

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA INTERUNIDADES DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA
Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física
Escola Politécnica / Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade

ALEXANDRE BETINARDI STRAPASSON

A ENERGIA TÉRMICA E O PARADOXO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético

São Paulo

2004

ALEXANDRE BETINARDI STRAPASSON

**A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética –
Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético**

Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Energia.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Tadeu Werneck Fagá

São Paulo

2004

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Strapasson, Alexandre Betinardi.

A Energia térmica e o paradoxo da eficiência energética: desafios para um novo modelo de planejamento energético / Alexandre Betinardi Strapasson; orientador Murilo Tadeu Werneck Fagá. – São Paulo, 2004.

134p. : il.; 30cm.

Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

1.Eficiência energética 2.Planejamento energético
3.Gás natural 4.Exergia 5.Entropia I.Título.

DEDICATÓRIA

Ao saudoso e eterno amigo
Fabrício Augusto de Assis (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Murilo Tadeu W. Fagá, pelo constante incentivo e confiança em mim depositada. Uma pessoa simples e verdadeira, a quem tenho grande consideração e respeito. Ao querido Prof. Dr. Edmilson M. dos Santos, todo o meu reconhecimento e estima, por sua amizade e apoio à minha formação acadêmica. A todos os professores do Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE/USP), em especial, ao Prof. Dr. Célio Bermann, Prof. Dr. Ildo Luís Sauer, Prof. Dr. Roberto Zilles, Profa. Dra. Virgínia Parente e Prof. Dr. Roberto Hukai. Aos membros das bancas de qualificação e defesa, Prof. Dr. Silvio de Oliveira Júnior, da Escola Politécnica da USP, e ao Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira, da Universidade Federal de Itajubá, pelas importantes contribuições feitas a esta pesquisa.

Ao Denílson Ferreira, uma amizade como a sua não se acha facilmente. Sou muito grato pelo seu companheirismo e cumplicidade. Ao Márcio Vilela, pelo ser humano que você é. Ao Humberto Renato de Oliveira e a todos os amigos e colegas do PIPGE. À vigilância do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE), especialmente, ao Márcio, Brito, Augusto e Edson, por terem me agüentado durante tantas madrugadas. Aos funcionários da Secretaria da Pós-Graduação, Júlio, Gisa, Rosa e Nazaré, e da Biblioteca do IEE, pela forma carinhosa como sempre me trataram.

Aos professores e colegas do Instituto Francês do Petróleo (IFP), pela forma fraterna como me acolheram em Paris. Agradeço ao Prof. Dr. Jean-Pierre Favennec, Prof. Dr. Karim Faïd e à Profa. Dra. Nadine Bret-Rouzaut. Aos amigos do IFP, Cesar Santa-Gadea, Nassir Akilu, Tahïr, José Martinez e Daniela Salvitti, e a todos os colegas da Rússia.

À Agência Nacional do Petróleo pela bolsa de pesquisa concedida e pelas oportunidades de aprendizado que me possibilitou. Aos companheiros do Ministério do Meio Ambiente, pelos aprendizados na área de energia, em especial ao Dr. Ruy de Góes L. de Barros e à Dra. Vânia de Araújo Soares.

Finalmente, agradeço à minha amada Manoela dos Anjos Afonso, simplesmente por existir. À minha querida família, sem a qual eu nada seria. E aos amigos de Curitiba - PR, por nunca terem me abandonado.

“Isso de querer ser exatamente aquilo que a gente é
ainda vai nos levar além”.

Paulo Leminsky

RESUMO

STRAPASSON, A. B. **A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética: Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

O modelo brasileiro de geração de energia elétrica possui características muito peculiares em relação aos demais países do mundo. Seu vasto parque hidrelétrico possibilitou ao país utilizar indiscriminadamente a eletricidade em diversas formas de uso final. Porém, com a transição do modelo hídrico para um modelo misto de geração, surge um novo paradigma de eficiência energética. A eletricidade consumida em usos finais térmicos pode agora ser substituída por diferentes fontes energéticas de origem química, como o gás natural e a biomassa. Nesse novo cenário, a energia primária pode ser convertida tanto em energia elétrica, quanto em energia útil, na forma de calor. O objetivo desta pesquisa foi identificar a distorção presente no atual modelo energético nacional e avaliar o potencial de economia de energia primária possível de ser obtido pela substituição de eletricidade por fontes de origem química, em usos finais térmicos. A hipótese formulada é de que o uso racional da energia, segundo sua qualidade exergética e finalidade de uso, pode reduzir significativamente o consumo de energia primária. Para comprovar essa hipótese, foram realizadas estimativas de substituição de eletricidade por gás natural, nos usos finais térmicos de todos os setores de consumo. Além disso, foi realizada uma análise comparativa entre diversos países do mundo, quanto ao uso do calor em suas matrizes energéticas, a fim de estimar o percentual de eletricidade que poderia ser substituído no Brasil e a quantidade de energia química equivalente que seria demandada. Também foram estimados os possíveis ganhos ambientais decorrentes de tal substituição. Os resultados obtidos mostram a relevância do tema e o impacto que uma política de uso racional da energia poderia alcançar.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Planejamento Energético. Gás Natural. Exergia. Entropia.

ABSTRACT

STRAPASSON, A. B. **The Thermal Energy and the Energy Efficiency Paradox: Challenges for a New Paradigm of Energy Planning.** Dissertation (Master) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

The electrical generation model of Brazil has a peculiar characteristic regarding other countries. Its large hydropower capacity allowed the indiscriminate use of the electricity for several kinds of end uses. However, with the transition of the hydroelectric generation model for a mixed generation model, a new paradigm of energy efficiency appears. The electricity consumed in the thermal end uses can be now substituted by other energy sources like natural gas and biomass. In that new scenario, the primary energy can be converted in electricity as well as useful energy. The objective was to identify the existent distortion in the current Brazilian model and to evaluate the economy potential of primary energy that could be obtained substituting the electricity by chemical energy in thermal end uses. The formulated hypothesis is that the rational use of energy, according to its exergy quality and purpose of use, can reduce significantly the primary energy consumption. The substitution of electricity by natural gas was simulated for all the thermal end uses of the energy mix. Besides, a comparative analysis taking into account other countries was carried out about the use of heat in the energy mixes, in order to estimate the electricity percent that could be substituted in Brazil and the equivalent amount of chemical energy that would be demanded. The possible environmental gains promoted by that substitution was also estimated. The results show the relevance of the theme and the impact that a policy of energy efficiency could attain.

Keywords: Energy Efficiency. Energy Planning. Natural Gas. Exergy. Entropy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Possibilidades de uso da energia química para a produção de calor.....	16
Gráfico 1. Preço médio do barril de petróleo.....	21
Gráfico 2. Oferta Mundial de Energia.....	21
Gráfico 3. Consumo Mundial de Energia.....	21
Gráfico 4. Geração mundial de energia elétrica por fonte.....	22
Gráfico 5. Consumo potencial de gás natural na indústria do Estado de São Paulo, em substituição a diferentes fontes de energia.....	29
Gráfico 6. Mercado potencial de gás natural para o Estado de São Paulo.....	31
Gráfico 7. Mercado potencial de gás natural para o Setor Industrial do Estado de São Paulo.....	32
Gráfico 8. Mercado potencial de gás natural para o Estado de São Paulo, segundo os insumos energéticos substituíveis.....	33
Gráfico 5. Nível médio dos reservatórios da Região Sudeste do Brasil.....	36
Gráfico 6. Substituição de derivados de petróleo e conservação de energia obtida pelo Programa CONSERVE, no período de 1981 a 1985.....	39
Figura 2. Processos de conversão de energia.....	49
Figura 3. Base de dados.....	66
Gráfico 7. Participação da eletricidade no consumo total de energia, para diferentes tipos de parque gerador.....	74
Gráfico 8. Setor de Ferro e Aço - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida pelo setor.....	80
Gráfico 9. Setor de Ferro e Aço - Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária.....	81
Gráfico 10. Setor de Química e Petroquímica - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor.....	83
Gráfico 11. Setor de Química e Petroquímica - Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária.....	84

Gráfico 12. Setor de Metais Não-Ferrosos - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor.....	86
Gráfico 13. Setor de Metais Não-Ferrosos - Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária	87
Gráfico 14. Setor de Minerais Não-metálicos - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor.....	90
Gráfico 15. Setor de Minerais Não-metálicos - Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária	91
Gráfico 16. Setor de Mineração - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor	92
Gráfico 17. Setor de Mineração - Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária	93
Gráfico 18. Setor de Alimentos e Tabaco - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor.....	96
Gráfico 19. Setor de Alimentos e Tabaco - Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária	97
Gráfico 20. Setor Têxtil e Couro - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor	100
Gráfico 21. Setor de Têxtil e Couro - Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária	101
Gráfico 22. Setor Residencial - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor	103
Gráfico 23. Setor Residencial - Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária.....	104
Gráfico 24. Setor Comercial e Serviços Públicos - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor.....	107
Gráfico 25. Setor Comercial e Serviços Públicos - Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária	108
Gráfico 26. Setor de Agricultura - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor	109
Gráfico 28. Setor de Agricultura - Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária	110
Gráfico 29. Perspectivas de substituição da eletricidade por energia química.....	111

Gráfico 30. Potencial de economia de energia primária possível de ser obtido pela substituição de eletricidade por gás natural em todos os usos finais térmicos da matriz energética nacional.....	113
Gráfico 31. Estimativa para o mercado de gás natural, como substituto da eletricidade, em usos finais térmicos, em comparação à capacidade máxima do Gasoduto Bolívia-Brasil	114
Gráfico 32. Emissões de dióxido de oxigênio (CO ₂) e de óxidos de nitrogênio (NO _x) possíveis de serem evitadas através da economia de energia primária	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mercado potencial para o gás natural no Brasil, avaliado em 1992	30
Tabela 2 - Parques geradores	61
Tabela 3 - Sumário de Equações da Metodologia de Cálculo	65
Tabela 4 - Equivalência dos setores de consumo de energia, para três bases de dados distintas	72
Tabela 5 - Consumo de energia no Setor de Ferro e Aço	79
Tabela 6 - Consumo de energia no Setor de Química e Petroquímica	82
Tabela 7 - Consumo de energia no Setor de Metais Não-Ferrosos	86
Tabela 8 - Consumo de energia no Setor de Minerais Não-Metálicos	89
Tabela 9 - Consumo de energia no Setor de Mineração	92
Tabela 10 - Consumo de energia no Setor de Alimentos e Tabaco	95
Tabela 11 - Consumo de energia no Setor Têxtil e Couro	99
Tabela 12 - Consumo de energia no Setor Residencial	103
Tabela 13 - Consumo de energia no Setor Comercial e Serviços Públicos	106
Tabela 14 - Consumo de energia no Setor de Agricultura	109
Tabela 15 - Sumário de Resultados	112

LISTA DE SIGLAS

AD - Aquecimento Direto

ADEME - *Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie* (França)

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP - Agência Nacional do Petróleo

BEN - Balanço Energético Nacional

BEU - Balanço de Energia Útil

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

BP - *British Petroleum*

BTE - Óleo Combustível com Baixo Teor de Enxofre (até 1%)

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética

COMGÁS - Companhia de Gás de São Paulo

CONPET - Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e do Gás Natural

COPEL - Companhia Paranaense de Energia

CP - Calor de Processo

DEFRA - *Department for Environment Food and Rural Affairs* (Reino Unido)

DETR - Departamento de Meio Ambiente, Transportes e Regiões (Reino Unido)

DoE – *Department of Energy* (EUA)

ECCJ - *The Energy Conservation Center of Japan*

EERE - *Energy Efficiency and Renewable Energy* (EUA)

EERN - *Energy Efficiency and Renewable Energy Network* (EUA)

EGTD - Energia Garantida por Tempo Determinado

ELETRORÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

FDTE - Fundação para o Desenvolvimento da Engenharia

GASBOL - Gasoduto Bolívia-Brasil

GASLAB - Centro de Análise e Monitoramento Ambiental do Gás Natural da Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

GN - Gás Natural

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDAE - *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía* (Espanha)

IEA - *International Energy Agency*

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MME - Ministério de Minas e Energia

NRCan - *Natural Resources Canada*

OECD - *Organisation for Economic Co-operation and Development*

OEE - *Office of Energy Efficiency* (Canadá)

OMM - Organização Meteorológica Mundial

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH - Pequena Central Hidrelétrica

PETROBRÁS - Petróleo Brasileiro S.A.

PIPGE - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia

PLANGÁS - Plano Nacional de Gás

PLE - Pipeline Engineering GmbH

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PPT - Programa Prioritário de Termelétricidade

PROÁLCOOL - Programa Nacional do Alcool

PROCEL - Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

SoP - *Electricity Standards of Performance* (Reino Unido)

SPG - Sociedade Privada do Gás

tEP - Tonelada Equivalente de Petróleo

UNFCCC - *United Nations Framework Convention of Climate Change*

USP - Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	ASPECTOS HISTÓRICOS	19
3.1.1	A ENERGIA NO MUNDO.....	19
3.1.2	A ENERGIA NO BRASIL	23
3.1.2.1	Perspectivas para o mercado de gás natural no Brasil	28
3.1.2.2	Inserção do gás natural na matriz energética nacional	34
3.1.2.3	Implicações do antigo modelo.....	35
3.1.3	OS PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	37
3.1.3.1	Brasil	38
3.1.3.2	Outros países.....	42
3.2	ASPECTOS CONCEITUAIS	47
3.2.1	A ENERGIA.....	47
3.2.2	PRIMEIRA E SEGUNDA LEIS DA TERMODINÂMICA	50
4	METODOLOGIA.....	55
4.1	METODOLOGIA DE CÁLCULO	55
4.1.1	ANÁLISE DO USO DA ENERGIA TÉRMICA NA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL	56
4.1.2	ANÁLISE DO USO DA ENERGIA TÉRMICA NO MUNDO.....	60
4.1.2.1	Metodologia de cálculo para estimar o Percentual de Substituição (S)	62
4.1.3	SUMÁRIO DE EQUAÇÕES.....	65
4.2	BASE DE DADOS UTILIZADA	66
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
5.1	SETOR INDUSTRIAL	78

5.1.1	SETOR DE FERRO E AÇO	78
5.1.2	SETOR DE QUÍMICA E PETROQUÍMICA	82
5.1.3	SETOR DE METAIS NÃO-FERROSOS.....	85
5.1.4	SETOR DE MINERAIS NÃO-METÁLICOS.....	88
5.1.5	SETOR DE MINERAÇÃO.....	91
5.1.6	SETOR DE ALIMENTOS E TABACO	94
5.1.7	SETOR DE PAPEL, CELULOSE E IMPRESSÃO	97
5.1.8	SETOR TÊXTIL E COURO.....	98
5.2	SETOR RESIDENCIAL.....	101
5.3	SETOR COMERCIAL E SERVIÇOS PÚBLICOS	106
5.4	SETOR DE AGRICULTURA.....	108
5.5	TOTAL DOS SETORES	111
6	CONCLUSÃO	117
7	REFERÊNCIAS.....	119
	APÊNDICES.....	125

1 INTRODUÇÃO

O vasto potencial hidrelétrico brasileiro explorado nas últimas décadas contribuiu diretamente à industrialização e ao desenvolvimento econômico do país. Contudo, com a escassez de novos grandes potenciais, a participação de outras fontes de energia na matriz energética nacional tem aumentado a cada ano, especialmente, a do gás natural. A conclusão do Gasoduto Bolívia-Brasil e a descoberta de novos campos de gás em território nacional dão fortes perspectivas de uma inserção massiva do gás natural na matriz energética. O que se presencia é uma transição gradual do modelo hídrico de geração de eletricidade para um modelo misto.

O modelo hídrico possibilitou ao Brasil utilizar indiscriminadamente a abundante eletricidade gerada, sem estabelecer usos prioritários. No entanto, em países com modelo misto de geração, como Alemanha, Inglaterra, Rússia, China e outros, a eletricidade é priorizada para usos finais que requerem uma energia mais ordenada, tais como: força motriz e iluminação. Nesses países, os usos finais térmicos são priorizados pelas fontes de energia química e não pela eletricidade. Entende-se com energia química a energia proveniente de fontes de origem química, como o gás natural, biomassa, carvão mineral, óleo combustível, etc.

Esse comportamento ocorre, devido à possibilidade de se poder utilizar as fontes químicas tanto para geração de eletricidade, quanto para a produção direta de calor (figura 1).

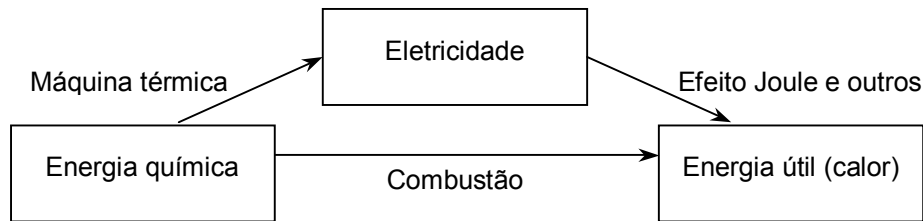


Figura 1. Possibilidades de uso da energia química para a produção de calor

A obsessão por ampliar a oferta de eletricidade, com o objetivo de excluir o risco de novos racionamentos e de dar maior estabilidade ao sistema, pode levar a modelos distorcidos de uso racional da energia. A atual política energética nacional tem ignorado o grande potencial de economia de energia primária possível de ser obtido pelo uso das fontes de energia química para a produção direta de calor, em substituição à eletricidade. Isso ocorre devido ao processo de conversão de energia química em energia útil apresentar uma baixa “qualidade exergética”, em relação à eletricidade. Entende-se como “qualidade exergética” o potencial que uma determinada forma energia possui para produzir energia útil na forma de trabalho, em um dado processo de transformação, uma vez que exergia é trabalho ou habilidade em produzir trabalho (Wall, 1990).

Os programas de eficiência energética, historicamente, utilizam somente o conceito da Primeira Lei da Termodinâmica na análise dos processos de conversão de energia, dando pouca relevância aos rendimentos térmicos decorrentes da geração de eletricidade, fato também observado nos estudos de Schaeffer (1990) e Santos et al. (2002). A escassez de pesquisas com esse enfoque revelam o atual estágio de imaturidade que o país se encontra no âmbito dessas discussões.

“A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética: Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético” traz exatamente essa abordagem,

incorporando a visão sistêmica à fase de planejamento. A metodologia apresentada neste trabalho possibilita identificar a existência de um verdadeiro paradoxo da eficiência energética, ao se considerar a discussão de modelos energéticos e não somente de processos específicos. Os resultados obtidos trazem subsídios importantes para os formuladores de políticas e tomadores de decisão.

A hipótese formulada nesta pesquisa é de que “o uso racional da energia, segundo sua qualidade exergética e finalidade de uso, pode reduzir significativamente o consumo de energia primária”. Com base em rendimentos de Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, foram analisadas as eficiências globais dos processos que demandam calor, para os diversos setores de consumo, envolvendo todas as etapas da cadeia energética: energia primária - energia final - energia útil (calor). A partir dessa análise são apresentadas propostas de uso racional da energia, visando dar novos elementos ao planejamento energético nacional.

Não foi objeto aqui realizar uma análise econômica, porém os resultados apresentados contribuem para identificar quais são os setores prioritários para o desenvolvimento de programas específicos de eficiência energética. Tampouco foi de realizar uma análise exergética ou uma discussão conceitual sobre exergia.

Cabe observar também que a presente dissertação foi devidamente aprovada em exame de defesa e incorpora as sugestões realizadas pelos membros da banca na ocasião.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Dar elementos para o estabelecimento de um novo modelo de planejamento energético no Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar a importância do uso racional da energia para o planejamento energético nacional, no que se refere à qualidade exergética e finalidade de uso da energia;
- Propor uma metodologia de análise e cálculo para estimar o potencial de economia de energia primária possível de ser obtido pela substituição de eletricidade por energia química, em usos finais térmicos, e identificar, do ponto de vista energético, os setores prioritários para tal substituição;
- Comparar o uso da eletricidade para produção de calor no Brasil com o uso em outros países;
- Avaliar as distorções presentes na matriz energética nacional e propor diretrizes ao desenvolvimento de novas políticas energéticas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está dividido em duas partes. Primeiramente, são apresentados os aspectos históricos da energia e, posteriormente, são elucidados os aspectos conceituais básicos mais relevantes.

3.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

Com o objetivo de contextualizar o tema desta dissertação foi realizada uma breve análise sobre a história da energia no Brasil e no mundo, bem como, uma análise sobre os programas de eficiência energética já realizados em nível nacional e internacional.

3.1.1 A ENERGIA NO MUNDO

O uso da energia no mundo sempre esteve associado ao grau de desenvolvimento das civilizações. Os períodos paleolítico (3.500.000 a 10.000 a.C.) e neolítico (10.000 a 5.000 a.C.) foram marcados por descobertas revolucionárias, como: a produção de ferramentas, o controle do fogo e o desenvolvimento de formas de cultivo. As principais fontes de energia eram a biomassa, a força humana e animal, os ventos e a água. Com o tempo, o homem aprimorou cada vez mais suas técnicas de conversão da energia, culminando com o uso do carvão mineral durante a Revolução Industrial, no século XVIII (Mabogunje, 1997).

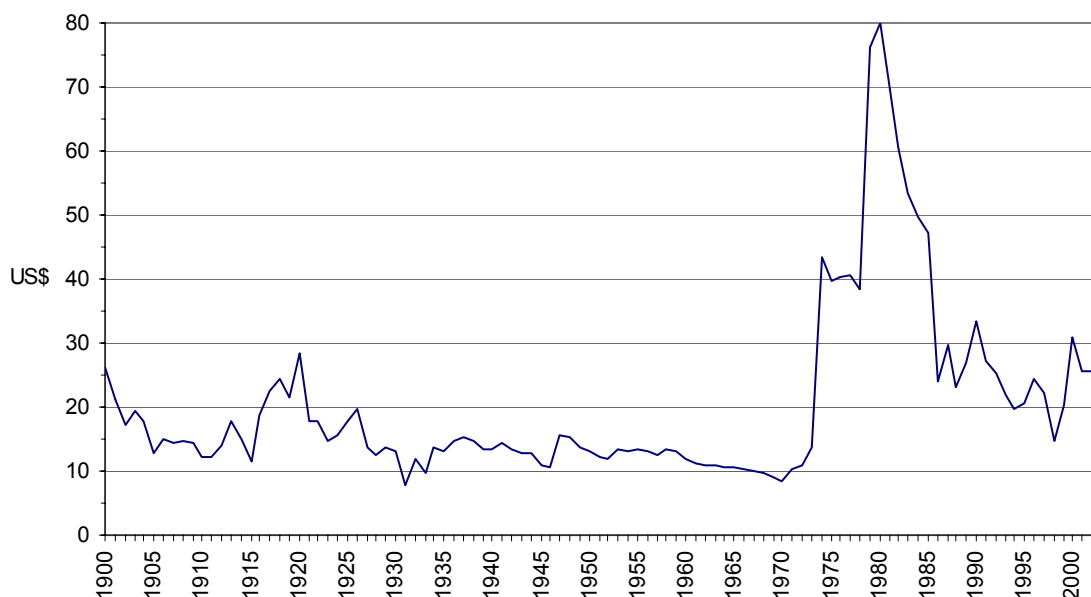
A era do carvão foi marcada por um intenso crescimento industrial, associado a importantes descobertas tecnológicas, como a máquina a vapor.

Após a descoberta do petróleo, no final do século XIX, e posteriormente do gás natural, o carvão deixa de ser a principal fonte de energia consumida, mas continua exercendo um papel importante na matriz energética global. O domínio do uso da eletricidade dá novo impulso ao desenvolvimento tecnológico e gera uma relação de forte dependência dos combustíveis fósseis para geração.

No século XX, o petróleo intensifica ainda mais o processo de industrialização e de desenvolvimento econômico, ocasionando uma intensa modificação e “artificialização” do espaço ocupado pelo homem (Santos, 1997). Na década de 70, os preços do petróleo tornam-se elevados, frente às fortes crises presenciadas em 1973-74 e 1979-80, conforme o gráfico 1, elaborado a partir de dados da British Petroleum (BP, 2003). Com isso, muitos países procuraram reduzir a dependência internacional de suas economias às oscilações drásticas de preço. As principais estratégias adotadas foram: aumentar a eficiência energética dos processos de conversão da energia; e substituir o consumo de óleo combustível, em usinas convencionais (ciclo a vapor), por outros tipos de combustíveis ou de usinas.

Desta forma, a geração termelétrica a carvão e nuclear foi priorizada em muitos países. Após a década de 80 o gás natural passou a ser largamente utilizado para geração elétrica em ciclo combinado, aumentando em muito a sua potência final. Outras fontes de energia, tais como, eólica, solar e biomassa, começaram a ocupar nichos específicos de mercado em alguns países (ANEEL et ANP, 1999). Além disso, muitos países investiram maciçamente em programas de conservação da energia. Outra forma de proteção encontrada foi firmar contratos bilaterais de compra e venda do petróleo, e ampliar a exploração interna.

Gráfico 1. Preço médio do barril de petróleo (valores corrigidos para 2003)



Apesar dos mecanismos de proteção citados e da eminente escassez de petróleo para as próximas décadas, observa-se que tanto a oferta, quanto o consumo mundial de energia ainda são intensamente dependentes do petróleo, conforme apresentado nos gráficos 2 e 3 (MME, 2002), para o ano base de 2001. O mesmo ocorre para o carvão mineral e gás natural.

Gráfico 2. Oferta Mundial de Energia

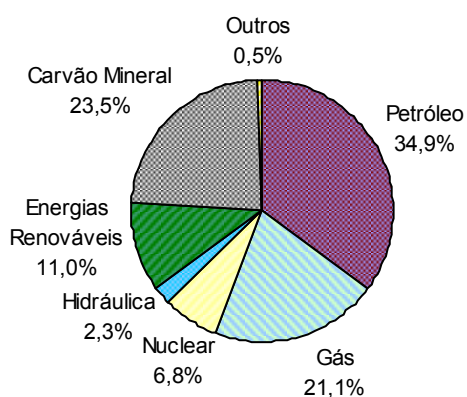
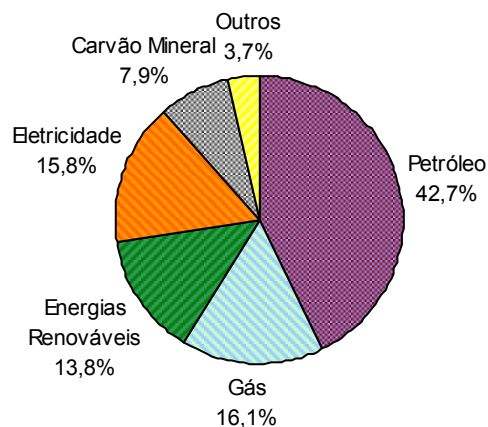
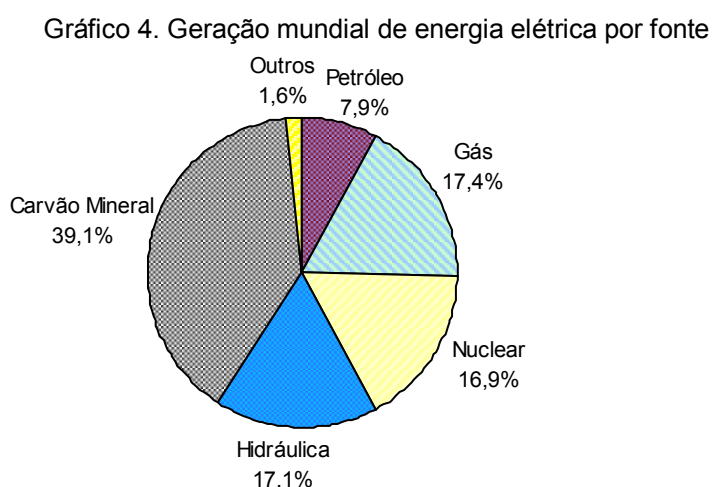


Gráfico 3. Consumo Mundial de Energia



Em relação à geração elétrica, os combustíveis fósseis também são as fontes mais consumidas. Além disso, conforme o gráfico 4, estimado para o ano base de 2001 (MME, 2002), pode-se também observar que o modelo de geração elétrica mundial possui base mista, ou seja, abrange vários tipos de fonte de energia. Apesar de todo esforço mundial em reduzir as emissões de gases de efeito estufa e estimular o aumento das fontes de energias renováveis, as energias solar e eólica, a biomassa e outras fontes renováveis, excetuando-se a hidroeletricidade, ainda apresentam uma participação muito baixa, menos de 1,6%, em relação ao total. Um dos principais motivos é a não internalização dos custos ambientais inerentes à geração de energia, ocasionando uma competição econômica desleal entre as energias renováveis e os combustíveis fósseis.



Apesar da perspectiva concreta de que as reservas de gás natural e carvão mineral irão perdurar por um tempo maior do que as petrolíferas (BP, 2003), a grande dependência mundial de petróleo tem gerado uma acentuada tensão mundial frente a sua iminente escassez, agravada pela forte pressão ambiental contra o uso de combustíveis fósseis. A disponibilidade de recursos energéticos e o domínio tecnológico tornaram-se fatores fundamentais ao desenvolvimento econômico, o que

gerou uma forte relação de interdependência entre os países. Segundo Hertz (2002), as empresas de energia e tecnologia adquiririam um poder ímpar na história, uma vez que as regras passaram a ser ditadas por elas, à revelia dos anseios da população e da real democracia. Para Castells (1999), a sustentabilidade energética tornou-se um desafio árduo sobre a ótica do modelo neoliberal, onde alguns países são fortemente privilegiados, enquanto outros ficam à margem do desenvolvimento, sem perspectivas mínimas de crescimento econômico.

3.1.2 A ENERGIA NO BRASIL

Desde a chegada dos portugueses, em 1500, até o final do período colonial, a biomassa, energia hidráulica, tração animal e força humana foram as principais fontes de energia utilizadas no Brasil. Também cabe observar o uso de óleo de baleia para iluminação pública. Segundo Caldeira (1995), o carvão mineral foi bastante utilizado no Brasil, até mesmo na forma de gás para iluminação pública, já em meados do século XIX.

Contudo, no início do século XX, gradativamente o consumo de petróleo foi aumentando sua participação na matriz energética nacional, seguindo a tendência mundial da época. No início, acreditava-se que o país não possuía grandes reservas, pois as primeiras inspeções haviam sido realizadas em sistemas “onshore” (exploração da porção continental), onde não foi obtido sucesso na época. Várias empresas estrangeiras instalaram-se no Brasil, com o intuito de explorar o ainda pouco mercado energético nacional. O período foi marcado por grande ufanismo político em relação à propriedade do petróleo e caracterizado por vários protestos em nível

nacional. Merece destaque a campanha “O Petróleo é Nosso”, na década de 40, capitaneada pelo escritor Monteiro Lobato, que pressionava o governo do então Presidente Getúlio Vargas a desenvolver uma indústria petrolífera nacional e a colher dela todos os frutos.

Posteriormente, os setores elétrico e petrolífero são estatizados. Em 1953, a Petrobrás é criada para executar as atividades do setor de petróleo em nome da União, através da Lei nº 2004/53 (Petrobrás, 2004). Reservas petrolíferas importantes são descobertas em nível nacional, embora insuficientes para suprir a demanda interna da época.

Os dois grandes choques do petróleo, em 1973-74 e 1979-80, geraram a percepção de que uma nova política energética se fazia necessária. O país precisava reduzir urgentemente sua dependência externa e proteger sua economia das bruscas oscilações de preço do petróleo. Desta forma, a nova política contemplou os seguintes aspectos: intensificação da prospecção de petróleo; incremento da produção de carvão mineral no país; lançamento do programa nuclear brasileiro; criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool); continuidade à expansão do parque gerador hídrico; e a realização dos primeiros programas de eficiência energética em nível nacional.

a) Intensificação da prospecção de petróleo

A intensificação da prospecção de petróleo pela Petrobrás ocorreu principalmente em sistemas “offshore” (exploração marítima), uma vez que os grandes potenciais petrolíferos brasileiros encontravam-se na plataforma continental.

Essa característica permitiu futuramente à Petrobrás gerar uma tecnologia singular no mundo para exploração de petróleo em águas profundas.

b) Incremento da produção de carvão mineral no país

Quanto ao incremento da produção de carvão mineral, merecem destaque as regiões sul e sudeste do país. No entanto, o alto teor de cinzas e enxofre característicos do carvão nacional e o baixo preço da eletricidade de origem hídrica e térmica, dificultaram sua inserção massiva no longo prazo. A inexistência de uma política ambiental consolidada na época fez com que os passivos ambientais gerados permanecessem até o presente. Problemas graves de contaminação do solo e da água, e outros impactos ambientais são registrados nessas regiões, a exemplo do ocorrido na região da Bacia Carbonífera de Santa Catarina (MMA, 2004; Belolli et al.; 2002).

c) Lançamento do programa nuclear brasileiro

No que se refere ao lançamento do programa nuclear brasileiro, os resultados obtidos ficaram muito abaixo das expectativas da época, tanto em transferência de tecnologia, quanto em termos de aumento de suprimento. Os equipamentos foram importados da Alemanha em sistema *turn-key*, ou seja, não contemplavam a transferência direta de tecnologia ao Brasil. A usina de Angra I levou muitos anos para ser construída, tendo apresentado vários problemas de funcionamento. Recentemente foi concluída a usina de Angra II, estando Angra III ainda em fase de discussão sobre sua continuidade. Portanto, a sociedade brasileira pagou muito caro pela execução do programa, tanto durante a fase de construção das usinas, que

implicou em aumento da dívida externa nacional, quanto pelo subsídio embutido na tarifa da eletricidade.

O modelo hídrico de geração de eletricidade adotado no Brasil não se mostrou compatível com o uso de energia nuclear, que é voltada para operar na base, com um fator de capacidade de 80% a 90%. Desta forma, em períodos de abundância de chuvas, as geradoras ficam obrigadas a desperdiçar água de seus reservatórios para não interromper a geração nuclear, uma vez que é inviável utilizar usinas nucleares para operar somente na ponta ou em situações emergenciais. Além disso, os custos também não incluíram as externalidades ambientais da energia nuclear, tais como: o descomissionamento das usinas; o risco de impactos ambientais graves e persistentes, ocasionados por um possível escape de radiação; os custos de um plano de emergência para acidentes radioativos; e a estocagem definitiva do rejeito radioativo.

d) Criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool)

Outra política adotada pelo país para reduzir a dependência do petróleo importado foi a criação do Programa Nacional do Álcool – Proálcool. O programa estava voltado inicialmente à produção de álcool anidro para ser misturado à gasolina e, em uma segunda fase, como substituto direto à gasolina, na forma de álcool hidratado (ANEEL & ANP, 1999). A idéia consistia em aproveitar a capacidade ociosa das usinas de açúcar e reduzir o consumo de gasolina no setor de transportes. Após um período de sucesso o programa enfrentou dificuldades com a elevação dos preços do açúcar e o recuo dos preços do petróleo no mercado internacional. Atualmente, o álcool ainda é um combustível importante dentro da

matriz energética nacional, bem como, o bagaço-de-cana, que pode ser aproveitado tanto para geração de energia elétrica, quanto para a produção de calor.

e) Continuidade à expansão do parque gerador hídrico

Após os choques do petróleo, foram construídas as principais usinas hidrelétricas do país, com destaque para a usina de Itaipu. O forte aumento da oferta de eletricidade em todo o país fez com que os preços baixassem e estimulassem à substituição de derivados de petróleo por eletricidade, até mesmo em usos finais térmicos. Surge então um novo modelo de uso da energia, determinado pelas características de um parque gerador essencialmente hídrico.

f) Realização dos primeiros programas de eficiência energética em nível nacional

Finalmente, como consequência das duas grandes crises do petróleo, também surgiram os primeiros programas de substituição dos derivados de petróleo por energia elétrica e de eficiência energética, a fim de reduzir os desperdícios e a dependência externa por energia primária. O período de 1984 a 1985 foi marcante para o estabelecimento deste novo paradigma de uso da eletricidade. Os programas de substituição e eficiência energética serão tratados em maior detalhe no próximo capítulo desta revisão bibliográfica.

Portanto, apesar dos esforços citados, visando proteger o Brasil das oscilações do preço do petróleo, a economia nacional obteve um crescimento muito baixo na década de 80, em relação às décadas de 60 e 70. Na década de 90 os potenciais hidrelétricos localizados nas proximidades de grandes centros urbanos se

tornaram cada vez mais escassos. Assim, o país dá início a uma nova estratégia de política energética, buscando aumentar a participação do gás natural em sua matriz.

A nova estratégia também contemplou a privatização de boa parte do setor elétrico e a quebra do monopólio da Petrobrás. No final da década de 90 foram criadas Agências Reguladoras tanto para o setor elétrico (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL), quanto para o de petróleo e gás natural (Agência Nacional do Petróleo – ANP), bem como, o Conselho Nacional de Política Energética – CNPE, visando orientar as ações do governo.

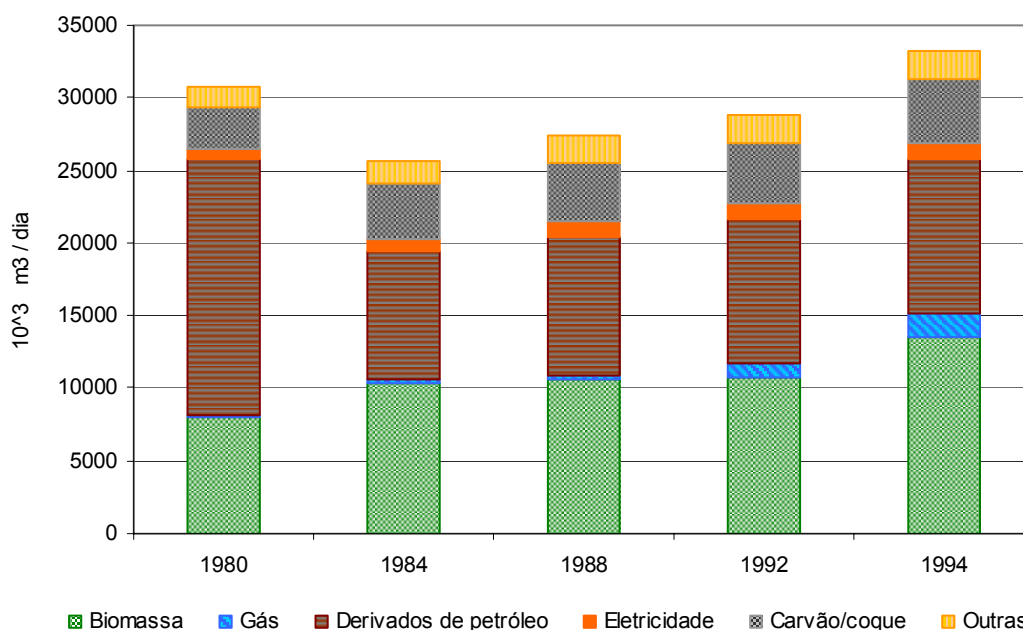
3.1.2.1 Perspectivas para o mercado de gás natural no Brasil

Ainda na década de 90 e frente à grande expectativa de construção do Gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL), surgiram os primeiros estudos para estimar o potencial de mercado existente para o gás no país, especialmente, na região a ser atendida pelo gasoduto. Dentre os principais estudos realizados, merecem destaque os trabalhos: Balanço Energético do Estado de São Paulo (1995); Comissão Nacional do Gás Natural (1992); Sociedade Privada do Gás – SPG (1993); e Pipeline Engineering GmbH – PLE (1993).

a) Balanço Energético de São Paulo (1995)

O Balanço Energético de São Paulo (1995) traz informações importantes sobre a perspectiva do gás natural na matriz energética paulista, apresentadas resumidamente no gráfico 5. O balanço teve como ano base 1994, onde foi estimado o consumo potencial de gás natural na indústria paulista, em substituição a combustíveis como biomassa, gás, derivados de petróleo, eletricidade, carvão e outros.

Gráfico 5. Consumo potencial de gás natural na indústria do Estado de São Paulo, em substituição a diferentes fontes de energia



O estudo considerou que 90% do consumo de eletricidade seriam destinados para iluminação e força motriz, onde não haveria mercado para o gás natural. Os resultados expressam um limite máximo teórico, embora se saiba que em alguns processos a substituição da eletricidade pelo gás natural é inviável, seja por uma limitação tecnológica ou econômica. Pode-se observar também a existência de um

mercado consumidor muito promissor para o gás boliviano, de cerca de 33 milhões de m³/dia, para 1994, o que equivale aproximadamente à capacidade máxima do GASBOL.

b) Comissão Nacional do Gás (1992)

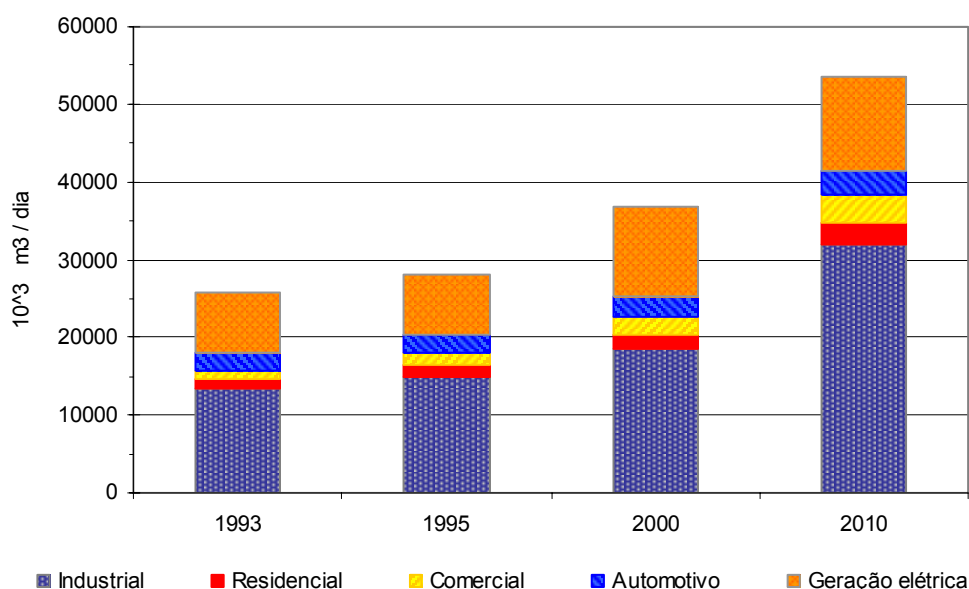
Com base nos resultados apresentados pelo Plano Nacional de Gás (Plangás, 1988) e outros trabalhos, a Comissão do Gás aprofundou ainda mais os resultados obtidos por esses estudos. Foi elaborada uma projeção otimista para o mercado de gás natural no Brasil, conforme a tabela 1 (Comissão Nacional do Gás, 1992).

Tabela 1 - Mercado potencial para o gás natural no Brasil, avaliado em 1992, em 10³ m³/dia

Setor de consumo	1993	1995	2000
Cimento	2070	3259	5006
Siderurgia	4840	6445	8869
Mineração e Pelotização	1413	1552	1941
Não-ferrosos	881	1208	1440
Química	4256	5693	9424
Alimentos e Bebidas	2451	3799	4635
Têxtil	1279	2148	2732
Papel e Celulose	922	1099	1355
Cerâmica	827	2482	3113
Vidro	1215	1463	1648
Outros	22618	12905	33344
Industrial (matéria-prima)	2529	4458	8682
Automotivo	5536	6248	7461
Residencial	3635	4946	6171
Comercial	1497	2047	2759
Geração Elétrica + Cogeração	11027	14216	22500
Total	66996	73968	121080

O mesmo estudo também traz uma análise regional para o sudeste brasileiro, onde foi estimado um mercado potencial de 43 milhões de m³/dia, para o ano de 1995. Desse total, quase metade do mercado potencial, cerca de 28 milhões de m³/dia, estaria no Estado de São Paulo. O gráfico 6 apresenta uma síntese das estimativas de previsão do mercado potencial de gás natural em São Paulo, apresentadas pela Comissão Nacional do Gás (1992).

Gráfico 6. Mercado potencial de gás natural para o Estado de São Paulo

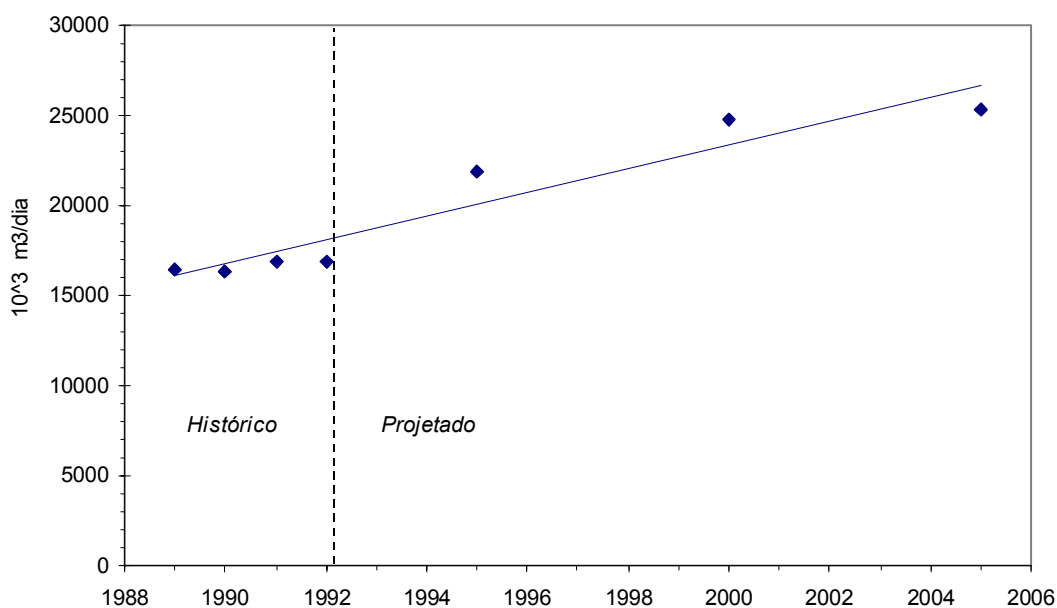


A previsão da Comissão Nacional do Gás Natural foi bem menos otimista que a o Balanço Energético do Estado de São Paulo, conforme mostrado no gráfico 5. Para o ano de 1994, a Comissão do Gás estimava um mercado potencial de gás da ordem de 14 milhões de m³/dia para o setor industrial, enquanto que o referido Balanço considerava algo em torno de 33 milhões de m³/dia. Contudo, apesar das discrepâncias entre ambos, pode-se observar a existência de um mercado de gás muito promissor já naquela época.

c) *Sociedade Privada do Gás (SPG, 1993)*

A antiga Sociedade Privada do Gás (SPG) também elaborou um estudo importante sobre o mercado de gás natural para o Estado de São Paulo, tendo como objeto de análise o Setor Industrial. O trabalho foi realizado por um consórcio entre as empresas Technoplan e Jaako Poyry, onde foram avaliadas 566 empresas de médio e grande porte, situadas nas proximidades do trecho de construção do GASBOL. Com base em dados da SPG (1993), o gráfico 7 traz uma previsão do mercado até 2005.

Gráfico 7. Mercado potencial de gás natural para o Setor Industrial do Estado de São Paulo

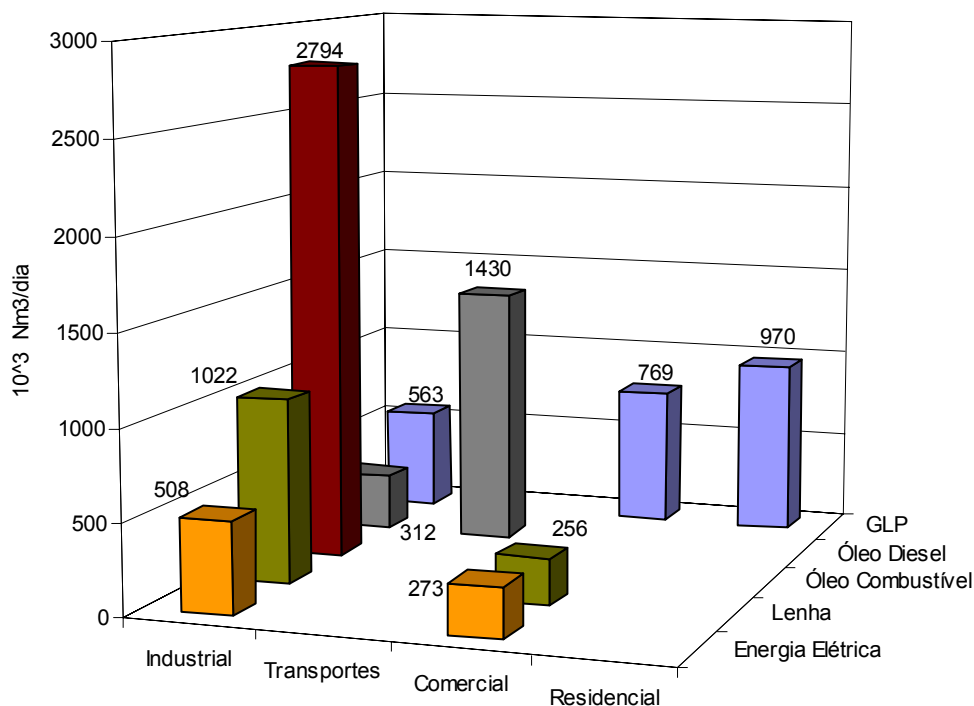


Os dados apresentados reforçam a existência de amplo mercado em potencial para o gás natural. Deve-se considerar que a projeção do mercado sofreu interferência do período de recessão da indústria paulista registrado no início da década de 90. Não foi objetivo deste estudo da SPG (1993) avaliar o potencial de uso do gás natural para a geração de energia elétrica.

d) Pipeline Engineering GmbH – PLE (1993)

Assim como o estudo da SPG (1993), o da PLE (1993) também procurou levantar o mercado potencial de gás natural existente na região de construção gasoduto no Estado de São Paulo. O gráfico 8 sintetiza os dados da PLE, apresentando a distribuição dos insumos energéticos substituíveis por gás natural, por setor de consumo. Apesar de não constar mercado potencial de gás para o setor residencial, em substituição à eletricidade, cabe lembrar que existe a possibilidade de se substituir chuveiros elétricos por sistemas a gás natural ou pelo uso de coletores solares. A substituição do chuveiro elétrico possibilita uma redução direta da demanda de eletricidade no horário de pico de consumo e, portanto, uma menor necessidade de investimentos em potência instalada.

Gráfico 8. Mercado potencial de gás natural para o Estado de São Paulo, segundo os insumos energéticos substituíveis.



Dessa forma, em todos os estudos de mercado citados é clara a existência de um amplo mercado de gás natural, pela substituição de determinados insumos energéticos, fato também observado por Mendes (1996), Gomes (1996) e Telles (1997). Além disso, deve-se considerar ainda a existência de um mercado secundário potencial para o gás natural, possível de ser explorado através do amadurecimento da cultura gasífera no país.

3.1.2.2 Inserção do gás natural na matriz energética nacional

Apesar da conclusão do GASBOL, a ausência de um mercado maduro para o gás natural (Santos et al., 2002), a necessidade de recuperar o capital investido na construção do gasoduto e a iminente escassez de eletricidade fizeram com que o país adotasse medidas emergenciais e precipitadas para o destino do gás. Além disso, os contratos incluíam obrigações rigorosas (*take or pay* e *ship or pay*) e estavam atrelados às oscilações do dólar americano. Nos contratos do tipo *take or pay* o comprador é obrigado a retirar ou pagar um percentual da quantidade diária contratual, referida ao produto gás, caso não atinja o percentual contratado. Enquanto que nos contratos do tipo *ship or pay* o comprador se compromete a pagar um percentual da capacidade do gasoduto, mesmo que retire volumes inferiores a esse compromisso (Gomes, 1996).

Portanto, frente à incoerência do planejamento energético da época, a solução encontrada foi utilizar o gás natural para a geração de energia elétrica e, para isso, foi criado o Programa Prioritário de Termelétricidade - PPT, que previa a construção imediata de termelétricas a gás em todo território nacional. Não houve

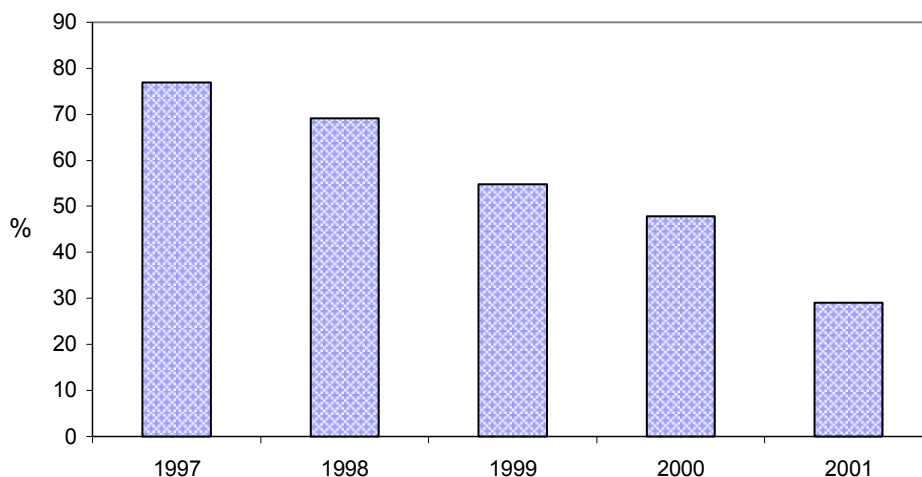
preocupação em priorizar o gás para o uso difuso ao invés da geração. Para Santos et al. (2002), se fosse para consumir o gás na geração, não faria sentido ter construído o gasoduto, uma vez que isso poderia ter sido feito no próprio país de origem, bastando importar a eletricidade gerada por meio de linhas de transmissão. Mesmo com o forte *lobby* das empresas de energia, as deficiências regulatórias e a dificuldade em competir com os baixos preços da hidroeletricidade inviabilizaram a construção das termelétricas previstas no PPT. A maioria dos poucos contratos firmados contou com a participação da Petrobrás, pois o setor privado não iria assumir os riscos elevados dos investimentos, enquanto que a Petrobrás estava pressionada a viabilizar urgentemente os projetos para poder pagar os investimentos realizados na construção do gasoduto.

3.1.2.3 Implicações do antigo modelo

A demora em ampliar a potência instalada fez com que o nível dos reservatórios baixasse demasiadamente, gerando uma grave crise energética em 2001. A então chamada “crise do apagão” foi um reflexo direto da ineficiente política energética vigente, embora se tenha culpado exclusivamente o baixo índice pluviométrico registrado naquele ano. O gráfico 5, elaborado com base em dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2004), apresenta uma média aritmética do nível dos principais reservatórios do país, pela qual pode-se observar que uma queda gradativa vinha ocorrendo a cada ano. Portanto, o baixo índice pluviométrico foi apenas um fator agravante à crise. Para Sauer et al. (2003) o motivo real da crise foi falta de planejamento energético de longo prazo, que

assegurasse os investimentos necessários em geração e transmissão de energia elétrica.

Gráfico 5. Nível médio dos reservatórios da Região Sudeste do Brasil*



* Hidrelétricas consideradas: Furnas, Mascarenhas de Moraes, Marimondo, Água Vermelha, Emborcação, Nova Ponte, Itumbiara, São Simão e Ilha Solteira

A “crise do apagão” deixou reflexos imediatos na economia nacional. Em 2001, a taxa de crescimento efetivo do PIB foi somente 1,4%, ficando muito abaixo das expectativas da época (IBGE, 2003). Contudo, apesar dos fortes impactos negativos gerados pela crise, houve uma importante contribuição para o aumento de eficiência energética e a redução dos desperdícios de energia elétrica. Os benefícios da crise chegaram a superar os resultados obtidos durante anos de execução de programas de eficiência energética. A crise reforçou a importância de se priorizar investimentos em programas de uso racional da energia.

Mesmo após o período da crise, o PPT não obtém o sucesso esperado. Em 2003, a Petrobrás anuncia novas descobertas de gás natural na Bacia de Santos e lança um programa para uso massivo do gás natural (Petrobrás, 2004). Atualmente, a nova política energética fortalece o controle estatal e procura diversificar a geração na matriz energética. Além do álcool etanol outras fontes de energias renováveis são incentivadas, com destaque para o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica do Ministério de Minas e Energia, que inicialmente estimula uma maior participação da energia eólica, de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) e da biomassa (PROINFA, 2004). O país também inicia a construção de um programa nacional de biodiesel, como substituto gradativo ao diesel convencional.

Quanto ao uso racional da energia, a política ainda permanece voltada aos tradicionais programas de eficiência energética existentes, apresentando resultados pouco expressivos, sem haver uma preocupação maior com o destino das fontes de energia primária, segundo as suas qualidades exergéticas e finalidades de uso, conforme será demonstrado no decorrer deste trabalho.

3.1.3 OS PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

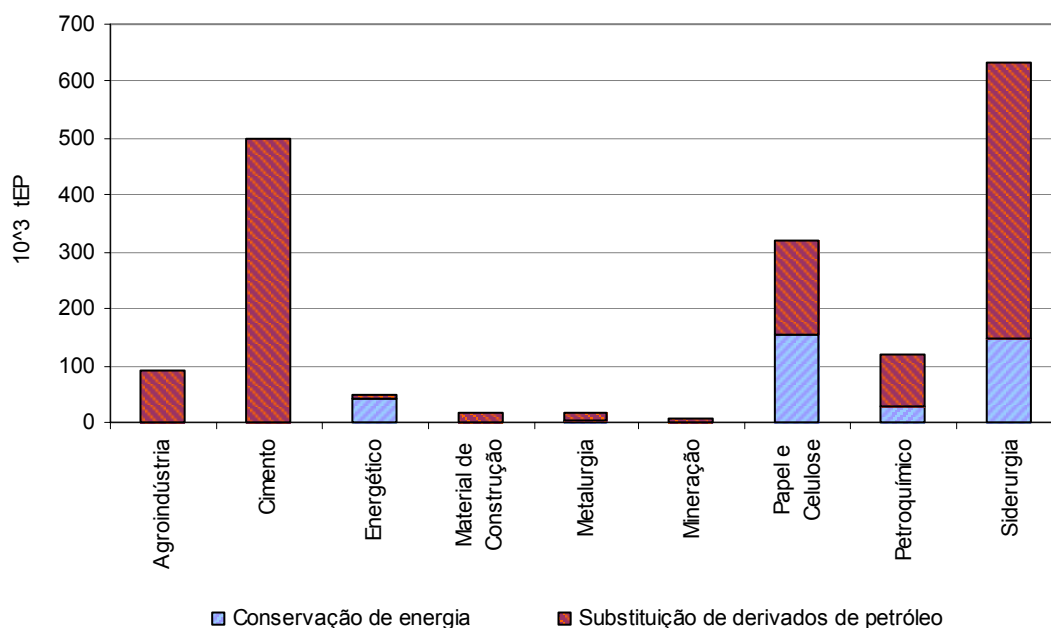
Com base em estudos anteriores, como ANEEL et ANP (1999), PROCEL (2004), MME (2004) e outros, são apresentados brevemente os principais programas de eficiência energética do Brasil e de outros países, a fim de dar subsídios à discussão apresentada neste trabalho.

3.1.3.1 Brasil

Os primeiros programas de eficiência energética do Brasil surgiram logo após os choques do petróleo ocorridos na década de 70. O CONSERVE foi o primeiro programa de peso em nível nacional, criado em 1981 sob a coordenação do então Ministério da Indústria e Comércio. O objetivo desse programa era a conservação de energia e a substituição de derivados do petróleo por eletricidade no setor industrial. Paralelamente, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2004), também elaborou uma série de estudos e materiais de divulgação nesse sentido.

O gráfico 6 apresenta os principais resultados alcançados pelo CONSERVE, com base em dados de Piccinini (1994). Pode-se observar que a conservação da energia ficou muito aquém do esperado, se considerarmos o forte período de recessão industrial verificado no início da década de 80. Somente os Setores de Papel e Celulose e de Siderurgia obtiveram um resultado expressivo, e em menor quantidade, os Setores Energético e Petroquímico. O total de energia economizada pela conservação de energia foi de 374 mil tEP. No entanto, programa obteve grande êxito quanto à substituição de derivados de petróleo pela eletricidade, com destaque para os Setores de Cimento e Siderurgia. Nesse caso, o total de energia substituída foi de 1381 mil tEP, ou seja, 79% da economia total obtida pelo CONSERVE, 1755 mil tEP, no período de 1981 a 1985.

Gráfico 6. Substituição de derivados de petróleo e conservação de energia obtida pelo Programa CONSERVE, no período de 1981 a 1985



O surpreendente resultado obtido através da substituição de derivados de petróleo deve-se a um forte estímulo tarifário concedido às indústrias, que tinham garantia de fornecimento de energia elétrica e com preços 30% inferiores aos praticados na época, por meio da aplicação da chamada Energia Garantida por Tempo Determinado - EGTD, que utilizava recursos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. A EDTD também atuava como redutora dos índices inflacionários da época. Conseqüentemente, o Setor Elétrico ficou pressionado pelo abrupto aumento de consumo de eletricidade e, por isso, em 1985 foi criado o Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica – PROCEL.

O foco inicial do PROCEL estava voltado ao combate ao desperdício de eletricidade, tanto na produção, quanto no uso da energia elétrica. Na década de 90 o PROCEL tem o seu escopo ampliado, tornando-se um programa de governo e não

mais setorial. Atualmente, o programa é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e executado pela Eletrobrás. O financiamento dos projetos conta com recursos do BNDES e da própria Eletrobrás. No período de 1994 a 2003 o programa conseguiu evitar a geração adicional de 15.775 GWh de energia elétrica (PROCEL, 2004). As principais linhas de ação do programa são (ANEEL et ANP, 1999):

- Eliminação de desperdícios, através de orientação, assistência técnica, conscientização e orientação em curto prazo;
- Aumento da eficiência energética de equipamentos, sistemas e processos produtivos, com impactos em curto, médio e longo prazos, por meio de desenvolvimento tecnológico, certificação de qualidade e normalização; e
- Cultura de racionalização energética em longo prazo, através de programas de educação, política de preços, financiamento e legislação.

Paralelamente ao PROCEL, em 1991 é criado o Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e do Gás Natural – CONPET, sob a coordenação da Petrobrás, com a participação de representantes do governo federal e da iniciativa privada. Conforme o Decreto Presidencial de 16 de julho de 1991, que institui o CONPET, o programa tem por finalidade desenvolver e integrar as ações que visem a racionalização do uso dos derivados de petróleo e do gás natural, em consonância com as diretrizes do Programa Nacional de Racionalização da Produção e do Uso da Energia, instituído pelo Decreto nº 99.250, de 11 de maio de 1990 (CONPET, 2004). O programa possui quatro diretrizes básicas (ANEEL et ANP, 1999):

- *Promoção e difusão*: realização de campanhas, eventos, premiações, difusão de tecnologias e métodos, elaboração de relatórios;

- *Racionalização energética*: revisão de normas técnicas para equipamentos, sistemas e métodos; difusão de conceitos de conservação; treinamento de pessoal; estratégias para investimentos; adequação de legislações setoriais; aumentar a sintonia entre o programa e as políticas industrial, educacional, tecnológica, de transporte e meio ambiente, desenvolvimento de mecanismos que desestimulem ações contrárias às do programa;
- *Aumento da eficiência energética em equipamentos e sistemas*: articulação com outros programas de eficiência energética; fomento à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico; padronização, certificação e normalização; apoio às outras ações de racionalização energética; proposição de mecanismos voltados à comercialização de bens e serviços que contribuam à conservação da energia; e
- *Regionalização*: apoio aos projetos e soluções regionais, bem como, à elaboração de estudos voltados ao aproveitamento de insumos energéticos locais.

Alguns Estados, como Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná, Rio Grande do Sul, Ceará e Bahia, têm procurado intensificar as ações do CONPET e PROCEL, além de desenvolverem outros programas específicos.

3.1.3.2 Outros países

Reino Unido

Após a realização da Cúpula da Terra (*Earth Summit*), na cidade do Rio de Janeiro, em 1992, o Reino Unido elaborou um plano de governo na área de eficiência energética. Dentre os objetivos do plano estão: a conscientização da população; e o gerenciamento de programas do Departamento de Meio Ambiente, Transportes e Regiões – DETR, e do programa *Electricity Standards of Performance* – SoP (DEFRA, 2004).

Dentre as principais atividades do DETR, destacam-se: construção de pequenas plantas de cogeração; implementação de aquecedores de água modernos, controladores de aquecimento e melhorias no isolamento de paredes na construção civil; uso de combustíveis alternativos (Programa *Powershift*); premiações; educação junto às escolas; iluminação eficiente; fomento a empreendimentos que contribuem à conservação de energia. O Programa SoP busca orientar as empresas concessionárias quanto a investimentos em projetos de eficiência energética em pequenos empreendimentos e residências.

França

A França desenvolve atividades de eficiência energética através da Agência do Meio Ambiente e da Matriz Energética – ADEME. Desta forma, há uma forte interação entre as políticas ambientais e energéticas francesas. Considera como prioritárias, três áreas básicas: economia dos resíduos, poluição do ar e matriz energética. A ADEME desenvolve vários projetos de eficiência energética que vão

desde a eficiência no setor agrícola, transportes, construção civil e industrial, até o fomento às energias renováveis e o desenvolvimento urbano sustentável (ADEME, 2004).

A França possui um parque gerador elétrico essencialmente nuclear. Por isso, o uso da eletricidade em processos térmicos é amplamente incentivado em todos os setores de consumo, visando assegurar a demanda de eletricidade, provida pela geração nuclear.

Espanha

O planejamento energético espanhol busca privilegiar o uso de energias renováveis e incentivar a implantação de sistemas de cogeração e a geração de eletricidade por produtores independentes e autoprodutores. O Instituto para a Diversificação e Economia Energética – IDAE é um órgão vinculado ao Ministério da Indústria e Energia Espanhol, que promove a eficiência energética no país, através do fomento ao uso racional da energia e da diversificação das fontes de energia, especialmente, pelo incentivo às energias renováveis. O IDAE também realiza auditorias energéticas e estimula o uso de combustíveis “limpos”, e a substituição de equipamentos obsoletos por tecnologias mais eficientes, com destaque para fornos e caldeiras da indústria (IDAE, 2004).

Japão

O Japão desenvolve programas de conservação de energia através do Centro de Conservação de Energia do Japão – ECCJ, que apresenta uma política de eficiência energética sinérgica às metas de redução de gases de efeito estufa. São

objetivos do ECCJ: o uso eficiente da energia, a proteção do meio ambiente global e o desenvolvimento sustentável. Além disso, o Centro estimula o uso de equipamentos e processos mais eficientes, bem como, desenvolve atividades de normalização, auditorias de consumo energético, redução de desperdícios em edifícios, etiquetagem de equipamentos, conscientização da população e a difusão de tecnologias voltadas à conservação da energia (ECCJ, 2004). O Japão apresenta um consumo elevado de eletricidade, devido à intensa automatização dos equipamentos de uso final da energia.

Canadá

A exemplo de diversos países do mundo, o Canadá também deu início a programas de eficiência energética em meados da década de 70, como reflexo dos choques do petróleo da mesma década. Após várias reformulações dos programas, em 1995, foi criado o *National Action Program on Climate Change* (Climate Change, 2004) coordenado pelo *Office of Energy Efficiency* – OEE, em parceria com o *Natural Resources Canada* - NRCan. Novamente, observa-se um país onde a política de eficiência energética está em sintonia com as metas relativas à mudança global do clima. As principais atividades desenvolvidas pela OEE são: elaboração de base de dados; regulação; programas de eficiência energética na indústria, setor público e transportes; normalização de equipamentos e da construção civil; etiquetagem de equipamentos eficientes (Programa “*Energy Efficient Act*”); orientação de consumidores; e um amplo estímulo à construção e reforma de edificações (Programas “*RenoSense, Energy Guide*” e “*Casas R-2000*”), dentro de critérios voltados à conservação de energia.

Estados Unidos

Os EUA apresentam ampla experiência em programas de eficiência energética, embora sejam os maiores consumidores de energia do mundo. Os programas são desenvolvidos pelo Departamento de Energia Americano – DoE, que trabalha dentro de uma visão sistêmica de eficiência energética, através do EERN - *Energy Efficiency and Renewable Energy Network* (EERE, 2004). O EERN estimula fontes de energias renováveis e a competitividade econômica, a fim de baixar os custos da energia que protejam o meio ambiente. Os principais atingidos pelo programa são as empresas concessionárias de energia, as indústrias e os setores de transporte e construção civil.

Além disso, o DoE também fomenta programas de pesquisa e desenvolvimento na área de eficiência energética, bem como, o gerenciamento energético pelo “lado da demanda”, a fim de corrigir as distorções do modelo de livre competição de mercado, para o qual interessa o gerenciamento pelo “lado da oferta”. Porém, o consumo de energia americano ainda permanece muito elevado e fortemente dependente de combustíveis fósseis, o que faz dos EUA o maior emissor de gases de efeito estufa do planeta (MCT et BNDES, 1999).

As mudanças climáticas representam uma grande ameaça para as próximas décadas, onde os países desenvolvidos têm uma responsabilidade superior aos demais, devido aos seus antecedentes históricos de utilização intensiva de combustíveis fósseis (Feldmann, 2002; Muylaert et al., 2000). Todas as previsões do *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC, que congrega cerca de 2000 cientistas em todo o mundo, indicam cenários crescentes das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera até o ano de 2100 (OMM et PNUMA, 2000; IPCC, 2001). Em 1990, os EUA respondiam por 36,1% das emissões totais de

dióxido de carbono dos países desenvolvidos e do leste europeu, conforme listado no Anexo I do Protocolo de Quioto (UNFCCC, 1997).

Outros países

A exemplo dos países citados, diversos outros países, como Noruega, Dinamarca, Suécia, Nova Zelândia e Austrália, desenvolvem programas similares de eficiência energética, onde há uma forte preocupação ambiental no planejamento energético. De maneira geral, os programas de eficiência energética buscam reduzir desperdícios de energia em todos os setores de consumo, bem como, estimular as energias renováveis, o uso de equipamentos eficientes, a etiquetagem e a normalização de produtos, métodos e processos. Observa-se também nesses países o uso racional dos recursos energéticos segundo o uso final e a conscientização da população.

3.2 ASPECTOS CONCEITUAIS

A seguir são apresentados os aspectos conceituais básicos sobre a energia. Não foi objetivo realizar uma pesquisa epistemológica dos conceitos, mas sim, dar subsídios à análise e interpretação dos resultados obtidos.

3.2.1 A ENERGIA

O estudo da energia remonta à Grécia Antiga. Desde o século IV a.C., Aristóteles já fazia referências a ela. Para ele, a energia era uma “realidade em movimento”. Desde então, vários pesquisadores tentaram redefinir ou aprimorar o conceito de energia. Mas, somente no século XVII d.C., surgem os primeiros estudos sobre energia potencial, por René Descartes, e sobre energia cinética, por Gottfried Wilhelm Leibnitz. Em 1687, Isaac Newton realiza descobertas revolucionárias sobre movimento e gravitação, mas o conceito de calor ainda permanecia como uma incógnita (Simmons, 2002).

No século XVIII, Jean le Rond D’Alembert concilia e aperfeiçoa as definições sobre energia potencial e cinética, elaboradas por Descartes e Leibnitz respectivamente. Na mesma época, Antoine Laurent de Lavoisier demonstrou que, apesar da mudança de estado da matéria durante uma reação química, a quantidade de matéria permanece constante do começo ao fim do processo. Seus experimentos resultaram em evidências em favor das leis de conservação. Posteriormente, em 1824, Nicolas Leonard Sadi Carnot propõe as primeiras relações entre calor e trabalho, que resultam na formulação do conceito de entropia, por

Rudolf Clausius, em meados do século XIX (Albuquerque, 1988). As descobertas de Sadi Carnot, associadas aos estudos de Rudolf Clausius e outros cientistas culminaram no estabelecimento das leis fundamentais da termodinâmica, conforme descritas sumariamente abaixo (Van Wylen et al., 1998):

- *Lei Zero*: quando dois corpos têm igualdade de temperatura com um terceiro corpo, eles terão igualdade de temperatura entre si;
- *Primeira Lei*: a energia sempre se conserva, não podendo ser criada ou destruída;
- *Segunda Lei*: determina o limite da possibilidade de transformação de calor em trabalho, com base no conceito de entropia; e
- *Terceira lei*: existe uma temperatura que não pode ser atingida, o zero absoluto.

A energia é comumente definida como *a medida da capacidade de realizar trabalho*. Porém, embora esse conceito se aplique perfeitamente à mecânica clássica, ele apresenta restrições quanto à termodinâmica, devido às limitações da transformação de calor em trabalho, determinadas pela Segunda Lei. Assim, em 1872, James Maxwell propõe uma definição mais completa do que as anteriores: “energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a esta mudança” (Nogueira, 2001).

Para atender às discussões relativas ao uso antrópico da energia, no âmbito da matriz energética ela pode ser classificada em basicamente três tipos: energia primária, secundária e útil. O Balanço Energético Nacional (MME, 2002) classifica a energia primária como “produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta”, tais como: petróleo; gás natural; carvão vapor e metalúrgico; urânio (U_3O_8); energia hidráulica; eólica; solar; e produtos da cana. O mesmo balanço define

também a energia secundária como “produtos energéticos resultantes dos diferentes centros de transformação, que têm como destino os diversos setores de consumo ou ainda um outro centro de transformação”. São exemplos de energia secundária: eletricidade, óleo diesel e combustível, gasolina, GLP, gás de cidade e coqueria, NAFTA, querosene, coque de carvão mineral, álcool etílico e carvão vegetal. A energia útil pode ser definida como a forma última de energia demandada diretamente pelo usuário (ex: calor, radiação luminosa), através de equipamentos específicos de uso final. A figura 2 apresenta um esquema sobre os processos de conversão de energia.

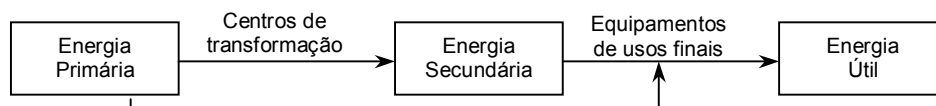


Figura 2. Processos de conversão de energia

São exemplos de centros de transformação: as refinarias de petróleo, centrais elétricas e as destilarias de álcool. O Balanço de Energia Útil (FDTE, 1996) classifica os usos finais em: força motriz, aquecimento direto, calor de processo, iluminação, eletroquímico e outros. Para cada uso final existem equipamentos específicos que transformam a energia primária ou secundária em energia útil, tais como: motores, fornos, caldeiras, lâmpadas, refrigeradores e muitos outros.

As transformações de energia primária para secundária e desta para útil, sempre implicam em perdas. Essas perdas podem ser calculadas através dos rendimentos termodinâmicos das centrais de transformação e dos equipamentos de usos finais. A seguir são apresentados os aspectos conceituais básicos da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, que embasaram a metodologia proposta para o cálculo dessas perdas.

3.2.2 PRIMEIRA E SEGUNDA LEIS DA TERMODINÂMICA

Primeira Lei:

A definição da Primeira Lei diz que, para um dado ciclo percorrido por um sistema, a integral cíclica do calor é igual a integral cíclica do trabalho, conforme apresentado na equação 1. Portanto, o calor líquido transferido durante um ciclo deve ser igual ao trabalho líquido realizado (Van Wylen et al., 1998).

$$\oint \delta Q = \oint \delta W \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

$\oint \delta Q$ = integral cíclica do calor.

$\oint \delta W$ = integral cíclica do trabalho.

Pela Primeira Lei também temos que o calor dado a um sistema mais o trabalho efetuado sobre o mesmo é igual ao aumento de sua energia interna (Feynman et al., 1971), logo, temos a equação 2:

$$\delta U = \delta Q + \delta W \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

δU = Aumento de energia no sistema

δQ = Calor dado a um sistema

δW = Trabalho efetuado sobre o sistema

Desta forma, a eficiência de Primeira Lei de um processo de conversão de energia é dada pela razão da energia útil pela energia total consumida, conforme a equação 3 (Nogueira, 2001). O conceito de Primeira Lei da Termodinâmica é extremamente útil para se poder avaliar e melhorar a eficiência energética de equipamentos de usos finais, conforme observado nos estudos de Geller (1991), Patterson (1996) e Warren (1999).

$$\eta_1 = \frac{\text{Energia Útil}}{\text{Energia Consumida}} \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

η_1 = Rendimento de Primeira Lei da Termodinâmica

Segunda Lei:

A Segunda Lei não contraria a lei da conservação da energia, porém, ela estabelece que a energia perde a sua capacidade de realizar trabalho durante os processos de conversão, uma vez que nem todo calor transferido de um corpo pode ser transformado em trabalho (Albuquerque, 1988). Portanto, é impossível haver um processo cujo único resultado seja tomar calor de um sistema e convertê-lo em trabalho, pois nenhuma máquina térmica que toma calor Q_1 e T_1 e que entrega Q_2 e T_2 pode efetuar mais trabalho (W) que uma máquina térmica reversível, para a qual temos a equação 4 (Feynman et al., 1971):

$$W = Q_1 \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1} \right) \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

W = trabalho realizado por uma máquina reversível

Q_1 = Calor inicial do sistema

T = Temperatura inicial (1) ou final (2)

Dessa forma, o rendimento térmico de uma máquina térmica sempre será inferior a 100%. Sadi Carnot, o mesmo que estabeleceu as bases de Segunda Lei, também idealizou um ciclo termodinâmico de eficiência máxima, seguindo quatro processos básicos reversíveis: uma expansão isotérmica, uma expansão adiabática, uma compressão isotérmica e uma compressão adiabática (Van Wylen et al., 1998).

Em um Ciclo de Carnot o rendimento térmico é função somente da temperatura (equação 5).

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

η_t = Rendimento térmico

Q = Calor transferido; fonte quente (H) ou fria (L)

T = Temperatura da fonte quente (H) ou fria (L)

Como consequência ou corolário da Segunda Lei temos a chamada “desigualdade de Clausius”, válida para todos os ciclos possíveis (equação 6). Para explicar tal desigualdade é preciso entender o conceito de entropia. A entropia (S) é uma propriedade de um sistema (Van Wylen et al., 1998). Sua variação permite medir a perfeição de um processo de conversão de energia, como os processos reais sempre apresentam imperfeições e perdas, a entropia sempre tende a aumentar (Nogueira, 2001). O conceito de entropia também é comumente comparado ao grau de desordem de um sistema, conforme observado por Hosokawa et Souza (1984), e Gyftopoulos (2001). Alguns autores ainda extrapolam esse conceito para explicar diversos comportamentos da sociedade e natureza, como Forse (1987) e Rifkin et Howard (1990).

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

$\oint \frac{\delta Q}{T}$ = integral cíclica do calor trocado em função da temperatura

Desta forma, a desigualdade de Clausius ocorre, devido à entropia total do sistema sempre aumentar nos processos irreversíveis, não variando nos processos reversíveis. Se um calor ΔQ é adicionado a um sistema de temperatura T, o aumento de entropia do sistema será igual, para um sistema reversível, ou maior, para um

sistema irreversível, do que a razão dos mesmos (equação 7). Se a temperatura se igualar a 0K (zero Kelvin ou zero absoluto) a entropia também será zero, satisfazendo assim a Terceira Lei da Termodinâmica (Feynman et al., 1971), que diz ser impossível atingir tal temperatura.

$$\Delta S \geq \frac{\Delta Q}{T} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

ΔS = variação de entropia

ΔQ = calor incorporado ao sistema

T = temperatura do sistema

Um outro conceito importante é a exergia. Para Wall (1990), a exergia pode ser definida como trabalho ou capacidade de realizar trabalho, conservando-se em processos reversíveis e sendo consumida em processos irreversíveis (reais). Cabe destacar que em um sistema real sempre haverá perdas. Segundo Nogueira (2001) elas podem ser avaliadas em termos de destruição de exergia ou da geração de entropia, correspondendo a uma redução da qualidade do fluxo energético e produção de calor. A análise de processos de conversão de energia com base no conceito de exergia tem sido utilizada tanto em estudos de sistemas térmicos específicos (Kotas, 1985; Vieira, 1997), quanto na análise de perdas e impactos ambientais (Gunnewiek et Rosen, 1998; Rosen et Dincer, 1999).

Pode-se ainda considerar que as formas energia diretamente conversíveis em trabalho, como a eletricidade, apresentam um processo de conversão de alta qualidade, em termos de exergia. Em contrapartida, os processos de conversão da energia térmica em trabalho apresentam uma baixa qualidade, pois nem todo o calor pode ser revertido em trabalho. A energia térmica pode ser obtida através da

combustão de diversas fontes de origem química, tais como: gás natural, carvão, petróleo e biomassa.

Nesta dissertação, denominou-se a esse tipo de qualidade o termo “qualidade exergética”, a fim de explicitar no texto a que tipo de qualidade está-se referindo. Cabe observar que o termo aplica-se ao processo de conversão de energia e não à qualidade da exergia química de uma determinada fonte.

Portanto, o planejamento energético precisa atentar para esses conceitos, de forma sistêmica e integrada, para que possa tomar decisões técnicas adequadas para o desenvolvimento de programas de uso racional da energia. A análise sistêmica, conforme citada por Capra (1982), Souza (1997), Nytuen et Dacey (1975), e a visão interdisciplinar dos problemas, relatada por Jacobi (1999), Tauk-Tornisielo et al. (1995), são fundamentais para que se possa atingir o sucesso desses programas. É com base nesses conceitos que foi motivada a metodologia deste trabalho, conforme descrita a seguir.

4 METODOLOGIA

A metodologia está dividida em duas partes. A primeira parte trata da metodologia de cálculo desenvolvida para este trabalho. Enquanto que, a segunda, trata da base de dados utilizada.

4.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO

A metodologia de cálculo visa estimar tecnicamente os potenciais de economia de energia obtidos pela substituição da eletricidade por energia química, em usos finais térmicos da matriz energética nacional. Para estimar tal percentual de substituição, foi realizada uma segunda metodologia de cálculo, com base em dados internacionais de consumo de energia. Esta metodologia possibilitou incorporar aos resultados inicialmente obtidos, uma estimativa da viabilidade técnica e econômica da referida substituição, através de uma comparação entre a realidade energética brasileira e a de diversos outros países, específicos para cada setor de consumo.

Não foram consideradas as perdas em transmissão e distribuição da eletricidade, bem como, na produção, transporte e distribuição da energia química. O combustível utilizado como referência de conversão, tanto da energia química em eletricidade, quanto da energia final em energia útil, foi o gás natural, devido à sua forte perspectiva de inserção na matriz energética nacional.

4.1.1 ANÁLISE DO USO DA ENERGIA TÉRMICA NA MATRIZ ENERGÉTICA NACIONAL

Para poder comparar o uso da eletricidade em processos térmicos, em relação à sua substituição por uma fonte de energia química, temos que a energia útil na forma de calor (U) produzida pela energia elétrica que será substituída (E_s) será a mesma que a energia útil da energia química equivalente (Q_{eq}), ou seja, a energia química que compensará a redução em energia elétrica destinada à produção de calor (equações 8, 9, 10, 11). Os valores dos rendimentos de transformação de energia (η_{1e} e η_{1q}) foram obtidos do Balanço de Energia Útil (FDTE, 1996), considerando cada setor de consumo. O valor de E_s foi estimado com base em uma análise comparativa internacional, conforme metodologia apresentada posteriormente, no item 4.1.2.

$$U = \eta_{1e} E_s \quad (\text{Equação 8})$$

$$E_s = \frac{U}{\eta_{1e}} \quad (\text{Equação 9})$$

$$U = \eta_{1q} Q_{eq} \quad (\text{Equação 10})$$

$$\eta_{1e} E_s = \eta_{1q} Q_{eq}$$

$$Q_{eq} = \frac{\eta_{1e} E_s}{\eta_{1q}} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

U = Energia final útil, na forma de calor

E_s = Energia final elétrica possível de ser substituída por uma fonte de energia química

Q_{eq} = Energia final química equivalente à eletricidade substituída

η_1 = Rendimento de Primeira Lei da Termodinâmica para a transformação de energia final elétrica (e) ou química (q) em energia útil, na forma de calor

Apesar de ter sido utilizado o gás natural como referência, poder-se-ia ter adotado qualquer outra fonte de energia química, bastando alterar os valores dos rendimentos de transformação de energia final química em calor (η_{1q}), para a respectiva fonte desejada. Esses valores também podem ser obtidos no Balanço de Energia Útil (FDTE, 1996).

Através da diferença entre as energias primárias consumidas em cada processo, pode-se calcular o potencial de economia de energia primária (P) resultante da substituição de eletricidade por energia química (equação 12). A energia primária química (P_q , equação 14) é a própria energia final química equivalente (Q_{eq} , equação 11), uma vez que fontes de energia química, como o gás natural e o carvão mineral, são fontes primárias. Porém, no cálculo da energia primária correspondente à energia final elétrica (P_e , equação 13), deve-se considerar também o rendimento térmico de sua geração (η_t). Isso foi feito, pois se considerou que a eletricidade substituída (E_s , equação 9) foi gerada por uma fonte de energia química. Tomando-se as equações 12, 13 e 14, obtém-se a equação 15.

$$P = P_e - P_q \quad (\text{equação 12})$$

$$P_e = \frac{E_s}{\eta_t} \quad (\text{equação 13})$$

$$P_q = Q_{eq} \quad (\text{equação 14})$$

$$P = \frac{U}{\eta_t \eta_{1e}} - \frac{\eta_{1e} E_s}{\eta_{1q}} \quad (\text{equação 15})$$

Onde:

U = Energia final útil, na forma de calor

E_s = Energia final elétrica possível de ser substituída por uma fonte de energia química

P = Energia primária economizada

P_e = Energia primária correspondente à energia final elétrica destinada à produção de energia útil na forma de calor

P_q = Energia primária equivalente à substituição da eletricidade por energia final química

η_1 = Rendimento de Primeira Lei da Termodinâmica para a transformação de energia final elétrica (e) ou química (q) em energia útil, na forma de calor

η_t = Rendimento térmico da geração de eletricidade

Como a equação 15 é linear, facilmente pode-se estimar o potencial de economia de energia primária para quaisquer percentuais de substituição de eletricidade (S) por energia final química. O rendimento térmico (η_t) adotado foi de 40%. Esse valor foi estimado segundo a eficiência média real das usinas a gás de alguns países, tidos como referência em geração de termoeletricidade, tais como: EUA, Reino Unido, Holanda e outros. Os valores foram obtidos dos balanços da *International Energy Agency* – IEA (2001a; 2001b).

Uma vez estabelecida a devida metodologia de cálculo, resta agora estimar a quantidade de energia elétrica passível de substituição (E_s) por energia química existente na matriz energética nacional. No entanto, para se obter esse valor seria preciso conhecer a fração do consumo de eletricidade que poderia ser substituída, chamada percentual de substituição (S), conforme a equação 16.

$$E_s = S E_t \quad (\text{equação 16})$$

Onde:

E_s = Energia final elétrica possível de ser substituída por uma fonte de energia química

S = Percentual de eletricidade passível de substituição por energia final química (x100)

E_t = Energia final elétrica total

Mas como estimar o percentual de substituição? Para calcular o potencial de economia para uma única indústria, bastaria realizar um levantamento da quantidade de eletricidade consumida, dos equipamentos utilizados na fábrica, das tecnologias disponíveis para a conversão ou troca dos mesmos, e de outros fatores, como a disponibilidade do gás a preços competitivos, o tipo do contrato de fornecimento, os custos de manutenção e a vida útil dos equipamentos. Porém, como estimar o percentual de eletricidade, da quantidade total consumida em processo térmicos, que poderia ser substituída por energia final química, para todos os setores de consumo da matriz energética nacional?

Uma solução e, talvez a ideal, seria estimar esse valor por meio de uma ampla e precisa pesquisa de campo em níveis regional, estadual e nacional, conforme a análise desejada. Uma outra maneira seria adotar valores fixos para substituição da eletricidade, por exemplo: $S = 50\%$ etc. Outra forma ainda seria utilizar uma análise gráfica para simular quaisquer cenários de substituição, ou seja, $0\% \leq S \leq 100\%$. Essas metodologias já foram realizadas com êxito em outros estudos de Strapasson et Fagá (2003; 2004), mas ainda não caracterizavam o cenário real que o Brasil poderia alcançar. Para sanar esse problema, buscou-se uma solução alternativa, onde o valor do percentual de substituição (S) foi estimado por meio de uma análise comparativa internacional, conforme descrito a seguir.

4.1.2 ANÁLISE DO USO DA ENERGIA TÉRMICA NO MUNDO

Com base nos dados da IEA (2001a; 2001b) foram realizadas algumas comparações entre os diferentes setores de consumo, de cada país analisado, a fim de identificar as distorções do atual modelo energético nacional e estimar qual seria o percentual de eletricidade passível de substituição no Brasil.

Identificou-se que o uso da energia no mundo apresenta dois comportamentos padrões. O primeiro compreende os países que possuem geração predominantemente hídrica ou nuclear, que passaram a ser chamados de países do “Grupo Elétrico”. São exemplos de países do “Grupo Elétrico”: Noruega, Suíça, Suécia, Brasil e França. Enquanto que o segundo comportamento agrega os países com uso intensivo da geração térmica em suas matrizes, apresentando grande demanda de gás natural, derivados de petróleo e carvão mineral. Por isso, esses países foram chamados de países do “Grupo Térmico”, tais como: EUA, Rússia, China, Alemanha, Japão, Holanda, Reino Unido e outros.

A tabela 2, elaborada com dados do IEA (2001a; 2001b), mostra esse comportamento. Adotou-se que os países do “Grupo Elétrico” são aqueles que apresentam o somatório da geração hídrica, nuclear e eletricidade importada, superior ou igual a 90% do total gerado. Enquanto que os países do “Grupo Térmico” apresentam somatório inferior a 90%. Essa linha divisória foi adotada com base nas características de cada país, quanto ao uso da energia elétrica em processos térmicos. Obviamente, a transição de um país qualquer de um grupo para outro é um processo gradativo e não abrupto. O objetivo desta caracterização foi apenas identificar determinados padrões mundiais de comportamento.

Tabela 2 - Parques geradores

	Países	Geração total de eletricidade (TWh)	Tipo de geração	
			Hid. + Nuc. + Import.	Térmica
Grupo Elétrico	Noruega	11,03	99%	1%
	Suíça	7,76	97%	3%
	Suécia	14,08	94%	6%
	Brasil	32,01	90%	10%
	França	45,14	90%	10%
Grupo Térmico	Venezuela	6,93	75%	25%
	Áustria	6,08	74%	26%
	Canadá	51,00	73%	27%
	Bélgica	7,95	63%	37%
	Finlândia	6,95	58%	42%
	Hungria	3,48	44%	56%
	Espanha	18,77	43%	57%
	Argentina	7,50	40%	60%
	Alemanha	50,90	39%	61%
	Japão	90,90	38%	62%
	Chile	3,30	37%	63%
	Rússia	73,42	35%	65%
	Reino Unido	32,55	31%	69%
	Itália	25,96	29%	71%
	EUA	339,99	28%	72%
	México	16,59	26%	74%
	Holanda	9,39	24%	76%
	Índia	45,47	18%	82%
	China	109,99	18%	82%
	Grécia	4,41	12%	88%
Dinamarca	3,79	12%	88%	
África do Sul	18,00	10%	90%	
Austrália	17,46	8%	92%	

Fonte: IEA (2001a; 2001b)

Países do “Grupo Elétrico” utilizam sem maiores restrições a energia elétrica em usos finais térmicos, pois normalmente o custo da eletricidade é baixo e não há outra alternativa disponível, uma vez que tanto a energia hídrica, quanto a nuclear não pode ser utilizada diretamente em usos finais térmicos. Em contrapartida, nos países do “Grupo Térmico”, a eletricidade é priorizada para usos mais nobres, ou seja, em processos onde se necessita de uma energia de maior qualidade exergética, tais como: força motriz, iluminação, eletroquímico e outros. Nesses

países, a utilização da energia química em usos finais térmicos é muito mais freqüente.

4.1.2.1 Metodologia de cálculo para estimar o Percentual de Substituição (S)

Para um determinado setor de consumo de um dado país, o total de energia consumida em processos térmicos (T) é resultado da soma do consumo de eletricidade nesse processo (E_t) e do consumo total de outras fontes de energia (Q_t), conforme a equação 17. A equação 18 expressa o percentual de participação da eletricidade em relação ao consumo total de energia.

$$T = E_t + Q_t \quad (\text{equação 17})$$

$$C = \frac{E_t}{T} \quad (\text{equação 18})$$

Onde:

T = Energia final total

E_t = Energia final elétrica total

Q_t = Energia final química total

C = Percentual de consumo de eletricidade, em relação ao total (x100)

Analisando-se o percentual de consumo de eletricidade (C), de cada setor de consumo, pode-se verificar se um determinado país utiliza ou não intensamente a eletricidade. Assim, conclui-se que o percentual de referência seria o percentual no qual o Brasil deveria atingir, para poder apresentar um uso eficiente de sua eletricidade, em face da perspectiva de transição gradual de sua matriz hídrica para um aumento da participação da geração térmica, especialmente, gás natural.

Dessa forma, para atingir o percentual de referência (C_{Ref}) seria necessário substituir uma determinada quantidade de eletricidade (E_s) e incrementar esse déficit com energia química (Q_{eq}), pois o consumo de energia útil na forma de calor (U) deve permanecer constante. Assim, com base nas equações 17 e 18, descritas anteriormente, chegamos à equação 19.

$$C_{Ref} = \frac{E_t - E_s}{E_t - E_s + Q_t + Q_{eq}} \quad (\text{equação 19})$$

Onde:

C_{Ref} = Percentual de referência do consumo de eletricidade, em relação ao total (x100)

E_s = Energia final elétrica possível de ser substituída por uma fonte de energia química

E_t = Energia final elétrica total

Q_t = Energia final química total

Q_{eq} = Energia final química equivalente à eletricidade substituída

O valor de C pode ser calculado segundo duas estimativas: agressiva ou moderada. Na estimativa agressiva, o percentual de referência é o menor valor de C encontrado, dentre todos os países analisados, para um dado setor. No caso da estimativa moderada, o percentual de referência é a média dos valores C dos países que apresentaram valor inferior ao percentual brasileiro.

Como o valor de Q_{eq} é dado pela equação (11), isolando-se a variável E_s da equação (19) e considerando a equação (17), temos finalmente a equação (20), que expressa a quantidade de energia elétrica que pode ser substituída por energia final química em usos finais térmicos. Uma vez mensurado o valor da variável E_s , pode-se também calcular o seu respectivo percentual de substituição (S), para cada setor da matriz energética nacional, conforme já estabelecido na equação 16, resultando assim na equação 21.

$$E_s = \frac{\eta_{1q} (C \cdot T - E_t)}{C_{\text{Ref}} (\eta_{1e} - \eta_{1q}) + \eta_{1q}} \quad (\text{equação 20})$$

$$S = \frac{E_s}{E_t} \quad (\text{equação 21})$$

Onde:

E_s = Energia final elétrica possível de substituída por uma fonte de energia final química

C_{Ref} = Percentual de referência do consumo de eletricidade, em relação ao total (x100)

T = Energia final total

E_t = Energia final elétrica total

η_1 = Rendimento de Primeira Lei da Termodinâmica para a transformação de energia final elétrica (e) ou química (q) em energia útil, na forma de calor

S = Percentual de eletricidade passível de substituição por energia final química (x100)

Com o objetivo de excluir países pouco representativos em cada setor de consumo analisado, foram considerados apenas os países que apresentaram tradição na área e que tiveram um consumo total de energia (T) superior a 10% do consumo brasileiro. Isso foi feito, pois pequenos consumidores poderiam distorcer a análise, por apresentarem escalas incompatíveis com a realidade brasileira. O valor de 10% foi adotado, devido às freqüentes disparidades de consumo de alguns países, em relação à média dos demais. Além disso, para os setores residencial, agrícola, comercial e público, também foram retirados da análise os países com realidades climáticas muito distintas da brasileira. Para esses setores, os valores estimados devem ser vistos com ressalva, uma vez que o potencial de substituição calculado poderia apresentar uma variação acentuada, caso fossem realizadas pesquisas de campo. Esse comportamento certamente não ocorre para o setor industrial.

4.1.3 SUMÁRIO DE EQUAÇÕES

A tabela 3 traz um sumário das principais equações apresentadas na metodologia cálculo, com a respectiva legenda das variáveis. As equações foram elaboradas com base nos princípios da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica.

Tabela 3 - Sumário de Equações da Metodologia de Cálculo

Equações	
$U = \eta_{1e} E_s$	$P = P_e - P_q$
$E_s = \frac{U}{\eta_{1e}}$	$P_e = \frac{E_s}{\eta_t}$
$U = \eta_{1q} Q_{eq}$	$P_q = Q_{eq}$
$Q_{eq} = \frac{\eta_{1e} E_s}{\eta_{1q}}$	$P = \frac{U}{\eta_t \eta_{1e}} - \frac{\eta_{1e} E_s}{\eta_{1q}}$
$T = E_t + Q_t$	$E_s = \frac{\eta_{1q} (C_{Ref} T - E_t)}{C_{Ref} (\eta_{1e} - \eta_{1q}) + \eta_{1q}}$
$C = \frac{E_t}{T}$	$S = \frac{E_s}{E_t}$
$C_{Ref} = \frac{E_t - E_s}{E_t - E_s + Q_t + Q_{eq}}$	

Legenda:

U = Energia final útil, na forma de calor

E_s = Energia final elétrica possível de ser substituída por uma fonte de energia química

Q_{eq} = Energia final química equivalente à eletricidade substituída

η_1 = Rendimento de Primeira Lei da Termodinâmica para a transformação de energia final elétrica (e) ou química (q) em energia útil, na forma de calor

P = Energia primária economizada

P_e = Energia primária correspondente à energia final elétrica destinada à produção de energia útil na forma de calor

P_q = Energia primária equivalente à substituição da eletricidade por energia final química

η_t = Rendimento térmico da geração de eletricidade

T = Energia final total

E_t = Energia final elétrica total

Q_t = Energia final química total

C_{Ref} = Percentual de referência do consumo de eletricidade, em relação ao total (x100)

S = Percentual de eletricidade passível de substituição por energia final química (x100)

4.2 BASE DE DADOS UTILIZADA

As principais literaturas utilizadas como bases de dados para o desenvolvimento deste trabalho foram:

- Balanço de Energia Útil - BEU (FDTE, 1996);
- Balanço Energético Nacional - BEN (MME, 2002); e
- Balanços de Energia da *International Energy Agency* - IEA (2001a, 2001b).

Conforme mostra a figura 3, as três bases de dados subsidiaram a elaboração de uma “nova matriz” sobre a qual foi aplicada a metodologia proposta. Infelizmente não foram encontrados estudos mais atualizados e detalhados para o nível de abordagem deste trabalho, o que pode limitar a precisão dos resultados.

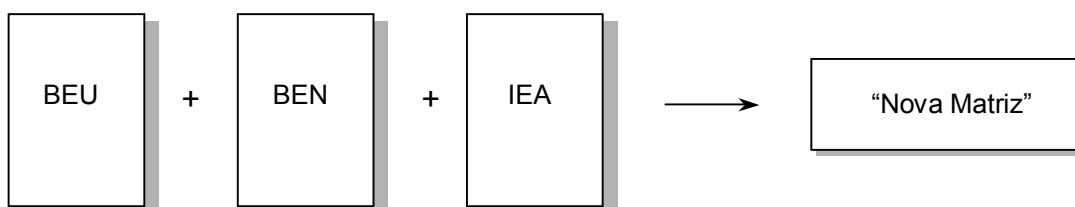


Figura 3. Base de dados

Balanço de Energia Útil

O BEU (FDTE, 1996) foi um estudo realizado pela FDTE - Fundação para o Desenvolvimento da Engenharia, a pedido do Ministério de Minas e Energia - MME, com a finalidade de produzir uma base de dados energéticos confiável, pela qual se poderia estimar o impacto que os programas de eficiência energética poderiam atingir, sobre a redução do consumo de energia final. Para elaborar essa base de

dados, a FDTE realizou um levantamento em mais de 350 empresas, além de utilizar dados de estudos anteriores, elaborados pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, pela COPEL - Companhia Paranaense de Energia, CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais e outras empresas.

Os dados do BEU são fundamentais para a elaboração de programas de uso racional da energia. Apesar de aparentemente desatualizado, o BEU ainda é uma base de dados ímpar e relevante, pois não se espera que os coeficientes de eficiência tenham sido alterados significativamente até o presente.

Em síntese, o Balanço de Energia Útil é uma matriz, onde são calculados todas as perdas e os potenciais de economia de energia, com base em coeficientes de distribuição e eficiência energética. Os dados foram levantados através de amplas pesquisas de campo, em nível nacional, para cada setor de consumo, uso final e fonte de energia. Os dados que alimentam o BEU, ou seja, o consumo total de energia por setor e por fonte; foram importados do Balanço Energético Nacional da época do estudo. Portanto, esses dados foram atualizados para a versão mais recente do BEN (MME, 2002), conforme sugerido pela própria FDTE (1996).

O Balanço de Energia Útil faz referência aos seguintes usos finais em sua análise: Força motriz, Iluminação, Eletroquímico, Aquecimento Direto, Calor de Processo e Outros Usos.

a) Força Motriz

A FDTE classifica como força motriz o uso da energia em motores para produção de energia mecânica. Os principais combustíveis utilizados são: óleo diesel, óleo combustível, gasolina, querosene, álcool etílico, gás natural (GN), gás

liquefeito de petróleo (GLP) e outros gases. Observa-se que nos transportes ferroviário e hidroviário ainda permanecem o uso de máquinas a vapor, assim, deve-se considerar que a primeira utilização da energia é em calor de processo, para o aquecimento da caldeira. No caso do transporte hidroviário, isso pode ocorrer em embarcações muito antigas ou em navios muito grandes, onde o vapor é utilizado para acionar a turbina. No setor ferroviário o diesel e a eletricidade são muito utilizados. Uma outra observação importante é que o mesmo balanço também considera a refrigeração como força motriz.

b) Iluminação

Entende-se como iluminação, a emissão de radiação luminosa, que pode ser proveniente da eletricidade, GLP, querosene etc. A eletricidade é a principal forma de energia utilizada para iluminação, em todos os setores de consumo. O uso de GLP e querosene, para esse fim, é muito baixo e restrito aos setores Residencial, Agropecuário e Mineração. No setor residencial, há um predomínio de lâmpadas incandescentes, enquanto que nos setores Comercial, Energético e Industrial as lâmpadas fluorescentes registram também uma participação importante. No Setor Público as lâmpadas de vapor de mercúrio e vapor de sódio são mais utilizadas. Segundo Yamachita et Haddad (2001) somente a iluminação pública é responsável por cerca de 3,3% do consumo total de eletricidade do Brasil.

c) Eletroquímico

O uso eletroquímico da energia ocorre principalmente no Setor Industrial, com destaque para os setores: Metais Não-Ferrosos; Química; e Ferro-Gusa e Aço. No

Setor de Metais Não-Ferrosos, o principal uso eletroquímico está voltado para a redução do alumínio e cobre, e no Setor de Química, para a produção de soda e cloro. No Setor de Ferro-Gusa e Aço e Outros Setores da Indústria, a energia eletroquímica é utilizada para o tratamento de superfícies metálicas por galvanoplastia.

d) Aquecimento Direto

Os usos finais térmicos da energia estão divididos em duas formas de utilização: Aquecimento Direto (AD) e Calor de Processo (CP). Entende-se como aquecimento direto, a transferência de calor direta ao uso final, sem o aquecimento de fluidos intermediários. Um dos equipamentos mais utilizados para aquecimento direto são os fornos, voltados para atender diversas finalidades, tais como: cozimento, fusão, secagem, tratamento térmico e calcinação (Martins, 2001).

Algumas fontes de energia apresentam rendimentos térmicos muito próximos para a produção de calor útil, conforme listado a seguir, em ordem decrescente: energia elétrica; gás natural, diesel, óleo combustível, GLP, querosene, gás e alcatrão; carvão metalúrgico, coque de carvão mineral e carvão vegetal; lenha, produtos da cana, carvão vapor e outras fontes primárias. A FDTE teve dificuldades para estimar os rendimentos de eficiência dos equipamentos, uma vez que o uso da energia térmica para aquecimento direto possui várias aplicações e equipamentos de uso final muito distintos. Por isso, a fim de poder determinar a eficiência típica dos equipamentos, a FDTE precisou realizar alguns trabalhos práticos, além de consultar trabalhos de medições de outras instituições.

e) Calor de Processo

Um outro uso final térmico é o Calor de Processo (CP), que abrange a geração de vapor e o aquecimento de água e de fluidos térmicos. O calor de processo possui ampla aplicação na indústria. Diversos combustíveis podem ser utilizados para a produção de calor, sejam sólidos (carvão vapor, carvão metalúrgico, carvão vegetal, coque, lenha e bagaço-de-cana), líquidos ou gasosos, além da energia elétrica. Os geradores de calor de processo mais utilizados são as caldeiras e, em menor quantidade, os aquecedores de fluidos. Basicamente, as caldeiras ou geradores de vapor são equipamentos voltados para produzir e acumular vapor superior em pressão superior à atmosférica (Martins, 2001).

Como os dados utilizados pelo BEU (FDTE, 1996) são comparados com dados internacionais de consumo de energia da IEA (2001a; 2001b), que não diferenciam os processos de uso final da energia em aquecimento direto e calor de processo, ambos os processos foram considerados como “usos finais térmicos”.

f) Outros Usos

A FDTE considerou como Outros Usos, o uso da energia em equipamentos de telecomunicações, receptores de televisão, máquinas de cópia eletrostática, computadores e outros.

Balanço Energético Nacional

Tradicionalmente, todos os anos o Ministério de Minas e Energia – MME vêm publicando o Balanço Energético Nacional - BEN, com base nos Balanços Energéticos Estaduais e outras estimativas. A versão utilizada como base de dados foi a de 2003, de ano base 2002. Em anos anteriores, o Balanço Energético Nacional trazia um resumo dos resultados obtidos pelo Balanço de Energia Útil, o que não foi mais realizado devido à falta de atualização do mesmo.

Balanços de Energia da IEA (Países da OECD e Não-OECD)

Os Balanços de Energia publicados pela IEA foram outra importante base de dados utilizada na metodologia de cálculo, especialmente, o Balanço de Energia dos Países da OECD - *Organisation for Economic Co-operation and Development* (IEA, 2001b) e o Balanço de Energia dos Países Não-membros da OECD (IEA, 2001a). A metodologia adotada pelo IEA difere em relação ao Balanço Energético Nacional e ao Balanço de Energia Útil, no que se refere à definição das atividades que caracterizam os diferentes setores de consumo. Portanto, optou-se em utilizar a padronização do IEA, por sintetizar alguns setores de consumo do BEN e BEU, e por ser uma das principais fontes de dados energéticos mundiais. A tabela 4 apresenta o esquema de adequação dos setores adotado para a compilação final dos dados.

Tabela 4 - Equivalência dos setores de consumo de energia, para três bases de dados distintas

Setores de consumo dos Balanços da IEA	Setores correspondentes	
	Balanço Energético Nacional	Balanço de Energia Útil
“Ferro e Aço”	“Ferro-gusa e Aço” + “Ferro-ligas”	“Ferro-gusa e Aço” + “Ferro-ligas”
“Minerais não-metálicos”	“Cimento” + “Cerâmica”	“Cimento” + “Cerâmica”
“Mineração” (Minas e Pedreiras)	“Mineração e Pelotização”	“Mineração” + “Pelotização”
“Metais Não-ferrosos”	“Não-ferrosos e Outros da Metalurgia”	“Minerais Não-ferrosos” + “Alumínio”
“Química e Petroquímica”	“Química”	“Química”
“Alimentos e Tabaco”	“Alimentos e Bebidas”	“Alimentos e Bebidas” + “Açúcar”
“Têxtil e Couro”	“Têxtil”	“Têxtil”
“Papel, Celulose e Impressão”	“Papel e Celulose”	“Papel e Celulose”
“Industrial” (total)	“Industrial” (total)	“Industrial” (total)
“Residencial”	“Residencial”	“Residencial”
“Comercial e Serviços Públicos”	“Comercial” + “Público”	“Comercial” + “Público”
“Agricultura”	“Agropecuário”	“Agropecuário”
“Energético”	“Energético”	“Energético”
“Transportes” (total)	“Transportes” (total)	“Transportes” (total)

Em alguns setores, fizeram-se necessários alguns ajustes, a fim de transforma-los em um único setor, considerando as premissas básicas de cada estudo para a caracterização dos setores. Esses ajustes foram realizados através de uma média, onde se ponderou o consumo de energia de cada fonte e sua participação no uso final térmico, para cada um dos setores listados. Como os rendimentos de transformação de energia final em energia útil na forma de calor foram obtidos no Balanço de Energia Útil, mas aplicados em dados da IEA, tais rendimentos de conversão foram ajustados segundo uma média ponderada da eficiência de cada uso final (Aquecimento Direto e Calor de Processo), em relação ao seu consumo final de energia. Portanto, devido às limitações encontradas para

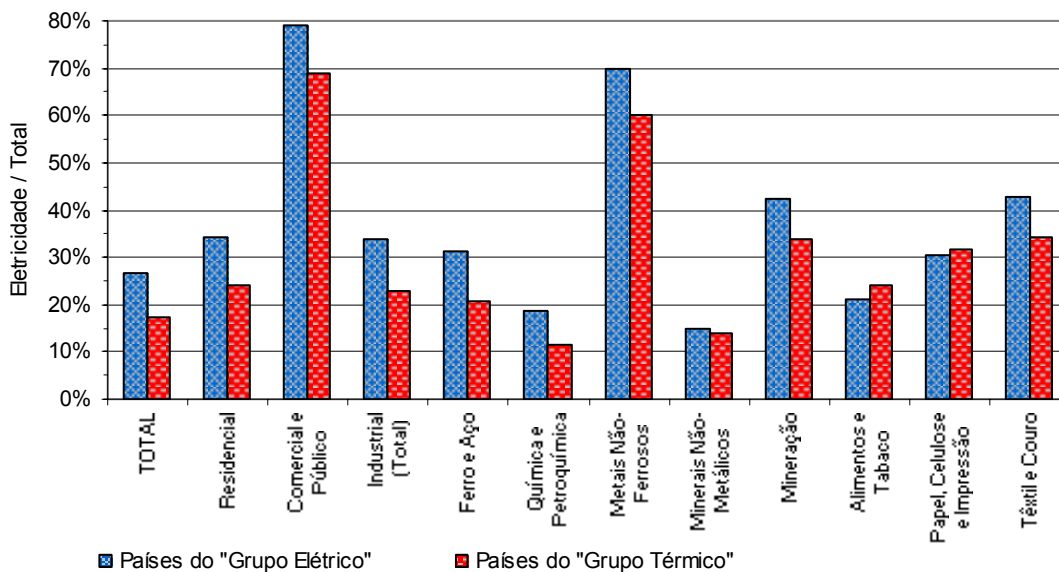
ajuste das referidas bases de dados, as estimativas realizadas estão sujeitas a pequenas variações, o que não invalida os resultados finais obtidos.

Cabe observar também que nem todos os países considerados na base de dados do setor industrial estão presentes no cálculo dos outros sub-setores da indústria, uma vez que os mesmos não satisfizeram os critérios mínimos abordados na metodologia, como, por exemplo, um consumo superior a 10% do consumo total brasileiro e tradição no setor. No caso do setor industrial, em cada sub-setor de consumo são considerados determinados países, de maneira que o potencial industrial calculado diretamente e o resultante da somatória de todos os sub-setores não são exatamente iguais, mas muito próximos, com diferenças desprezíveis estatisticamente. O mesmo ocorre para o potencial total dos setores.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos mostram a existência de determinadas distorções no atual modelo energético. Inicialmente são apresentados os resultados da análise internacional e, posteriormente, os resultados do Brasil, por setor de consumo. Com base na referida metodologia, observa-se que os países do “Grupo Elétrico” apresentam, na média, uma participação da eletricidade maior do que os países do “Grupo Térmico”, para a maioria dos setores de consumo (gráfico 7).

Gráfico 7. Participação da eletricidade no consumo total de energia, para diferentes tipos de parque gerador



Esse comportamento ocorre devido à energia hídrica, nuclear e eletricidade importada não possibilitarem uma aplicação direta ou viável de sua respectiva energia primária, em usos finais térmicos. Enquanto que as fontes de energia química podem ser utilizadas tanto para a geração, quanto para produção direta

de energia final útil, na forma de calor. Os únicos setores díspares foram: Alimentos e Tabaco; e Papel, Celulose e Impressão. Nesses setores, observou-se que o uso da biomassa elevou em demasia a participação da energia química em relação ao total, especialmente, para o Brasil. Muitos países não foram incorporados à análise, pois não satisfizeram os requisitos mínimos apresentados na metodologia. No entanto, observa-se que a hipótese pôde ser confirmada para a maioria dos setores, uma vez que as diferenças encontradas decorrem basicamente da forma como os países utilizam a energia, segundo a qualidade exergética e finalidade de uso.

No entanto, se a eficiência energética da conversão da eletricidade em energia térmica (η_{1e}) é, normalmente, superior à eficiência da conversão de energia química em energia térmica (η_{1q}), qual seria o porquê de não se priorizar o consumo de eletricidade para a produção de calor útil? O Estado não deveria realizar políticas de uso intensivo da eletricidade em usos finais térmicos? Em certos casos sim, os dados mostram que esse argumento é válido para países do “Grupo Elétrico”, pois eles não têm outra opção relevante de uso para a energia primária, que senão a conversão em eletricidade.

Porém, para a maioria dos casos, ou seja, para países do “Grupo Térmico”, observa-se que o uso da energia primária destinada à produção de energia útil na forma de calor é normalmente muito mais interessante do que para a geração de eletricidade, pois há que se considerar também o rendimento térmico das usinas termelétricas (η_t). Nesses países, o uso difuso das fontes de energia química é bastante comum e a eletrotermia (uso da eletricidade para a produção de calor) está restrita às situações em que a eletricidade se faz realmente necessária, uma vez que existe um mercado de energia térmica para o qual a energia química não consegue

substituir a eletricidade, devido a limitações tecnológicas ou a existência de barreiras econômicas e ambientais.

Outra exceção pode ser feita às bombas de calor, onde o uso da eletricidade para a produção de calor é bastante eficiente. A bomba de calor foi concebida por Lord Kelvin, em 1852, e segue basicamente o circuito de uma máquina de Carnot. Seu funcionamento é possível devido à entrada de dois fluxos de energia (calor e trabalho) em um sistema e a saída de somente um fluxo (calor), resultando em um coeficiente de performance superior a 1 (Macomber, 2002).

Guardadas as devidas especificidades de cada tecnologia, a medida em que um país altera a sua matriz energética, aumentando a participação da energia química na geração, o planejamento deve priorizar, antecipadamente, a utilização direta da energia primária no uso final térmico. Atualmente, diversos países encontram-se nessa situação ou na situação inversa, ou seja, aumentando a participação hídrica ou nuclear na geração. Ambos deveriam estar atentos perante a necessidade de se alterar gradualmente os seus modelos de planejamento energético, no que se refere ao uso da energia térmica. Obviamente, a alteração de uma matriz está sempre associada a questões de oferta e demanda de recursos energéticos, portanto, a questão da eficiência energética deverá servir apenas como base para o planejamento energético, pois será a análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental, de acordo com cada empreendimento, que realmente irá determinar o processo de mudança.

No caso do Brasil, com o aumento da participação do gás natural na matriz energética nacional, o país deveria tender a uma alteração gradual em seu modelo de planejamento energético, ou seja, a eletricidade utilizada em processos térmicos deveria ser substituída gradualmente pelo gás. Dessa forma, haveria uma redução

na demanda elétrica e um ganho significativo em eficiência energética, já que o gás não estaria sendo utilizado para a geração. Aliás, vários estudos realizados na década de 90 mostram a existência de um amplo mercado para o gás em usos finais térmicos, conforme já apresentado na revisão bibliográfica.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para cada setor de consumo do cálculo dos potenciais de inserção da energia química, especialmente o gás natural, nos usos finais térmicos da matriz energética nacional. A matriz geral de cálculos encontra-se em anexo.

Os Setores de Transportes e Energético não foram considerados, uma vez que o consumo de eletricidade em usos finais térmicos foi muito próximo a zero. Além disso, a substituição da eletricidade não é pertinente nesses casos. No entanto, o Setor de Transportes apresenta um potencial de inserção do gás natural muito importante, em substituição a outros combustíveis, como a gasolina e o diesel, mas para uso final em matriz. O IEA (2001a; 2001b) ainda considera setores como: Equipamentos de Transporte; Maquinaria; Madeira e Subprodutos; e Construção. Porém, o Brasil e vários outros países não apresentam consumo de energia nesses setores. Isso ocorre devido à metodologia adotada pelo IEA não ser a mesma dos balanços específicos de cada país. De qualquer maneira, esse consumo está embutido no item “setores não especificados” do IEA.

5.1 SETOR INDUSTRIAL

O setor industrial foi o que apresentou o maior potencial de inserção de fontes de energia química como substituto da eletricidade em usos finais térmicos. Cada sub-setor da indústria possui características específicas, assim, a análise foi realizada para cada sub-setor, a fim de estimar o potencial total do setor industrial.

5.1.1 SETOR DE FERRO E AÇO

Os combustíveis químicos são muito utilizados no Setor de Ferro e Aço, com destaque para o coque de carvão mineral, carvão vegetal, óleo combustível e gás. Embora a eletricidade não seja a principal fonte de energia utilizada, o setor apresenta o maior uso de eletricidade em usos finais térmicos do setor industrial. Cerca de 70% do consumo de eletricidade neste setor é destinada a usos finais térmicos.

No Setor de Ferro-gusa e Aço, o principal uso da eletricidade em aquecimento direto ocorre em fornos elétricos, por exemplo: fornos a arco, indução, plasma e resistência. A eletricidade é utilizada em diferentes fases do processo, tais como: redução direta, fusão, aquecimento de panelas, ligotamento contínuo, pré-aquecimento de placas, forjaria e tratamento térmico. Existem outros fornos muito utilizados, mas voltados para o uso de fontes de energia química, como: fornos a óleo, para fusão e ligotamento contínuo; e fornos a coque e carvão vegetal, tipo cubilô, para fundição e acerto da liga. Para o Setor de Ferro-ligas, o principal forno utilizado é o forno a arco elétrico de eletrodo submerso, que pode utilizar como

combustíveis auxiliares, o carvão metalúrgico e o coque. No processo de redução, o uso de óleo combustível e gases também pode ocorrer (FDTE, 1996).

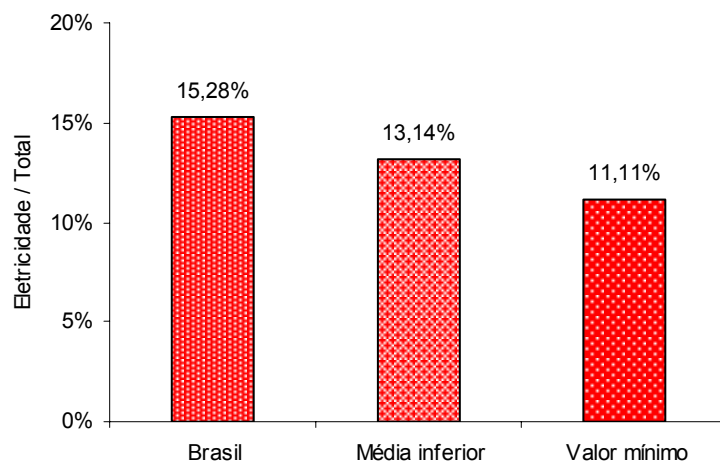
Portanto, basta agora saber quanto da eletricidade destinada aos usos finais térmicos poderia ser substituída por uma fonte de origem química. Seguindo a metodologia proposta nesta dissertação, foram calculados os percentuais de participação da eletricidade para os quais o Brasil poderia atingir, ou seja, o valor da média inferior (estimativa moderada) e o valor mínimo (estimativa agressiva). Na tabela 5 são apresentados os países utilizados como referência para análise deste setor.

Tabela 5 - Consumo de energia no Setor de Ferro e Aço, em 10³ tEP

Países	Eletricidade	Outros	Total	Percentuais Elétricos (C)
Brasil	1,67	9,28	10,95	15,28%
México	0,82	4,82	5,64	14,54%
Áustria	0,19	1,15	1,34	14,18%
China	8,64	59,21	67,85	12,73%
Holanda	0,19	1,52	1,71	11,11%

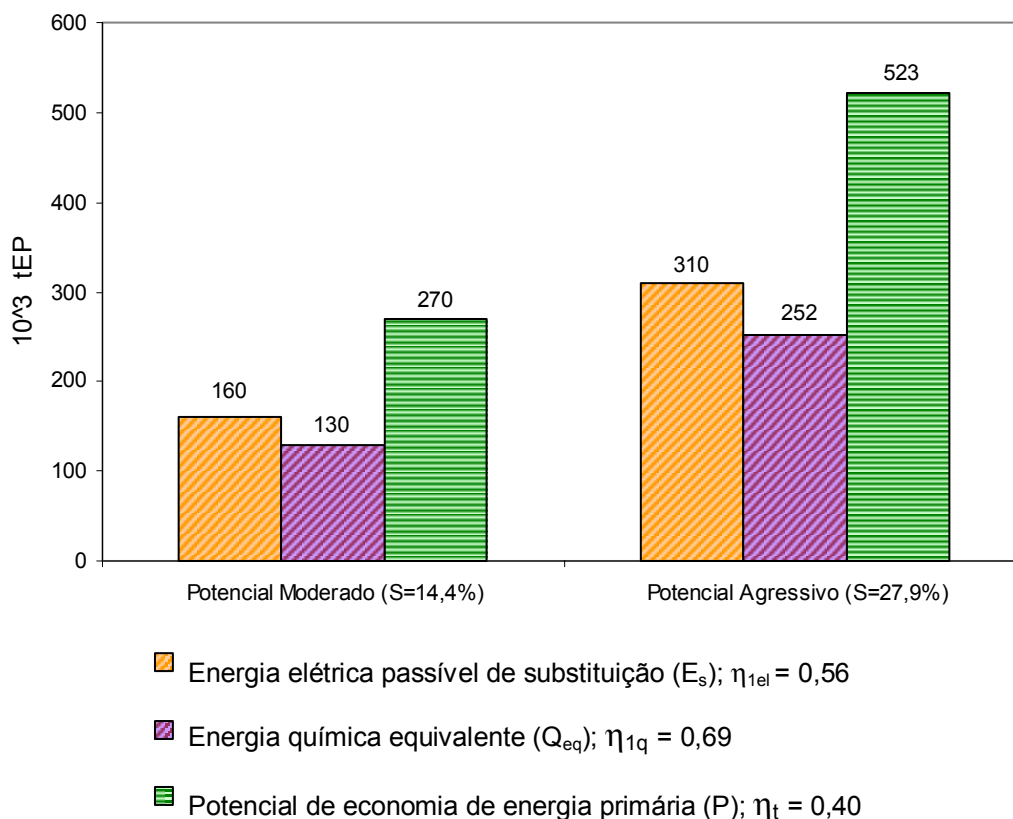
Portanto, cerca de 15% da eletricidade consumida no Setor de Ferro e Aço do Brasil é destinada aos usos finais térmicos, especialmente, através dos fornos elétricos citados. No entanto, conforme o gráfico 8, o país poderia reduzir esta participação para 13,14% (média inferior; desvio padrão (σ) = 11,56), considerando uma estimativa moderada, ou até 11,11% (valor mínimo: Holanda), para uma estimativa agressiva.

Gráfico 8. Setor de Ferro e Aço - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida pelo setor



Com base na metodologia proposta e nos valores calculados para a média inferior e valor mínimo, pode-se obter os valores do percentual de substituição (S), da energia elétrica passível de substituição (E_s) e da quantidade de energia química equivalente (Q_{eq}), que representa o nicho de mercado existente para a inserção de fontes de energia de origem química, como o gás natural, em substituição à eletrotermia (gráfico 9).

Gráfico 9. Setor de Ferro e Aço – Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária



O Setor de Ferro e Aço apresenta um grande potencial de economia de energia primária e de inserção de fontes de origem química, em substituição à eletrotermia. O consumo total de eletricidade em usos finais térmicos é de 1111 ktEP. Portanto, o equivalente a 24% (estimativa moderada) ou 47% (estimativa agressiva) desta energia poderia ter sido poupada, em energia primária.

5.1.2 SETOR DE QUÍMICA E PETROQUÍMICA

O Setor de Química é muito diverso e possui uma grande quantidade de segmentos. De maneira geral, a maioria deles apresenta um elevado consumo de energia em aquecimento direto, com destaque para as indústrias de óxidos metálicos e fertilizantes. Algumas indústrias químicas consomem grandes quantidades de energia em processos de secagem. Há também um grande consumo de óleo combustível, gás natural e eletricidade, em aquecimento direto. No caso do óleo combustível e do gás natural, os principais fornos utilizados são os fornos tipo túnel e tambor rotativo. Para a eletricidade, os fornos a resistência são os mais comuns.

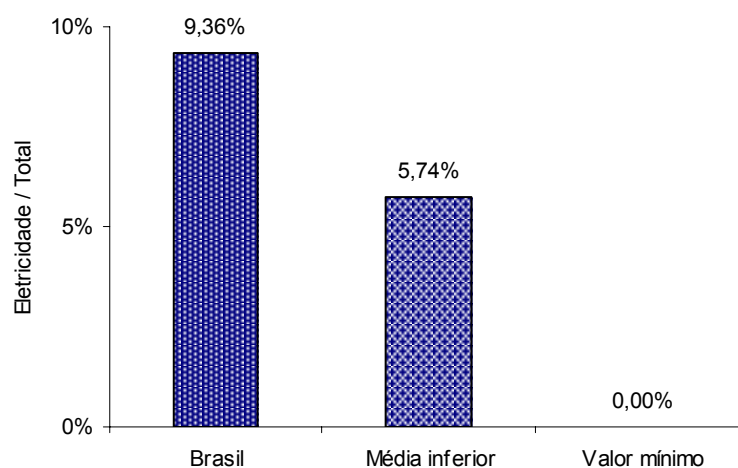
O Brasil possui um baixo percentual de consumo de eletricidade em usos térmicos neste setor, embora outros sete países dentre os analisados tenham apresentado percentuais ainda inferiores (tabela 6). A Argentina não registrou consumo de eletricidade e, portanto, utiliza 100% de outras fontes para o abastecimento de usos finais térmicos, especialmente, devido à abundância de gás natural existente neste país.

Tabela 6 - Consumo de energia no Setor de Química e Petroquímica, em 10^3 tEP

Países	Eletricidade	Outros	Total	Percentuais Elétricos (C)
Brasil	1,40	13,59	14,99	9,36%
Rússia	3,55	35,24	38,80	9,16%
Holanda	1,02	10,30	11,32	9,01%
Canadá	1,64	17,47	19,11	8,58%
México	0,72	10,67	11,39	6,32%
Venezuela	0,19	4,94	5,13	3,69%
África do Sul	0,22	6,08	6,30	3,42%
Argentina	.	1,97	1,97	0,00%

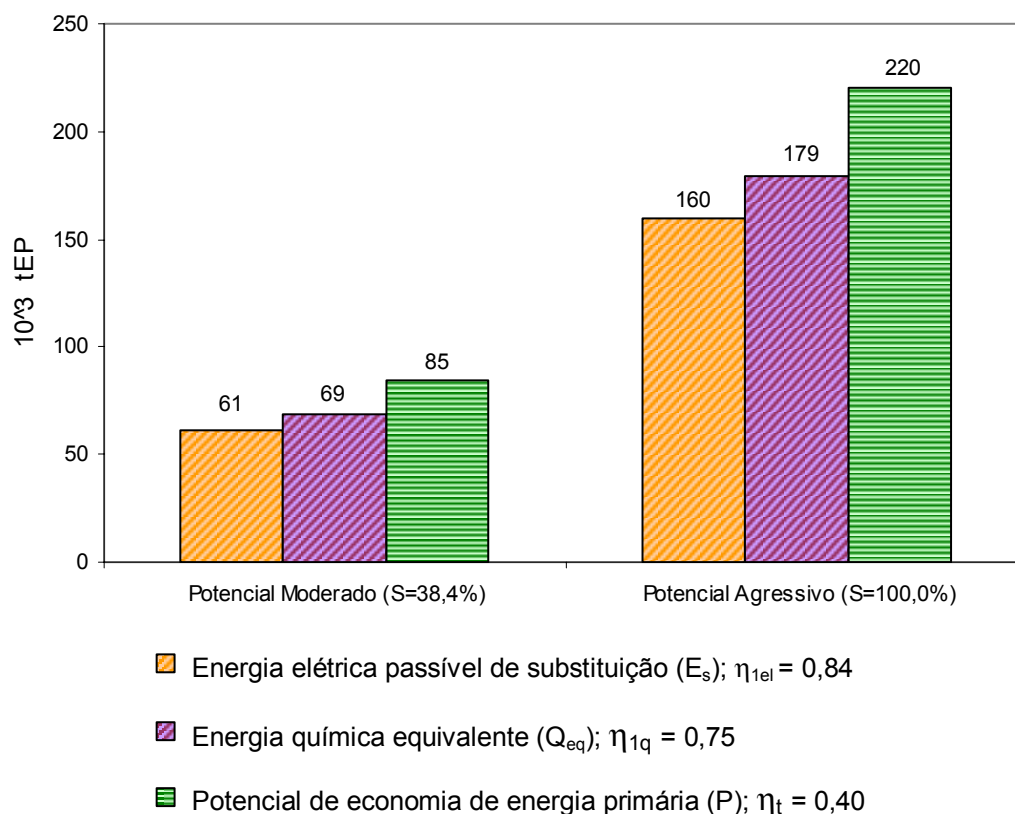
Dessa forma, a Argentina foi tida como referencial máximo para o qual o Brasil poderia alcançar, no que se refere ao percentual de uso da eletricidade em usos finais térmicos deste setor, ou seja, o valor mínimo (estimativa agressiva). A média dos percentuais elétricos dos países com resultados inferiores ao do Brasil (média inferior = estimativa moderada), representa um valor mais próximo da realidade e mais facilmente possível de se atingir. O valor obtido foi de 5,74% ($\sigma = 3,50$), conforme apresentado no gráfico 10.

Gráfico 10. Setor de Química e Petroquímica - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor



Apesar do potencial de substituição de eletricidade por energia química ser bastante limitado neste setor, a existência de sete importantes países tidos como referência válida ainda mais os resultados obtidos (gráfico 11).

Gráfico 11. Setor de Química e Petroquímica – Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária



A diversidade de equipamentos de uso final presente neste setor representa um desafio ainda maior para se poder substituir a eletricidade por energia química, frente ao nível de especificidade encontrado e o alto custo dos mesmos. O potencial de economia de energia primária equivale a 53% (estimativa moderada) ou 138% (estimativa agressiva) do consumo total de eletricidade em usos finais térmicos, 160 ktEP. Observa-se que, em uma estimativa agressiva, o resultado encontrado supera tal consumo elétrico, revelando um amplo potencial de economia de energia primária a ser explorado.

5.1.3 SETOR DE METAIS NÃO-FERROSOS

O Setor de Metais Não-Ferrosos abriga indústrias produtoras de metal primário, através da redução do minério, além das indústrias de fundição, que opera na recuperação de sucata, e de conformação desses metais, realizada por meio de processos de fundição, forjaria e extrusão.

Este setor apresenta um consumo muito elevado de energia em usos finais térmicos, especialmente, óleo combustível e eletricidade, com destaque para a indústria de alumínio. Para fins de aquecimento direto com óleo combustível, o forno do tipo cadinho é o mais utilizado. O óleo combustível também é muito usado como combustível auxiliar em processos de redução. Enquanto que para a eletricidade, os principais fornos encontrados são os a indução e a arco direto. Observa-se um importante mercado para o gás natural como substituto ao óleo diesel em fornos de forja de metal não-ferroso (Comgás, 1993). O gás também pode ser utilizado em fornos de tratamento térmico, estufas de secagem, aquecimento de cadinhos de fundição, geração de atmosfera controlada, equipamentos de corte de chapas, estufas litográficas, fornos de fusão e espera de metais não-ferrosos.

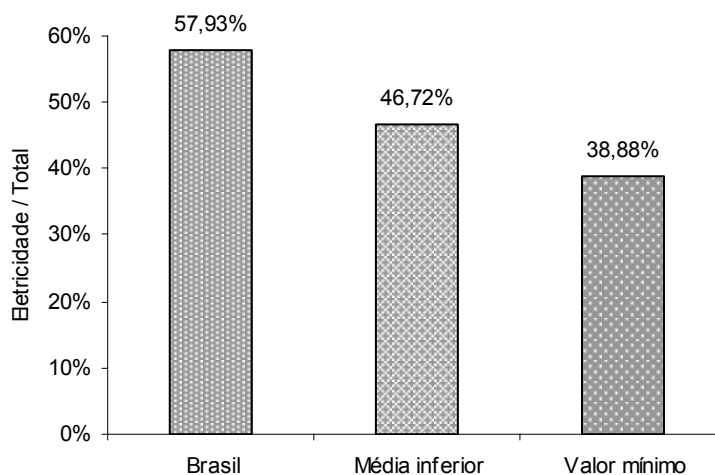
Vários países apresentaram um percentual de consumo de eletricidade inferior ao do Brasil, o que mostra a existência de um amplo mercado para inserção do gás natural (tabela 7). No entanto, observa-se também que a eletricidade apresenta uma participação importante neste setor, uma vez que todos os equipamentos podem ser convertidos para gás natural, devido a problemas tecnológicos ou de viabilidade econômica.

Tabela 7 - Consumo de energia no Setor de Metais Não-Ferrosos, em 10³ tEP

Países	Eletricidade	Outros	Total	Percentuais Elétricos (C)
Brasil	2,43	1,77	4,20	57,93%
Venezuela	0,85	0,62	1,47	57,82%
França	0,81	0,66	1,47	55,10%
Japão	1,66	1,71	3,37	49,26%
EUA	7,10	7,77	14,87	47,75%
Itália	0,45	0,50	0,95	47,37%
Rússia	8,18	9,33	17,51	46,73%
Grécia	0,30	0,40	0,70	42,86%
Reino Unido	0,51	0,71	1,22	41,80%
China	5,23	7,95	13,18	39,68%
Austrália	2,99	4,70	7,69	38,88%

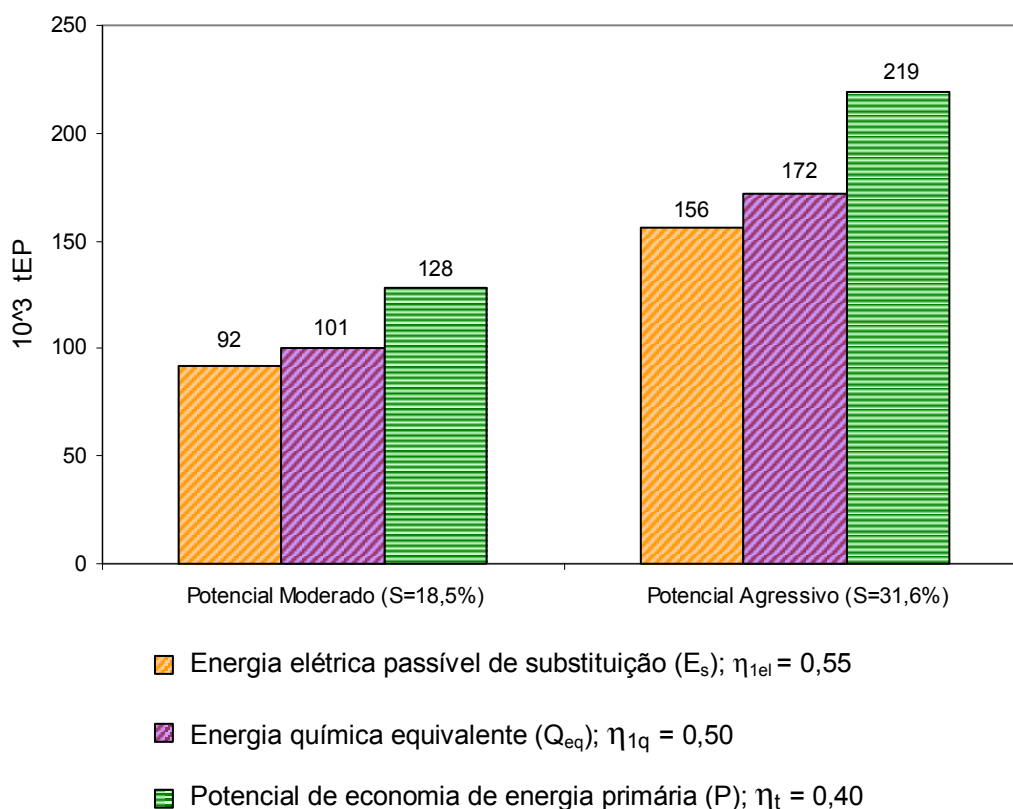
Dentre os países analisados, o que menos utiliza a eletricidade neste setor é a Austrália, tida como o valor mínimo para referência. Enquanto que a média inferior resultante dos países analisados foi de 46,72% ($\sigma = 6,25$). Através do gráfico 12 pode-se visualizar as metas para as quais o Brasil poderia atingir através da conversão de alguns equipamentos de uso final térmico.

Gráfico 12. Setor de Metais Não-Ferrosos - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor



Apesar do percentual de substituição encontrado para o Setor de Metais Não-Ferrosos não ser muito elevado, o potencial de economia possível de ser obtido justifica a substituição da eletricidade, devido ao alto consumo de eletricidade em usos finais térmicos verificado neste setor, 495 ktEP. De acordo com o gráfico 13, o potencial de economia de energia primária poderia alcançar cerca de 26% (estimativa moderada) ou 44% (estimativa agressiva) do total de eletricidade consumida em usos finais térmicos.

Gráfico 13. Setor de Metais Não-Ferrosos – Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária



5.1.4 SETOR DE MINERAIS NÃO-METÁLICOS

O Setor de Minerais Não-Metálicos abrange as Indústrias de Cimento, Cerâmica e Vidro. A eletricidade é pouco utilizada neste setor, em relação às fontes de energia final química. Na indústria de cimento a eletricidade é usada basicamente em processos de secagem do minério. O principal combustível utilizado é o óleo combustível, empregado em fornos de clínquerização, onde os gases da combustão fluem por um tambor rotativo a uma temperatura de cerca de 1400°C. Além do óleo combustível, os combustíveis sólidos também podem ser utilizados como auxiliares nesses fornos.

Na indústria de cerâmica, pode-se observar três segmentos típicos: cerâmica vermelha; pisos e azulejos; e outros, tais como, cerâmica técnica, louça sanitária e de mesa. A indústria de cerâmica vermelha consome muita lenha e bagaço-de-cana especialmente em fornos do tipo Hoffmann. A indústria de pisos e azulejos consome uma grande variedade de combustíveis em fornos do tipo túnel, tais como: gás natural, gás, GLP, óleo BTE e eletricidade. Em outros setores da indústria cerâmica também se consome muito óleo BTE e combustíveis gasosos. O gás natural apresenta muitas vantagens frente aos outros combustíveis nesse setor, por não possuir impurezas, possibilitar o controle automatizado da temperatura e a utilização de queimadores de alta velocidade de combustão, especialmente, em fornos contínuos e intermitentes, nos atomizadores e secadores. Países como Itália e Espanha têm atentado para essa vantagem do gás natural, ganhando competitividade no cenário internacional.

Na indústria do vidro são muito consumidos a eletricidade, o óleo combustível e o gás natural. As atividades de fusão e refinamento consomem grande quantidade

de energia nos mais diversos tipos de vidros: planos, vasilhames, isolantes e prensados. O gás natural poderia ter uma inserção maior nos sistemas auxiliares do processo de fusão, tais como: pré-aquecedores de vidro reciclado, recuperadores de calor e queimadores regenerativos. Os fornos utilizados na fabricação de vidros não-planos e prensados exigem um preciso controle de temperatura, o que é perfeitamente possível de ser feito com o gás natural (Gomes, 1996).

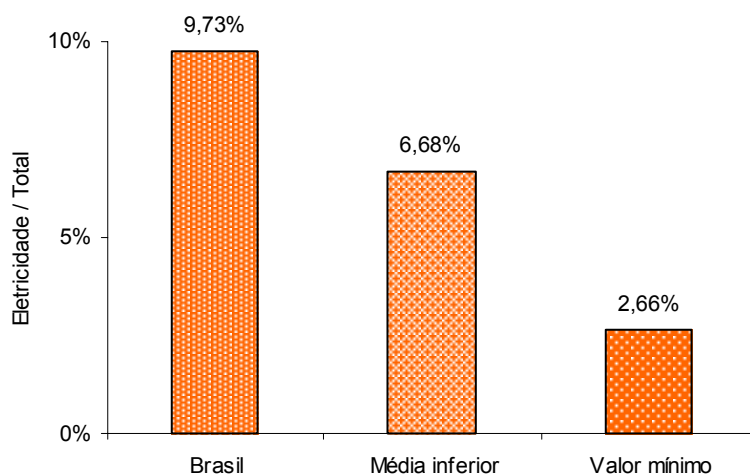
Considerando a análise comparativa com outros países, observa-se que a participação da eletricidade no Setor de Minerais Não-Metálicos é muito baixa no Brasil, pois somente três dos países analisados obtiveram percentuais elétricos inferiores (tabela 8).

Tabela 8 - Consumo de energia no Setor de Minerais Não-Metálicos, em 10³ tEP

Países	Eletricidade	Outros	Total	Percentuais Elétricos (C)
Brasil	0,62	5,76	6,38	9,73%
China	5,68	57,98	63,66	8,92%
África do Sul	0,10	1,04	1,13	8,47%
Venezuela	0,03	1,17	1,20	2,66%

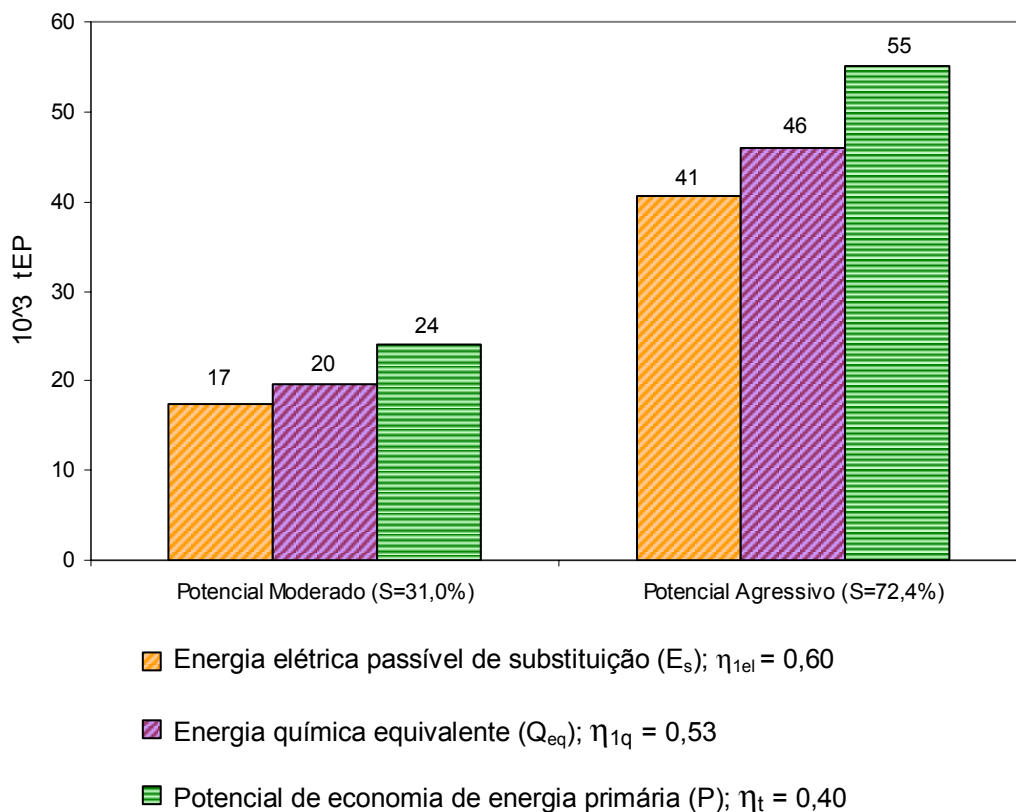
A Venezuela foi o país que apresentou o menor percentual elétrico (valor mínimo), dentre os analisado. Portanto, a Venezuela foi o país tido como referência para estimar o potencial agressivo de substituição da eletricidade por energia química, em usos finais térmicos. O gráfico 14 apresenta os resultados estimados para a média inferior ($\sigma = 3,49$) e para o valor mínimo.

Gráfico 14. Setor de Minerais Não-metálicos - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor



O Setor de Minerais Não-Metálicos consome somente 56 ktEP de eletricidade em usos finais térmicos. Desta forma, o potencial de economia de energia possível de ser obtido também é baixo, embora os percentuais de substituição de eletricidade por energia química sejam elevados (gráfico 15). Cerca de 43% (estimativa moderada) ou 98% (estimativa agressiva) do consumo de eletricidade poderia estar sendo economizada em energia primária equivalente.

Gráfico 15. Setor de Minerais Não-metálicos – Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária



5.1.5 SETOR DE MINERAÇÃO

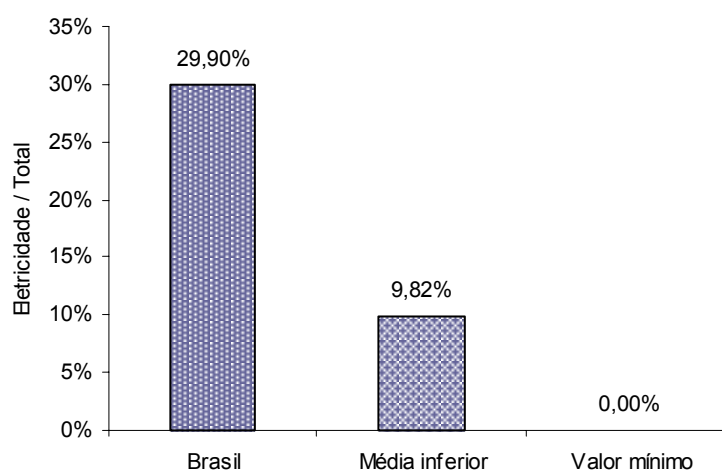
Apesar da eletricidade ter um consumo representativo no Setor de Mineração, o consumo de óleo combustível e carvões vegetal e metalúrgico também apresentam um consumo significativo, especialmente, nos processos de secagem e calcinação do mineral. Observa-se que o Brasil utiliza muita eletricidade neste setor, conforme a tabela 9.

Tabela 9 - Consumo de energia no Setor de Mineração, em 10³ tEP

Países	Eletricidade	Outros	Total	Percentuais Elétricos (C)
Brasil	0,58	1,36	1,93	29,90%
Japão	0,19	0,51	0,70	27,14%
Índia	0,10	0,81	0,91	10,56%
Chile	0,03	0,30	0,33	8,21%
México	0,05	1,53	1,58	3,16%
Reino Unido	.	0,35	0,35	0,00%

O menor percentual elétrico obtido foi o do Reino Unido (valor mínimo), que utiliza somente outras fontes de energia para abastecer os usos finais térmicos do Setor de Mineração. Desta forma, o Brasil tem como referência a média inferior ($\sigma = 10,54$), para uma estimativa moderada, e o percentual do Reino Unido, para uma estimativa agressiva (gráfico 16).

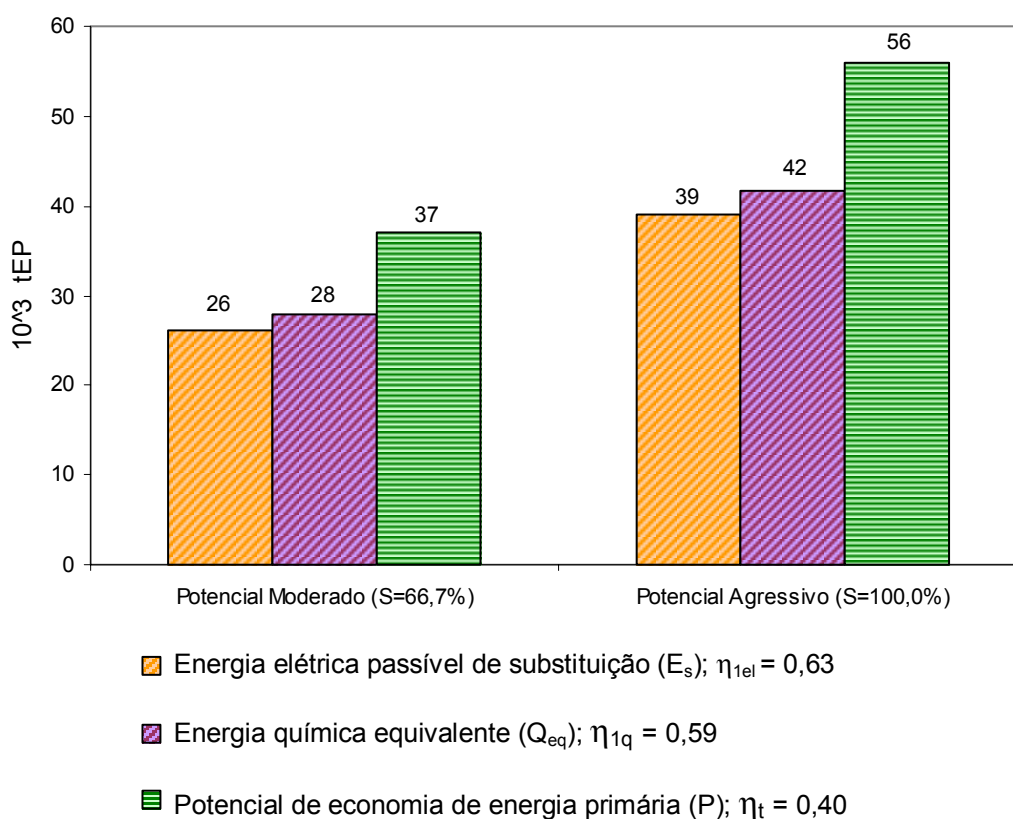
Gráfico 16. Setor de Mineração - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor



Em uma estimativa agressiva, o potencial de economia de energia primária possível de obtido supera inclusive o consumo total de eletricidade em usos finais térmicos deste setor, que é de 39 ktEP. Isso ocorre, devido ao percentual de substituição estimado, ser igual a 100%, gerando uma economia de energia primária

equivalente a 144% da eletricidade consumida (gráfico 17). Esse valor máximo expressa um potencial pouco realista, mas teoricamente possível de ser atingido. No entanto, até mesmo a estimativa moderada apresenta um elevado potencial de substituição, o que implicaria em uma economia de energia primária equivalente a 95% da quantidade de energia elétrica consumida em usos térmicos.

Gráfico 17. Setor de Mineração – Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária



5.1.6 SETOR DE ALIMENTOS E TABACO

O Setor de Alimento e Tabaco é um grande consumidor de energia em usos finais térmicos, em seus mais diversos segmentos, tais como: açúcar; biscoitos e bolachas; café; panificação; massas; farinhas; bebidas; e tabaco. Todos os segmentos apresentaram consumos elevados tanto em aquecimento direto, quanto em calor de processo.

O Brasil consome muito bagaço-de-cana em usos finais térmicos no segmento de açúcar, que é o principal de segmento deste setor, quanto ao consumo de energia. Devido a esse elevado consumo de biomassa, ou seja, de energia final química, a análise comparativa internacional tornou-se limitada, pois o Brasil situou-se como um país de referência. Somente o México apresentou um percentual de consumo de eletricidade menor do que o Brasil, o que mostra que a substituição de eletricidade por energia final química ainda é possível em alguns processos específicos do setor, mas pouco representativa em relação ao total de energia consumida nos processos de usos finais térmicos.

A indústria de biscoitos e bolachas utiliza muito forno do tipo túnel, a base de óleo combustível, gás, gás natural, GLP, lenha e eletricidade. A indústria de panificação, por sua vez, apresenta um grande consumo de eletricidade em fornos, seguido de lenha, GLP e gás. Já a indústria de massas e farinha, bem como, a indústria de tabaco, consome muita energia em processos de secagem. Já a indústria de bebidas possui uma larga utilização de processos de aquecimento direto, tais como em processos de esterilização de garrafas, secagem de matérias-primas e aceleração da fermentação.

De maneira geral, todos os segmentos apresentaram consumos elevados de energia não somente em aquecimento direto, mas também em calor de processo. Os processos de aquecimento direto, especialmente secagem e cozimento, possibilitam um uso bastante nobre para o gás natural, enquanto que o uso em calor de processo, como o aquecimento de caldeiras, pode ser otimizado através da cogeração.

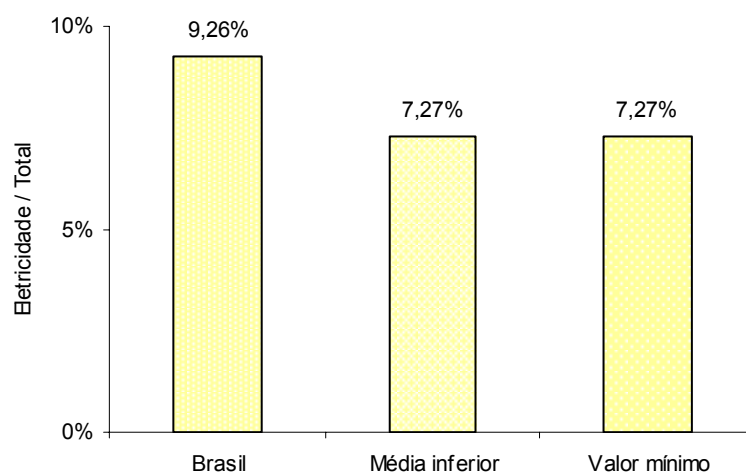
Na tabela 10, observa-se que o Brasil utiliza muita pouca eletricidade no Setor de Alimentos e Tabaco, perdendo somente para o México. O baixo consumo de eletricidade verificado neste setor para o Brasil ocorre basicamente devido ao elevado consumo de biomassa, principalmente bagaço-de-cana no segmento de açúcar.

Tabela 10 - Consumo de energia no Setor de Alimentos e Tabaco, em 10^3 tEP

Países	Eletricidade	Outros	Total	Percentuais Elétricos (C)
Brasil	1,32	12,98	14,30	9,26%
México	0,20	2,55	2,75	7,27%

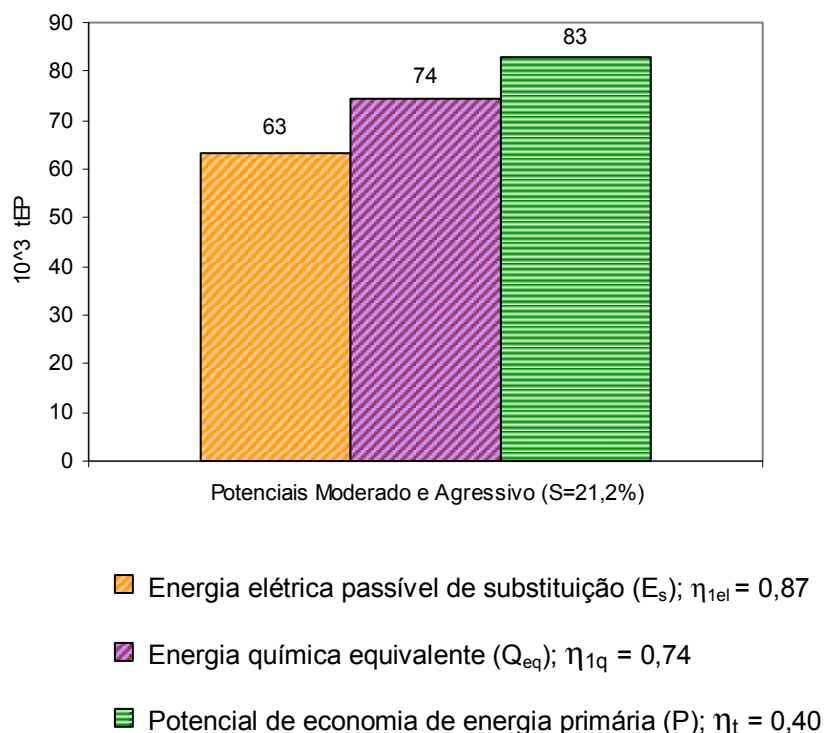
Desta forma, o valor de referência obtido, tanto para estimativa moderada, quanto para agressiva é o mesmo, pois somente o México pôde ser considerado na análise (gráfico 18).

Gráfico 18. Setor de Alimentos e Tabaco - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor



Sendo assim, o resultado encontrado teve sua precisão reduzida, ao ser considerado somente um país na análise. O gráfico 19 mostra qual seria o potencial de economia de energia primária possível de ser obtido, caso o Brasil igualasse o seu o percentual de consumo de eletricidade ao valor apresentado pelo México. Como o consumo total de eletricidade em usos finais térmicos do Brasil neste setor é de 298 ktEP, o potencial de economia possível de ser obtido implicaria em uma economia de energia primária equivalente a 28% desse consumo.

Gráfico 19. Setor de Alimentos e Tabaco – Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária



5.1.7 SETOR DE PAPEL, CELULOSE E IMPRESSÃO

O Brasil foi o país que apresentou menor percentual de participação da eletricidade em relação às outras fontes de energia, para usos finais térmicos. Sendo assim não foi possível de se mensurar um potencial de substituição de eletricidade por energia final química, uma vez que o Brasil é a própria referência. No entanto, certamente, assim como no Setor de Alimentos e Tabaco, existem processos térmicos específicos, onde a eletricidade pode ser substituída por energia química.

O Setor de Papel, Celulose e Impressão possui um elevado consumo de energia nas atividades de secagem, através do uso final calor de processo. A eletricidade é utilizada em processos de aquecimento por meio de resistência elétrica e de radiação infravermelha. Fornos de cal, a base de óleo combustível e

“licor negro”, também são utilizados para aquecimento direto. O licor negro é um líquido resultante do cozimento da polpa celulósica, que contém muitas substâncias valiosas (sulfetos, carbonatos, sulfato de sódio, cloreto de sódio, alumina, entre outras), em suspensão e em solução, que são recuperadas por meio de tratamento especial.

No caso do gás natural, observa-se um mercado importante para esta fonte como substituto do óleo combustível e da lenha. Dentre as tecnologias propícias ao gás, destacam-se os diversos tipos de caldeiras e as tecnologias de combustão submersa, os trocadores de calor submersos compactos, os tubos submersos compactos, os processos de secagem direta e os sistemas de cogeração.

5.1.8 SETOR TÊXTIL E COURO

O Setor Têxtil e Couro consome muita eletricidade em usos finais térmicos da energia, como a secagem. Normalmente, a secagem é realizada pela circulação de ar quente, proveniente de trocadores de calor. A eletricidade é utilizada em alguns processos de aquecimento direto por meio de resistência elétrica e radiação infravermelha, uma vez que outros combustíveis podem apresentar problemas de resíduos. Exceção pode ser feita para as fontes gasosas de energia, que possuem uma queima mais limpa, ideal para a chamuscagem, onde os fiapos do tecido são eliminados. A secagem é realizada após o tratamento dos fios e dos tecidos. Esse tratamento envolve muitos banhos e vários processos, tais como: tingimento, estampagem, amaciamento, engomagem e amaciamento.

Na fase de fabricação há um predomínio de processos mecânicos, onde a eletricidade é largamente utilizada. No entanto, na fase de tratamento, há um grande mercado para inserção do gás natural, uma vez que predominam os processos térmicos. Além disso, frente ao elevado consumo de vapor em algumas atividades a cogeração também poderia ser aplicada em determinados casos.

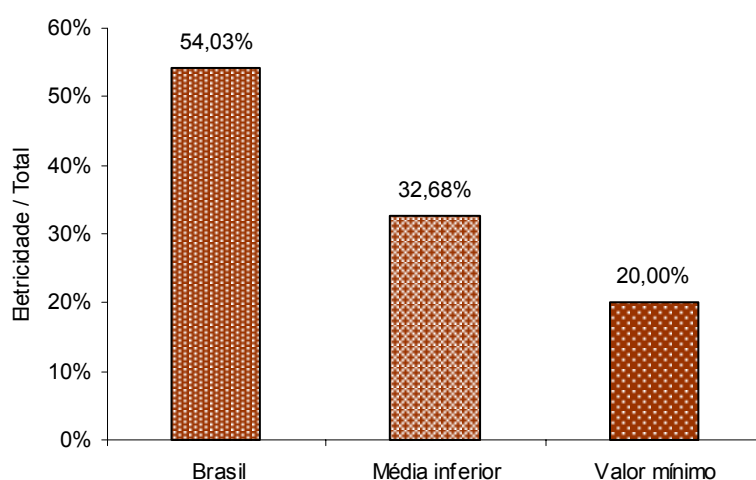
Muitos países apresentaram um percentual de consumo de eletricidade inferior ao do Brasil, o que mostra um amplo mercado a ser explorado pelas fontes químicas em substituição à eletricidade nos usos finais térmicos (tabela 11). A quantidade elevada de países aumenta a precisão da análise.

Tabela 11 - Consumo de energia no Setor Têxtil e Couro, em 10³ tEP

Países	Eletricidade	Outros	Total	Percentuais Elétricos (C)
Brasil	0,54	0,46	1,01	54,03%
Austrália	0,17	0,19	0,36	47,22%
EUA	3,52	5,07	8,59	40,98%
Grécia	0,08	0,12	0,20	40,00%
Suíça	0,05	0,08	0,13	38,46%
Alemanha	0,35	0,58	0,93	37,63%
Itália	0,94	1,64	2,58	36,43%
França	0,31	0,56	0,87	35,63%
Reino Unido	0,32	0,66	0,98	32,65%
Espanha	0,34	0,61	1,06	32,08%
Índia	1,74	3,69	5,43	32,02%
Holanda	0,05	0,13	0,18	27,78%
China	3,21	10,12	13,33	24,08%
Japão	0,70	2,25	2,95	23,73%
Rússia	0,36	1,32	1,68	21,45%
Áustria	0,04	0,16	0,20	20,00%

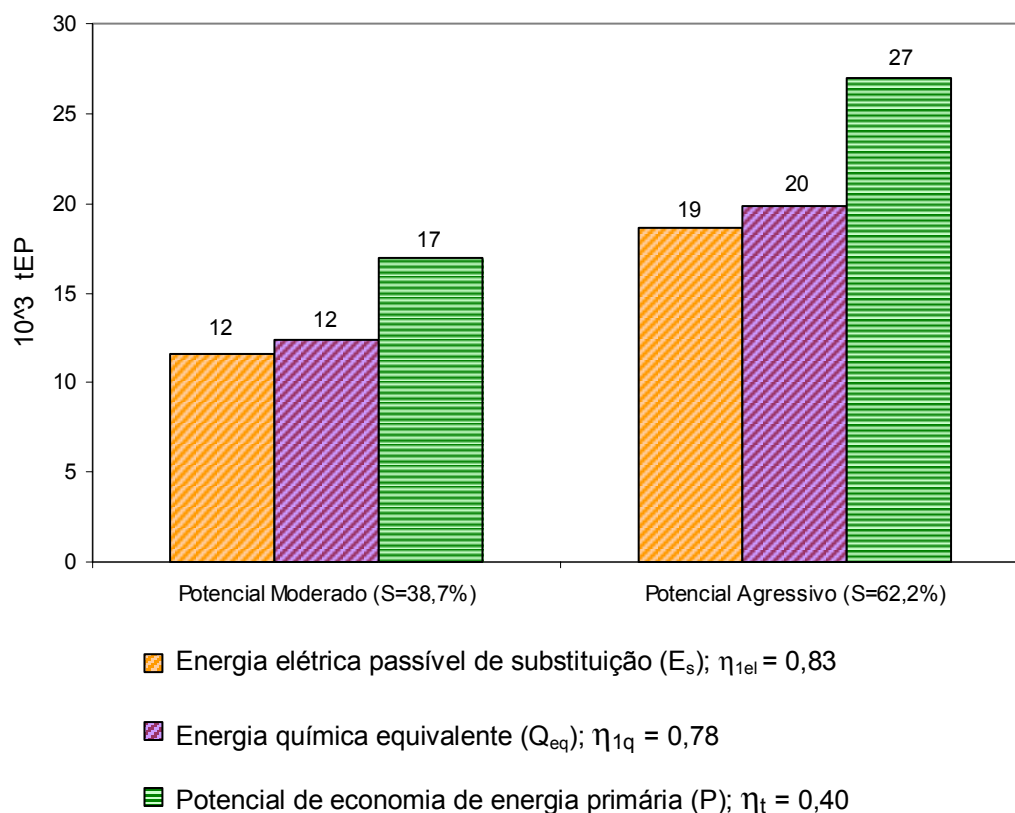
A menor participação da eletricidade ocorreu na Áustria (valor mínimo), seguida por países de consumo elevado de energia, como Rússia, Japão e China. O gráfico 20 apresenta a média inferior ($\sigma = 7,93$) e o valor mínimo, tidos como referência para o Brasil, no Setor Têxtil e Couro.

Gráfico 20. Setor Têxtil e Couro - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor



Desta forma, vários processos e equipamentos de usos finais térmicos poderiam ser substituídos neste setor, uma vez que muitos países apresentaram um “percentual elétrico” inferior ao do Brasil. O consumo total da energia elétrica em usos finais térmicos neste setor é de 30 ktEP. Portanto, a substituição da eletricidade por energia química, em usos finais térmicos deste setor, propiciaria uma economia de energia primária equivalente a 57% da quantidade de eletricidade substituída. Essa economia poderia chegar a até 90%, em uma estimativa agressiva.

Gráfico 21. Setor de Têxtil e Couro – Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária



5.2 SETOR RESIDENCIAL

O Setor Residencial apresenta um elevado consumo de energia em usos finais térmicos, como calor de processo e aquecimento direto. Observou-se um elevado consumo de energia elétrica, em ambos os casos de uso final. Em calor de processo, o chuveiro elétrico é o principal equipamento utilizado. Apesar de sua alta eficiência energética, o chuveiro elétrico é utilizado simultaneamente por diversos usuários no Brasil, o que implica em um consumo muito elevado em determinadas horas do dia, o chamado horário de ponta. Com isso, a capacidade instalada de geração de eletricidade precisa estar dimensionada para suprir essa demanda,

pressionando as empresas e em muitas vezes o próprio Estado a despendere recursos financeiros demasiados para tal finalidade.

Nos processos de cozimento há um elevado consumo de GLP, gás e eletricidade, através de equipamentos como o fogão e o microondas. Em algumas regiões do Brasil ainda pode-se encontrar a existência de fogões a lenha. Outros equipamentos voltados ao uso final térmico são: ferro de passar roupas; máquinas de lavagem e secagem; aquecedores de ambiente; secadores de cabelo; dentre outros.

No que se refere ao uso de bombas de calor, o uso térmico da eletricidade pode se mostrar bastante eficaz, conforme já fora mencionado no início deste capítulo. Atualmente a tecnologia tem sido empregada para vários fins, como o aquecimento de piscinas, conforto térmico, etc. Seu uso em consórcio com a energia solar também pode ser interessante em alguns casos. O mercado de bombas de calor no Brasil ainda permanece reduzido, mas apresenta um grande potencial de expansão para as próximas décadas.

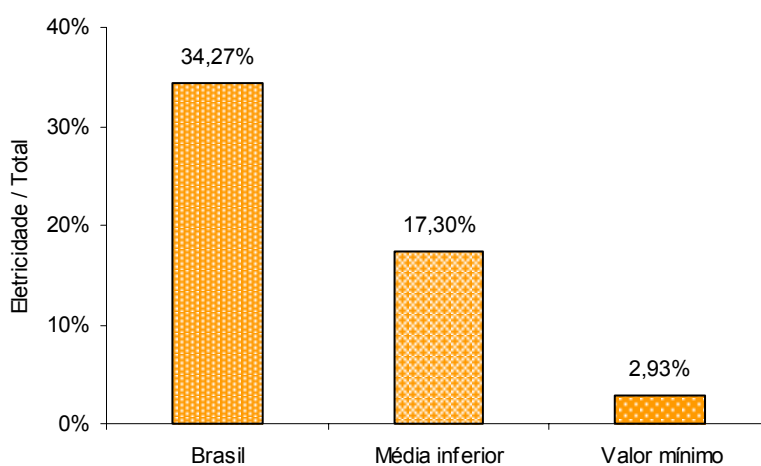
A análise feita para o setor residencial trata-se de um exercício, uma vez que as questões culturais e as variações climáticas limitam em muito a interpretação dos dados, embora casos extremos tenham sido excluídos, conforme já comentado na metodologia. A tabela 12 apresenta a lista de países analisados e seus respectivos percentuais elétricos.

Tabela 12 - Consumo de energia no Setor Residencial, em 10³ tEP

Países	Eletricidade	Outros	Total	Percentuais Elétricos (C)
Brasil	6,99	13,41	20,41	34,27%
Espanha	3,91	7,97	11,88	32,91%
Grécia	1,16	3,14	4,30	26,98%
África do Sul	2,54	9,11	11,65	21,79%
México	2,87	13,86	16,73	17,15%
Itália	5,22	30,28	35,50	14,70%
China	13,48	277,13	290,61	4,64%
Índia	5,87	194,91	200,78	2,93%

O país que menos utiliza a eletricidade dentre os demais citados foi a Índia (valor mínimo), seguida pela China, Itália, México e outros. O gráfico 22 apresenta a média inferior ($\sigma = 11,04$) e o valor mínimo obtidos para o Setor Residencial.

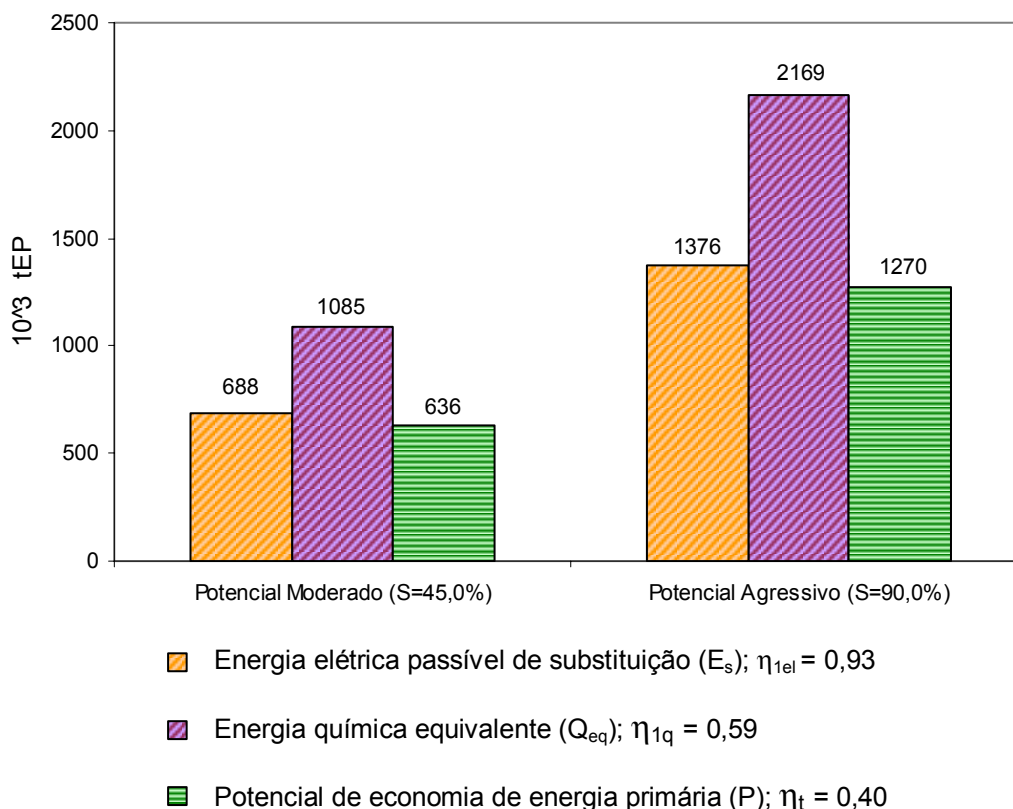
Gráfico 22. Setor Residencial - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor



O Setor Residencial apresentou tanto o maior consumo de eletricidade em usos finais térmicos, 1529 ktEP, como o maior potencial de economia de energia primária, excetuando-se o setor industrial total. Ao se referenciar na média inferior e no valor mínimo obtido, o Brasil poderia obter uma economia de energia primária

equivalente a 42%, para uma estimativa moderada, ou até a 83%, para uma estimativa agressiva, do consumo de eletricidade em usos finais térmicos deste setor (gráfico 23).

Gráfico 23. Setor Residencial – Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária



Possivelmente, o maior nicho a ser explorado está na substituição do chuveiro elétrico pelo sistema a gás. Outra forma de substituição é através do uso de coletores solar, que vem crescendo a cada ano. Porém, o chuveiro elétrico ainda é o principal equipamento utilizado para esse fim, tendo em vista seu baixo custo de investimento e instalação. No caso do coletor solar, como o sistema apresenta um funcionamento satisfatório em apenas 70% dos dias do ano, ou seja, no restante dos dias o coletor não tem a performance desejada, o gás poderia ser utilizado para

elevar a temperatura da água nesses períodos. O sistema "solar-gás" possui um grande potencial de inserção para as principais regiões país.

Sabe-se que o chuveiro elétrico é um dos maiores responsáveis pelo aumento da demanda de energia elétrica no horário de ponta, obrigando as empresas geradoras a realizar grandes investimentos na ampliação do parque gerador. Assim, parte desse problema poderia ser amenizada através da substituição do chuveiro elétrico por coletores solares, associados ao GN, GLP ou à própria eletricidade. Apesar dos custos dos equipamentos e da instalação ainda serem elevados e pouco competitivos, ao analisarmos o potencial de redução de gastos em potência instalada eles tornam-se muito vantajosos, especialmente, para as empresas geradoras. Além disso, ainda existem os ganhos ambientais, promovidos pela redução dos impactos na geração de energia elétrica.

Outra forma de reduzir a demanda em horário de ponta seria coibir ou desestimular a venda de chuveiros elétricos de potência muito elevada. Atualmente, pode-se encontrar facilmente no mercado chuveiros elétricos de alta potência, inclusive superiores a 8.000 W. Esses equipamentos causam um forte impacto sobre o aumento centralizado da demanda, ocasionando relevantes prejuízos às geradoras, ao meio ambiente e à sociedade como um todo.

5.3 SETOR COMERCIAL E SERVIÇOS PÚBLICOS

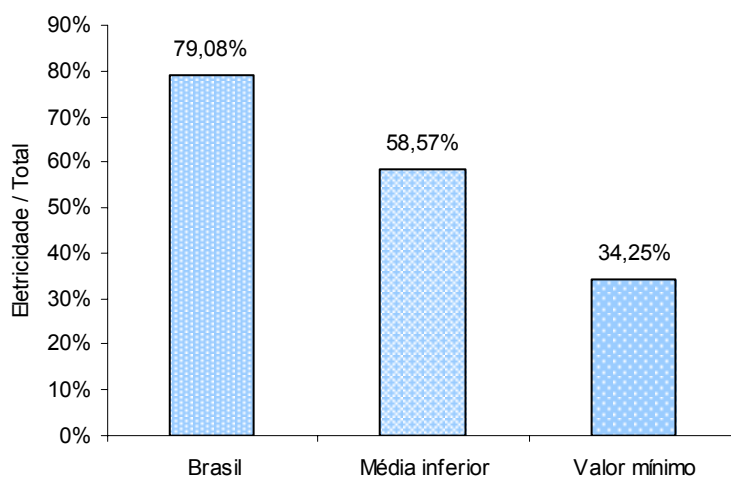
O Setor Comercial e Serviços Públicos apresenta um elevado consumo de eletricidade em relação às outras fontes de energia. O aquecimento resistivo é muito freqüente neste setor. A exemplo do Setor Residencial, o Setor Comercial e Serviços Públicos também apresenta limitações em sua análise, devido a complexidade das questões climáticas e comportamentais envolvidas na discussão. A tabela 13 apresenta os países que tiveram uma menor participação da eletricidade em relação ao Brasil.

Tabela 13 - Consumo de energia no Setor Comercial e Serviços Públicos, em 10³ tEP

Países	Eletricidade	Outros	Total	Percentuais Elétricos (C)
Brasil	6,13	1,62	7,75	79,08%
Venezuela	1,50	0,47	1,97	76,09%
África do Sul	1,53	0,53	2,06	74,21%
Austrália	3,47	1,43	4,90	70,82%
Espanha	3,87	2,04	5,91	65,48%
EUA	93,13	89,64	182,77	50,95%
México	1,41	2,28	3,69	38,21%
China	7,11	13,65	20,76	34,25%

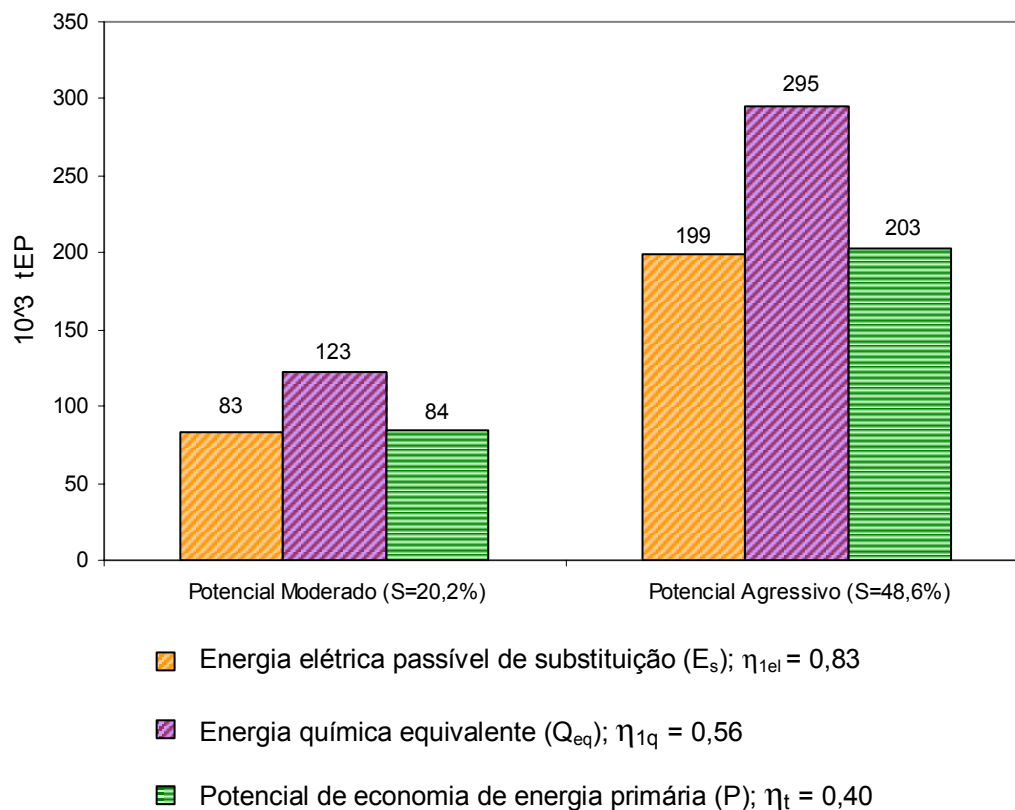
O país tido como referência máxima para o Brasil foi a China, considerada como valor mínimo de referência. No gráfico 24 são apresentados a média inferior ($\sigma = 17,38$) e o valor mínimo obtidos para o Setor Comercial e Serviços Públicos.

Gráfico 24. Setor Comercial e Serviços Públicos - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor



Conforme se pode observar no gráfico 25, há um vasto potencial de economia de energia primária possível de ser explorado no Setor Comercial e Serviços Públicos. O valor encontrado para o potencial de economia representa cerca de 20% (estimativa moderada) ou 50% (estimativa agressiva) do consumo total de eletricidade em usos finais térmicos deste setor, que é de 410 ktEP.

Gráfico 25. Setor Comercial e Serviços Públicos – Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária



5.4 SETOR DE AGRICULTURA

O principal consumo de energia em usos finais térmicos no Setor de Agricultura dá-se nos processos de secagem, onde uma ampla gama de equipamentos pode ser observada, tais como: forno tipo túnel, tambor rotativo e *spray dryers*. No caso da eletricidade, o uso mais freqüente é o aquecimento resistivo.

A comparação do Setor de Agricultura do Brasil com o de outros países apresenta limitação, pois a diversidade de culturas exploradas é distinta e os fatores climáticos interferem fortemente na análise, embora se tenha buscado considera na

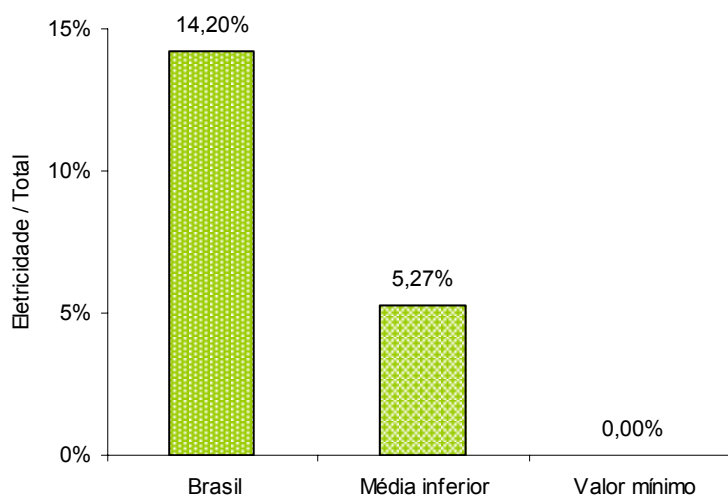
análise países com características minimamente próximas à realidade brasileira, no que se refere ao este setor (tabela 14).

Tabela 14 - Consumo de energia no Setor de Agricultura, em 10^3 tEP

Países	Eletricidade	Outros	Total	Percentuais Elétricos (C)
Brasil	1,07	6,44	7,50	14,20%
Itália	0,40	2,78	3,18	12,58%
Holanda	0,29	3,80	4,09	7,09%
França	0,22	2,95	3,17	6,94%
Japão	0,32	9,66	9,98	3,21%
Argentina	0,05	2,58	2,62	1,83%
EUA = valor mínimo	.	13,47	13,47	0,00%

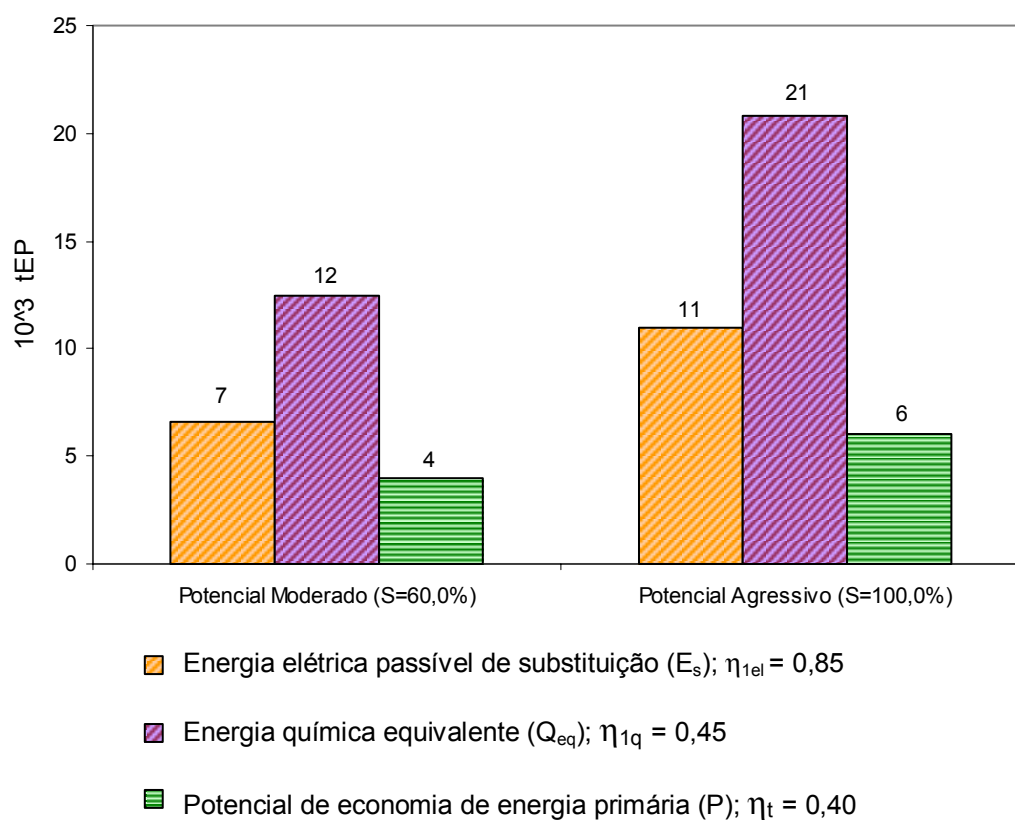
Os Estados Unidos foi o país que apresentou o menor percentual elétrico, dentre os demais analisados, seguido pela Argentina, Japão e outros. O valor mínimo e a média inferior estimada ($\sigma = 4,55$) estão representados no gráfico 26.

Gráfico 26. Setor de Agricultura - Participação da eletricidade em relação ao total de energia consumida no setor



O Brasil consome uma baixa quantidade de eletricidade em usos finais térmicos para este setor, 11 ktEP, o que implicou em um baixo potencial de economia de energia primária, conforme o gráfico 28. No entanto, percentualmente, o valor obtido equivale a uma economia de energia primária de 36% do consumo de eletricidade em usos finais térmicos, considerando uma estimativa moderada, ou de até 55%, para uma estimativa agressiva.

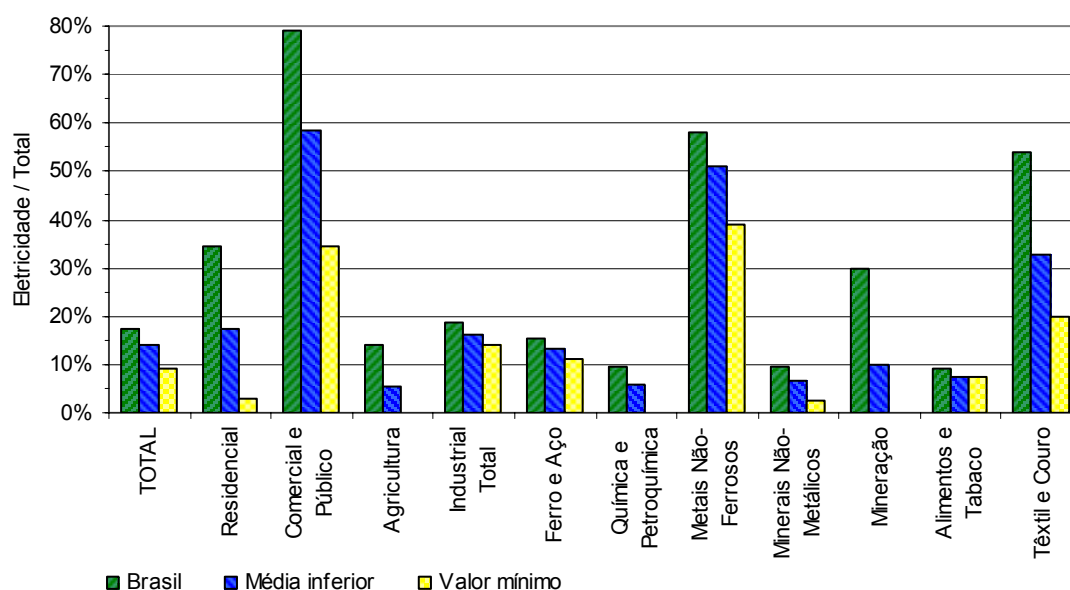
Gráfico 28. Setor de Agricultura – Substituição da eletricidade por energia química e o potencial de economia de energia primária



5.5 TOTAL DOS SETORES

Como resultado da análise internacional, constatou-se que a participação da eletricidade no Brasil, em relação ao seu consumo total, apresentou um comportamento próximo aos demais países do grupo elétrico, para a maioria dos setores de consumo. A disparidade entre os grupos ocorre, principalmente, devido ao uso da eletricidade ou da energia química, para fins térmicos. Desta forma, assumiu-se que a diferença encontrada entre o percentual elétrico (C) do Brasil e o de outros países, seja do grupo elétrico ou térmico, representa basicamente o potencial de inserção da energia química em substituição à eletricidade usada para produção de energia útil, na forma de calor. Dois potenciais foram estimados, o primeiro (potencial moderado) se refere à diferença entre o percentual elétrico nacional e o resultante da média dos países com percentual inferior ao do Brasil. O segundo (potencial agressivo) compara o Brasil com o país de menor percentual elétrico, para cada setor de consumo. Os resultados obtidos estão representados no gráfico 29.

Gráfico 29. Perspectivas de substituição da eletricidade por energia química



A média inferior e o valor mínimo representam valores de referência para o Brasil, que incorporam as dimensões tecnológica e econômica dos países considerados na análise de cada setor. Portanto, o máximo potencial teórico de substituição de eletricidade por uma fonte de origem química pode ser ainda maior do que os resultados obtidos através dos cenários de referência.

Com base no gráfico 29 e nos valores apresentados na análise de cada setor, temos a tabela 15, que apresenta um sumário dos principais resultados obtidos.

Tabela 15 - Sumário de Resultados

Valores em 10³ tEP/ano

Setores de consumo final	Consumo de eletricidade		Percentual de substituição (S)		η_i **		E_s		Q_{eq}		Potencial de economia de energia primária ($\eta_t = 40\%$)	
	Total *	Usos térmicos	Mod.	Agr.	el	q	Mod.	Agr.	Mod.	Agr.	Mod.	Agr.
Industrial (total)	11022	2606	17,9%	36,0%	0,62	0,64	431	788	433	785	643	1184
Ferro e aço	1536	1111	14,4%	27,9%	0,56	0,69	160	310	130	252	270	523
Metais não-ferrosos	2118	495	18,5%	31,6%	0,55	0,50	92	156	101	172	128	219
Minerais não-metálicos	557	56	31,0%	72,4%	0,60	0,53	17	41	20	46	24	55
Mineração	566	39	66,7%	100,0%	0,63	0,59	26	39	28	42	37	56
Química e petroquímica	1288	160	38,4%	100,0%	0,84	0,75	61	160	69	179	85	220
Alimentos e tabaco	1286	298	21,2%	21,2%	0,87	0,74	63	63	74	74	83	83
Têxtil e couro	518	30	38,7%	62,2%	0,83	0,78	12	19	12	20	17	27
Papel, celulose e imp.	943	53	0,0%	0,0%	0,94	0,88	0	0	0	0	0	0
Outros da indústria	2210	365	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Residencial	5902	1529	45,0%	90,0%	0,93	0,59	688	1376	1085	2169	636	1270
Comercial e serviços públicos	5837	410	20,2%	48,6%	0,83	0,56	83	199	123	295	84	203
Agricultura	1054	11	60,0%	100,0%	0,85	0,45	7	11	12	21	4	6
Energético	878	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Transportes	101	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
TOTAL	24794	4557	27,3%	55,8%	0,75	0,61	1209	2374	1653	3270	1367	2663

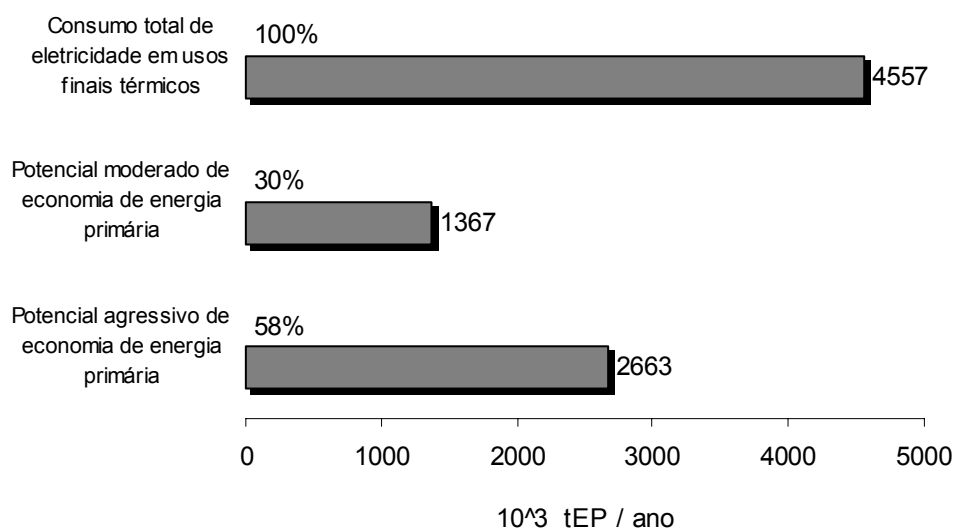
* Dados do MME (2002)

** Dados da FDTE (1996)

Conforme se pode observar, tanto o potencial agressivo de economia de energia primária, quanto o moderado, são extremamente significativos. O potencial agressivo representa 58% do consumo de eletricidade em usos finais térmicos e 11% do consumo total elétrico. Enquanto que, o potencial moderado, cerca de 30%

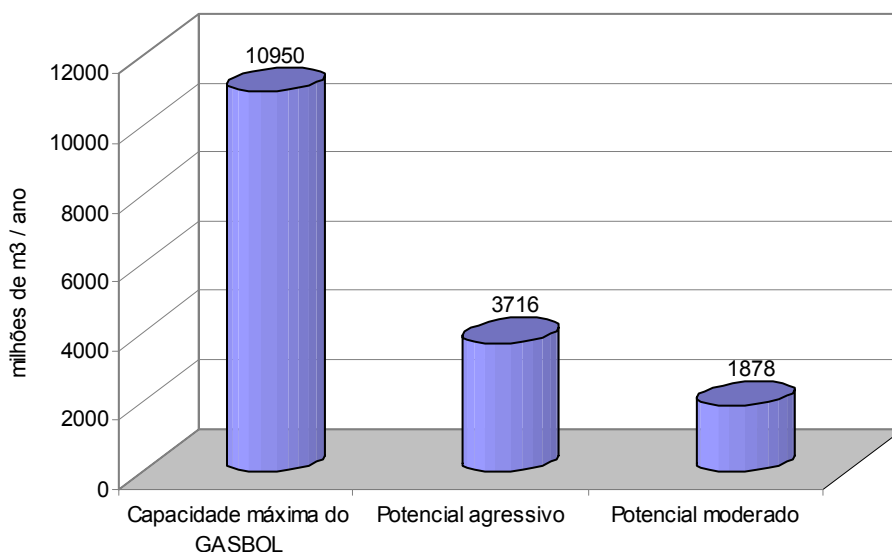
e 6%, respectivamente. O consumo total de eletricidade em usos finais térmicos equivale a 18% do consumo total elétrico, considerando-se todos os usos finais da eletricidade. O gráfico 30 mostra a relevância dos resultados obtidos.

Gráfico 30. Potencial de economia de energia primária possível de ser obtido pela substituição de eletricidade por gás natural em todos os usos finais térmicos da matriz energética nacional



Considerando-se o gás natural como insumo energético em Q_{eq} , observa-se que para uma estimativa moderada o gás apresenta um potencial de inserção de 1.653 ktEP/ano ou 1.878 milhões de m^3 /ano. Para uma estimativa agressiva, o valor obtido foi de 3.270 ktEP ou 3.716 milhões de m^3 /ano. A título de comparação, segundo Azevedo et al. (2002), a capacidade máxima do GASBOL é de 30 milhões de m^3 /dia ou 10.950 milhões de m^3 /ano (gráfico 31).

Gráfico 31. Estimativa para o mercado de gás natural, como substituto da eletricidade, em usos finais térmicos, em comparação à capacidade máxima do Gasoduto Bolívia-Brasil



Desta forma, os respectivos valores estimados para o mercado de gás natural correspondem a 17% (estimativa moderada) e 34% (estimativa agressiva) da capacidade máxima do GASBOL, o que é muito significativo. O valor real desse mercado irá depender da reposta econômica ao investimento para cada tecnologia, região e indústria específica. É preciso explorar em detalhe cada setor de consumo para se poder obter estimativas mais precisas. Contudo, os resultados encontrados possibilitam identificar os setores prioritários para o desenvolvimento de políticas específicas nesse sentido. No caso do gás natural, outro mercado importante de consumo diz respeito à substituição de óleo combustível e carvão mineral em usos finais térmicos e de gasolina e diesel no setor de transportes, além de seu uso para geração de energia elétrica.

O uso de cogeração e outras tecnologias, como a bomba de calor, também podem alterar alguns valores obtidos, mas sem afetar a ordem de grandeza dos resultados. Outra limitação que precisa ser destacada se refere ao nível tecnológico

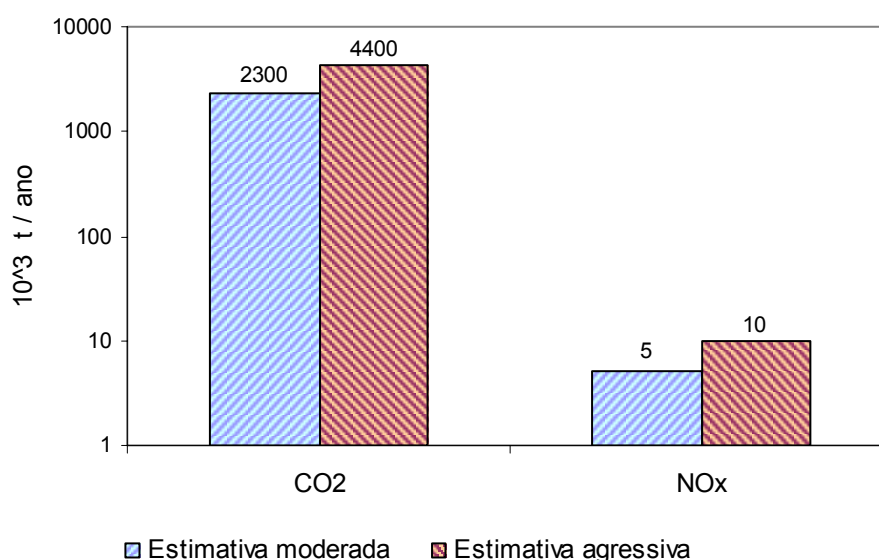
de cada país analisado. Essa variação pode ser reduzida, quando considerados países mais próximos tecnologicamente do Brasil, tais como: México, China, Índia, Argentina e outros. Também não foram consideradas as variações de ciclo hidrológico dos reservatórios das hidrelétricas, onde a geração termelétrica pode ser estratégica em alguns casos, por propiciar uma maior segurança ao sistema elétrico nacional.

No que se refere à questão ambiental, ambos os potenciais de economia de energia primária mostram a possibilidade de se obter uma expressiva redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2) e de óxidos de nitrogênio (NO_x) resultantes da queima do gás natural. As emissões de materiais particulados e de dióxido de enxofre (SO_2) são pouco relevantes no caso do gás natural e, portanto, não foram consideradas nesta análise.

Segundo La Rovere (1999), as emissões referentes a termelétricas a gás natural são da ordem de $449 \text{ tCO}_2/\text{GWh}$, valores próximos também foram obtidos pelo Centro de Análise e Monitoramento Ambiental do Gás Natural da Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul (GASLAB, 2004). Para uma estimativa moderada de substituição da eletricidade por gás natural, em usos finais térmicos, temos um potencial de economia de energia primária de 1367 ktEP/ano , cerca de 1553 milhões de m^3/ano , o que equivale a 15.891 GWh/ano (860 kcal/kWh). Considerando o seu uso para geração termelétrica, com rendimento térmico de 40% e fator de capacidade de 80%, tem-se 5085 GWh/ano . Portanto, aproximadamente 2,3 milhões de tCO_2/ano deixariam de ser emitidas para um cenário de uso difuso do gás natural como substituto da eletricidade, em usos finais térmicos, ao invés da geração de eletricidade. Para uma estimativa agressiva, a quantidade evitada seria de 4,4 milhões tCO_2/ano .

No caso das emissões de NO_x são emitidos na geração termelétrica a gás natural, em ciclo combinado, cerca de 1 tNO_x/GWh (GASLAB, 2004). Considerando um cenário moderado de substituição de eletricidade por gás natural, aproximadamente 5,1 mil tNO_x/ano seriam evitadas de serem lançadas na atmosfera. Da mesma forma, para um cenário agressivo, a emissão de 10 mil tNO_x/ano seriam evitadas. O gráfico 32 sumariza esses resultados.

Gráfico 32. Emissões de dióxido de oxigênio (CO_2) e de óxidos de nitrogênio (NO_x) possíveis de serem evitadas através da economia de energia primária



Obviamente, os dados de emissões apresentados são apenas um exercício para mostrar a ordem de grandeza dos resultados obtidos, uma vez que a quantidade de emissões difere para cada tipo de queima do gás natural. Também precisariam ser computadas as emissões fugitivas de cada caso.

6 CONCLUSÃO

A matriz energética nacional apresenta um elevado potencial de inserção de fontes de energia de origem química, em substituição à eletricidade destinada a usos finais térmicos. Por meio de análise comparativa entre o Brasil e diversos outros países do mundo foi possível estimar, para cada setor de consumo da matriz energética nacional, os respectivos percentuais de substituição de eletricidade por energia química. Com isso, pôde-se comprovar a hipótese inicial de que “o uso racional da energia, segundo sua qualidade exergética e finalidade de uso, pode reduzir significativamente o consumo de energia primária”.

Através da metodologia proposta nesta pesquisa, constatou-se que o Brasil apresenta várias distorções quanto ao uso do calor em sua matriz energética, pois segue as condicionantes de um modelo hídrico de geração de eletricidade, não atentando para as conseqüências de sua transição para um modelo misto. Os programas de eficiência energética estão focados somente sobre o uso final da energia, não observando a eficiência global dos processos de conversão, esse é o paradoxo levantado no início desta pesquisa. Observou-se na análise dos resultados que muitas vezes é mais oportuno substituir uma determinada fonte ou forma de energia do que somente aumentar a eficiência de determinados equipamentos.

No que se refere ao gás natural, o seu uso como substituto da eletricidade em processos de uso térmico se mostrou sensivelmente mais vantajoso do que para a geração de eletricidade. O consumo de gás natural no Brasil através da implantação de termelétricas deve ser mais bem avaliado, uma vez que seu uso difuso propicia um grande potencial de economia de energia primária e de redução

das emissões de dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio decorrentes de sua combustão.

Portanto, com a ampliação da geração térmica no país, surge um novo paradigma de planejamento energético, onde os programas de uso racional da energia devem analisar, além dos rendimentos de Primeira Lei da Termodinâmica, a qualidade exergética da energia, de acordo com seu uso final. Os tomadores de decisão e formuladores de políticas energéticas devem estar devidamente orientados e atentos sobre as possibilidades de economia de energia primária advindas do uso racional da energia térmica.

A metodologia proposta se mostrou apropriada e condizente com os objetivos do trabalho, podendo ser reaplicada tanto em outros países, quanto em análises regionais. Apesar das limitações encontradas na base de dados, os resultados obtidos contribuem para identificar os setores e mercados prioritários para o desenvolvimento de políticas públicas específicas. As estimativas realizadas mostram a possibilidade de se obter uma grande economia de energia primária e redução de impactos ambientais.

Novos trabalhos nesse sentido poderiam estar voltados ao desenvolvimento de análises setoriais, regionais ou econômicas, bem como, ao aprimoramento da base de dados. Espera-se que esta dissertação embase estudos futuros e contribua para a elaboração de um novo modelo de planejamento energético para o Brasil.

7 REFERÊNCIAS

- ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie. <http://www.ademe.fr>. France: ADEME, 2004.
- ALBUQUERQUE, I. F. M. *Entropia e a Quantização da Energia: Cálculo Termodinâmico de Planck*. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1988. 121p.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica et ANP – Agência Nacional do Petróleo. *Eficiência Energética: Integrando Usos e Reduzindo Desperdícios*. Brasília: ANEEL/ANP, 1999. 432p.
- AZEVEDO, L. F. A. et al. *Auditoria Técnica para Verificação da Capacidade de Transporte do Gasoduto Bolívia-Brasil, GASBOL: Sumário Executivo*. Rio de Janeiro: PUC-RJ, 2002. 13p.
- BELLOLI, M.; QUADROS, J.; GUIDI, A. *A História do Carvão de Santa Catarina: 1790-1950*. Vol. 1. Criciúma: Imprensa Oficial do Estado de Santa Catarina, 2002. 196p.
- BP - British Petroleum. *Statistical Report*. United Kingdom: BP, 2003.
- CALDEIRA, J. Mauá. *Empresário do Império*. São Paulo: Companhia das Letras, 1995. p. 289-290.
- CAPRA, F. *O Ponto de Mutação*. São Paulo: Editora Cultrix Ltda., 1982. 477p.
- CASTELLS, M. A. *Sociedade em Rede: A Era da Informação - Economia, Sociedade e Cultura*. Vol. I. 3 ed. São Paulo: Paz e Terra, 1999. 617p.
- CLIMATE CHANGE. <http://www.climatechange.gc.ca>. Canada: Government of Canada, 2004.
- COMGÁS. *Relatórios de Ação Comercial*. São Paulo: COMGÁS, 1993.
- COMISSÃO Nacional do Gás. *Comissão para Viabilização do Aproveitamento do Gás Natural: Relatório das Subcomissões de Oferta e Demanda*. Brasília: Ministério de Infra-Estrutura, 1992.
- CONPET - Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e do Gás Natural. <http://www.conpet.gov.br>. Petrobrás, 2004.
- DEFRA – Department for Environment Food and Rural Affairs. <http://www.defra.gov.uk>. UK: DEFRA, 2004.
- ECCJ – The Energy Conservation Center, Japan. <http://www.eccj.or.jp>. Japan: ECCJ, 2004.

EERE – Energy Efficiency and Renewable Energy. <http://www.eere.energy.gov>. USA: US Department of Energy, 2004.

FDTE - Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia. *Balanço de Energia Útil: Modelo de Avaliação do Potencial de Economia de Energia*. São Paulo: FDTE, 1996. 170p.

FELDMANN, F. *Rio+10 Brasil: Uma década de transformações*. Rio de Janeiro: MMA, ISER e FBMC, 2002. 177p.

FEYNMAN, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. *The Feynman Lectures on Physics: Mainly Mechanics, Radiation and Heat*. USA: Caltech/Bilingua, 1971.

FORSE, M. *L'Ordre Improbable: Entropie et Processus Sociaux*. Tesis de Doctorat d'Etat. France: Université Paris 5, 1987.

GASLAB - Centro de Análise e Monitoramento Ambiental do Gás Natural da Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul. <http://www.gaslab.uems.br>. UEMS, 2004.

GELLER, H. S. *Efficient Electricity Use: A Development Strategy for Brazil*. Washington D.C., USA: ACEEE, 1991. 164 p.

GOMES, I. C. Uma Análise do Mercado e do Preço Competitivo de Gás Natural em São Paulo. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1996. 217p.

GUNNEWIEK, L. H. & ROSEN, M. A. Relation Between the Exergy of Waste Emissions and Measures of Environmental Impact. *International Journal of Environment and Pollution*. Vol. 10, n. 2, p. 261-272, 1998.

GYFTOPOULOS, E. P. Entropies of Statistical Mechanics and Disorder Versus the Entropy of Thermodynamics and Order. *Journal of Energy Resources Technology*. Vol. 123, jun/2001, p. 110-118. New York, USA: The American Society of Mechanical Engineers.

HERTZ, N. *The Silent Takeover: Global Capitalism and the Death of Democracy*. UK: Arrow Books, 2002. 312p.

HOSOKAWA, R. T. et SILVA, J. C. G. L. da. A Ciência Florestal e a Humanidade. *Floresta*, v. 15, n. 1-2, p. 26-49. 1984.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <http://www.ibge.com.br>. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2003.

IDAE – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. <http://www.idae.es>. Espanha: IDAE, 2004.

IEA – International Energy Agency. *Energy Balances of Non-OECD Countries: 1998-1999*. Paris: IEA, 2001a.

Energy Balances of OECD Countries: 1998-1999. Paris: IEA, 2001b.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2001: IPCC Third Assessment Report*. CD-ROM. Genebra: WMO e UNEP, 2001.

JACOBI, P. R. *Ciência Ambiental: Os Desafios da Interdisciplinariedade*. 1º ed. São Paulo: Editora Annablume, 1999. 388p.

KOTAS, T. J. *The Exergy Methode of Thermal Plant Analysis*. London: Butterworths, 1985.

LA ROVERE, E. *Política Ambiental e Planejamento Energético*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1999.

MABOGUNJE, A. *State of the Earth: Contemporary Geographic Perspectives*. Vol. 2. 1 ed. Oxford, UK: Blackwell Publishers Ltd. and UNESCO, 1997. 428p.

MACOMBER, H. K. *The Basic Physics of Heat Pumps*. Waterloo Technical Society, June 2002.

MARTINS, A. R. S. Caldeiras e Fornos. In: ELETROBRAS et EFEI. *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*. 2º ed. Itajubá – MG: Editora da EFEI, 2001. p. 300-348.

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia et BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. *Efeito Estufa e a Convenção sobre Mudança do Clima*. Brasília – DF: MCT, 1999. 25p.

MENDES, A. C. T. Estudo dos Usos de Gás Natural no Estado de São Paulo, Considerando-se a Implantação do Gasoduto Brasil-Bolívia. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1996. 174 p.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. <http://www.mma.gov.br>. MMA, 2004.

MME - Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional 2002: Ano Base 2001*. Brasília: MME, dezembro de 2002. 183p.

<http://www.mme.gov.br>. MME, 2004.

MUYLAERT, M. S. (Coord.) et al. *Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta*. Rio de Janeiro: IVIG/COPPE/UFRJ, 2000. 247p.

NOGUEIRA, L. A. H. Energia: Conceitos e Fundamentos. In: ELETROBRAS et EFEI. *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*. 2º ed. Itajubá – MG: Editora da EFEI, 2001. p. 1-29.

- NYSTUEN, J. et DACEY, M. Um Interpretação de Regiões Nodais Segundo a Teoria dos Grafos. In : FAISSOL, S. (Org.). *Urbanização e Regionalização – Relações com o Desenvolvimento Econômico*. Rio de Janeiro: IBGE, 1975.
- OMM – Organização Meteorológica Mundial et PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. *A Ciência da Mudança do Clima: Sumário para Formuladores de Políticas e Sumário Técnico do Relatório do Grupo de Trabalho I*. Tradução de Alexandra de Ávila Ribeiro. Brasília: MCT, IPCC e PNUD, 2000. 56p.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. <http://www.ons.gov.br>. ONS, 2004.
- PATTERSON, G. M. What is Energy Efficiency? Concepts, Indicators and Methodological Issues. *Energy Policy*. Vol. 24. N. 5, p. 377-390. ELSEVIER, 1996.
- PETROBRÁS - Petróleo Brasileiro S.A. <http://www.petrobras.com.br>. Petrobrás, 2004.
- PICCININI, M. Conservação da Energia na Indústria: As Políticas Adotadas na Época da Crise Energética. *Revista do BNDES*. V. 1, n. 2, p. 153-183. Rio de Janeiro: BNDES, dezembro de 1994.
- PLE - Pipeline Engineering GmbH. *Feasibility Study Assessment of Market Potencial: Basic Study and Investment Estimate for Lateral Connection*. Germany: PLE, 1993.
- PROCEL – Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica. <http://www.procel.gov.br>. MME/Eletróbrás, 2004.
- PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. <http://www.proinfa.gov.br>. MME, 2004.
- RIFKIN, F. & HOWARD, T. *Entropía: Hacia el Mundo Invernadero*. Barcelona: Urano, 1990. 345 p.
- ROSEN, M. A. & DINCER, I. Exergy Analysis of Waste Emissions. *International Journal of Energy Research*. Vol 23, n. 13, p. 1153-1163. 1999.
- SANTOS, E. M. dos (Org.) et al. *Gás Natural: Estratégias para uma Energia Nova no Brasil*. São Paulo: Annablume, 2002.
- SANTOS, M. *Técnica, Espaço, Tempo: Globalização e Meio Técnico-Científico Informacional*. 3 ed. São Paulo: Editora Hucitec, 1997. 190p.
- SAUER, I. L. et al. *A Reconstituição do Setor Elétrico Brasileiro*. Campo Grande – MS: Ed. UFMS; São Paulo: Paz e Terra, 2003. 300p.

- SCHAEFFER, R. Generalization of the Concept of Exergy at a National Level: A tool for Energy Planning Using Brazil as a Case Study, tese de doutorado. Philadelphia: University of Pennsylvania, 1990.
- SECRETARIA de Energia do Estado de São Paulo. *Balanço Energético do Estado de São Paulo – 1995, ano base 1994*. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1995.
- SIMMONS, J. *Os Cem Maiores Cientistas da História: uma classificação dos cientistas mais influentes do passado e do presente*. Tradução de Antônio Canavarro Pereira. Rio de Janeiro: DIFEL, 2002. 584p.
- SOUZA, M. L. de. A Expulsão do Paraíso: o Paradigma da Complexidade e o Desenvolvimento Sócio-Espacial. In: CASTRO, I. E (Org.) et al. *Explorações Geográficas: Percursos no Fim de Século*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997. p. 43-87.
- SPG - Sociedade Privada do Gás. *Bolivia-Brazil integrated Gas Project: Prospects for the Participation of the Private Sector*. São Paulo: Technoplan & Jaako Poyry, 1993.
- STRAPASSON, A. B. et FAGÁ, M. T. W. "Usos Finais Térmicos da Energia: Elementos para um Novo Modelo de Eficiência Energética" in Anais do IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Itajubá – MG, 2004.
-
- "Impacto da qualidade exergética da energia final no consumo de energia primária: caso gás natural" in Anais do 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 2003.
- TAUK-TORNISIELO, S. M. (Org) et al. *Análise Ambiental: Uma Visão Multidisciplinar*. 2º ed. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1995. 206p.
- TELLES, L. H. E. Impactos da Conversão de Indústrias ao Gás Natural na Região Metropolitana de São Paulo. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1997. 51p.
- UNFCCC – United Nations Framework Convention of Climate Change. *The Kyoto Protocol to the Convention on Climate Change*. Bonn – Germany: Climate Change Secretariat, 1997. 34p.
- VAN WYLEN, G. J. et al. *Fundamentos da Termodinâmica*. Tradução de Euryale de Jesus Zerbini. 5º ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1998. 537p.
- VIEIRA, S. Estudo de configurações de sistemas térmicos de geração de energia elétrica através da análise de exergia e de termoeconomia. Dissertação de mestrado. São Paulo: USP/IEE, 1997. 191p.
- WALL, G. Exergy Conversion in the Japanese Society. *Energy*. Vol. 15. N. 5. p. 435-444. Great Britains: Pergamon Press, 1990.

- WARREN, A. Energy Efficiency and Conservation. In: HESTER, R. E. et HARRISON, R. M. *Issues in Environmental Science and Technology: Environmental Impact of Power Generation*. Vol. 11. Cambridge - UK: The Royal Society of Chemistry, 1999. p. 113-129.
- YAMACHITA, R. A. et HADDAD, J. Iluminação. In: ELETROBRAS et EFEI. *Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*. 2º ed. Itajubá – MG: Editora da EFEI, 2001. p. 167-212.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Planilhas de cálculo utilizadas na metodologia

Valores em 10³ tEP

Parte IV	Geração total de eletricidade (TWh)	Tipo de geração			TOTAL		
		Hid + Nuc + Import.	Térmica	Outros	Eletricidade	Total	E / T
Noruega	11,03	99%	1%	9,30	11,03	20,33	45,75%
Suíça	7,76	97%	3%	4,48	16,93	21,41	20,92%
Suécia	14,08	94%	6%	10,77	24,65	35,42	30,41%
Brasil	32,01	90%	10%	26,20	126,20	152,20	17,21%
França	45,14	90%	10%	32,22	137,52	169,74	18,98%
Venezuela	6,93	75%	25%	5,08	29,70	34,78	14,61%
Austria	6,08	74%	26%	4,30	19,90	24,20	17,77%
Canadá	51,00	73%	27%	40,02	146,11	186,13	21,50%
Bélgica	7,95	63%	37%	6,41	34,85	41,26	15,54%
Finlândia	6,95	58%	42%	6,38	18,84	25,22	25,30%
Hungria	3,48	44%	56%	2,49	14,60	17,09	14,57%
Espanha	18,77	43%	57%	15,24	67,94	83,18	18,32%
Argentina	7,50	40%	60%	6,10	37,91	44,00	13,85%
Alemanha	50,90	39%	61%	40,17	199,57	239,74	16,76%
Japão	90,90	38%	62%	81,06	259,74	341,99	23,70%
Chile	3,30	37%	63%	2,98	14,57	17,55	16,99%
Rússia	73,42	35%	65%	50,97	359,40	410,37	12,42%
Reino Unido	32,55	31%	69%	27,55	132,24	159,79	17,24%
Itália	25,96	29%	71%	22,48	109,30	131,78	17,06%
EUA	339,99	28%	72%	287,00	1188,50	1475,50	19,45%
México	16,59	26%	74%	13,04	80,95	93,99	13,87%
Holanda	9,39	24%	76%	8,15	49,74	57,89	14,08%
Índia	45,47	18%	82%	32,53	328,37	360,90	9,01%
China	109,99	18%	82%	84,69	682,82	767,51	11,03%
Grécia	4,41	12%	88%	3,49	15,50	18,99	18,38%
Dinamarca	3,79	12%	88%	2,76	12,88	15,64	17,65%
África do Sul	18,00	10%	90%	13,67	42,01	55,69	24,55%
Austrália	17,46	8%	92%	14,49	55,38	69,87	20,74%

Base de dados: IEA (2001a; 2001b)

Valores em 10³ tEP

Parte II/V	Residencial			Comercial e Público			Agricultura			Transportes Total						
	Eleticidade	Outros	Total	E / T	Eleticidade	Outros	Total	E / T	Eleticidade	Outros	Total	E / T				
Noruega	2,89	0,91	3,80	76,05%	1,89	0,42	2,31	81,82%	0,19	0,64	0,83	22,89%	0,16	4,96	5,12	3,13%
Suíça	1,34	4,54	5,88	22,79%	1,30	2,10	3,40	38,24%	0,08	0,17	0,25	32,00%	0,22	6,69	6,91	3,18%
Suécia	3,60	4,39	7,99	45,06%	2,23	2,64	4,87	45,79%	0,12	0,38	0,50	24,00%	0,24	7,91	8,15	2,94%
Brasil	6,99	13,41	20,41	34,27%	6,13	1,62	7,75	79,08%	1,07	6,44	7,50	14,20%	0,10	48,01	48,11	0,21%
França	10,92	28,84	39,76	27,46%	8,38	14,04	22,42	37,38%	0,22	2,95	3,17	6,94%	0,97	50,82	51,79	1,87%
Venezuela	1,30	2,29	3,59	36,33%	1,50	0,47	1,97	76,09%		0,17	0,17	0,00%	0,01	11,67	11,68	0,12%
Áustria	1,11	5,00	6,11	18,17%	0,60	2,05	2,65	22,64%	0,13	0,68	0,81	16,05%	0,19	6,34	6,53	2,91%
Canadá	11,37	18,15	29,52	38,52%	10,51	14,43	24,94	42,14%	0,84	3,35	4,19	20,05%	0,43	53,66	54,09	0,79%
Bélgica	2,02	7,56	9,58	21,09%	1,01	2,71	3,72	27,15%	0,02	0,87	0,89	0,00%	0,12	9,71	9,83	1,22%
Finlândia	1,59	3,60	5,19	30,64%	1,11	0,39	1,50	74,00%	0,07	0,66	0,73	9,59%	0,04	4,51	4,55	0,88%
Hungria	0,85	4,54	5,39	15,77%	0,69	2,11	2,80	24,64%	0,09	0,64	0,73	12,33%	0,09	3,24	3,33	2,70%
Espanha	3,91	7,97	11,88	32,91%	3,87	2,04	5,91	65,48%	0,39	1,84	2,23	17,49%	0,31	32,34	32,65	0,95%
Argentina	1,77	7,48	9,25	19,13%	1,42	1,72	3,14	45,26%	0,05	2,58	2,62	1,83%	0,04	14,11	14,15	0,30%
Alemanha	11,29	52,22	63,51	17,78%	9,16	14,41	23,57	38,86%	0,64	2,06	2,70	23,70%	1,36	66,93	68,29	1,99%
Japão	22,27	27,36	49,63	44,87%	21,26	22,57	43,83	48,51%	0,32	9,66	9,98	3,21%	1,88	91,76	93,64	2,01%
Chile	0,51	4,07	4,58	11,23%	0,35	0,22	0,57	61,93%	0,01	0,15	0,16	8,18%	0,02	5,91	5,93	0,29%
Rússia	12,05	123,85	135,90	8,87%	5,29	20,68	25,98	20,38%	2,95	11,57	14,52	20,32%	5,21	77,20	82,41	6,33%
Reino Unido	9,50	32,92	42,42	22,40%	7,67	9,07	16,74	45,82%	0,33	0,91	1,24	26,61%	0,73	50,84	51,57	1,42%
Itália	5,22	30,28	35,50	14,70%	4,64	0,00	4,64	100,00%	0,40	2,78	3,18	12,58%	0,71	41,69	42,40	1,67%
EUA	98,53	155,68	254,21	38,76%	93,13	89,64	182,77	50,95%		13,47	13,47	0,00%	0,36	600,92	601,28	0,06%
México	2,87	13,86	16,73	17,15%	1,41	2,28	3,69	38,21%	0,69	1,93	2,62	26,34%	0,09	36,26	36,35	0,25%
Holanda	1,84	8,48	10,32	17,83%	2,44	2,00	4,44	54,95%	0,29	3,80	4,09	7,09%	0,14	13,98	14,12	0,99%
Índia	5,87	194,91	200,78	2,93%	2,74	0,00	2,74	100,00%	8,88	0,86	9,74	91,17%	0,68	43,80	44,48	1,52%
China	13,48	277,13	290,61	4,64%	7,11	13,65	20,76	34,25%	5,80	24,85	30,65	18,92%	1,07	75,89	76,96	1,39%
Grécia	1,16	3,14	4,30	26,98%	0,99	0,25	1,24	79,84%	0,22	0,86	1,08	20,37%	0,02	7,60	7,62	0,26%
Dinamarca	0,88	3,48	4,36	20,18%	0,83	1,02	1,85	44,86%	0,17	0,94	1,11	15,32%	0,03	4,98	5,01	0,60%
África do Sul	2,54	9,11	11,65	21,79%	1,53	0,53	2,06	74,21%	0,50	1,23	1,72	28,76%	0,38	13,20	13,58	2,79%
Austrália	4,07	4,76	8,83	46,09%	3,47	1,43	4,90	70,82%	0,24	1,36	1,60	15,00%	0,20	27,16	27,36	0,73%

Base de dados: IEA (2001a; 2001b)

Valores em 10³ IEP

Parte III/IV	Industrial Total			Ferro e Aço			Química e Petroquímica			Metais Não-Ferrosos						
	Eletricidade	Outros	Total	E / T	Eletricidade	Outros	Total	E / T	Eletricidade	Outros	Total	E / T				
Noruega	4,17	3,32	7,49	55,67%	0,67	0,61	1,28	52,34%	0,60	1,15	1,75	34,29%	1,63	0,07	1,70	95,88%
Suíça	1,47	2,77	4,24	34,67%	0,08	0,07	0,15	53,33%	0,21	0,48	0,69	30,43%	0,11	0,04	0,15	73,33%
Suécia	4,60	8,13	12,73	36,14%	0,43	0,65	1,08	39,81%	0,52	0,97	1,49	34,90%	0,23	0,07	0,30	76,67%
Brasil	11,91	52,41	64,32	18,51%	1,67	9,28	10,95	15,28%	1,40	13,59	14,99	9,36%	2,43	1,77	4,20	57,93%
França	11,42	35,17	46,59	24,51%	1,32	3,78	5,10	25,88%	2,16	15,17	17,33	12,46%	0,81	0,66	1,47	55,10%
Venezuela	2,27	13,43	15,70	14,45%	0,48	2,54	3,02	15,95%	0,19	4,94	5,13	3,69%	0,85	0,62	1,47	57,82%
Áustria	1,43	4,58	6,01	23,79%	0,19	1,15	1,34	14,18%	0,18	0,64	0,82	21,95%	0,03	0,08	0,11	27,27%
Canadá	16,86	49,76	66,62	25,31%	0,89	3,87	4,76	18,70%	1,64	17,47	19,11	8,58%	4,35	1,18	5,53	78,66%
Bélgica	3,21	12,68	15,89	20,20%	0,53	2,66	3,19	16,61%	1,10	6,03	7,13	15,43%	0,16	0,15	0,31	51,61%
Finlândia	3,57	8,26	11,83	30,18%	0,22	0,98	1,20	18,33%	0,38	1,16	1,54	24,68%	0,17	0,04	0,21	80,95%
Hungria	0,72	3,45	4,17	17,27%	0,05	0,52	0,57	8,77%	0,25	1,46	1,71	14,62%	0,07	0,15	0,22	31,82%
Espanha	6,56	19,76	26,32	24,92%	1,14	1,94	3,08	37,01%	0,92	7,23	8,15	11,29%	0,77	0,32	1,09	70,64%
Argentina	2,81	11,18	13,99	20,10%		0,15	0,15	0,00%		1,97	1,97	0,00%				
Alemanha	17,71	52,28	69,99	25,30%	1,90	7,53	9,43	20,15%	4,40	24,22	28,62	15,37%	1,56	1,07	2,63	59,32%
Japão	35,31	99,54	134,85	26,18%	6,79	15,39	22,18	30,61%	5,63	39,66	45,29	12,43%	1,66	1,71	3,37	49,26%
Chile	2,09	4,23	6,32	33,05%	0,03	0,31	0,34	8,24%	0,05	0,07	0,12	41,74%	0,94	0,48	1,42	66,48%
Rússia	25,46	112,78	138,24	18,42%	5,03	25,75	30,78	16,34%	3,55	35,24	38,80	9,16%	8,18	9,33	17,51	46,73%
Reino Unido	9,33	32,36	41,69	22,38%	0,85	3,10	3,95	21,52%	1,71	13,13	14,84	11,52%	0,51	0,71	1,22	41,80%
Itália	11,51	30,24	41,75	27,57%	1,58	3,13	4,71	33,55%	1,79	9,44	11,23	15,94%	0,45	0,50	0,95	47,37%
EUA	94,98	262,87	357,85	26,54%	6,12	19,93	26,05	23,49%	20,59	131,78	152,37	13,51%	7,10	7,77	14,87	47,75%
México	7,55	25,90	33,45	22,57%	0,82	4,82	5,64	14,54%	0,72	10,67	11,39	6,32%	0,03	0,09	0,12	25,00%
Holanda	3,44	15,68	19,12	17,99%	0,19	1,52	1,71	11,11%	1,02	10,30	11,32	9,01%	0,49	0,08	0,57	85,96%
Índia	13,86	84,00	97,86	14,16%	2,52	12,47	14,99	16,80%	3,13	24,82	27,94	11,19%	2,27	0,16	2,43	93,53%
China	52,13	264,55	316,68	16,46%	8,64	59,21	67,85	12,73%	11,13	71,37	82,50	13,49%	5,23	7,95	13,18	39,68%
Grécia	1,11	3,20	4,31	25,75%	0,07	0,10	0,17	41,18%	0,11	0,33	0,44	25,00%	0,30	0,40	0,70	42,86%
Dinamarca	0,85	2,00	2,85	29,82%	0,05	0,05	0,10	50,00%	0,10	0,15	0,25	40,00%	0,01	0,00	0,01	100,00%
África do Sul	8,57	17,18	25,75	33,29%	1,68	4,03	5,71	29,41%	0,22	6,08	6,30	3,42%	1,28	0,04	1,32	96,90%
Austrália	6,50	17,64	24,14	26,93%	0,51	1,88	2,39	21,34%	0,39	2,35	2,74	14,23%	2,99	4,70	7,69	38,88%

Base de dados: IEA (2001a; 2001b)

Valores em 10³ tEP

Parte IV/V	Minerais Não-Metálicos			Equipamentos de Transporte			Maquinaria			Mineração			Alimentos e Tabaco								
	Eletricidade	Outros	Total	E / T	Eletricidade	Outros	Total	E / T	Eletricidade	Outros	Total	E / T	Eletricidade	Outros	Total	E / T					
Noruega	0,07	0,28	0,35	20,00%	0,07	0,02	0,09	78%	0,10	0,04	0,14	71%	0,04	0,01	0,05	80,00%	0,23	0,16	0,39	58,97%	
Suíça	0,07	0,36	0,43	16,28%					0,26	0,19	0,45	58%					0,15	0,27	0,42	35,71%	
Suécia	0,10	0,34	0,44	22,73%	0,20	0,08	0,28	71%	0,17	0,12	0,29	59%	0,19	0,11	0,30	63,33%	0,22	0,31	0,53	41,51%	
Brasil	0,62	5,76	6,38	9,73%													1,32	12,98	14,30	9,26%	
França	0,83	3,35	4,18	19,86%	0,74	0,12	0,86	86%	1,43	1,92	3,35	43%	0,07	0,14	0,21	33,33%	1,48	2,98	4,46	33,18%	
Venezuela	0,03	1,17	1,20	2,66%															0,33	0,33	0,00%
Áustria	0,11	0,52	0,63	17,46%	0,05	0,07	0,12	42%	0,17	0,21	0,38	45%	0,03	0,09	0,12	25,00%	0,10	0,31	0,41	24,39%	
Canadá	0,17	1,24	1,41	12,06%																	
Bélgica	0,21	0,91	1,12	18,75%	0,09	0,10	0,19	47%	0,17	0,09	0,26	65%	0,03	0,00	0,03	100,00%	0,32	0,37	0,69	46,38%	
Finlândia	0,07	0,43	0,50	14,00%		0,03	0,03	0%	0,22	0,06	0,28	79%	0,05	0,04	0,09	55,56%	0,13	0,30	0,43	30,23%	
Hungria	0,08	0,49	0,57	14,04%	0,02	0,06	0,08	25%	0,05	0,14	0,19	26%	0,00	0,01	0,01	0,00%	0,09	0,39	0,48	18,75%	
Espanha	0,76	4,45	5,21	14,59%	0,28	0,48	0,76	37%	0,46	0,47	0,93	49%	0,13	0,21	0,34	38,24%	0,66	1,35	2,01	32,84%	
Argentina																					
Alemanha	1,28	6,03	7,31	17,51%	1,56	1,36	2,92	53%	0,84	2,34	3,18	26%	0,18	0,31	0,49	36,73%	1,21	3,22	4,43	27,31%	
Japão	1,85	8,49	10,34	17,89%	2,55	0,00	2,55	100%	4,51	2,89	7,40	61%	0,19	0,51	0,70	27,14%	2,35	2,92	5,27	44,59%	
Chile	0,04	0,23	0,26	13,31%														0,01	0,13	0,13	6,02%
Rússia	0,93	7,67	8,59	10,78%														0,89	8,15	9,04	9,87%
Reino Unido	0,62	1,90	2,52	24,60%		1,05	1,05	0%	1,76	1,06	2,82	62%						1,03	2,74	3,77	27,32%
Itália	1,12	6,83	7,95	14,09%	0,39	0,00	0,39	100%	1,65	2,78	4,43	37%	0,08	0,08	0,16	50,00%	0,96	2,65	3,61	26,59%	
EUA	3,41	16,90	20,31	16,79%	3,54	5,28	8,82	40%	10,43	11,70	22,13	47%	3,31	0,07	3,38	97,93%	6,26	19,55	25,81	24,25%	
México	0,45	2,90	3,35	13,43%	0,11	0,08	0,19	0%		0,04	0,04	0%	0,05	1,53	1,58	3,16%	0,20	2,55	2,75	7,27%	
Holanda	0,13	0,70	0,83	15,66%	0,05	0,08	0,13	38%	0,37	0,49	0,86	43%	0,02	0,10	0,12	16,67%	0,55	1,45	2,00	27,50%	
Índia	1,49	8,30	9,79	15,20%	0,52	0,00	0,52	100%		0,69	0,69	0%	0,10	0,81	0,91	10,56%	0,47	0,99	1,45	32,05%	
China	5,68	57,98	63,66	8,92%	1,47	3,89	5,36	27%	4,84	12,84	17,68	27%	1,75	3,16	4,91	35,64%	2,86	14,36	17,22	16,61%	
Grécia	0,17	1,00	1,17	14,53%	0,01	0,03	0,04	25%	0,05	0,01	0,06	83%	0,02	0,11	0,13	15,38%	0,10	0,48	0,58	17,24%	
Dinamarca	0,07	0,42	0,49	14,29%	0,03	0,03	0,06	50%	0,14	0,20	0,34	41%	0,01	0,07	0,08	12,50%	0,20	0,56	0,76	26,32%	
África do Sul	0,10	1,04	1,13	8,47%	0,00	0,01	0,01	11%	0,00	0,03	0,03	12%	2,48	0,98	3,46	71,74%	0,05	0,06	0,11	47,62%	
Austrália	0,29	1,77	2,06	14,08%	0,26	0,19	0,45	58%	0,15	0,19	0,34	44%	0,76	1,29	2,05	37,07%	0,47	2,74	3,21	14,64%	

Base de dados: IEA (2001a; 2001b)

Valores em 10³ tEP

Parte V/V	Papel, Celulose e Impressão			Madeira e Subprodutos			Construção			Têxtil e Couro			Outros da Indústria								
	Eletricidade	Outros	Total	E / T	Eletricidade	Outros	Total	E / T	Eletricidade	Outros	Total	E / T	Eletricidade	Outros	Total	E / T					
Noruega	0,59	0,72	1,31	45,04%	0,07	0,19	0,26	27%	0,06	0,04	0,10	60%	0,02	0,01	0,03	66,67%	0,02	0,02	0,04	50,00%	
Suíça	0,21	0,44	0,65	32,31%					0,07	0,27	0,34	21%	0,05	0,08	0,13	38,46%	0,26	0,57	0,83	31,33%	
Suécia	1,89	4,05	5,94	31,82%	0,23	0,88	1,11	21%	0,06	0,00	0,06	100%	0,03	0,04	0,07	42,86%	0,33	0,51	0,84	39,29%	
Brasil	0,98	4,99	5,96	16,40%										0,54	0,46	1,01	54,03%	2,35	2,23	4,59	51,31%
França	1,02	2,74	3,76	27,13%	0,47	0,91	1,38	34%	0,13	0,97	1,10	12%	0,31	0,56	0,87	35,63%	0,65	1,87	2,52	25,79%	
Venezuela																		0,72	3,84	4,56	15,79%
Áustria	0,37	0,89	1,26	29,37%	0,06	0,15	0,21	29%	0,01	0,14	0,15	7%	0,04	0,16	0,20	20,00%	0,09	0,17	0,26	34,62%	
Canadá	5,14	13,00	18,14	28,34%		0,25	0,34	0%		0,81	1,13	0%						1,89	7,86	9,75	19,38%
Bélgica	0,21	0,16	0,37	56,76%	0,05	0,00	0,05	100%	0,02	0,12	0,14	14%	0,16	0,09	0,25	64,00%	0,16	2,00	2,16	7,41%	
Finlândia	2,12	3,15	5,27	40,23%	0,13	0,51	0,64	20%	0,02	0,12	0,14	14%	0,02	0,04	0,06	33,33%	0,04	1,40	1,44	2,78%	
Hungria	0,04	0,12	0,16	25,00%	0,01	0,02	0,03	33%	0,00	0,01	0,01	0%	0,02	0,06	0,08	25,00%	0,04	0,02	0,06	66,67%	
Espanha	0,47	1,14	1,61	29,19%	0,12	0,05	0,23	52%	0,11	0,06	0,22	50%	0,34	0,61	1,06	32,08%	0,40	1,45	1,65	24,24%	
Argentina																		2,81	9,06	11,87	23,69%
Alemanha	1,72	2,72	4,44	38,74%	0,32	0,33	0,65	49%	0,07	0,71	0,78	9%	0,35	0,58	0,93	37,63%	2,32	1,86	4,18	55,50%	
Japão	3,04	6,41	9,45	32,17%					0,10	3,97	4,07	2%	0,70	2,25	2,95	23,73%	5,94	15,34	21,28	27,91%	
Chile	0,24	0,72	0,96	24,82%														0,76	2,00	2,76	27,54%
Rússia		0,18	0,18	0,00%	1,62	6,08	7,70	21%	0,78	2,84	3,61	21%	0,36	1,32	1,68	21,45%	0,47	4,19	4,66	10,04%	
Reino Unido	0,94	1,38	2,32	40,52%		0,02	0,02	0%	0,12	0,64	0,76	16%	0,32	0,66	0,98	32,65%	1,47	5,62	7,09	20,73%	
Itália	0,83	1,72	2,55	32,55%	0,34	0,00	0,34	100%	0,10	0,09	0,19	53%	0,94	1,64	2,58	36,43%	1,28	1,38	2,66	48,12%	
EUA	12,23	24,39	36,62	33,40%	2,70	16,24	18,94	14%		0,52	0,52	0%	3,52	5,07	8,59	40,98%	15,77	3,67	19,44	81,12%	
México	0,30	0,72	1,02	29,41%					0,04	0,13	0,17	24%						4,83	2,37	7,20	67,08%
Holanda	0,32	0,42	0,74	43,24%	0,03	0,02	0,05	60%	0,04	0,22	0,26	15%	0,05	0,13	0,18	27,78%	0,18	0,17	0,35	51,43%	
Índia	0,58	1,66	2,24	26,01%									1,74	3,69	5,43	32,02%	1,05	30,42	31,47	3,34%	
China	1,89	7,07	8,96	21,09%	0,33	1,63	1,96	17%	1,22	4,66	5,88	21%	3,21	10,12	13,33	24,08%	3,88	10,31	14,19	27,34%	
Grécia	0,04	0,11	0,15	26,67%	0,01	0,03	0,04	25%	0,01	0,15	0,16	6%	0,08	0,12	0,20	40,00%	0,14	0,33	0,47	29,79%	
Dinamarca	0,06	0,10	0,16	37,50%	0,03	0,09	0,12	25%	0,02	0,18	0,20	10%	0,02	0,04	0,06	33,33%	0,11	0,11	0,22	50,00%	
África do Sul	0,09	0,06	0,15	61,84%	0,05	0,01	0,06	91%	0,00	0,24	0,24	1%	0,04	0,01	0,04	81,82%	2,58	4,61	7,19	35,88%	
Austrália	0,39	0,91	1,30	30,00%	0,12	0,29	0,41	29%	0,00	1,14	1,14	0%	0,17	0,19	0,36	47,22%					

Base de dados: IEA (2001a; 2001b)

