Contabilidade Ambiental: Custos Ambientais – Uma Visão de Sistema de Informações**. I Seminário de Contabilidade Ambiental (UMA/WWI). Salvador, Bahia, Brasil. Disponível: www.wwiuma.org.br, 27 abr.

- FINARDI, E. C.; 1999. **Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Utilizando Processamento de Alto Desempenho**. Florianópolis, SC, Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- FLORY, JOHN; PETERS, JANE; VOGT, LARRY; et al.; 1994. **Evaluating DSM: Can An Engineer Count On It? A Short Note Paper Summarizing a Panel Session at the July 1992 Summer Power Meeting**. *Transactions on Power Systems*, New York, USA, v. 9, nº 4, p. 1752 – 1758, nov.
- FONSECA, F. F. A.; 1999. **O Mundo em Crise: Economia, Ecologia e Energia**. 1ª Edição. Editora Signus: São Paulo, SP, Brasil.
- GE – General Electric; 2002. **Catálogo Geral de Produtos – Iluminação**. São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: <http://www.ge.com.br>
- GELLINGS, P. E.; 1996. Electric Power Research Institute (EPRI). **Introduction to Forecasting. In: Demand Forecasting in the Electric Utility**, 2th Edition. Tulsa, OK, USA: PennWell Publishing Company.
- GEO BRASIL 2002; – Global Environmental Outlook BRASIL 2002; 2002. **O Estado da Saúde e do Meio Ambiente no Brasil**. In: GEO BRASIL 2002; págs 200 – 218. Brasil: Disponível: <http://www.ibama.gov.br>. Out. 2003.
- GOTTSCHALK, C. M.; 1996. **Industrial Energy Conservation**. – UNESCO ENERGY ENGINEERING SERIES. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- GUIMARÃES, A.; 2000. - Prototype Carbon Fund - **Mobilizando Recursos Públicos e Privados para Combater Mudanças Climáticas Globais**. Seminário de Eficiência Energética “Campinas 2000”. Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE). Rio de Janeiro, RJ, 2000. Disponível em: www.inee.org.br.
- HANSEN, S. J.; 2002. **O Novo Mercado da Eficiência Energética e Seus Aspectos Financeiros**. In Seminário Internacional. INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética) – IBMEC Corporate (Centro de Estudos e Gestão em Energia). Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível: <http://www.inee.org>, maio.
- HENRIQUES Jr., MAURÍCIO F.; SCHAEFFER, Roberto. **Uso de Energia na Indústria Brasileira – Indicadores de Intensidade e de Eficiência Energética**. Instituto Nacional de Tecnologia – INT - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- HSU, Y.; SU, C.; 1991. **Dispatch of Direct Load Control Using Dynamic Programming**. *IEEE Transactions on Power Systems* PWRS, New York, v. 6, nº 3, p... - ...
- IEA – International Energy Agency -; 2003. **World Energy Investment Outlook 2003**. Disponível: <http://library.iea.org/dbtw-wpd/textbase/npsum>, fev.
- IEA – International Energy Agency; 2002. **IEA Statistics. OECD Renewables Information 2002**. 2002 Edition. Paris, France. Disponível: <http://www.iea.org>.
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial; 2003. **Tabelas de Consumo/Eficiência Energética**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível: <http://www.inmetro.gov.br>.
- JACOBS, J. M.; 1997. **Artificial Power Markets and Unintended Consequences**. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. PAS-12, nº 2, p. 968-972, may.

- JANNUZZI, G. M.; SWISHER, J. N. P.; 1997. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos. Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis**. 1ª Edição. Campinas – SP: Editora Autores Associados.
- KULOOR, S.; HOPE, G. S.; MALIK, O. P.; 1992. Environmentally Constrained Unit Commitment. *IEEE Proceedings-C*, New York, v. 139, nº 2, p. 122-128, mar.
- KURUCZ, C. N.; BRANDT, D.; SIM, S.; 1996. **A Linear Programming Model for Reducing System Peak Through Customer Load Control Programs**. *IEEE PES 96 WM 239-9 PWRs*, Baltimore, Maryland.
- LE, K. D.; BOYLE, R. F.; HUNTER, M. D.; JONES, K. D.; 1983. **A Procedure for Coordinating Direct-Load Control Strategies to Minimize System Production Cost**. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, New York, v. PAS-102, nº 6, june.
- LEE, F. N.; BREIPOHL, A. M.; 1984. **Operational Cost Savings of Direct Load Control**. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, New York, v. PAS-103, nº 5, p. -, may.
- Lei n. 9.991, de 24 de julho de 2000; 2000. **Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências**. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, 25 jul.
- Lei Nº 10.438, de 26 de abril de 2002. **Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências**. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Publicado no D.O de 29.04.2002, seção 1, p. 1, v. 139, n. 81-A.
- Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o Inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro, de 1989**. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. D.O, 9 jan., 1997.
- LINDO.EXE; 2000. 6.1.0.6. **LINDO for Windows**. LINDO Systems Inc. LINDO Solver. EUA, 2000. 1,8 MB.
- MARTIN, N.; WORRELL, E.; RUTH, M.; PRICE, L. - (LBNL); ELLIOT, R. N.; SHIPLEY, A. M.; THORNE, J. – ACEEE.; 2000. **Emerging Energy-Efficient Industrial Technologies**. Berkeley Lab – LBNL 46990 – DOE: Environmental Energy; Technologies Division; New York; October.
- MARTINS, M^a P. S.; 1999. **Inovação Tecnológica e Eficiência Energética**. Dissertação. MBA. Energia Elétrica – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- MATTOZO, V.; 2001. **O Histórico do Desenvolvimento Sustentável**. In: ENERGIA, AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. Caderno Digital sobre Energia, Ambiente e Desenvolvimento. Disponível em: <http://www.guiafloripa.com.br/energia/desenvolvimento>. fev., 2002.
- MEADOWS, D. H.; 1972. **The Limits to Growth**. Potomac Associates. London.

- MENDONÇA, M. A. R.; 1999. **Gerenciamento pelo Lado da Demanda. Métodos Direto, Indireto e Incentivado.** In: XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. STC/13, Anais do XV SNPTEE. 17 a 22 de outubro. Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- MORENO, H.; 2001. **Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas, Efeitos e Soluções.** 66 pags. PROCOBRE – Instituto Brasileiro do Cobre: 1ª Edição; São Paulo, SP, Brasil. Disponível: <http://www.procobrebrasil.org>.
- NG, KAH-HOE; SHEBLÉ, GERALD B.; 1998. **Direct Load Control – A Profit-Based Load Management Using Linear Programming.** *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 13, nº 2, p. 688-695, may.
- OSRAM; 2002. **Manual Luminotécnico Prático.** Disponível em: <http://www.osram.com.br>.
- PARACHA, Z. J.; DOULAI, P.; 1998. **Load Management – Techniques and Methods in Electric Power System.** *IEEE Trans. on PAS*.
- POOLE, A. D.; GELLER, H.; 1997. **O Novo Mercado de Serviços de Eficiência Energética no Brasil.** Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), American Council for an Efficient-Energy Economy (ACEEE). Rio de Janeiro/RJ. Disponível em: http://www.inee.org.br/down_loads/escos.
- PROCEL; 1989 – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. – **Manual de Conservação de Energia Elétrica. Fornos Elétricos a Arco Submerso.** Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras SA. Rio de Janeiro, RJ, Brasil; setembro.
- PROCEL; 1989 – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. – **Manual de Conservação de Energia Elétrica. Fornos Elétricos a Arco Direto.** Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras SA. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PROCEL; 2001 – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Manual de Tarificação da Energia Elétrica.** 1ª Edição. Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras SA. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, maio.
- PROCEL; 2002 – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. – **Sistemas de Ar Condicionado e Refrigeração.** 1ª Edição. Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras SA. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PROCEL; 2003 – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. – **Canal do Consumidor.** Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras SA. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível: <http://www.eletrabras.com/procel>.
- RAO, M. V. KRISHNA; RADHAKRISHNA, C.; 1991. **Development of Agricultural Demand Side Management Project.** *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. PAS-6, nº 4, p. 1466-1472, nov.
- ROSS, M. H.; STEINMEYER, D.; 1990. **Energy for Industry: Industrial Processes Consume Two Fifths of the Developed World's Energy. Efficiency Improvements Have Steadily Cut That Share and Promise to Continue.** *Scientific American*, New York, sep.
- SACHS, IGNACY. **Formulação de Princípios Sobre Ecodesenvolvimento.**
- SANTOS, M. F. M. - Presidente do ONS –; 2002. **Mínimo Custo e Máxima Segurança.** In *Folha de São Paulo*, São Paulo, 3 mar.

- SAWIN, J.; 2003. **Traçando um Novo Futuro Energético**. In: O Estado do Mundo 2003. Worldwatch Institute, WWI. pags. 97-124. Editora UMA – Universidade Livre da Mata Atlântica. Salvador/BA, Brasil.
- SHEBLÉ, G. B. **Price Based in an Auction Market Structure**. *IEEE PES*, 96 WM 191 – 7 PWRS, Baltimore, Maryland, 1996.
- SHEFFIELD, J. **The Role of Energy Efficiency and Renewable Energies in the Future World Energy Market**. Oak Ridge National Laboratory (ORNL); Oak Ridge, Tennessee, USA. Disponível: <http://www.doe.gov>.
- SICA, E. T.; 2003. **Internalização de Variáveis Qualitativas no Planejamento de Sistemas Elétricos de Energia: Uma Proposta Metodológica**. Mestrado. Dissertação. Engenharia Elétrica. UFSC. Florianópolis, SC, Brasil.
- SHIRMOHAMMADI, D.; THOMAS, C. L.; 1991. **Valuation of the Transmission Impact in a Resource Bidding Process**. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. PAS-6 n° 1, p. 316 – 323, feb.
- SILVA, E. L.; 2001. **Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica**. 1ª Edição. Editora Sagra Luzzato. Porto Alegre, RS, Brasil. 183 pags.
- SOUZA, MARCOS DE MOURA; 2003. **Relatório da UNESCO Sobre a Água Faz Alerta Sobre 'Inércia Política'**. O Estado de SP in Jornal da Ciência – JC e-mail, Edição 2232 - Notícias de C&T – Serviço da SBPC, 6 mar.
- STRBAC, G.; KIRSCHEN, D.; 1998. **Assessing Competitiveness of Demand-Side Bidding**. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. __, n° __, p. __-, apr.
- STRBAC, G.; FARMER, E. D.; CORY, B. J.; 1996. **Framework for the Incorporation of Demand-Side in a Competitive Electricity Market**. *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, New York, v. 143, n° 3, p. 232-237, may.
- STRONG, M.; 1973. **Conceito de Ecodesenvolvimento**. Canadá.
- SWISHER, J. N., JANNUZZI, G. DE M.; REDLINGER, R. Y.; 1997. **Tools and Methods for Integrated Resource Planning: Improving Energy, Efficiency and Protecting the Environment**. Denmark: Grafisk Service, Risø National Laboratory.
- TOLMASQUIM, M. T.; MOTTA, R. S.; MONTEIRO, A. G.; 2000. **Metodologias de Valoração de Danos Ambientais Causados pelo Setor Elétrico**. Setor de Publicações e Programação Visual/COPPE & Setor de Reprografia/COPPE – UFRJ: COPPE. Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- UNIDO - UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION; 1998. **Statistics and Informations Networks Branch and the Cleaner Production and Environmental Management Branch Sustainable Industrial Development**. UNIDO POSITION. WorldLinks Films and Graphics. Viena.
- WEG MOTORES; 2001. **Catálogo Geral de Motores Elétricos – Linhas de Produtos, Características, Especificação, Instalação, Manutenção**. Jaraguá do Sul/SC, Brasil, nov.
- WEGMTPT.EXE. (2002). Versão 4.01. **Escolha de Motores Elétricos**. WEG Motores Ltda. Catálogo Eletrônico WEG. Jaraguá do Sul/SC. Disponível em: <http://www.weg.com.br>.
- WWI, 2003 – Worldwatch Institute **Estado do Mundo 2003**: Edição Especial do 20º Aniversário. Editora UMA. Salvador, BA, Brasil.

