

JOSÉ MÁRCIO COSTA

ANÁLISE EXERGÉTICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "Doctor Scientiae".

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2001

JOSÉ MÁRCIO COSTA

ANÁLISE EXERGÉTICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "Doctor Scientiae".

APROVADA: 9 de março de 2001.

Prof. Luiz Aurélio Raggi
(Conselheiro)

Prof. Jadir Nogueira da Silva
(Conselheiro)

Prof. Gutemberg Pereira Dias

Prof. José Helvecio Martins

Prof. Delly Oliveira Filho
(Orientador)

Ao eterno amor, Deus Pai, na pessoa de **JESUS**.

AGRADECIMENTO

As minhas “meninas” Carmen, Camila e Gabriela, por tudo.

Aos meus pais e aos meus irmãos, especialmente, ao meu irmão Hécio, que tem sido meu segundo pai, pelo constante apoio.

Ao professor Delly Oliveira Filho, pelo ombro amigo, porto seguro da amizade e irmão de oração e pela excelente orientação.

Ao professor José Helvecio Martins, pela bondade e prestatividade.

Ao professor Juarez de Souza e Silva, também colaborador do meu bem viver, pela amizade sincera.

Ao professor Paulo Marcos de Barros Monteiro, pela amizade e pelo apoio profissional.

Aos meus conselheiros professores Luiz Aurélio Raggi e Jadir Nogueira da Silva, pelas sugestões, pelo apoio e pela amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e à Federação das Indústrias de Minas Gerais, pelo financiamento dessa pesquisa.

À TROMBINI, na pessoa do gerente-administrativo Antônio Adirson Bombassaro, pelo auxílio no desenvolvimento desta tese durante o terceiro ano.

Ao estudante de Engenharia Agrícola Cristhian Lao Vorobieff, pela participação em grande parte deste trabalho.

Ao meus pais adotivos, sogro e sogra – José Alberto Gomide e Maria Lúcia de Miranda Gomide –, por me reconhecerem, de fato, como filho.

Aos meus colegas da Área de Energia do DEA Joel Gomide, Precci, Ney, Isnard, Carlos, Flávio, Ricardo, Júlio, Sidney e Saulo, pelo tempo bom de convivência.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

Ao chefe professor Haroldo Carlos Fernandes e aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, que sempre me fizeram sentir em casa, pela ajuda nas etapas deste trabalho.

Aos meus amigos e irmãos de caminhada na RCC – Renovação Carismática Católica de Viçosa –, pelas orações e pelo testemunho de vida.

BIOGRAFIA

JOSÉ MÁRCIO COSTA, filho de José Manoel da Costa e Edina Martha de Freitas Costa, nasceu em Viçosa, MG, em 4 de julho de 1965.

Em dezembro de 1992, concluiu o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, tendo sido bolsista de iniciação científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Em fevereiro de 1996, concluiu o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde exerceu atividades de Monitor II no período de março a dezembro de 1994.

Em março de 1996, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, na área de Energia na Agricultura, na UFV onde exerce as atividades de professor substituto na Área de Energia na Agricultura, no Departamento de Engenharia Agrícola, desde janeiro de 2000.

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	6
CAPÍTULO 1.....	8
EXERGIA E O PLANEJAMENTO INTEGRADO DOS RECURSOS	
1.1. INTRODUÇÃO.....	8
1.2. MATERIAL E MÉTODOS	18
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
1.4. CONCLUSÕES	26
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27
CAPÍTULO 2.....	29
CONSIDERAÇÕES DA ANÁLISE EXERGÉTICA EM TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA	
2.1. INTRODUÇÃO.....	29
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	34
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
2.4. CONCLUSÕES	40
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
CAPÍTULO 3.....	43
TARIFAS EXERGÉTICAS HORO-SAZONAIS	
3.1. INTRODUÇÃO.....	43
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	47

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
3.4. CONCLUSÕES	54
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
CAPÍTULO 4.....	57
AVALIAÇÃO EXERGÉTICA DA ADOÇÃO DE CARROS ELÉTRICOS NO BRASIL	
4.1. INTRODUÇÃO.....	57
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	62
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
4.4. CONCLUSÕES	76
4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
CAPÍTULO 5.....	80
APLICAÇÃO DA ANÁLISE EXERGÉTICA EM EQUIPAMENTOS RESIDENCIAIS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA	
5.1. INTRODUÇÃO.....	80
5.2. MATERIAL E MÉTODOS	84
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
5.4. CONCLUSÕES	111
5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
APÊNDICE	115
CONCLUSÕES GERAIS.....	119

RESUMO

COSTA, José Márcio, D.S., Universidade Federal de Viçosa, março de 2001.
Análise exérgica em sistemas elétricos. Orientador: Delly Oliveira Filho.
Conselheiros: Luiz Aurélio Raggi e Jadir Nogueira da Silva.

O paradigma econômico que imperou até as crises do petróleo foi o do desenvolvimento com crescimento econômico. Aspectos ambientais tinham importância secundária, e sua avaliação não era integrada nas etapas desse desenvolvimento. Cada vez mais, observa-se maior mobilização da sociedade organizada para minimizar impactos ambientais. O planejamento integrado, que engloba ações desde os recursos naturais até o uso final dado à energia pela sociedade, a um baixo custo e com menor impacto ambiental, é uma forma de se racionalizar o uso desses recursos. A análise exérgica, baseada no primeiro e segundo princípios da termodinâmica, é proposta neste trabalho para quantificar a racionalidade do uso da energia. O primeiro princípio da termodinâmica quantifica a energia utilizada em processos e equipamentos, mas não qualifica o uso dessa energia. A eficiência energética não compara os níveis de degradação que diferentes equipamentos e processos fazem ao utilizar energia, o que dificulta a comparação. Pelo segundo princípio da termodinâmica, compara-se o máximo trabalho possível de ser realizado por diferentes processos, equipamentos e fontes energéticas. Assim, a análise exérgica possibilita identificar e quantificar as irreversibilidades de qualquer sistema de energia. Portanto, a utilização da termoeconomia enfatiza o valor do recurso natural e não somente a riqueza proporcionada por este. Neste estudo,

primeiramente, mostrou-se a importância conceitual do tema, bem como suas formas de aplicação; em segundo lugar, as considerações da análise exérgica em tarifas de energia elétrica nos diversos setores da economia do Estado de Minas Gerais; em terceiro lugar, propôs-se a tarifa exérgica horo-sazonal e simulou-se o impacto de taxar o consumo e a demanda de energia elétrica pelo seu uso final e pelo horário do dia; em quarto, analisou-se a análise exérgica na adoção de carros elétricos em substituição aos de passeio movidos a gasolina das regiões brasileiras (Centro-Oeste, Sul, Sudeste, Norte e Nordeste) e propuseram-se ações de gerenciamento do lado da demanda como remanejamento de chuveiros do horário de ponta, alterações do fator de carga e geração de energia para atender à demanda devido à adoção do carro elétrico; e, por último, aplicou-se o conceito de exérgia em sistemas residenciais de aquecimento de água. Utilizaram-se cinco tipos de equipamentos de aquecimento de água residencial e foram aplicados quatro tipos de tarifas: monômia energética, monômia exérgica, horo-sazonal amarela e exérgica horo-sazonal. Neste trabalho foi introduzida a tarifação exérgica, que contempla tanto as leis de oferta e procura de energia quanto a redução do nível de degradação ambiental. Acredita-se que a motivação maior são a possibilidade da sustentabilidade e a valorização de externalidades ambientais, buscando a reestruturação do sistema energético nacional pela valorização dos recursos naturais e do uso final dado à energia.

ABSTRACT

COSTA, José Márcio, D.S., Universidade Federal de Viçosa, March 2001.
Exergy analysis in electric systems. Adviser: Delly Oliveira Filho.
Committee members: Luiz Aurélio Raggi and Jadir Nogueira da Silva

The economic model, which predominated until the oil crisis, was a combination of development and economic growth. Environmental aspects played a minor role and their evaluation was not part of the development stages. An increase in social awareness and mobilization is being observed, aiming to minimize environmental impacts. Integrated planning – actions ranging from the use of natural resources by society to the energy end-uses at low cost and lower environmental impact – is a rational way of using the natural resources. Exergetic analysis, based on the first and second principles of thermodynamics, is proposed in this work to quantify the rational use of energy. The first principle of thermodynamics quantifies the energy used by processes and equipments, but it does not qualify the use of energy. Energy efficiency does not compare the levels of degradation that different equipments and processes cause while using energy, thus making evaluation difficult. The second principle of thermodynamics compares the maximum work possible to be carried out by different processes, equipments and energetic sources. Thus, exergetic analysis (thermoeconomics) allows the identification and quantification of the irreversibilities of any given energy system. Therefore, thermoeconomics emphasizes energetically and exergetically the value of natural resources and not only the wealth they

provide. This study firstly presented the exergetic analysis conceptual importance, as well as, their application forms; secondly, it presented the exergetic analysis considerations on the electric energy rates in the various economic sectors of Minas Gerais State; thirdly, it proposed time-of-use exergetic rates for different seasons, simulating the impact caused by charging electric energy consumption and demand according to its end-uses; fourthly, exergetic analysis studied if internal combustion gasoline cars were replaced by electric cars, throughout the Brazilian regions (Central Western, Southern, Southeastern, Northern and Northeastern) and Demand Side Management (DSM) actions were also proposed, such as peak clipping or load shifting, improvement in the load factor and generation of energy to meet the demand due to the adoption of electric cars; and lastly, the exergetic analysis was applied on residential water heating systems. The utilization of five types of residential water heating equipments were simulated to four different rates: energetic monomial, exergetic monomial, time-of-use energetic and exergetic rates as a function of demand and electrical consumption and the year's season. This work introduced the exergetic rate, which charges, as a function of both energy supply/demand laws and level of environmental degradation. It is believed that this thesis greatest motivation is to show the possibility of increased environmental sustainability by the valorization of externalities, aiming to rearrange the national energetic system by prioritizing and valueing the natural resources and the energy end-uses.

INTRODUÇÃO GERAL

A estabilidade da moeda e a privatização do setor de energia elétrica no Brasil, pela desregulamentação do monopólio estatal no fornecimento de energia, fizeram o consumidor acreditar que as tarifas de energia iriam se reduzir. No entanto, têm-se observado reajustes mais freqüentes nas tarifas, que, para o setor industrial, subiram 14% no período de 1994 a 1997. Um índice alto quando comparado com o de países como Estados Unidos, França, Reino Unido e Noruega, onde as tarifas para o setor industrial tiveram aumento de aproximadamente 2% no mesmo período. O reajuste de 9,9%, em janeiro de 1997, resultou em faturamento extra de R\$1,5 bilhão para o setor no mesmo ano. Isso trouxe impacto de 0,049 ponto percentual na inflação medida pelo IGP-FGV*, de 0,151 na taxa medida pelo INPC-IBGE* e de 0,364 na inflação medida pelo IPC-Fipe*. Nesse mesmo período, o Brasil teve déficit de energia elétrica da ordem de 5%, o que obrigou o país a importar energia da Argentina, e, segundo a Eletrobrás, o consumo teve crescimento de 6% em relação ao mesmo mês do ano anterior, acima das previsões do governo, devido, principalmente, ao aumento de consumo do setor residencial (TOLMASQUIM e PIRES, 1997; FOLHA DE SÃO PAULO, 1997).

Alegou-se, mesmo com esse faturamento extra, que o Estado não teve recursos suficientes para aplicar no setor de energia elétrica na proporção requerida. Com a privatização, o setor recebeu no ano de 1997, pela primeira

* IGP-FGV – Índice Geral de Preços - Fundação Getúlio Vargas.

* INPC-IBGE – Índice de Preços ao Consumidor – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

* IPC-Fipe – Índice de Preços ao Consumidor – Instituto de Pesquisas de Campinas.

vez, grandes investimentos, que se refletiram no volume de recursos emprestados pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) aos grupos privados. O BNDES concedeu financiamentos no total de R\$1,2 bilhão para empresas investirem em energia elétrica, um volume recorde que representa aumento de quase 400% em relação ao total liberado no ano de 1996. Segundo estimativas do BNDES, até o ano 2005 o país precisará investir mais de R\$60 bilhões na expansão da oferta de energia elétrica para atender plenamente à demanda crescente. Para o ano de 2015 seriam necessários entre 700 e 1.500 TWh de energia elétrica. Desse total, estima-se que R\$33,6 bilhões serão investidos na geração de energia, por meio da construção de 61 usinas hidroelétricas e 10 usinas termelétricas. Outros R\$30 bilhões terão que ser investidos na transmissão e distribuição da energia elétrica gerada (O GLOBO, 1997; BRASIL, 2000).

Investimentos no Gerenciamento do Lado da Demanda (GLD) têm sido a forma encontrada para se adiar a necessidade de aumentar a capacidade de geração de energia elétrica, que é onerosa para o país e para o meio ambiente. Essas ações são direcionadas aos consumidores, pelas concessionárias de energia ou órgãos governamentais, para diminuir a demanda de energia elétrica, principalmente nos horários críticos durante o dia, entre às 17h e às 21h.

Vários fatores, como a substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes comuns e, ou, compactas, incandescentes do tipo econômica, vapor de mercúrio e vapor de sódio; melhoria da eficiência de refrigeradores; e substituição de motores elétricos por modelos mais eficientes, dentre outros, estão contribuindo para diminuir os kWh a serem gerados.

O objetivo é racionalizar o uso de energia elétrica, e o Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica (Procel) tem atuado de diversas formas, como no incentivo ao uso de lâmpadas e geladeiras eficientes, lançamento do selo de economia para os equipamentos mais eficientes energeticamente, prêmios aos agentes que atuam no combate ao desperdício de energia elétrica, criação de comissões internas de conservação de energia (CICEs) nas empresas e concessão de subsídios no Imposto Predial Territorial Urbano (IPTU) para proprietários de imóveis que atendam às normas de conservação de energia, dentre outras (PROCEL, 2001).

Essas soluções têm sido buscadas na sociedade para resolver o problema energético do país, com um mínimo de danos ao meio ambiente. É com esse pensamento que surgiu o Planejamento Integrado dos Recursos (PIR), que engloba ações de racionalização desde os recursos naturais até o uso final dado à energia, ou seja, prover os serviços energéticos requeridos pela sociedade a um baixo custo e com menor impacto ambiental.

Segundo o economista Stuart Mill, “a riqueza de um bem está relacionada com o valor de troca (escassez)”, o que numa economia liberalista é normal. Portanto, tudo que é gratuito, abundante na natureza, não pode ser considerado riqueza. Contrariamente a essa definição, como não considerar riqueza o que a natureza oferece se ela atende às necessidades do homem? Assim, o ar que se respira não pode ser uma riqueza, já que é obtido gratuitamente (CORDEIRO, 1995)?

Pensar na poluição como opção de investimentos e de novos empregos não cabe mais no pensamento do homem moderno. Aumentar os níveis de poluição de forma geral faz com que o homem tenha que trabalhar mais para manter a mesma riqueza que antes possuía.

Padrões ambientais estão se tornando cada vez mais exigentes nos dias de hoje, e serão no futuro, porque cresce a preocupação com a qualidade de vida e com as mudanças climáticas globais que têm ocorrido e seus possíveis efeitos. Custos ambientais das emissões na produção de eletricidade começam a ser considerados em programas de planejamento e de eficiência energética, como vem acontecendo nos Estados Unidos e no Canadá, segundo Hashem, citado por JANNUZZI e SWISHER (1997).

Várias são as opções para reduzir os efeitos ambientais e atender à demanda crescente de energia, principalmente nos horários de “ponta”. A tarifação adequada se tornou uma dessas opções, em que o setor de energia elétrica considera tarifas diferentes para diferentes categorias de consumidores. Cita-se, principalmente, a existência de políticas econômicas para compensar a distribuição desigual de riqueza e, ou, para promover e estimular setores específicos da economia, por exemplo energia elétrica para irrigação. Outra importante consideração é entender as características de comportamento do mercado diante da oferta e demanda de energia. Conhecer a elasticidade demanda-preço é importante para introduzir novas tecnologias, influenciar o comportamento do consumidor, retraindo o consumo e até mesmo

aumentar a demanda em diferentes horários do dia e épocas do ano. Entretanto, introduzir novas tarifas não é algo instantâneo, deve-se considerar o fator tempo (curva de carga). Diferentes tarifas têm sido apresentadas como opção de GLD, a tarifa em bloco aplicada ao setor residencial, em que residências de maior renda subsidiam as de menor renda; a Tarifa Horário-de-Uso (Tarifas Horó-Sazonais - THS), na qual os preços de energia variam por consumo e pela demanda exigida da concessionária em diferentes horários do dia e do ano. As tarifas horó-sazonais em vigor são as tarifas Azul e Verde, e a recentemente implantada, em caráter experimental em nível residencial, no Vale do Jequitinhonha, MG, tarifa binomial Amarela, com preços diferenciados no horário de “ponta” e fora de ponta para demanda e consumo. Ainda não implantada pelo setor elétrico, mas proposta por TANABE (1998) e OLIVEIRA FILHO e GALIANA (1995), é a tarifa tipo-de-uso, na qual os preços de energia variam de acordo com o uso final dado a essa energia.

A tarifa tipo-de-uso é sugerida devido à insuficiência da análise energética em sistemas elétricos em não considerar a qualidade da energia consumida, mas apenas as quantidades das energias envolvidas nos processos e nas fontes. A análise energética realizada com base no primeiro e segundo princípios da termodinâmica (PPT e SPT) recebe o nome de análise exérgica, a qual diferencia a qualidade da energia, ou seja, o seu emprego no uso final. Considera-se, assim, que a análise exérgica relaciona a minimização de impactos ambientais e a energia consumida (TANABE, 1998; OLIVEIRA FILHO, 1995). Este conceito é semelhante ao utilizado em economia, em que se relaciona o melhor uso possível dos recursos disponíveis para produzir determinado bem. Daí o desafio que vive o mundo inteiro, que é o de buscar o desenvolvimento, o que envolve o uso de energia, minimizando-se a degradação, de forma irreversível ou desnecessária, do meio ambiente (SERAPHIM e TEIXEIRA, 1997).

Segundo Louis Dumont, citado por CORDEIRO (1995), “o valor de um bem consiste na qualidade de trabalho que se pode obter em troca deste bem”. Esse conceito se relaciona com o da termodinâmica sobre exérgia, que é “o trabalho disponível em um gás, fluido ou massa, resultante da condição relativa de não equilíbrio com alguma condição de referência” (AHERN, 1980). Assim, pode-se relacionar a economia com a termoeconomia, no que se refere a “o que se quer” e “o que se paga”.

Baseado no primeiro princípio da termodinâmica, tem-se o termo eficiência, que é usado em engenharia para considerar o rendimento de uma máquina. Esse define a relação entre a energia útil e a energia disponível, ou seja, é um número não negativo sempre inferior a 1 (FERREIRA, 1998).

Se a eficiência não pode ser maior que 1, pois a máquina não pode fornecer mais energia do que recebe, não se pode melhorar o rendimento dessa máquina com 100% de eficiência pelo PPT. Como, então, avaliar a eficiência, em processos adiabáticos sem o SPT (McGOVERN, 1990 a e b)? Portanto, pelo PPT, determinada quantidade de energia se conserva, e o mesmo não pode ser dito a respeito de sua qualidade (VAN WYLEN et al., 1998). O conceito de qualidade de energia surge do SPT, que estabelece e quantifica a degradação da energia, também chamada de irreversibilidade. Um processo de transformação que envolve energia pode ser melhorado em termos qualitativos quando há menor degradação da energia.

A palavra exergia foi introduzida pelo cientista Z. Rant em 1956, em uma publicação que surgiu de seu trabalho com energia consumida em processos industriais. A exergia expressa a capacidade da energia em realizar trabalho útil; como energia, esta não é conservada em um processo, cuja destruição implica irreversibilidade (BRZUSTOWSKI e GOLEM, 1977).

Acredita-se que o impacto ambiental, o custo, a confiabilidade e a eficiência sejam os principais critérios no planejamento de sistemas de energia elétrica. Dentre eles, o critério impacto ambiental é o que prioriza a qualidade do emprego da energia (OLIVEIRA FILHO, 1995). Assim, atribui-se o melhor preço para o consumidor mais eficiente, segundo ambos os princípios da termodinâmica, e a maior sobretaxa aos não-eficientes, conforme o conceito “o que se quer” e “o que se paga”. Se nos sistemas atuais de energia elétrica as tarifas são definidas, baseando-se somente no PPT, fica claro que o sistema de tarifação de energia elétrica poderá ser melhorado, se também a energia for medida pela qualidade de seu uso final, conforme o SPT, e não somente pela quantidade. Portanto, fica evidente a necessidade de se estudar a tarifação exergética.

Este trabalho teve como originalidade, além do reconhecimento da importância da tarifa horo-sazonal (já implantada) e da tarifa exergética (conceitual), a integração dessas tarifas, o que proporcionará tarifação inteligente em relação ao planejamento integrado dos recursos e ao

desenvolvimento sustentável. Apesar da utilidade potencial de tal integração, a tarifa exergética horo-sazonal (XHS) ainda não foi elaborada, implantada, e nem simulados os possíveis impactos do seu uso. Nos capítulos desse trabalho, aplicou-se o conceito de exergia nas diversas situações do sistema nacional de energia elétrica. Primeiramente, discutiu-se a importância conceitual do tema, bem como suas formas de aplicação; em segundo lugar, as considerações da análise exergética em tarifas de energia elétrica; em terceiro, a proposição da tarifa exergética; e, por último, a aplicação do conceito exergia no sistema nacional de transporte e em aquecimentos residenciais de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHERN, J. E. **The exergy method of energy systems analysis**. California: John Wiley & Sons, 1980. 295p.

BRASIL – MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME. **Balço energético nacional**. Brasília, DF, 2000. 154p

BRZUSTOWSKI, T. A., GOLEM, P. J. Second-law analysis of energy processes – Part I: Exergy – An introduction. **Transactions of the Society for Mechanical Engineers**, v. 4, n. 4, 1977.

CORDEIRO, R. C. **Da riqueza das nações à ciência das riquezas**. São Paulo: Loyola, 1995. 230p. (Coleção filosofia - 33).

FERREIRA, O. C. **Energia e meio-ambiente – Explorando novos caminhos metodológicos**. Belo Horizonte: Fundação CETEC, 1998. 26p.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Tarifas de energia elétrica sobem a partir de terça**. Agência Folha, 08/04/97

JANNUZZI, G. M., SWISHER, J. N. P. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis**. Campinas, SP: Ed. Autores Associados, 1997. 246p.

McGOVERN, J. A. Exergy analysis: a different perspective on energy. I. The concept of exergy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 24, p. 253-262, 1990a.

McGOVERN, J. A. Exergy analysis: a different perspective on energy. II. Rational efficiency and some examples of Rational efficiency and some examples of exergy analysis. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 24, p. 262-268, 1990b.

O GLOBO. **Empresas privadas investirão mais 400% em energia**. Ramona Ordoñez, 07/01/1997.

OLIVEIRA FILHO, D. **Electric energy system planning and the second principle of thermodynamics**. Québec: McGill University. 1995. 199p. Thesis (Doutorado) - McGill University, 1995.

OLIVEIRA FILHO, D.; GALIANA, F. D. A model for the planning of electric energy systems including exergetic considerations. In: OLIVEIRA FILHO, D., GALIANA, F. D. **Power industry computer applications conference**. Salt Lake City, Utah: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1995. 6p.

PROCEL- Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica - **Boletim informativo**. www.eletrabras.gov.br/procel. Data da consulta: 2/2/2001.

SERAPHIM, O. J., TEIXEIRA, N. M. Conservação e racionalização de energia elétrica no meio rural. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – XXVI CONBEA. **Anais...** Campina Grande, Paraíba, julho de 1997.

TANABE, C. S. **Viabilidade da análise exergética na elaboração de tarifas de energia elétrica**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1998. 72p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

TOLMASQUIM, M., PIRES, J. C. L. **Tarifas no Brasil e no mundo**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1998. 537p.

CAPÍTULO 1

EXERGIA E O PLANEJAMENTO INTEGRADO DOS RECURSOS

1.1. INTRODUÇÃO

“Se o mercado funciona imperfeitamente, a tributação pode corrigir significativamente as imperfeições...” (CORDEIRO, 1995).

Vários são os interesses do mercado capitalista, como estímulos aos investimentos em máquinas e tecnologias produtivas e promissoras, mas, no entanto, existe total despreocupação em planejar melhor o uso dos recursos naturais. O comportamento econômico atual separou-se da responsabilidade com a sociedade e sua riqueza ambiental. Países ricos e industrializados sacrificam o meio ambiente para manter a ascensão do enriquecimento de uma sociedade consumista. Valores como o ar e a água são relegados em favor do padrão de posse e consumo de bens materiais. Conceitos de vitória e realização pessoal estão cada vez mais ligados ao enriquecimento.

A ambição desmedida de riqueza em nossa sociedade, dita moderna, tem sido incapaz de acordar para avaliar a resposta dada pelo meio ambiente. Respostas que necessitam da urgente intervenção do homem para que as próximas gerações tenham vida em qualidade e abundância.

As manifestações da natureza têm sido gritantes, pois cada vez mais as catástrofes naturais estão acontecendo no mundo: cidades inundadas, calor excessivo, neve em diferentes estações do ano, queimadas incontrolláveis, escassez ou excesso de chuva, chuvas ácidas etc.

Na avaliação econômica de investimentos, considera-se a depreciação de máquinas e equipamentos, mas não se levam em conta a depreciação da natureza com a poluição dos mananciais de água doce, a destruição das florestas, a contaminação do ar, a perda de solo por redução de sua fertilidade e assoreamento dos rios e lagos, o buraco na camada de ozônio e os furacões causados pelos fenômenos naturais El Niño, La Niña etc.

Mesmo que a definição sobre economia admita que somente aquilo que tem valor de troca é alvo de reflexão, deve-se dar valor de uso a determinados bens, a princípio sem valor, pois alguns deles têm a força de produzir maior-valor do que o valor de uso específico. Portanto, nem tudo que não tem valor de troca pode ser ignorado (CORDEIRO, 1995).

As externalidades ambientais (ar, água, terra etc.) devem ser expressas por meio de custos evitados com os recursos naturais. Assim, o ar que se respira é um exemplo. Quanto menor o nível de poluição, menor será o trabalho necessário para recuperá-lo com as características aceitáveis à vida, já que é elemento indispensável à sobrevivência dos seres vivos.

Várias são as dificuldades de atribuir valores monetários aos recursos naturais e quantificar o nível de destruição provocado na natureza pelos processos produtivos. Paralelamente a essas grandes dificuldades, percebe-se o aumento dos problemas ambientais gerados pela concentração de gases na atmosfera pela queima de combustíveis fósseis e biomassa, pela mineração, por escapamentos de gases de geladeiras e aparelhos de ar-condicionado e, conseqüentemente, por seus impactos ambientais como o efeito-estufa.

De todos os registros da temperatura da Terra, que começaram por volta de 1850, seis anos, na década de 1980, foram os mais quentes até então conhecidos. Posteriormente, o ano de 1990 se tornou o ano mais quente de todos. Nessa cadência de aumento da temperatura, tem-se um relato das Nações Unidas, de 1996, segundo o qual o ano de 1995 teve temperaturas mais elevadas que o ano de 1990; o ano de 1997 superou as temperaturas de 1995. Os sete primeiros meses de 1998 foram os mais quentes até então registrados, superando todos os índices de temperatura dos anos anteriores.

O efeito mais danoso que se salienta do efeito-estufa é o descongelamento de grandes quantidades da massa de gelo nos continentes, bem como a conseqüente elevação dos níveis das marés dos oceanos. Em estudos feitos na Universidade de Maryland, nos Estados Unidos, constatou-se o desaparecimento de, aproximadamente, 30 ilhas na baía de Chesapeake, costa leste norte-americana, devido à subida do nível das marés. Constatou-se, ainda, que nos últimos cinco mil anos o nível do mar subiu 33 cm a cada mil anos e que somente nos últimos 100 anos esse nível subiu 18 cm. Isso significa aumento cinco vezes maior que nos 100 anos anteriores e um gasto de US\$8 bilhões, desde 1970, para recompor praias e evitar o avanço do mar sobre a zona costeira, onde vivem mais de 50% da população americana. Os desastres ecológicos como o aumento da temperatura e o avanço das marés são irrecuperáveis para a sociedade, a exemplo da contaminação dos reservatórios de água doce, plantações inundadas, civilizações expulsas de suas terras, avanço de pragas e doenças etc. Estima-se que o aumento de 0,5m no nível do mar mediterrâneo deslocaria mais de 16% da população do Egito, e o aumento de 1°C na temperatura ambiente deslocaria determinadas zonas florestais por mais de 200 km, pois algumas espécies são mais sensíveis a variações de clima e só sobrevivem em estreita faixa de temperatura e umidade (PENNA, 1999).

Na década de 80, grupos ambientalistas pressionaram os governos com o objetivo de forçar a redução de impactos ambientais causados pelas hidroelétricas e acentuar o uso de fontes energéticas renováveis para geração de energia elétrica. Outras preocupações apresentadas foram o uso de equipamentos de maior rendimento energético com pequenos índices de poluição, modulação da carga e, principalmente, que levem em consideração os impactos ambientais na exploração das fontes de energia. Ainda nessa década foi introduzido, pela Comissão de Brundtland (1987), o termo Desenvolvimento Sustentável, definido como “satisfazer às necessidades atuais da sociedade sem comprometer a possibilidade de atendimento das necessidades das gerações futuras” (AGENDA 21, 2000). Sachs, citado por VIEIRA et al. (1998), relatou que a sustentabilidade deve se apoiar em critérios que norteiam o processo decisório de avaliar os impactos ambientais. Desses critérios, três principais deram origem aos demais: o critério econômico, o

ecológico e o social. Esclareceu também que “funcionando sem controle social, o mercado não se encontra à altura deste desafio”.

Padrões internacionais de regulamentação têm criado normas de regulamentação e orientação dos consumidores e da indústria para eliminar do mercado os produtos que têm baixa eficiência energética e elevados níveis de emissões de poluentes. Países como Alemanha, Inglaterra, Dinamarca, Noruega e Suécia estão adotando, inclusive, mecanismos de mediação entre os interesses comerciais e os da sociedade, por meio de agências reguladoras.

Grande incentivo ao crescimento dessas iniciativas e orientações tem sido a pesada taxação por parte dos mecanismos regulatórios, a qual tem conduta negativa em relação ao meio ambiente. Uma política de eficiência energética desejável está relacionada, acima de tudo, com elevada qualidade de vida da sociedade. Particularmente, tem provido objetivos de diminuir as emissões de elementos poluentes que alimentam o efeito-estufa, elevar a qualidade do ar e da água e promover o uso de energéticos renováveis na natureza.

No Brasil, a situação da alta dependência externa de energéticos no início do século desencadeou, progressivamente, a busca da transformação da matriz energética. Assim, a política energética brasileira teve como objetivo, no passado, atender às necessidades do produtivismo nacional, com qualidade dos serviços e preços baixos, reduzindo a dependência externa de energéticos, sem se preocupar com os impactos ambientais e sociais. As regiões industrializadas tiveram sistema energético moderno e maduro e as regiões não-industrializadas, sistemas dependentes de recursos tradicionais, como o uso da biomassa. Atendeu-se aos suprimentos do segmento industrial a preços baixos, mas não às necessidades da sociedade, em termos de minimização dos impactos ambientais.

A preocupação ambiental cresceu, notadamente, devido à influência de ONGs preocupadas com os recursos energéticos não-renováveis e a qualidade de vida para o futuro da nação. Essa preocupação propiciou a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo, em 1972 (AGENDA 21, 2000).

Na primeira metade do século XX, o Brasil tornou-se exemplo de atendimento das necessidades elétricas com mínimos impactos ambientais pela opção da hidroeletricidade. Com as crises do petróleo (1973 e 1979), que

representaram e despertaram grandes avanços na economia, surgiu a necessidade de novas tecnologias e de novos energéticos, mas incorporando às atividades econômicas a necessidade de contabilizar as externalidades e os custos sociais aos processos produtivos. Foi nessa década que a política ambiental começou a atingir o setor elétrico com geração hidroelétrica. Usinas hidroelétricas estavam gerando problemas ambientais causados pelas grandes áreas alagadas e pelos impactos em microrregiões. Citam-se dois projetos na Amazônia das usinas de Balbina e de Samuel, os quais foram descartados em 1970, reativados em 1982 e tornaram-se casos exemplares para a organização das atividades no meio ambiente, em razão dos elevados custos ambientais com pequenos benefícios energéticos (PENNA, 1999).

Daí a criação no Brasil, em 1973, da Secretaria Especial do Meio Ambiente (SEMA). Em 1981, implementou-se a Política Nacional do Meio Ambiente e do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Em 1989, foi criado o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente), em substituição à SEMA e ao IBDF (Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal). Esses órgãos tinham como funções a proteção, o controle, o fomento e o desenvolvimento ambiental. Na prática, qualquer instalação industrial que provocasse danos ao meio ambiente deveria submeter para aprovação um Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) antes de sua implementação (LEITE, 1998).

Em janeiro de 1992, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente – Rio 92, que, devido ao seu grande sucesso, veio comprovar a importância e o desejo de uma política ambiental consolidada e aplicada. A Rio 92 foi um marco mundial para promoção do meio ambiente e contou com a presença de representantes governamentais de 179 países, de 18.000 participantes de 166 países e 450.000 visitantes (PNUMA, 2000).

Ações foram propostas e assumidas para viabilizar políticas de eficiência energética sustentável que começaram a se estruturar pelas ações da então chamada “Agenda 21”. Essas ações valorizaram a proteção ambiental e energias novas e renováveis. A busca de cooperação e participação do setor privado com o setor público tem sido o desafio maior dessa política de desenvolvimento e implantação de programas de eficiência energética. A necessidade de indicadores do desenvolvimento sustentável se intensificou, e a Comissão de Desenvolvimento Sustentável (CSD) da ONU começou a

realizar trabalhos baseados nas recomendações do capítulo 40 da Agenda 21, que trata de informações para a tomada de decisões para o desenvolvimento sustentável.

A preocupação com a redução dos impactos ambientais e com o desenvolvimento sustentável reverteu-se em ações práticas da sociedade civil brasileira, como as da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995). Definiu-se um texto preliminar de norma para certificação ambiental de produtos com a criação de um programa denominado “ABNT – Qualidade Ambiental”. Essa certificação tem como meta informar os consumidores sobre produtos que são menos agressivos ao meio ambiente.

Várias ações para reduções de perdas criaram, em diversos países, programas governamentais visando à eficiência energética. No Brasil, o Procel (Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica); no México, o Lumex (lâmpadas eficientes); no Japão, o ECCJ (Centro de Conservação de Energia do Japão); no Canadá, o NRCan (“Natural Resources”, Canadá) para aconselhar os ministros em assuntos relacionados com energia e desenvolvimento econômico; nos EUA, o EEREN (“Energy Efficiency and Renewable Energy Network”), que tem como objetivos, entre outros, incentivar o uso de energia renovável de forma mais significativa na matriz energética do país, chegar a 28% do total da demanda de energia americana; etc. Dentre as abordagens possíveis do planejamento energético, destaca-se o Planejamento Integrado dos Recursos (PIR), que é o desenvolvimento combinado da oferta e da demanda de energia. O PIR consiste em ações de Gerenciamento do Lado do Suprimento (GLS) e de Gerenciamento do Lado da Demanda (GLD) de energia. Nos sistemas elétricos, a integração de opções de gerenciamento do lado da oferta e da demanda fornece serviços de energia a custo mínimo, incluindo custos sociais e ambientais, pois otimiza recursos e permite a abordagem sistêmica. Essa abordagem sistêmica do PIR envolve questões importantes sobre o suprimento da energia e a satisfação das necessidades dos consumidores com confiabilidade, economia financeira e a vertente questão ambiental. O desenvolvimento sustentável e a minimização do impacto ambiental têm se tornado cada vez mais relevantes em relação aos demais. Portanto, uma abordagem que se inicia desde o recurso natural como reservas de energia, biomassa e potencial hidroelétrico até o uso final dado a energia. Também, é

de grande preocupação, por parte do PIR, projetar estratégias de integração das opções de ofertas do lado da demanda, bem como ferramentas para explicar os custos econômicos, sociais e ambientais da conversão e do uso final dado à energia. As projeções são baseadas nos serviços de energia solicitados, considerando-se várias bases tecnológicas (tipos de equipamentos de conversão de energia, lâmpadas eficientes, motores de alto rendimento etc.) e fatores socioeconômicos (preço, renda, índice de aceitação de determinada tecnologia, hábitos de consumo etc.) (JANNUZZI e SWISHER, 1997).

O PIR, nos Estados Unidos, é uma ferramenta do planejamento que indica quais ações devem ser executadas em longo prazo por órgãos governamentais. Também, auxilia nas decisões de investimentos de empresas concessionárias. No Estado da Califórnia, as empresas concessionárias foram obrigadas, por leis aprovadas pelo legislativo, a manter os programas de GLD já inicializados. Em algumas empresas, o custo médio de um programa de GLD é de US\$20/MWh, sendo competitivos perante a geração termoelétrica a gás natural, que custa US\$35/MWh, apesar das quedas nos preços desse gás natural ocorridas em 1999 (ANEEL, 2000).

O desafio maior no planejamento integrado dos recursos disponíveis é casar o par ideal para cada finalidade.

O conceito de exergia pode se tornar parte do PIR na busca desse par ideal, recurso x uso final, por avaliar a qualidade de energia e que uso final se faz dela. A avaliação exérgica baseia-se no primeiro e segundo princípios da termodinâmica, que valorizam e quantificam o conceito de *qualidade do uso da energia*, diferentemente do critério tradicional de medir apenas a eficiência (avaliação energética), o qual se baseia somente no primeiro princípio da termodinâmica, que estabelece que a energia se conserva, mas nada aborda a respeito da sua qualidade.

O setor de energia elétrica tem ignorado a avaliação exérgica no planejamento de sistemas, e acredita-se que isso é devido, principalmente, à falta de familiaridade com o segundo princípio da termodinâmica e às implicações decorrentes para avaliação precisa. Há variáveis e alguns fatores que não se encontram totalmente disponíveis no mercado e precisam ser estudados, daí a dificuldade. São eles: fatores tecnológicos de conversão da energia, informações sobre o uso final da energia, razões políticas e nível de conscientização sobre o segundo princípio da termodinâmica – exergia e suas

implicações no planejamento – e sobre diversas esferas de decisão da sociedade, tecnologia disponível, equipamentos eficientes, hábitos de consumo etc. (OLIVEIRA FILHO, 1995).

A análise exergetica pode dar às instituições reguladoras do sistema energético nacional instrumentos que auxiliem o mercado econômico a encontrar o equilíbrio entre o impacto ambiental e a utilidade necessária à civilização do setor elétrico.

Histórico do conceito de exergia

O desenvolvimento do conceito sobre exergia surgiu baseado no 2º princípio da termodinâmica. A primeira tentativa válida para o enunciado do segundo princípio da termodinâmica data de 1824, com a célebre “memória de Carnot”, e foi continuada por Clausius (1850 a 1870). Porém, somente na primeira metade do século XX, graças ao trabalho de Planck, Poincaré e De Donder e sua escola, é que se consolidaram os conceitos relativos ao segundo princípio.

As evidências que levaram à formulação do segundo princípio da termodinâmica são baseadas nos fatos de que, em dado sistema que efetua um ciclo, as trocas de calor e trabalho ocorrem em dado sentido e não o oposto. Dois enunciados importantes, o de Kelvin-Planck e o de Clausius, elucidaram o segundo princípio da termodinâmica e introduziram o conceito de irreversibilidade.

CIMBLERIS (1979) atribuiu a Gibbs (1873) o papel do autor intelectual do conceito exergia, pois foi ele o primeiro a definir o conceito de trabalho máximo. A formulação da função de Gibbs para energia livre considera como variável a temperatura T do estado considerado. Já a função exergia, denominada composta, opera com a variável temperatura T , do estado do sistema, mais a variável temperatura T_0 do meio ambiente. Stodola, em 1898, introduziu o conceito de entalpia juntamente com o de energia interna. Mais tarde, autores franceses, como Jouget (1910) e Darrieus (em torno de 1930), fizeram as primeiras tentativas de definição de um novo rendimento baseado no segundo princípio da termodinâmica, e, em 1932, o trabalho de Keenan exerceu grande influência em vários países, datando-se de 1955 seu mais importante trabalho, que definiu os conceitos de disponibilidade e

irreversibilidade – conceitos importantes utilizados até o momento. Porém, é a Szargurt que se deve a melhor referência para definição de energia disponível, pois as tentativas para definir o novo conceito sobre rendimento baseado no segundo princípio da termodinâmica, como “disponibilidade”, “energia disponível”, “capacidade de realizar trabalho” etc., não foram satisfatórias e capazes de uma descrição completa (CIMBLERIS, 1979).

O nome que conseguiu impor e expressar esse rendimento se deve ao autor iugoslavo Z. Rant, em 1956. A palavra-chave encontrada, EXERGIA, é originada da palavra grega “εργον”, que significa trabalho. É análoga à palavra energia, e o seu prefixo “ex” significa origem, extração, definida, assim, como o trabalho extraído de determinado sistema. O uso da palavra exergia firmou-se, e aponta-se, nesse mesmo período, a Áustria como o primeiro país a fazer um balanço exergético (ALMEIDA NETO, 1999).

A evolução dos estudos e o uso da palavra exergia têm-se refletido pelo crescente número de trabalhos publicados. Até 1970, 270 foram escritos; em 1986, 1.443 foram publicados; e em 1992, 2.034, conforme mostrado no Quadro 1 (HADDAD et al., 1999).

Centrado no ponto de vista do segundo princípio da termodinâmica, que considera a qualidade da energia consumida e não somente as quantidades envolvidas em processos e fontes, é que se realiza a análise exergética. O índice de rendimento exergético pode contribuir na difícil tarefa de permitir o planejamento integrado dos recursos em sistemas energéticos em geral e de energia elétrica em particular.

A análise exergética pode contribuir para a melhoria da utilização dos recursos naturais, porque quantifica a degradação da energia. Menor degradação de energia significa, diretamente, menor impacto ambiental e, conseqüentemente, maiores recursos do lado da oferta. Incentivos financeiros, por exemplo, poderiam ser criados, visando valorar as externalidades, evitando a expansão da oferta e encorajando as concessionárias, a sociedade e os consumidores ao uso de alternativas eficientes num programa de conservação de energia (OLIVEIRA FILHO et al., 2000). O primeiro princípio da termodinâmica, isoladamente, é incapaz de avaliar o impacto ambiental do uso da energia no planejamento integrado dos recursos. No entanto, o segundo princípio da termodinâmica não quantifica alguns aspectos de avaliações ambientais, como níveis de emissões atmosféricas e de efluentes.

Quadro 1 – Evolução histórica das abordagens do segundo princípio da termodinâmica

Ano	Nome	Fato
1824	Nicolas Leonard Sadi Carnot	Definiu as limitações de conversão de calor em trabalho – 2º Princípio da Termodinâmica
1840-1849	James P. Joule	Provou a equivalência numérica exata entre trabalho e calor – 1º Princípio da Termodinâmica
1865	Clausius	Introduziu o conceito de entropia
1868	P. G. Tait	Primeiro uso do termo “disponibilidade”
1871	J.C. Maxwell	Usou pela primeira vez o termo “energia disponível” na 1ª edição de seu livro “Theory of Heat”
1873	J. W. Gibbs	Determinação analítica da energia disponível em termos do trabalho de eixo
1875	J.C. Maxwell	Determinação analítica da energia disponível em termos do trabalho total
1889	M. Gouy	Introduziu o conceito de energia utilizável em termos do trabalho de eixo, obtendo uma expressão similar àquela deduzível a partir do trabalho de Gibbs
1898	A. Stodola	Deduziu uma expressão semelhante à de Maxwell para energia disponível e derivou a relação entre a perda de trabalho total e a geração de entropia
1930	G. Darrieus	Definiu o que pode ser considerado como o rendimento “exergético” de uma turbina
1938	F. Bosnjakovic	Propôs um balanço de entropia. Avaliou o grau de perfeição dos processos térmicos, analisando as irreversibilidades. Formulou o slogan: “Guerra contra as irreversibilidades”
1941	J. H. Keenan	Introduziu o conceito de disponibilidade de modo semelhante ao de Gouy e o termo irreversibilidade
1944	M. W. Thring	Introduziu pela primeira vez o termo “virtude da energia”
1950	A. Keller	Avaliou as perdas numa central termelétrica por meio de balanço de entropia
1951	J. H. Keenan	Deduziu uma expressão para relação entre a perda de trabalho de eixo e a geração de entropia
1956	Z. Rant	Utilizou pela primeira vez o termo “exergia”
1961	J. Szargut	Foi o pioneiro na aplicação da análise exergética em processos metalúrgicos
1965	J. Szargut e R. Petela	Publicaram o primeiro livro especificamente sobre exergia e com o título “Exergia”
1969	R. B. Evans	Propôs a “essergia” como a única medida consistente do trabalho termodinâmico
1970	Y. M. Brodyanskyi	Realizou pesquisa bibliográfica sobre exergia até 1970. Foram levantados cerca de 270 trabalhos
1980	J. E. Ahern	Publicou o primeiro livro sobre exergia nos EUA
1986	Göran Wall	Realizou pesquisa bibliográfica sobre exergia, citando 1.443 publicações

Fonte: HADDAD et al. (1999) e CIMBLERIS (1979).

O objetivo deste trabalho foi demonstrar a complementaridade da análise conjugada do primeiro e segundo princípios da termodinâmica na avaliação de impactos ambientais sobre o uso da energia. Também estabelecer o conceito da Exergia como ferramenta importante na análise de energia elétrica em diversos setores.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, constatou-se a importância da busca de índices de avaliação do uso da energia nos princípios da termodinâmica, esclarecendo sua significância.

Primeiro princípio da termodinâmica

O primeiro princípio da termodinâmica estabelece que, durante qualquer ciclo percorrido por um sistema, a integral cíclica do calor é proporcional à integral cíclica do trabalho (VAN WYLEN et al., 1998).

Considerando um sistema que percorre um ciclo mudando de um estado 1 para um estado 2, pode-se representar o primeiro princípio da termodinâmica, também conhecido como *Lei da Conservação da Energia*, por meio da equação 1.

$$Q_1^2 = E_2 - E_1 + W_1^2 \quad (1)$$

em que

Q_1^2 = calor transferido para o sistema durante o processo de transformação, J;

E_2 e E_1 = valor da energia nos estados inicial e final, J; e

W_1^2 = trabalho efetuado durante o processo, J.

A equação 1 estabelece que, quando um sistema passa por mudança de estado, a energia pode cruzar a fronteira como calor ou trabalho. Considerando que a energia do sistema pode variar nas três formas de energia – interna, cinética e potencial –, tem-se que:

$$Q_1^2 = U_2 - U_1 + m \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + mg(z_2 - z_1) + W_1^2 \quad (2)$$

em que

U_2 e U_1 = energia interna no estado 2 e 1, J;

m = massa das partículas, kg;

G = aceleração da gravidade, $m \cdot s^{-2}$;

Z_2 e z_1 = cota das partículas em relação ao referencial, m; e

V_2 e v_1 = velocidade das partículas, $m \cdot s^{-1}$.

A equação 2 indica que a variação líquida da energia do sistema é sempre igual à transferência líquida da energia através da fronteira do sistema, nas formas de calor e trabalho. Se os parâmetros de estado da matéria e o meio ambiente, no sistema, forem iguais, a capacidade de transferência líquida de energia é nula. Portanto, não há realização de trabalho, a não ser que haja trabalho externo. O estado de equilíbrio da matéria e o meio ambiente fornecem o estado de equilíbrio termodinâmico, que constitui o nível de referência, também chamado de nível zero, da disponibilidade de energia.

Enfatizam-se então, pela formulação matemática: i) a existência de uma função energia interna; ii) o princípio da conservação da energia; e iii) a definição de calor como energia em trânsito, em consequência da diferença de temperatura. A conversão de energia, pelo primeiro princípio da termodinâmica, engloba calor, trabalho e qualquer outra forma de energia, e as equações 1 e 2 podem ser reescritas para essas formas de energia. A realização de trabalho e o fluxo de calor são formas de variar a energia interna de um corpo. Portanto, é impossível separar fisicamente ou dividir a energia interna em uma parte mecânica e outra térmica, mas é possível avaliar essas quantidades. A capacidade de realizar trabalho mecânico e utilizá-lo nos processos energéticos é primordial e acaba se tornando medida universal de qualidade, principalmente quando a partir dele se pode chegar, pela conversão, a qualquer outra forma de energia (VAN WYLEN et al., 1998).

Segundo princípio da termodinâmica

Enunciado de Kelvin-Planck - *É impossível construir um dispositivo que opere num ciclo termodinâmico e não produza outros efeitos além do levantamento de um peso e da troca de calor com um único reservatório térmico.* Portanto, é impossível construir um motor térmico que, operando segundo um ciclo, receba uma quantidade de calor de um corpo com alta temperatura e produza igual quantidade de trabalho. Ainda, não se desenvolveu uma máquina com capacidade de converter calor extraído de um reservatório em trabalho sem rejeitar algum calor para outro reservatório com temperatura menor. Daí dizer-se que é impossível construir um motor térmico que tenha eficiência de 100%. O máximo rendimento (η) da transformação de calor em trabalho é dado pela equação 3, ciclo de Carnot, em condições de reversibilidades.

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (3)$$

em que

T_1 e T_2 = temperatura absoluta das fontes fria e quente, K, respectivamente.

Enunciado de Clausius - *É impossível construir um dispositivo que opere segundo um ciclo e não produza outros efeitos além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente.*

O calor não pode, por si só, passar de um corpo com menor temperatura para outro com temperatura maior. Estabelece o enunciado que é também impossível construir um refrigerador que opere sem receber trabalho.

O importante desses enunciados é o fato de eles serem equivalentes. Portanto, a validade de um implica na validade do outro, e a violação de um implica a violação do outro. Como exemplo, cita-se a compressão isotérmica de um gás perfeito que não altera a energia interna do sistema. O fornecimento de trabalho nesse caso, segundo o primeiro princípio da termodinâmica, gera calor, mas não esclarece o que é feito do calor que atravessa a fronteira, energia em trânsito. A análise energética é incapaz de mensurar a

disponibilidade de energia do sistema capaz de gerar trabalho, conforme indicado pela equação 4.

$$\text{Eficiência energética} = \frac{\text{Energia}_{\text{ÚTIL}}}{\text{Energia}_{\text{DISPONÍVEL}}} \quad (4)$$

A energia é transferida para o meio ambiente, mas também ocorre aumento de pressão no gás, que aumenta sucessivamente a disponibilidade energética. O ar comprimido, a temperatura ambiente, expandido gera trabalho e retira do meio ambiente igual quantidade de calor. Portanto, a diferença que torna marcante o conceito de exergia é a parte líquida transformável da energia em qualquer outro tipo de energia (equação 5).

$$\text{Exergia} = \alpha \text{ Energia} \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (5)$$

em que α é igual à fração da energia convertível em trabalho útil.

A definição de exergia em geral é “a capacidade de realizar trabalho”. E esse conceito é fundamentado na relação entre as eficiências de PPT e SPT, por fatores de conversão energia/exergia, conforme indicado pela equação 6 (OLIVEIRA FILHO,1995).

$$\frac{\varepsilon}{\eta} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (6)$$

em que

ε = eficiência exergética;

η = eficiência energética; e

α_1 e α_2 = índices tecnológicos dos equipamentos e processos de conversão de energia.

A equação 6 indica que a análise exergética contém em si a análise energética. Contudo, não se pode falar que a análise exergética depende somente da energética. A eficiência do segundo princípio da termodinâmica depende também dos índices tecnológicos dos equipamentos e processos de

conversão de energia (fração da energia convertível em trabalho útil, conforme a equação 5).

A equação 7 é a usada para calcular a eficiência exergética.

$$\varepsilon = \frac{\text{Trabalho}_{\text{ÚTIL}}}{\text{Trabalho}_{\text{DISPONÍVEL}}} = \frac{\text{Exergia}_{\text{ÚTIL}}}{\text{Exergia}_{\text{DISPONÍVEL}}} \quad (7)$$

Na Figura 1, apresenta-se o esquema da análise de diferentes fontes alimentando diferentes usos finais.

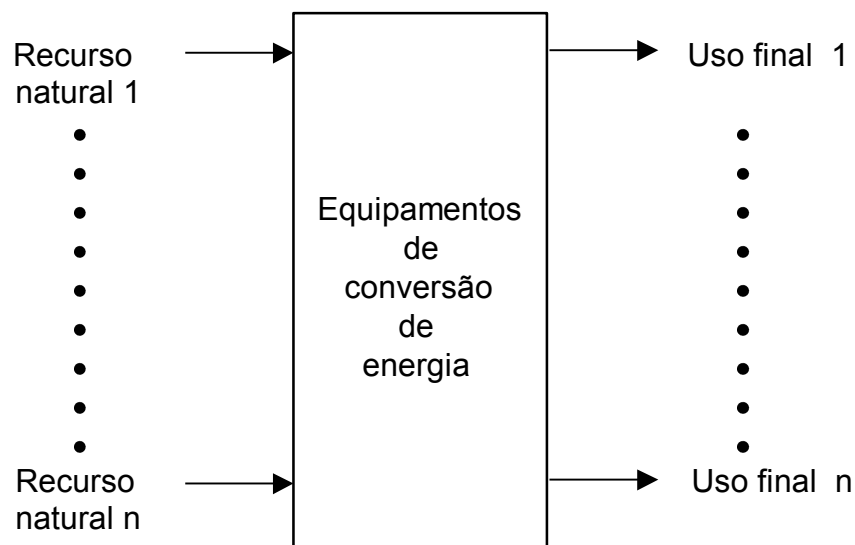


Figura 1 - Esquema da análise de diferentes fontes alimentando diferentes usos finais.

Para a matriz da Figura 1, calcula-se o rendimento de primeiro e segundo princípios da termodinâmica, e assim se associa um índice de rendimentos exergético e energético a cada equipamento de conversão do sistema. Em máquinas térmicas, o rendimento exergético é estabelecido pelo ciclo de Carnot como limite. O valor da irreversibilidade gerada será inversamente proporcional ao rendimento exergético estimado para cada uso final a que se destina a energia requerida; assim, a habilidade da análise exergética representa a degradação ambiental.

Pode-se atribuir tarifa associada aos rendimentos energéticos e exergéticos, segundo ambos os princípios da termodinâmica (COSTA, 2000). O peso atribuído a cada parcela dos rendimentos utilizados será em função da importância que os mecanismos reguladores darão aos usos quantitativo e qualitativo da energia.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, analisou-se a avaliação do rendimento energético pelo primeiro princípio da termodinâmica, que não leva em consideração a “qualidade” da energia utilizada. Essa avaliação indicou, com clareza, os rendimentos dos processos térmicos, mas não diferenciou a qualidade das energias transformadas. Pelo primeiro princípio da termodinâmica, a maior diferença entre as temperaturas das fontes quente e fria fornecerá maior energia ao meio ambiente. O rendimento energético dado pelo primeiro princípio da termodinâmica considera calor e trabalho como quantidades equivalentes. Ao lidar apenas com quantidades, não se considera o fator qualidade. A energia contida no meio ambiente (atmosfera, mares etc.) é praticamente infinita, mas a sua disponibilidade é nula.

O segundo princípio da termodinâmica auxilia na determinação prática da utilização da energia, determinando-se, assim, a qualidade, que pode ser distinguida entre as várias formas de energias pelo rendimento da segunda lei da termodinâmica.

Segundo CIMBLERIS (1979), a capacidade de realizar trabalho é o que interessa ao homem, e é isso que delimita as possibilidades do processo e estabelece os limites. Portanto, define-se o conceito de exergia como a “capacidade máxima de uma substância de executar trabalho em processos, cuja condição final seja o equilíbrio termodinâmico com o meio ambiente”.

Para atingir a capacidade máxima de realizar trabalho, o processo deve ser reversível. Portanto, quanto menos irreversibilidade estiver associada a determinada mudança de estado, maior o trabalho realizado, tornando o processo ideal. Processos naturais espontâneos não conservam a energia disponível, pois são processos irreversíveis, devido aos efeitos dissipativos, como atrito, viscosidade, condução, convecção, radiação, expansão e compressão, combustão, resistência elétrica, histerese, inelasticidade etc. Nos processos de transmissão de calor, as irreversibilidades aumentam com a diminuição do gradiente de temperatura entre as fontes; com isso, diminui-se a qualidade ou a capacidade de realizar trabalho útil na forma de tração.

As irreversibilidades dos processos é que causam as imperfeições: menor irreversibilidade associada a dada mudança de estado, maior o trabalho realizado. O grau de perfeição de sistemas está ligado ao grau de irreversibilidade, em que a exergia não é conservada, mas destruída por degradação. Ressalta-se que a diminuição de exergia não provém somente das perdas de energia, mas também do rebaixamento de sua qualidade.

Quando se avalia um processo pela análise energética, isto é, somente pelo rendimento energético, esse processo poderá ser eficiente em relação à conservação da energia. No entanto, a análise energética não aponta as perdas nas possibilidades de geração de trabalho. O rendimento exergético fornece avaliação mais fiel de sistemas termodinâmicos, por mostrar onde ocorrem as perdas de trabalho disponível, apresentando, assim, os equipamentos e processos menos eficientes.

A observação experimental do calor e do trabalho e as propriedades das substâncias relacionadas são diretamente dependentes do meio ambiente em questão. Considerando o meio ambiente como parte de interesse nos processos energéticos que influenciam a qualidade de vida de uma sociedade, percebe-se que a função exergia é uma propriedade composta da substância e do meio ambiente. Por exemplo, na utilização da energia do ar comprimido, à temperatura ambiente, o gás fornece trabalho, mas requer igual quantidade de calor do meio ambiente.

Como resultado deste trabalho, demonstrou-se o exemplo do chuveiro para aplicação das análises energética e exergética. Consideraram-se a potência do chuveiro ($P=4400$ W), as temperaturas inicial e final da água, conforme mostrado na Figura 2, e a vazão da água (0,05 L/s).

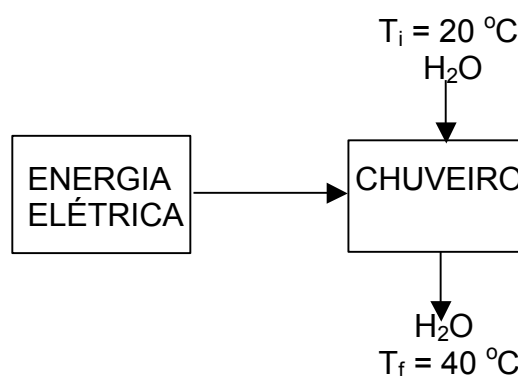


Figura 2 - Esquema de um chuveiro alimentado com energia elétrica.

A eficiência energética (η) de primeira lei foi calculada pela equações 8 e 9, que é a relação entre a energia útil (água aquecida) e a energia fornecida (energia elétrica).

$$\eta = \frac{\text{Energia útil (calor)}}{\text{Energia fornecida (eletricidade)}} = \frac{Q}{W} = \frac{q \rho c_p (T_2 - T_1)}{W} \quad (8)$$

em que

q = vazão de água do chuveiro, L/s;

ρ = massa específica, kg/L;

c_p = calor específico da água, J/kg K;

T_2 e T_1 = temperatura de saída e de entrada da água no chuveiro, K; e

T_1

W = potência do chuveiro utilizado, W.

$$\eta = \frac{Q}{W} = \frac{0,05 \cdot 4,2 \cdot (40 - 20) \cdot 1000}{4400} = 0,95 = 95\% \quad (9)$$

A eficiência exergética entre as duas fontes de calor foi calculada pelo ciclo de Carnot, conforme as equações 10 e 11. O trabalho disponível considerado para energia elétrica foi de 97%, “performance” de motores de alto rendimento elétrico de alta potência. No Quadro 2, mostram-se os rendimentos do primeiro e segundo princípios da termodinâmica.

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = \frac{20}{313} = 0,0638 \cong 6,4\% \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Trabalho}_{\text{ÚTIL}}}{\text{Trabalho}_{\text{DISPONÍVEL}}} = \frac{\eta_{\text{Carnot}} \eta_{\text{AH}_2\text{O}}}{\eta_{\text{EE} \rightarrow \text{Trabalho}}} = \frac{(6,4)(0,95)}{0,97} = 6,27\% \quad (11)$$

em que

η_{Carnot} = eficiência do ciclo de Carnot utilizando as temperaturas de saída e entrada do chuveiro;

$\eta_{\text{AH}_2\text{O}}$ = eficiência do chuveiro elétrico para aquecimento de água; e

$\eta_{\text{EE} \rightarrow \text{Trabalho}}$ = eficiência de motores elétricos de alto rendimento

utilizando a mesma energia elétrica fornecida ao chuveiro para aquecimento d'água.

Quadro 2 – Rendimento dos equipamentos

Equipamento	Rendimento (%)	
	PPT (η)	SPT (ε)
Chuveiro elétrico	95,0	6,27

Os resultados foram bem distintos nas avaliações de rendimento pelo primeiro e segundo princípios da termodinâmica. Tal diferença evidenciou que as análises de eficiência têm grande complementaridade nas avaliações de equipamentos e serviços que utilizam energia para determinado uso final.

1.4. CONCLUSÕES

Acredita-se que o impacto ambiental, o custo, a confiabilidade e a eficiência, um dos principais critérios no planejamento de sistemas de energia elétrica, são fatores que priorizam a qualidade do emprego da energia (OLIVEIRA FILHO, 1995), ou seja, a atribuição do menor preço do kWh para o consumidor mais eficiente, segundo ambos os princípios da termodinâmica, e sobretaxa para os não-eficientes. Se nos sistemas atuais de energia elétrica as tarifas são definidas, baseando-se somente no primeiro princípio da termodinâmica, fica claro que o sistema de tarifação de energia elétrica poderá ser melhorado se também a energia for medida pela qualidade de seu uso final, conforme o segundo princípio da termodinâmica, e não somente pela quantidade.

O desafio do desenvolvimento sustentável e a preocupação ambiental têm gerado mercado cativo de consumidores com consciência ecológica. Produtos diferenciados, que causam menor impacto ambiental, com menor gasto de energia em sua produção, contribuem com o meio ambiente e podem, e devem, ser um novo padrão para a sociedade. O índice de rendimento exergético pode passar a ser parâmetro para as ONG's ambientalistas e defensoras da Terra e comissões de defesa do meio ambiente, visando avaliar

o impacto ambiental de equipamentos. Também, a ABNT poderá certificar produtos e serviços com menor impacto ambiental com a minimização de geração de irreversibilidades.

Considerando-se as perspectivas de uma estratégia de planejamento sustentável, a eficiência de processos poderá ser quantificada pelos dois princípios da termodinâmica: pelas eficiências energética e exergetica.

Como exemplo, cita-se a “Lei Robin Hood” (Lei nº 12.040/95) do Estado de Minas Gerais, que favorece os municípios de menor porte e mais pobres com aumentos na quota-parte do ICMS (GOVERNO DE MINAS GERAIS, 1997). Em troca, esses municípios têm que investir em educação, saúde, agricultura, patrimônio cultural e *preservação do meio ambiente*. Os critérios para preservação do meio ambiente, com menor impacto sobre os recursos naturais, são: a proteção legal das reservas ambientais, o tratamento de lixo e esgotos sanitários etc. Assim, o incentivo às externalidades pode contribuir para a melhor eficiência da utilização dos recursos naturais com menor impacto ambiental.

1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENDA 21. <http://www.rolac.unep.mx/agenda21> – Data da consulta: Novembro/2000.

ALMEIDA NETO, J. F. **Análise exergetica do ciclo do combustível nuclear – Etapa da mineração até a obtenção do concentrado de urânio (“Yellow Cake”)**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1999. 132 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Geais, 1999.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. <http://www.aneel.gov.br>. Brasília, DF. Data da consulta: Dezembro/2000.

CIMBLERIS, B. **Uma introdução à energia disponível e conceitos correlatos**. Belo Horizonte: UFMG, 1979. 116p. (Apostila do curso de pós-graduação em engenharia térmica).

CORDEIRO, R. C. **Da riqueza das nações à ciência das riquezas**. São Paulo: Ed. Loyola, 1995. 230p.

- COSTA, J. M., OLIVEIRA FILHO, D. Tarifas exergéticas horo-sazonais. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3 - AGRENER 2000. **Anais...** Campinas, SP. (CD-ROM).
- GOVERNO DE MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **ICMS ecológico – Coletânea de normas.** Belo Horizonte, julho/1997. 51p.
- HADDAD, J., AGUIAR, S. C., MARTINS, A. R. S. **Eficiência energética: integrando usos e reduzindo desperdícios.** Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; Agência Nacional do Petróleo – ANP, 1999. 432p.
- JANNUZZI, G. M., SWISHER, J. N. P. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis.** Campinas, SP: Ed. Autores Associados, 1997. 246p.
- LEITE, A. D. O desenvolvimento do setor energético brasileiro. In: LEITE, A. D. **Energia e desenvolvimento sustentável.** Rio de Janeiro: Instituto de Economia – UFRJ, 1998. p.13-21.
- OLIVEIRA FILHO, D. **Electric energy system planning and the second principle of thermodynamics.** Quebec, 1995, 199p. Thesis (Doutorado) – McGill University, Montreal, 1995.
- OLIVEIRA FILHO, D., TANABE, C. S., COSTA, J. M. Considerações da análise exergética em tarifas de energia elétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n.1, p. 114-119, 2000.
- PENNA, C. G. **O estado do planeta – Sociedade de consumo e degradação ambiental.** Rio de Janeiro: Ed. Record, 1999. 252p.
- PNUMA, 2000. <http://www.rolac.unep.mx> – Data da consulta: Dezembro/2000.
- VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica.** 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1998. 537p.
- VIEIRA, P. F., RIBEIRO, M. A., FRANCO, R. M., CORDEIRO, R. C. **Desenvolvimento e meio ambiente no Brasil – A contribuição de Ignacy Sachs.** Porto Alegre: Ed. Pallotti; Florianópolis: Aped, 1998. 448p.

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES DA ANÁLISE EXERGÉTICA EM TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1. INTRODUÇÃO

Na expectativa da virada de século e com a estabilização econômica, os diversos setores da economia brasileira viram-se forçados a reduzir seus custos de produção, devido à acirrada competitividade que se instalou depois da abertura de mercado e à luta pela própria sobrevivência, havendo, com isso, considerável incremento na demanda de energia elétrica. O Brasil, tendo atravessado longa crise econômica, deixou de investir maciçamente em infraestrutura no ritmo que seria necessário, e, hoje, o sistema elétrico nacional encontra-se com déficit, em termos de quantidade de energia oferecida, com riscos até de blecaute nos horários de pico de consumo, por não conseguir ofertar energia suficiente.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia do Brasil (BRASIL, 1996), seria necessário, até o ano de 2015, quase que triplicar a oferta de energia. Considerando o crescimento econômico e populacional projetado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE – até aquele ano, seriam

necessários, aproximadamente, 200 bilhões de reais em investimentos (IBGE, 1995).

Logicamente, um problema como esse não poderá ser solucionado com apenas uma medida, é preciso um conjunto de medidas que planejem o sistema elétrico de forma integrada. O planejamento integrado prevê ações tanto do lado do suprimento da demanda quanto do lado da sua utilização. O gerenciamento do lado da demanda (GLD) acarreta, em muitas situações, economia superior às ações do lado do suprimento.

Na maioria absoluta dos casos, a melhoria da eficiência e a utilização racional da energia são, em certos processos e em termos econômicos, menos onerosas que a produção de novas fontes energéticas, significando que os custos dos programas para racionalização de energia são, muitas vezes, menores que os custos para aumento da geração de eletricidade.

Existe, atualmente, outro conceito de avaliação do uso da energia, que leva em conta critérios não somente tradicionais como o da quantidade de energia, mas, também, o conceito da qualidade dessa energia, ou seja, a exergia.

A eficiência de um processo qualquer era tradicionalmente medida somente pelo Primeiro Princípio da Termodinâmica (PPT), em que se consideram apenas níveis quantitativos, ou seja, a eficiência energética é dada pela relação entre a energia de entrada e a energia de uso final. Considerando o Segundo Princípio da Termodinâmica (SPT), a eficiência de um processo é a possibilidade de realização de trabalho, isto é, a eficiência exergética é dada pela relação entre a energia útil e a realização de trabalho possível, por meio dessa energia.

O setor de energia elétrica tem ignorado, virtualmente, considerações exergéticas no planejamento de sistemas, devido, principalmente, à falta de familiaridade com o SPT e às implicações dele decorrentes (OLIVEIRA FILHO e GALIANA, 1995). Acredita-se que esse fato ocorre, em parte, por causa da dificuldade de se aplicá-lo em considerações exergéticas para o planejamento integrado de recursos energéticos.

Modificações na utilização final da energia, que visem ao aumento da eficiência exergética, e também modificações no atual sistema de tarifas de energia elétrica podem alterar, de forma significativa, o *modus operandi* do planejamento de sistemas de energia.

O Brasil, detentor de grandes áreas agricultáveis, poderia ser uma potência agrícola mundial se contasse com custos produtivos e incentivos adequados. Na questão dos custos para produtos agrícolas nobres exportáveis, grande parcela advém das contas de energia elétrica, uma vez que esse tipo de cultura necessita de irrigação; também para a produção agrícola em certas áreas, como o norte de Minas Gerais e, praticamente, todo o Nordeste brasileiro, a irrigação é de vital importância para que haja alguma produção, devido aos baixos níveis de precipitação.

Sendo a irrigação atividade com eficiência tanto quantitativa quanto qualitativamente alta, poderia ser oferecida uma tarifa de energia elétrica mais econômica para esse setor. Para que tal situação ocorra, é necessária uma análise da matriz energética brasileira, além de se conhecer e analisar cada um dos processos de utilização de fontes energéticas não somente da energia elétrica, mas também de outras fontes, bem como propor opções justas, do ponto de vista exergético, para adequada utilização de alguns dos recursos disponíveis, e, ainda, de alternativa de cálculo de tarifas exergéticas para os diversos setores econômicos.

A situação atual

O Brasil consumiu, no ano de 1995, cerca de 244.000 GWh (FGV, 1996). Considerando quatro cenários de crescimentos econômico e populacional, para o ano 2015 seriam necessários entre 700 e 1.500 TWh de energia elétrica (BRASIL, 1996); portanto, até o ano de 2015 seria necessário, no mínimo, triplicar a oferta de energia dos níveis atuais.

Usinas hidrelétricas atualmente em construção, como a Usina de Nova Ponte, no Triângulo Mineiro, com capacidade de 510 MW e custo aproximado de 1 bilhão de dólares (CEMIG, 1996a), têm como média de custo aproximadamente US\$2.000,00/kW. Supondo que cada kW seja capaz de gerar, durante um ano, aproximadamente 5.000 kWh, então, para gerar 700 TWh, seriam necessários 140 GW e aproximadamente 270 usinas, como a de Nova Ponte, ou seja, um investimento de mais ou menos US\$270 bilhões até o ano 2015.

A certeza de que o País não dispõe desses recursos faz com que se procurem outras maneiras de solucionar e, ou, amenizar o problema. As

necessidades energéticas poderiam ser utilizadas mais racionalmente, de modo que se obtenha maior aproveitamento dessa energia.

Eficiência como critério de planejamento

Consideram-se três perspectivas para a implementação de uma estratégia de planejamento: a das concessionárias, a dos consumidores e a da sociedade.

Do ponto de vista das concessionárias de energia elétrica, o objetivo principal é melhorar a “performance” financeira, incluindo o uso máximo possível das capacidades de geração e transmissão, a prorrogação do prazo dos planos de expansão para geração e transmissão e a redução da dependência sobre combustíveis críticos; já do ponto de vista dos consumidores, o principal foco de interesse são o valor da energia (tarifa) e a confiabilidade do fornecimento.

A sociedade está interessada, basicamente, no desenvolvimento macroeconômico (ex. criação de empregos, desenvolvimento da nação e aumento na arrecadação de impostos), regulação das tarifas e índices de confiabilidade, objetivos estratégicos da nação (ex. redução da dependência de combustível) e minimização de danos ambientais (emissões para a atmosfera, uso da terra, deposição de rejeitos) (WANG e DeLUCHI, 1992; LEE e DARANI, 1995; SIOSHANSI, 1995).

Segundo OLIVEIRA FILHO (1995) o planejamento de sistemas de energia elétrica no longo prazo é realizado de acordo com alguns critérios básicos inter-relacionados, como: custo, confiabilidade, impacto ambiental e eficiência. O peso que se atribui a cada um desses critérios básicos depende do contexto histórico, variando com o passar dos anos.

Termodinamicamente, a eficiência de um processo pode ser quantificada por duas maneiras: eficiência energética e eficiência exergética, em que a primeira é proveniente do PPT, enquanto a eficiência exergética se origina do SPT.

Nos sistemas de energia elétrica, a eficiência é normalmente definida de acordo com o PPT e, no planejamento de sistemas de energia elétrica, pode ser ampliada para, também, incluir a interpretação de acordo com o SPT (OLIVEIRA FILHO, 1995).

A eficiência exergética diferencia a qualidade da energia, ou seja, o seu emprego no uso final com menor degradação da energia. O termo exergia expressa a capacidade da energia em realizar trabalho. Em processos de transformação de energia, a capacidade de realizar trabalho diminui; portanto, à medida que é transformada a energia, implica geração de irreversibilidade (BRZUSTOWSKI e GOLEM, 1977).

Para ilustrar quanto esses dois tipos de medida de eficiência, eficiência energética e eficiência exergética são diferentes, é dado este exemplo: Num processo em que se faz o aquecimento de água em baixa temperatura (chuveiro elétrico), a eficiência energética é de aproximadamente 90%, enquanto a exergética não ultrapassa 7%; isso se deve ao fato de que, com a água aquecida em baixa temperatura (de 20 para 40 °C), é muito pequena a possibilidade de realização de trabalho. Este valor não implica em deixar de prover o serviço, ou melhor, não se está querendo deixar de aquecer a água ou qualquer outro processo em que a eficiência exergética seja baixa. O que se propõe é que haja mudança de uso final da energia por outras fontes compatíveis de energia. Por exemplo, para se aquecer a água não se deveria utilizar energia de alta qualidade como a energia elétrica, pois o aquecimento de água é um processo com baixo rendimento exergético. O problema, porém, seria melhorado se fosse utilizado o gás natural, ou até o liquefeito de petróleo, em cujos processos o rendimento exergético seria elevado a níveis bem maiores que aqueles, que têm como fonte a energia elétrica.

No caso de motores eficientes de 10 kW, a eficiência energética pode ser considerada de cerca de 87% e a exergética, de 92%, portanto, enquanto as eficiências da análise via PPT são de 80 e 87% (valores da mesma ordem de grandeza), via SPT são de 7 e 92% (valores bem distintos). Este constitui um exemplo claro da alta discrepância possível entre as eficiências energética e exergética e da significativa perda irreversível da exergia até mesmo em processo que é 100% energeticamente eficiente, como no caso do chuveiro elétrico (KRENZ, 1980; MCGOVERN, 1990 a e b; KLENKE, 1991; OLIVEIRA FILHO e GALIANA, 1995).

O objetivo deste trabalho foi avaliar as implicações da utilização da análise exergética nas tarifas de energia elétrica.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

Cálculo de tarifas de energia elétrica, considerando-se a eficiência exergética

Para calcular tarifas exergéticas em função do planejamento do uso da energia elétrica, considerou-se que:

– O total a ser arrecadado pelas concessionárias foi considerado constante.

– O total a ser consumido por setor econômico também foi considerado constante. Observe-se que essa hipótese pode não se verificar em algumas situações, haja vista a possibilidade de o mercado se comportar de outra forma.

– O valor da tarifa exergética calculada foi inversamente proporcional ao rendimento exergético estimado.

– O rendimento exergético para cada setor foi estimado por meio do rendimento para cada um dos usos finais de cada atividade considerada.

– Os rendimentos exergéticos de cada um dos usos finais foram diferenciados para cada um dos setores econômicos, a fim de representarem as particularidades de cada um deles.

A equação a seguir, citada por TANABE et al. (1997), é utilizada para calcular a tarifa exergética para o setor econômico i:

$$T_i = \frac{T_m \sum_{j=1}^n C_j}{\varepsilon_i \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{\varepsilon_j}} \quad (1)$$

em que

T_m = tarifa média de todos os setores econômicos em vigor, R\$.MWh⁻¹;

ε_i = eficiência exergética do setor i, %;

C_j = consumo do setor j expresso como fração do consumo total, MWh; e

ε_j = eficiência exergética do setor econômico j, %.

Note-se que, para elaboração da equação 1, foi suposto que a quantidade a ser cobrada pela concessionária de energia seria a mesma depois da implementação das tarifas exergeticas.

Cálculo da eficiência exergetica média por setor

A eficiência exergetica média dos setores foi calculada segundo a equação 2,

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{uj} C_j \quad (2)$$

em que

- ε_i = Eficiência exergetica do setor i, %;
- ε_{uj} = Eficiência exergetica do uso final para cada setor considerado, %;
- e
- C_j = Consumo energético em uso final, MWh.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1, apresenta-se a estimativa do consumo de energia elétrica nos diversos setores econômicos de Minas Gerais. Consideram-se três usos finais principais da energia elétrica: aquecimento, tração e iluminação. Percebe-se, nesse quadro, que os setores industrial e residencial respondem por cerca de 85% do total consumido.

Quadro 1 – Estimativas do consumo de energia elétrica final dos setores econômicos em Minas Gerais

Setor econômico	Consumo energético em uso final (%)			Total %	Consumo energético % kWh
	AQU	TRA	ILU		
Irrigação		100		100	1
Comercial	20	30	50	100	14

Industrial	10	75	15	100	60
Residencial	45	35	20	100	25

AQU = aquecimento, TRA = tração e ILU = iluminação.

No Quadro 2, apresentam-se eficiências exergéticas reais para os usos finais nos setores econômicos do Estado de Minas Gerais, a eficiência exergética média e a tarifa média por setor. Foi considerada uma tarifa elétrica média de R\$76,02/MWh (CEMIG, 1996b).

Quadro 2 – Eficiências exergéticas para os usos finais dos setores econômicos em Minas Gerais

Setor econômico	Eficiência exergética média de uso final (%)			Eficiência exergética média do setor %	Tarifa exergética (*) R\$/MWh
	AQU	TRA	ILU		
Irrigação		80		80	46,71
Comercial	19	70	8	29	128,87
Industrial	26	90	8	71	52,64
Residencial	8	60	6	26	143,74

(*) Considerando-se uma tarifa de energia elétrica média de R\$76,02/MWh para o Estado de Minas Gerais.

AQU = aquecimento, TRA = tração e ILU = iluminação

No Quadro 3 são apresentados os valores para as tarifas médias praticadas pela CEMIG no ano de 1995 (CEMIG, 1996a) e os valores para as tarifas exergéticas, calculadas a partir das informações contidas nos Quadros 1 e 2.

Quadro 3 – Comparação entre tarifas exergéticas calculadas e tarifas elétricas praticadas

Setor econômico	Tarifa exergética R\$/MWh	Tarifa praticada R\$/MWh
Irrigação	46,71	86,60
Industrial	52,64	58,70
Comercial	128,87	138,84
Residencial	143,74	113,99

Nota-se, no Quadro 3, que a tarifa exergética calculada para irrigação foi a mais baixa, devido à sua alta eficiência exergética. Propõe-se, então, que o setor industrial deva, como um todo, ser taxado por uma tarifa relativamente baixa, porém o setor residencial é exergeticamente menos racional em razão, principalmente, da baixa eficiência do processo de aquecimento de água, sendo, assim, desfavorecido com uma tarifa mais elevada. Observa-se que, nesse caso, o setor residencial é o responsável pela geração de recursos para que outros setores tenham tarifa de energia elétrica menor (Quadro 4).

A diferença de arrecadação e os setores econômicos considerados estão expressos no Quadro 4, em que os de irrigação, comercial e industrial, seriam responsáveis por diminuição na arrecadação de cerca de 20, 140 e 25 milhões de reais por ano, respectivamente; enquanto isso, o setor residencial seria responsável por aumento na arrecadação, equivalente à soma do decréscimo dos outros setores, ou seja, 185 milhões de reais por ano.

Quadro 4 – Diferença na arrecadação, por setor econômico, causada pela aplicação de tarifas exergéticas

Setor econômico	Diferença na arrecadação * Mil R\$/setor/ano
Irrigação	-20.000
Industrial	-140.000
Comercial	-25.000
Residencial	+185.000

(*) Nota-se que o somatório das diferenças é nulo, pois a proposta é de que o total arrecadado antes e depois da aplicação das tarifas exergéticas seja o mesmo.

É importante ressaltar que o nível de especificidade das tarifas será função de uma série de fatores como:

- da disponibilidade de informações sobre o uso final da energia por setor/atividade;
- de razões políticas;
- do nível de conscientização das diversas esferas de decisão, como concessionárias, governo e sociedade; e
- tecnologia disponível para aplicação das tarifas exergéticas para uso final.

Para elaboração das tarifas exergéticas, considerou-se que a arrecadação seria a mesma antes e depois da implantação dessas tarifas. Isso não é rigorosamente verdadeiro, uma vez que, após a implantação da tarifa, setores menos eficientes do ponto de vista exergético tenderiam a substituir equipamentos com alto gasto de energia, por exemplo, a substituição dos chuveiros elétricos por coletores solares, em alguns casos. Dessa maneira, a arrecadação, que anteriormente foi suposta constante, iria gradativamente diminuir. Assim, à medida que os setores econômicos tivessem aumento da eficiência exergética, seriam necessárias avaliações periódicas das tarifas, para que estas continuem a refletir a eficiência exergética do setor. Devem ser considerados, também, o grau de detalhamento e a universalidade desejada, a facilidade e os custos para implantação da tarifa, além da constante atualização da eficiência exergética do mecanismo de conversão de energia considerado.

Considerando que atualmente no setor residencial existem diversos degraus tarifários e que, quanto menor o consumo, menor o valor pago por kWh, conclui-se que existe uma espécie de compensação para consumidores de classes econômicas mais baixas. Dessa forma, quando se observa o valor da tarifa exergética para o setor residencial descrito no Quadro 3, verifica-se, a princípio, uma distorção dos fatos, na qual todos os consumidores do setor residencial pagariam tarifa muito elevada; na realidade, o valor de R\$143,74/MWh representa um valor médio a ser pago pelo setor, não significando que todos os consumidores pagariam o mesmo valor pela energia consumida.

Para que essa injustiça não ocorra, calculou-se, para cada faixa de consumo do setor residencial, o valor para a energia consumida. No Quadro 5,

apresentam-se os valores para a tarifa exergética em cada faixa de consumo no setor residencial, obtidos mediante valores hipotéticos de consumo e de consumidores. No referido quadro, demonstra-se que, independentemente do número de consumidores em cada faixa, poderão haver tarifas socialmente justas para consumidores que, em hipótese, consomem menos energia e, conseqüentemente, são economicamente menos favorecidos. Dessa forma, mesmo com tarifas exergéticas, poderia haver favorecimento de determinados consumidores em detrimento de outros, a exemplo do que é realizado atualmente no setor residencial.

Quadro 5 – Valores estimados para tarifas exergéticas no setor residencial por faixa de consumo

Faixa de consumo kWh	Número dos consumidores %	Tarifa exergética aplicada R\$/MWh
0 a 30	27	51,34
31 a 100	17	118,93
101 a 180	25	155,17
Acima de 180	31	228,61
Média ponderada		143,74

No Brasil, ainda é tímida a criação de outros tipos de tarifa de energia elétrica, em comparação com outros países. Pode-se citar, como exemplo, tarifas em que são oferecidos níveis de confiabilidade menores e troca de uma tarifa mais atrativa em termos econômicos, ou seja, em troca de tarifas mais baratas, em que a concessionária poderia, por exemplo, deixar de fornecer energia quando houvesse pico de demanda; logicamente, existem algumas regras a serem seguidas, como aviso prévio do corte de energia, número máximo de horas seguido de corte etc. Esse tipo de tarifação indica que, num mesmo sistema, as concessionárias de energia elétrica podem oferecer vários tipos de tarifa – normal, tarifa horo-sazonal, exergética, amarelas etc. –, que podem coexistir num mesmo sistema, cujos programas de gerenciamento possam, pelo lado da demanda, ser aplicados via tarifas de energia elétrica.

2.4. CONCLUSÕES

Existe a necessidade de implantação de outros tipos de tarifa de energia elétrica, além das já existentes, no Brasil. Seria de grande interesse, para o aumento da eficiência exergética, principalmente no setor residencial, em que houvesse incentivo para a substituição parcial dos chuveiros elétricos por outros equipamentos que não utilizem energia elétrica para aquecer a água. Setores como o de irrigação, que praticamente só utilizam energia sob a forma de tração, devem ser de alguma forma compensados.

A aplicação da análise exergética na formulação de tarifas de energia elétrica nos setores econômicos de Minas Gerais indicou que os setores mais eficientes, segundo a ótica exergética, teriam tarifas menores, como do setor industrial e a atividade de irrigação. O contrário também se verificou, em que setores menos eficientes teriam maiores tarifas de energia elétrica. Haverá a tendência da utilização de tecnologias eficientes, segundo o princípio da termodinâmica, se tarifas exergéticas forem adotadas. Enquadra-se, aqui, o uso final da energia elétrica para aquecimento em baixas temperaturas, já que há outros possíveis substitutos energéticos, a serem analisados, para gerar o mesmo serviço.

Este trabalho evidenciou que os atuais subsídios às tarifas residenciais de energia elétrica não precisam ser extintos, apenas adaptados à nova perspectiva de construção de tarifas que levem em consideração a análise exergética.

Outros fatores, como a análise econômica e energética, e aspectos sociais e políticos devem influenciar, juntamente com a análise exergética, a formulação de tarifas de energia elétrica.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério das Minas e Energia – MME. **Balanco energético nacional**. Brasília, DF, 1996. 150p.

BRZUSTOWSKI, T. A., GOLEM, P. J. Second-law analysis of energy processes – Part I: Exergy – An introduction. **Transactions of the Society for Mechanical Engineers**, v. 4, n. 4, 1977.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GÉRIAS – CEMIG. **Acompanhamento de preços de energéticos**. Belo Horizonte: Departamento de Análises e Informações em Energia, 1996a. 3p.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GÉRIAS – CEMIG. **Boletim Estatístico, 1995**. Belo Horizonte: Departamento de Integração do Mercado e do Planejamento da Expansão, 1996b. 88p.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – FGV. **Conjuntura econômica**. Rio de Janeiro, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Anuário Estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1995. v. 55.

JANNUZZI, G. M., SWISHER, J. N. P. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis**. Campinas, SP: Ed. Autores Associados, 1997. 246p.

KLENKE, W. Useful work, exergy and thermodynamic potentials. **International Chemical Engineering**. [s.l.], Germany, v. 31, n. 4, p. 654–660, 1991.

KRENZ, J. H. **Energy for opulence to sufficiency**. [s.l.]: Ed. Praeger, 1980.

LEE, H., DARANI, N. **Electricity restructuring and the environment**. Harvard: Center for Science & International Affairs, Environment and Natural Resource Program, Harvard, University. 1995. 123p.

McGOVERN, J. A. Exergy analysis: a different perspective on energy. I. The concept of exergy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, [s.l.], v. 24, p. 253–262, 1990a.

McGOVERN, J. A. Exergy analysis: a different perspective on energy. II. Rational efficiency and some examples of exergy analysis. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, [s.l.], v. 24, p. 263–268, 1990b.

OLIVEIRA FILHO, D. **Electric energy system planning and the second principle of thermodynamics**. Quebec, 1995, 199p Thesis (Doutorado). McGill University, Montreal, 1995.

OLIVEIRA FILHO, D., GALIANA, F. D. A model for the planning of electric energy systems including exergetic considerations. In: POWER INDUSTRY

COMPUTER APPLICATIONS CONFERENCE – **Institute of electrical and electronic engineers**. Salt Lake City, Utah, [s. ed.], 1995. p.6.

SIOHANSI, F. P. Viewpoint: demand side management. **Energy Policy**, Great Britain, v. 23, n. 2, p. 111–114, 1995.

TANABE, C. S., OLIVEIRA FILHO, D., CORRÊA, G. A. Tarifas exergéticas para irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27 – CONBEA, 1997. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba/SBEA CD-ROM.

WANG, Q., DeLUCCHI, M. A. Impacts of electric vehicles on primary energy consumption and petroleum displacement. **Energy: International Journal**, Great Britain, v. 17, n. 4, p. 351–366, 1992.

CAPÍTULO 3

TARIFAS EXERGÉTICAS HORO-SAZONAIS

3.1. INTRODUÇÃO

O conhecimento dos padrões de consumo de energia elétrica no País é de fundamental importância para a elaboração de programas de conservação de energia e o planejamento estratégico do uso dos recursos naturais. A segmentação do consumo de energia por setores e por uso final permite melhores projeções acerca do consumo futuro.

A base do modelo hoje utilizado pelas concessionárias, para cobrança de tarifas, é essencialmente a projeção de fatores como “preços” de energia e “renda”, bem como suas relações com a demanda de energia elétrica pelo comportamento do consumidor, a legislação e os novos usos de energia. Países mais industrializados têm incorporado a esse modelo novos parâmetros para explicar a evolução do consumo de energia. Os fatores considerados são o nível da atividade (o serviço de energia) e a intensidade de energia (o uso da energia por unidade de serviço). O nível da atividade depende da população, da renda e da produção econômica, ao passo que a intensidade de energia é dependente da eficiência energética nos aspectos operacionais e tecnológicos.

Em tempos de crise é que a busca de soluções e um novo enfoque surgem com mais intensidade para suprir as necessidades de energia da população de modo mais barato e com menor impacto ambiental. As crises do petróleo, em 1973 e 1979, fizeram surgir o Planejamento Integrado dos Recursos (PIR), que é o desenvolvimento combinado da oferta de eletricidade e opções de Gerenciamento do Lado da Demanda (GLD), para fornecer serviços de energia a custo mínimo, incluindo custos sociais e ambientais (JANNUZZI e SWISHER, 1997).

Com as diversas formas de pressão por parte da sociedade, movimentos e órgãos não-governamentais, as avaliações de impactos ambientais e de conservação de energia estão progressivamente sendo incluídas no processo de planejamento de energia. Assim, evolui-se em direção a fatores tecnológicos com eficiência energética, gestão de carga no lado da demanda, fontes de geração descentralizadas, produtores independentes e custos ambientais e sociais nas avaliações de seleção das alternativas de potências de energia.

Programas de incentivo ao uso de energia solar, substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes, uso de motores de alto rendimento etc. são iniciativas que procuram ofertar energia (MWh) para o sistema com menor custo. O MWh economizado nessas opções tem custo inferior ao do MWh gerado (PINHEIRO, 1989).

As concessionárias alegam que as barreiras legais, financeiras e tecnológicas não estimulam a política de mudanças eficientes. Ao contrário, há o encorajamento, por parte das concessionárias, para a compra do MWh excedente, gerando receita extra, e não a implementação de medidas de conservação de energia por parte do consumidor. No entanto, com a abertura do mercado de energia elétrica a produtores independentes, percebe-se um avanço por parte da concessionária em investir parte de sua renda em programas de conservação e introdução de alternativas eficientes de energia. Devido à concorrência, ainda pequena, mas crescente, a importância da disponibilidade de energia na hora e no tempo requerido pelos consumidores torna-se prioridade.

Exergia

A palavra exergia foi introduzida pelo cientista Z. Rant, em 1956, em uma publicação que surgiu de seu trabalho com energia consumida em processos industriais (ALMEIDA NETO, 1999). A avaliação exergética baseia-se no primeiro e no segundo princípio da termodinâmica, que valorizam o conceito de qualidade do uso da energia, diferentemente dos critérios tradicionais de medir a eficiência, os quais se baseiam somente no primeiro princípio da termodinâmica (McGOVERN, 1990). O primeiro princípio da termodinâmica diz que a energia se conserva, mas nada diz a respeito da qualidade dessa energia.

O setor de energia elétrica tem ignorado a avaliação exergética no planejamento de sistemas. Acredita-se que isso ocorre devido à falta de familiaridade com o segundo princípio da termodinâmica e às implicações decorrentes para uma avaliação precisa do sistema elétrico (OLIVEIRA FILHO, 1995). Ressalta-se que há variáveis e alguns fatores que não se encontram totalmente disponíveis no mercado e precisam ser estudados. São eles: fatores tecnológicos de conversão da energia, informações sobre o uso final da energia, razões políticas, nível de conscientização das diversas esferas de decisão da sociedade, tecnologia disponível, equipamentos eficientes, hábitos de consumo etc.

Centrado no ponto de vista do segundo princípio da termodinâmica, que considera a qualidade da energia consumida e não somente as quantidades envolvidas em processos e fontes, é que se realiza a análise exergética.

A análise exergética pode contribuir para a melhoria da utilização dos recursos naturais, pois, ao quantificar a degradação do uso da energia, permite parametrizar a qualidade do uso da energia (OLIVEIRA FILHO et al., 2000). Menor degradação de energia significa, diretamente, menor impacto ambiental e, conseqüentemente, maior disponibilidade de recursos do lado da oferta. Essa análise poderá criar sistema de incentivos financeiros às externalidades, o que evitaria a expansão da oferta e encorajaria as concessionárias, a sociedade e os consumidores a usar alternativas eficientes num programa de conservação de energia.

Externalidades

As externalidades são aquelas dimensões ambientais (ar, água, terra etc.) normalmente não consideradas nas avaliações econômico-financeiras tradicionais. Poderão ser expressas por meio de procedimentos qualitativos ou por custos evitados com minimização de impactos ambientais e nos recursos naturais. Assim, o ar que se respira é um exemplo. Quanto menor o nível de poluição, menor será o trabalho necessário para produzi-lo com as características aceitáveis à vida, já que é elemento indispensável à sobrevivência dos seres vivos. Em países europeus tecnologicamente industrializados, as externalidades (referentes ao ar e à água) são contabilizadas, em alguns casos, na forma de impostos sobre: emissões decorrentes do uso de combustíveis fósseis pela indústria e o uso da água pelas concessionárias de energia elétrica.

Tarifas para o uso da água

Em 1997, foi criada a Lei das Águas, como meta da agenda do governo para disciplinar o uso da água. Em 1999, O Ministério do Meio Ambiente apresentou dois projetos para a proposta de criação da Agência Nacional de Águas (ANA) e de regulamentação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (JULIÃO, 1999). Nesses projetos, os grandes consumidores de água, como usinas hidrelétricas, empresas de saneamento e de irrigação, terão que pagar pela utilização das águas dos rios. A cobrança será feita para que as empresas utilizem de forma mais racional e eficaz os recursos hídricos. As tarifas seriam variáveis e progressivas, de acordo com cada consumidor. Quem racionalizar o uso da água e adotar medidas para o tratamento das bacias pagará menos. Quem poluir mais terá que pagar mais, até que fique tão caro que a empresa seja obrigada a tratar seus poluentes antes de jogá-los nos rios.

Lei Robin Hood

Outro exemplo de experiência positiva, visando à educação no trato com o meio ambiente, é a “Lei Robin Hood” (Lei 12.040/95), do Estado de

Minas Gerais (GOVERNO DE MINAS GERAIS, 1997). Essa medida favorece os municípios ecologicamente corretos com maior arrecadação na quota-parte do ICMS. Em troca, esses municípios teriam que investir em educação, saúde, agricultura, patrimônio cultural e preservação do meio ambiente. Os critérios para preservação do meio ambiente caracterizam-se pela proteção legal das reservas ambientais e pelo tratamento de lixo e esgotos sanitários. Assim, o incentivo às externalidades pode contribuir para melhorar a eficiência da utilização dos recursos naturais com menor impacto ambiental.

A sazonalidade das afluências naturais do sistema elétrico brasileiro, em sua totalidade de origem hidráulica, e a curva de carga nacional, com grandes oscilações no período do dia, trouxeram ao consumidor a tarifa horo-sazonal. A aplicação dessa tarifa com diferentes taxas de energia, tanto horárias quanto sazonais, forçou o deslocamento de parte da carga, em horários de pico, para horários em que o sistema elétrico estivesse ocioso, contendo, assim, o crescimento da curva de carga e retardando futuros investimentos na geração de energia para atender a horários, do dia e do ano, de maior demanda.

A tarifa horo-sazonal (THS) contempla a cobrança de taxas para o consumo e a demanda, mas não contempla em si nenhuma estratégia de tarifação para formação e educação do consumidor, quanto aos aspectos sociais e ambientais (CEMIG, 1996). Portanto, a THS é uma tarifa punitiva de interesse apenas comercial.

O objetivo deste trabalho foi apresentar metodologia de tarifação, tarifa exergética horo-sazonal, para o uso final dado à energia elétrica em alguns setores da economia mineira, metodologia baseada nas leis de mercado e no segundo princípio da termodinâmica, que qualifica a energia.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

A proposta da tarifa exergética horo-sazonal (XHS) proporciona a uniformização da curva de carga, o aumento do fator de carga e um novo conceito sobre taxação com aproveitamento da energia disponível em seu uso final. Portanto, um direcionamento da energia na fonte para seu melhor uso

final, e não simplesmente deslocando o uso da energia para horários e épocas do ano de maior disponibilidade de recursos energéticos.

Com base na mesma estrutura da tarifa horo-sazonal, a tarifa exergética horo-sazonal é composta, além do preço relativo à demanda de potência (MW) e ao consumo de energia (MWh), do preço relativo ao fator “uso final” dado à energia. Conseqüentemente, a XHS induz a adequação do recurso energético tecnologicamente disponível para atender à mesma necessidade do consumidor, sem novos investimentos para aumentar a disponibilidade do energético tradicionalmente usado, o que força um deslocamento de hábitos do consumidor para o recurso energético mais atrativo para atender ao seu uso final, gerando racionalização do uso dos recursos energéticos. Como exemplo, cita-se o uso de aquecedores solares ou a gás para liberar a energia elétrica consumida pelos chuveiros.

O fator uso final é representado pela forma que se emprega a energia: tração, calor, iluminação e outras, conforme dados disponíveis (PROCEL, 2000). Basicamente, esses parâmetros são os empregados na comparação dos rendimentos energético e exergético.

A proposta da tarifa XHS é baseada na tarifação diferenciada do uso da energia elétrica para dois usos finais: a) produção de calor e b) outros usos.

A tarifa XHS é implementada de acordo com os seguintes segmentos de cobrança: demanda e consumo nos horários de ponta e fora de ponta, períodos secos e úmidos do ano e uso final dado à energia: “calor x outros usos”.

O faturamento total (F_t) é apresentado pela equação 1.

$$F_t = \xi_{dP} D_{fatP} T_{dP} + \xi_{dFP} D_{fatFP} T_{dFP} + \xi_{cP} C_P T_{cP} + \xi_{cFP} C_{FP} T_{cFP} \quad (1)$$

em que

D_{fatP} = demanda faturada no horário de ponta, MW;

T_{dP} = tarifa de demanda de ponta, R\$.MW⁻¹;

D_{fatFP} = demanda faturada no horário fora de ponta, MW;

T_{dFP} = tarifa de demanda fora de ponta, R\$.MW⁻¹;

C_P = consumo medido no horário de ponta, durante o período de faturamento, MWh;

- T_{CP} = tarifa de consumo no horário de ponta, R\$.MWh⁻¹;
- C_{FFP} = consumo medido no horário fora de ponta, durante o período de faturamento, MWh;
- T_{CFP} = tarifa de consumo no horário fora de ponta, R\$.MWh⁻¹; e
- ξ = índice de uso final, por setor, conforme demanda e consumo na ponta ou fora de ponta.

O consumidor terá enquadramento tarifário de acordo com a tarifa horo-sazonal. O índice de uso final permitirá aumentar ou diminuir o valor da tarifa conforme a utilização da energia, o qual poderá variar de acordo com a demanda e o consumo em cada uso final.

A leitura da energia elétrica consumida será feita por meio de dois medidores, os mesmos usados na tarifa THS: um para as cargas de uso final “calor” e outro para o restante das cargas. Assim devem estar as cargas relativas a calor e a outros usos em circuitos elétricos independentes no quadro de distribuição.

De posse das leituras de consumo e demanda, o faturamento total corresponderá à soma dessas leituras relativas a cada segmento, conforme a THS, mais a informação do índice uso final relativo ao calor. O índice uso final para “outros usos”, em princípio, por falta de dados para adequação, será calculado pela percentagem nacional de uso final para cada setor, percentagem do total demandado com iluminação, tração etc.

A eficiência exergética por uso final é calculada para cada setor de acordo com a percentagem de: i) calor, cujo rendimento é estabelecido pelo ciclo de Carnot a baixa e alta temperaturas; ii) tração, pelo do número de motores, pela eficiência dos motores de alto rendimento ou “standards” e pela faixa de potência; iii) iluminação, tipo e percentagem de lâmpadas de maior penetração; e iv) energia consumida e demandada em cada setor.

No cálculo do índice de uso final (ξ), considerou-se que:

- Seu valor é inversamente proporcional ao rendimento exergético estimado; e
- cada setor teria seu índice de uso final calculado de acordo com o uso final a que se destina a energia requerida.

A eficiência exergética média dos setores é calculada segundo a equação 2 (TANABE, 1998), ou seja:

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{uj} C_j \quad (2)$$

em que

ε_i = eficiência exergética do setor i, %;

ε_{uj} = eficiência exergética do uso final para cada setor considerado, %; e

C_j = consumo energético por uso final, MWh.

A tarifa exergética (T_i) para cada setor foi proposta conforme a equação 3:

$$T_i = \xi_i T_m \quad (3)$$

em que

ξ_i = índice exergético de uso final do setor i, %; e

T_m = tarifa média de todos os setores econômicos em vigor, R\$.MWh⁻¹.

O índice exergético de uso final (ξ) por setor é quantificado conforme a equação 4 (TANABE, 1998):

$$\xi_i = \frac{1}{\varepsilon_i} \frac{\sum_{j=1}^n C_j}{\sum_{j=1}^n \frac{C_j}{\varepsilon_j}} \quad (4)$$

em que

ξ_i = índice exergético de uso final do setor i, %;

ε_i = eficiência exergética do setor i, %;

C_j = consumo do setor j expresso como fração do consumo total, e

ε_j = eficiência exergética do setor econômico j, %.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise da eficiência exergética dos diferentes setores da economia, foram utilizados os limites superiores e inferiores de rendimento conforme o segundo princípio da termodinâmica (McGOVERN, 1990). Esses limites representam as cargas com seus principais usos finais, conforme mostrado no Quadro 1. O conhecimento desses limites evidencia a influência do segundo princípio da termodinâmica no planejamento integrado dos recursos energéticos.

No cálculo da eficiência exergética média, utilizaram-se como base dados relativos aos tipos de usos finais: tração, iluminação e calor.

Quadro 1 – Eficiência exergética média por setor e por uso final

Setor	Eficiência exergética por uso final (%)			
	Limite	Tração	Iluminação	Calor
Industrial	Superior	92,0	12,6	10,0
	Inferior	61,1	4,2	0,0
	Média	84,3	10,1	10,0
Comercial	Superior	73,2	4,2	5,2
	Inferior	61,1	0,2	0,0
	Média	70,2	4,0	5,2
Residencial	Superior	73,2	4,2	5,2
	Inferior	61,1	0,2	0,0
	Média	64,1	0,4	5,2
Rural	Superior	92,0	4,2	5,2
	Inferior	61,1	0,2	0,0
	Média	79,6	0,2	5,2

Consideram-se, no cálculo da eficiência média por uso final: para tração, a percentagem de motores específicos por faixa de potência (MW) e a eficiência exergética como limite superior (S) para motores de alto rendimento e limite inferior (I) para motores “standard”; para iluminação, o tipo de lâmpada mais utilizado (incandescente, fluorescente, vapor de sódio etc.) e a sua eficiência exergética; e para cargas de calor, a eficiência exergética com base em Carnot, para baixas e altas temperaturas.

O consumo energético estimado dos setores analisados é representado no Quadro 2.

Quadro 2 – Uso final da energia elétrica nos diversos setores da atividade econômica no Estado de Minas Gerais

Setor	Uso final dado à energia elétrica (%)			
	Tração	Iluminação	Calor	Outras
Industrial	51	2	20	27
Comercial	17	44	20	19
Residencial	32	24	26	18
Rural	60	20	20	0

Fonte: CEMIG (1996), PROCEL (2000).

Por poder ser tarifada, a eficiência exergética foi calculada com base em apenas dois usos finais: “calor x outros usos”. Estes são potencialmente mensuráveis por medidores de energia elétrica e possuem recursos energéticos disponíveis no mercado para adoção. Calor e outros usos finais são os dados considerados nos Quadros 3, 4, 5 e 6, para consumo e demanda, nos horários de ponta e fora de ponta dos setores.

Quadro 3 – Consumo de energia elétrica para produção de calor e outros usos no horário fora de ponta, nos diversos setores da atividade econômica do Estado de Minas Gerais

Setor	Consumo de energia elétrica (%) horário fora de ponta			Consumo energético por setor %
	Outros usos	Calor	Total	
Industrial	80	20	100	68
Comercial	80	20	100	9
Residencial	74	26	100	20
Rural	80	20	100	3
Total				100

Quadro 4 – Consumo de energia elétrica para produção de calor e outros usos no horário de ponta, nos diversos setores da atividade econômica do Estado de Minas Gerais

Setor	Consumo de energia elétrica (%) horário de ponta			Consumo energético por setor %
	Outros usos	Calor	Total	
Industrial	80	20	100	43
Comercial	80	20	100	13
Residencial	40	60	100	39
Rural	60	40	100	5
Total				100

Quadro 5 – Demanda de energia elétrica para produção de calor e outros usos no horário fora de ponta, nos diversos setores da atividade econômica do Estado de Minas Gerais

Setor	Demanda de energia elétrica (%) horário fora de ponta			Demanda por setor %
	Outros usos	Calor	Total	
Industrial	80	20	100	54
Comercial	80	20	100	11
Residencial	74	26	100	31
Rural	80	20	100	4
Total				100

Quadro 6 – Demanda de energia elétrica para produção de calor e outros usos no horário de ponta, nos diversos setores da atividade econômica do Estado de Minas Gerais

Setor	Demanda de energia elétrica (%) horário fora de ponta			Demanda por setor %
	Outros usos	Calor	Total	
Industrial	80	20	100	44
Comercial	80	20	100	13
Residencial	40	60	100	39
Rural	60	40	100	4
Total				100

No cálculo do índice de uso final, utilizaram-se os valores de R\$96,80/MWh para a tarifa média de consumo e de R\$11,22/MW para a tarifa média de demanda, em todos os setores econômicos em vigor (ANEEL, 2000). Esses valores foram baseados na tarifa média de energia para o Sudeste, na grande percentagem de participação da indústria no quadro energético mineiro.

A eficiência exergética média e os índices de uso final para a tarifa XHS são apresentados nos Quadros 5 e 6, juntamente com os valores de

tarifas a serem cobrados. Esses estão distribuídos pelo horário do dia, ponta e fora de ponta. Na sazonalidade anual será usada a mesma relação da THS.

Quadro 7 – Eficiência exergética média por setor e as novas tarifas para consumo

Setor	Eficiência exergética média		Tarifas exergéticas para consumo			
	Horário		Horário			
	Fora de ponta	Ponta	Fora de ponta		Ponta	
	%	%	R\$/MWh	ξ	R\$/MWh	ξ
Industrial	55	55	70,79	0,7	44,61	0,5
Comercial	23	23	171,05	1,8	107,79	1,1
Residencial	25	16	154,11	1,6	152,80	1,6
Rural	42	33	91,24	0,9	73,66	0,8

Quadro 8 – Eficiência exergética média por setor e as novas tarifas para demanda

Setor	Eficiência exergética média		Tarifas exergéticas para demanda			
	Horário		Horário			
	Fora de ponta	Ponta	Fora de ponta		Ponta	
	%	%	R\$/MWh	ξ	R\$/MWh	ξ
Industrial	55	55	7,33	0,7	6,79	0,6
Comercial	23	23	17,71	1,6	16,40	1,5
Residencial	25	16	15,96	1,4	23,25	2,1
Rural	42	33	9,45	0,8	11,21	1,0

No horário fora de ponta, o maior índice uso final (ξ) para consumo foi o do setor comercial, devido à baixa eficiência luminosa das lâmpadas ainda utilizadas (fator tecnológico). No horário de ponta, o setor residencial teve o maior índice uso final, devido à grande demanda com chuveiros elétricos, na forma de calor. Calor à baixa temperatura gera pequeno rendimento exergético.

3.4. CONCLUSÕES

Estabeleceu-se uma das formas de taxar a energia pelo uso final e, conseqüentemente, pelo recurso natural utilizado. O início da adoção de uma política nacional de racionalização de recursos naturais, com fixação das tarifas a serem cobradas dos usuários, pode ser viabilizado por essa metodologia e não simplesmente pela atual análise econômica de projetos emergentes, em

que a tarifa é o rateamento de despesas com os consumidores sem, dessa forma, educá-los para o uso mais adequado da energia disponível à sua necessidade.

A aplicação da tarifa exergética é uma metodologia viável para qualificar o uso da energia em diversos setores econômicos do Estado de Minas Gerais. Setores com equipamentos com pequena eficiência, pelo segundo princípio da termodinâmica, pagariam valores superiores, ao passo que aqueles com equipamentos com maior eficiência pelo segundo princípio da termodinâmica, o que significa menor impacto ambiental ou melhor fator tecnológico de conversão de energia, pagariam menores tarifas.

A simulação do impacto para taxar a energia elétrica pelo seu uso final, via MWh e MW consumidos e demandados, nos grandes setores da economia mineira, resultou tarifa maior para o setor residencial no horário de ponta. Isso foi devido ao i) baixo fator de carga e ao elevado consumo no horário de ponta e à ii) baixa eficiência exergética pelo aquecimento de água por chuveiros elétricos. Resultou, também, tarifa maior para o setor comercial no horário fora de ponta, em razão da i) baixa eficiência exergética da iluminação nesses setores.

Finalmente, conclui-se que a cobrança de tarifas exergéticas refletirá na racionalização do uso da energia e, conseqüentemente, dos recursos naturais, as quais poderão sofrer mudanças no tempo, conforme a utilização da energia desses recursos.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA NETO, J. F. de **Análise exergética do ciclo de combustível nuclear Etapa da mineração até a obtenção do concentrado de urânio (“Yellow Cake”)**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 1999. 132p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.

ANEEL, 2000, Tarifas médias por classe de consumo, <http://www.procel.com.br>, Brasília, DF.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. **Departamento de análises e informações em energia. Acompanhamento de preços de energéticos.** Belo Horizonte: CEMIG, 1996. 3p.

GOVERNO DE MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **ICMS ecológico – Coletânea de normas.** Belo Horizonte, julho/1997. 51p.

JANNUZZI, G. M., SWISHER, J. N. P. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis.** Campinas, SP: Ed. Autores Associados, 1997. 246p.

JULIÃO, L. Hidrelétricas pagarão tarifa de água. **Jornal do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, 21/7/1999.

McGOVERN, J.A. Exergy analysis: a different perspective on energy. I. The concept of exergy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, [s.l.], v. 24, p.253-262, 1990.

OLIVEIRA FILHO, D. **Electric energy system planning and the second principle of thermodynamics.** Quebec, 1995, 199p. Thesis (Doutorado) – McGill University, Montreal, 1995.

OLIVEIRA FILHO, D., TANABE, C. S., COSTA, J. M. Considerações da análise exergética em tarifas de energia elétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n.1, p.114-119, 2000.

PINHEIRO, S. F. Conservação de energia elétrica: recurso energético renovável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 1, Campinas, 1989, **Anais...** Campinas, SP: [s.n.], 1989. p 95-108.

PROCEL (2000), Tarifas. <http://www.procel.com.br>, Rio de Janeiro, RJ.

TANABE, C. S. **Viabilidade da análise exergética na elaboração de tarifas de energia elétrica.** Viçosa, MG: UFV, Imp. Univ., 1998. 72p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

CAPÍTULO 4

AVALIAÇÃO EXERGÉTICA DA ADOÇÃO DE CARROS ELÉTRICOS NO BRASIL

4.1. INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial e o êxodo rural provocaram o desenvolvimento complexo da estrutura urbana das grandes cidades. O transporte urbano tornou-se exigência na vida do cidadão, devido à sua necessidade de participação em atividades diversificadas e espacialmente distantes. As melhorias das condições de transporte com ganhos de tempo, conforto, segurança e desenvolvimento econômico vieram acompanhadas de impactos ambientais, que, atualmente, colocam em risco a vida nos grandes centros.

A poluição atmosférica proveniente, em grande parte, do atual sistema de transporte, a poluição visual e auditiva, vibrações, segregação urbana, valor ou ocupação do solo e o comprometimento da segurança trouxeram à tona a conscientização do homem com relação aos aspectos naturais e ambientais. Ainda assim, o crescimento econômico tem estimulado e valorizado o uso de veículos individuais em prejuízo do transporte coletivo. O automóvel se tornou símbolo de prestígio pessoal e sinal de progresso para a nação. A sociedade

industrial, muito dependente do veículo particular, obtém, em consequência disso, tráfegos mais lentos, poluição atmosférica pelas emissões gasosas e crescente uso de combustíveis fósseis não-renováveis.

Em 1950, quando a Terra era povoada por 2,6 bilhões de pessoas, existiam 50 milhões de automóveis. Em 1996, a população subiu para 5,5 bilhões de pessoas, e o número de veículos passou para 500 milhões, 10 vezes mais veículos em menos de 50 anos. Somente em 1998, a indústria automobilística brasileira produziu 1.254.227 veículos movidos a gasolina. Na região metropolitana de São Paulo circulam hoje, aproximadamente, 5 milhões de veículos, e a frota aumenta em 250 mil veículos a cada ano (GEIPOT, 1999; CETESB, 2001). Espera-se um crescimento de 50% no número de veículos em 2010 e de 100% em 2030 em relação à frota brasileira de 1996. Esse grande crescimento do número de veículos é preocupante quando se estima o impacto da emissão de poluentes no meio ambiente (CNT, 2000).

A natureza do combustível utilizado, a tecnologia empregada e o estado de conservação do mecanismo utilizado interferem na emissão de poluentes que, conseqüentemente, afetam diretamente a saúde humana. Partículas não-tóxicas que, dependendo da concentração e do tempo de exposição, provocam bronquite e outras doenças respiratórias, doenças cardíacas e aumento de mortalidade. O ozônio provoca dificuldades de respirar, irritação no nariz, na garganta, dores no peito e tosse muito forte. O dióxido de nitrogênio causa doenças cardíacas e pulmonares, sendo potencialmente fatal na concentração de 150 partes por milhão (ppm) com tempo de exposição de cinco a oito minutos. Uma infinidade de doenças da modernidade, como o câncer e o estresse, dentre outras, estão ligadas às poluições.

Dentre os impactos causados pelo homem na natureza, destaca-se o efeito-estufa como o mais preocupante segundo muitos ambientalistas. Maiores emissões de gases estão associadas à liberação de calor para a atmosfera, aumentando, conseqüentemente, a temperatura terrestre.

O gás carbônico (CO₂) tem grande importância na natureza por manter a temperatura da terra em condições habitáveis para o homem. Entretanto, sua alta concentração tem sido responsável por cerca de 50% do efeito-estufa. Após a revolução industrial, estima-se que a concentração de CO₂ na atmosfera tenha aumentado em quase 30%. Do período de 1958 a 1990, essa

concentração aumentou de 315 ppm para 355 ppm, o que corresponde à mais alta variação conhecida. A queima de combustíveis fósseis contribuiu para se alcançar o índice de 363 ppm em 1998. Cientistas do grupo formado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) afirmaram que a concentração de CO₂ deverá chegar a 500 ppm no final do século 20 se nada for feito para conter a emissão de poluentes. Nas atuais taxas de concentração de CO₂, aliadas à alta temperatura das grandes cidades, já se registram casos de mortalidade de inúmeras pessoas, como em Paris, que teve em 21 de julho de 1995 o dia mais quente do século XX, cuja temperatura chegou a 40 °C (PENNA, 1999; PNUMA, 2000).

Para atender ao desenvolvimento das atividades humanas, é necessário o comprometimento da sociedade na preservação dos recursos naturais, bem como o uso racional dos combustíveis fósseis, principalmente, no transporte rodoviário.

Segundo Varella (1996), citado por CABRAL (1997), as primeiras intervenções conhecidas para resolução dos problemas urbanos datam da época do imperador romano Júlio Cezar. O imperador decretou medidas restritivas ao trânsito de carroças pelo centro da cidade de Roma, em determinados horários do dia, em prioridade ao trânsito de carruagens.

A regulamentação nacional de grande repercussão relativa aos automóveis foi estabelecida pelo Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores - Proconve. O Proconve, regulamentado pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - Conama, através de várias resoluções e suportado pela Lei nº 8.723/93, estabeleceu diretrizes, prazos e padrões legais de emissões de poluentes admissíveis nas diferentes categorias de veículos e motores, nacionais e importados (PROCONVE,1998). A fiscalização e a implementação de taxas para os veículos poluentes são formas de alcançar resultados para recuperação da qualidade do ar no país, notadamente nos grandes centros urbanos. No Brasil, a participação do setor de transportes na modalidade rodoviária avançou de 80,3%, em 1985, para 90,1%, em 1995, do consumo total de energia do setor. Desse total, o óleo diesel e a gasolina representam, aproximadamente, 82,0% e o álcool, 12,7% (ELETROBRÁS, 1998).

Vários países já taxam o uso dos recursos naturais e as emissões produzidas para a atmosfera. A taxação sobre a emissão do gás carbônico é um exemplo adotado em programas de redução dos níveis de emissão desse poluente para a atmosfera. Na Dinamarca, existe um programa que tem como meta reduzir os níveis de emissão de carbono em 2005 para o índice de 80% das emissões de 1988. Inicialmente, impôs-se taxação para famílias de US\$16,00 por tonelada de CO₂ emitida e, posteriormente, US\$8,00 para as empresas (ELETROBRÁS, 1998).

Sem necessariamente taxar as emissões, a adoção do carro elétrico é uma das opções tecnológicas promissoras para redução dos níveis de emissão de CO₂ na atmosfera. A introdução de inovação tecnológica tem contribuído no processo de desenvolvimento de novos paradigmas tecnológicos que se destacam nas mudanças fundamentais de determinado setor, além do ganho de maior eficiência na conversão de energia e nível praticamente zero de ruído.

No Estado da Califórnia, EUA, tem se tratado a questão dos carros elétricos com grande agressividade perante a sociedade. As melhores vagas nos estacionamentos de “shoppings” e ginásio são reservadas aos que possuem carros elétricos e são considerados ecologicamente corretos. As vantagens não param simplesmente em estacionamentos, mas na isenção de taxas de circulação, tráfego livre para os motoristas sozinhos em pistas de trânsito rápido reservadas a veículos com mais de um passageiro nas auto-estradas e taxa simbólica de luz residencial (apenas US\$1,00) em algumas cidades do estado. Todo esse incentivo tem atraído consumidores que abrem mão da praticidade e do preço inferior do carro a gasolina (QUATRO RODAS, 2000). Desde o início da década de 90, o Estado da Califórnia tem leis para a emissão de poluentes por veículos. O objetivo é a redução das emissões poluentes por meio da diminuição do uso de combustíveis fósseis. Estabeleceu-se no ano de 1994 que 10% dos veículos do estado deveriam ter baixos índices de emissões: em 1997, 25% dos veículos deveriam ter emissões ultrabaixas e, até o ano 2006, 10% dos veículos deverão ter índice zero de emissão de poluentes (CNT, 2000).

A introdução de carros elétricos no sistema nacional de transporte pode ser muito interessante, pois, além da não-poluição, contribuiria para diminuir a dependência externa do Brasil de petróleo. Atualmente, nos últimos 10 anos, o Brasil tem importado cerca de 45% do total do petróleo gasto (BRASIL, 2000).

A avaliação energética dos veículos leves que utilizam combustíveis fósseis e eletricidade pode não apontar a melhor eficiência do sistema nacional de transportes se essa análise se basear somente no Primeiro Princípio da Termodinâmica (PPT). Pelo PPT, consideram-se equivalentes as energias de cada processo. Já a análise exérgica, baseada no Primeiro e no Segundo Princípio da Termodinâmica (SPT), define que a energia em diferentes formas tem potenciais diferentes de realizar trabalho. A análise exérgica derivada desse conceito define o termo “exergia” como a capacidade de realizar trabalho de um sistema quando este é levado ao estado de equilíbrio com o meio em que se encontra. No PPT, a energia se conserva, mas no SPT ela pode diminuir o seu potencial de realizar trabalho. Por exemplo, quando se diminui o gradiente de temperatura entre as fontes fria e quente, são geradas maiores irreversibilidades, portanto piores condições de se realizar trabalho. O rendimento exérgico baseado no SPT, juntamente com o rendimento energético, pode ser aplicado para avaliar a melhor forma de tarifar o uso final dado à energia e, conseqüentemente, o uso racional dos recursos naturais.

Os objetivos deste trabalho foram: i) avaliar a adoção de carros elétricos em substituição aos veículos leves (de passeio) a combustão interna, baseando-se em seus rendimentos energéticos, exérgicos e na eficiência dos sistemas de geração de energia elétrica regional (Regiões Norte, Sul, Centro-Oeste, Nordeste e Sudeste), sendo o horizonte de planejamento considerado de 1999 a 2008; ii) simular o impacto da adoção de ações de gerenciamento do lado da demanda pelo deslocamento de chuveiros elétricos ligados na ponta para fora de ponta, visando à ampliação da oferta de energia elétrica para a adoção maciça de carros elétricos.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido, utilizando-se de dados reais e projeções do consumo e da demanda de energia elétrica das cinco regiões brasileiras (Norte (N), Sul (S), Centro-Oeste (CO), Sudeste (SE) e Nordeste (NE)) nos anos de 1999 e 2008 (Quadros 1, 2, 3 e 4).

Quadro 1 – Geração de energia elétrica por diferentes fontes energéticas nas regiões brasileiras, no ano de 1999

Região	Fonte energética							Total p/ região (MW)
	Hidráulica (MW)	Carvão (MW)	Petróleo (MW)	Gás natural (MW)	Biomassa (MW)	Nuclear (MW)	Outras (MW)	
CO	2.063,96		80,11	203,60				2.347,67
SE	25.919,49		1.411,17	40,04	566,45	657,00	366,20	28.960,35
S	8.122,31	1.055,00	683,23	2,40	12,50		37,00	9.912,44
N	4.001,00		1.456,87		76,76			5.534,63
NE	10.276,30		689,93	144,00			15,00	11.125,23
Total	50.383,06	1.055,00	4.321,31	390,04	655,71	657,00	418,20	57.880,32

Fonte: BRASIL (2000).

Quadro 2 – Projeção da geração de energia elétrica por diferentes fontes energéticas nas regiões brasileiras, no ano de 2008

Região	Fonte energética							Total p/ região (MW)
	Hidráulica (MW)	Carvão (MW)	Petróleo (MW)	Gás natural (MW)	Biomassa (MW)	Nuclear (MW)	Outras (MW)	
CO	3.475,71		91,19	282,00				3848,90
SE	43.648,42		1.848,63	247,58	742,05	860,67	280,71	47.628,07
S	13.677,97	1.382,05	895,03	3,77	16,38		48,47	16.023,67
N	6.737,68		1.908,50		100,56			8.746,74
NE	17.305,29		903,81	188,64			19,65	18.417,39
Total	84.845,07	1382,05	5.647,16	722,00	858,98	860,67	348,83	94.664,76

Fonte: ELETROBRÁS (2000) e ABRADE (2000).

Quadro 3 – Consumo de energia elétrica nas diferentes regiões brasileiras no ano de 1999, por diferentes fontes energéticas

Região	Fonte energética							Total p/ região
	Hidráulica	Carvão	Petróleo	Gás natural	Biomassa	Nuclear	Outras	
	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)
CO	41.256,94		692,92	6.981,45				48.931,30
SE	136.978,33		6.424,19	1.065,77	2.661,92	3.087,44	1.006,98	151.224,63
S	42.924,47	2.656,17	1.720,16	8,70	31,47		93,15	47.434,13
N	16.041,00							16.041,00
NE	51.284,00							51.284,00
Total	288.484,74	2.656,17	8.837,27	8.055,92	2.693,39	3.087,44	1.100,14	314.915,07

Fonte: BRASIL (2000).

Quadro 4 – Projeção do consumo de energia elétrica nas diferentes regiões brasileiras no ano de 2008, por diferentes fontes energéticas

Região	Fonte energética							Total p/ região
	Hidráulica	Carvão	Petróleo	Gás natural	Biomassa	Nuclear	Outras	
	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)
CO	61.070,34		1.025,68	10.334,25				72.430,28
SE	202.761,39		9.509,38	1.577,60	3.940,29	4.570,16	1.490,58	223.849,40
S	63.538,71	3.931,77	2.546,26	12,88	46,59		137,89	70.214,10
N	30.395,09							30.395,09
NE	99.013,50							99.013,50
Total	456.779,04	3.931,77	13.081,32	11.924,72	3.986,87	4.570,16	1.628,47	495.902,37

Fonte: ELETROBRÁS (2000) e ABRADE (2000).

A frota de veículos de passeio utilizada em cada região é apresentada no Quadro 5. Os dados utilizados foram da frota de 1998 para os veículos de passeio movidos a gasolina, e adotou-se, para estabelecer o número de veículos no ano de 1999, o índice de crescimento dos últimos cinco anos (0,5% ao ano). Esse número de veículos foi mantido constante nos cálculos dos rendimentos exergéticos de cada região para o ano de 2008.

Quadro 5 – Número de veículos leves de passeio movidos a gasolina circulando nas regiões brasileiras

Região	Número de veículos de passeio (Frota do ano de 1999)
Centro-Oeste	1.681.242
Sudeste	14.528.960
Sul	4.711.961
Norte	489.330
Nordeste	2.387.852
Brasil	23.799.344

Fonte: GEIPOT (1998).

Os rendimentos dos veículos elétricos e a combustão interna, nos anos de 1999 e 2008, são apresentados nos Quadros 6 e 7. Os rendimentos energéticos dos veículos foram baseados nos dados dos anos de 1995 e 2010 e interpolados nos anos de 1999 e 2008. Os valores apresentados expressam o consumo e o rendimento dos veículos leves movidos a gasolina. As características dos carros elétricos e a combustão interna são as mesmas em relação à capacidade de condução de passageiros e peso.

Quadro 6 – Projeção do consumo de combustível e energia elétrica de veículos de passeio elétricos e a combustão interna

Tipo de veículo	Consumo	
	Ano de 1999	Ano de 2008
Elétrico	(kWh/km) 0,32	0,22
Combustão interna	(km/l) 10,8	13,0

Fonte: WANG e DeLUCCHI (1992).

Quadro 7 – Projeção dos rendimentos do primeiro (η) e do segundo (ε) princípios da termodinâmica nos veículos de passeio elétricos e a combustão interna

Tipo de veículo	Rendimento (%)			
	Ano de 1999		Ano de 2008	
	η	ε	η	ε
1. Elétrico	41,4	43,6	65,1	68,6
2. Combustão interna	15,9	37,0	19,1	44,4

Fonte: OLIVEIRA e GALIANA (1995).

As eficiências do primeiro e segundo princípios da termodinâmica nos veículos a combustão interna e elétricos, nas diferentes configurações de recursos naturais a gerar energia elétrica, são apresentadas no Quadro 8. Essas eficiências levam em consideração os rendimentos em cada etapa de transformação da energia contida na fonte até o uso final dado a ela. No caso do petróleo, por exemplo, essa configuração se inicia na extração, no transporte do óleo cru, no refino, no transporte do combustível, na queima do petróleo nas termoelétricas, na transmissão da energia elétrica, na energia elétrica na tomada e, por fim, no seu uso no carro elétrico. Todos os rendimentos energéticos e exergéticos em cada etapa de transformação obtidos por OLIVEIRA FILHO (1995) foram interpolados para os anos de 1999 e 2008 e são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 – Eficiências do primeiro (η) e do segundo (ε) princípio da termodinâmica nos veículos a combustão interna (VCI) e veículos elétricos (VE) para diferentes fontes de energia

Fonte		Eficiências (%)			
		Ano de 1999		Ano de 2008	
		η	ε	η	ε
Petróleo	VCI	13,3	30,8	15,9	37,0
	VE	12,4	28,8	21,6	50,2
Biomassa	VCI	7,7	19,0	9,2	25,1
	VE	6,4	17,7	9,5	26,4
Gás natural	VCI	14,3	33,0	17,3	39,4
	VE	12,9	30,1	23,4	54,4
Carvão	VCI	8,5	19,9	11,1	25,9
	VE	13,4	31,3	23,0	53,5
Hidroelétrica	VE	36,6	38,5	58,1	61,2

Fonte: OLIVEIRA FILHO (1995).

De posse dos dados do Quadro 8, calcularam-se as eficiências exergéticas das regiões brasileiras (Centro-Oeste, Sudeste, Sul, Norte e Nordeste) para adoção do carro elétrico de acordo com a matriz energética de cada região, conforme a equação 1:

$$\xi_{Si} = \frac{\sum_{j=1}^n R_j \varepsilon_j}{\sum R_j} \quad (1)$$

em que

- ξ_{Si} = eficiência exergética de cada região brasileira i , %;
- R_j = percentagem do recurso energético que gera energia elétrica na matriz energética das regiões brasileiras, %; e
- ε_j = eficiência do primeiro ou segundo princípios da termodinâmica para veículos elétricos no recurso energético até seu uso final, %.

Consideraram-se as diferentes configurações de recurso energético natural das regiões brasileiras que geram energia elétrica (Quadros 1, 2, 3 e 4). No cálculo das eficiências exergéticas para adoção do veículo elétrico, adotaram-se os dados de consumo e a demanda de cada região.

Fator de carga

O fator de carga é a relação entre a demanda máxima e a média em determinado período. O fator de carga mede a modulação do sistema e é usado com índice de utilização de dado sistema elétrico. Calculou-se o fator de carga com base nos dados de demanda e consumo, para os anos de 1999 e 2008, dos Quadros 1, 2, 3 e 4. No Quadro 9, apresentam-se os fatores de carga calculados do sistema elétrico nacional antes da adoção de carros elétricos.

Quadro 9 – Fator de carga do sistema elétrico nacional e de todas as regiões nos anos de 1999 e 2008

Região	Fator de carga (%)	
	Ano de 1999	Ano de 2008
Centro-Oeste	61,7	55,3
Sudeste	74,1	59,5
Sul	54,6	52,7
Norte	33,1	53,6
Nordeste	52,6	64,0
Brasil	62,1	58,5

Redução no uso do petróleo

Calculou-se a redução do uso de petróleo na matriz energética nacional com a adoção de veículos elétricos, nos anos de 1999 e 2008, em substituição a 100% dos carros de passeio a combustão interna movidos a gasolina. Para cada região, calculou-se a economia de petróleo levando em consideração as configurações de energéticos na matriz das regiões para geração de energia elétrica. A equação 2 baseou-se nas eficiências energéticas de uso final dos veículos elétricos e na percentagem de petróleo que gera energia elétrica na configuração da matriz das regiões. Essa percentagem não pode ser deslocada ou economizada, pois faz parte da matriz energética de cada região.

$$R_i = 1 - P_i \frac{\eta_{VCI}}{\eta_{VE}} \quad (2)$$

em que

R_i = redução na dependência do uso de petróleo de cada região brasileira, %;

P_i = petróleo na matriz energética de cada região brasileira que gera energia elétrica, %;

η_{VC} = eficiência do primeiro princípio da termodinâmica para veículos a combustão interna do recurso energético petróleo até seu uso final; % e

η_{VE} = eficiência do primeiro princípio da termodinâmica para veículos elétricos do recurso energético petróleo até seu uso final, %.

Ações do lado da demanda

As ações de Gerenciamento do Lado da Demanda (GLD) adotadas para suprir a energia demandada pela adoção maciça de veículos elétricos de passeio foram baseadas no remanejamento de cargas para fora do horário de ponta. Os chuveiros elétricos foram as cargas escolhidas, devido às suas características de alta demanda e à facilidade de substituição desse equipamento por outro que ofereça o mesmo serviço. Calculou-se a percentagem de chuveiros necessários a serem remanejados para fora do horário de ponta de demanda do sistema elétrico de cada região brasileira e do país como um todo (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL, 2001). Considerou-se que 85% das residências brasileiras, com cinco pessoas, possuem um chuveiro de potência igual a 4.400 W. Adotou-se a percentagem de 27,5% como índice de simultaneidade no uso dos chuveiros elétricos para o horário de ponta e de 15% para o horário fora de ponta (CEMIG, 1996). Estimaram-se para o horário de ponta e fora de ponta demandas diferenciadas para o carregamento das baterias dos carros elétricos. Os intervalos foram de 10%, 20%, 30% e 40% da demanda, com 100% de simultaneidade de carregamento para o horário de ponta. No horário fora de ponta, adotou-se o complemento restante da carga (90%, 80%, 70% e 60%), com simultaneidade de carregamento igual a 30%. Nos dois horários, ponta e fora de ponta, e respectivas simultaneidades, calculou-se também a demanda do sistema com 100% de carregamento das baterias.

A potência nominal das baterias utilizadas foi de 9.200 W, com tempo de carregamento de oito horas, para um sistema totalmente descarregado. A potência do carregador foi de 1.125 W, com 80% de rendimento (WANG e DeLUCI, 1995; GABEIRA, 2001).

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As eficiências do primeiro e segundo princípios da termodinâmica foram determinadas para os carros elétricos, em cada região, para 1999 e 2008, conforme mostrado no Quadro 10. Nesse quadro, notam-se altas eficiências, por causa da grande percentagem de geração de energia hidroelétrica na configuração do uso de recursos naturais nas regiões do Brasil. As maiores diferenças entre as eficiências se encontram entre as Regiões Sudeste e Norte, onde há maior ou menor participação de combustíveis fósseis na matriz energética para geração de energia elétrica. Maior percentagem de combustíveis fósseis na matriz energética gerando energia elétrica implica menor eficiência exergética e vice-versa.

As eficiências do PPT e SPT em todas as regiões foram maiores que a eficiência de determinada região que utiliza apenas petróleo na configuração energética de sua matriz para gerar energia elétrica. A menor eficiência foi da Região Norte, 29,8%, sendo 124% maior que a eficiência de uso do petróleo no carro a combustão interna, conforme apresentado no Quadro 8. Portanto, para qualquer região do País, a adoção de carros elétricos é viável tanto pela análise energética quanto pela análise exergética. Todas as regiões, que geram energia elétrica com petróleo, apresentaram maior rendimento na adoção do carro elétrico. Isso devido à pequena percentagem de energia elétrica gerada por termoelétricas que utilizam petróleo.

Quadro 10 – Eficiências do primeiro e segundo princípios da termodinâmica na adoção de carros elétricos, conforme a matriz energética das regiões brasileiras

Região	Eficiências dos carros elétricos considerando todos os tipos de fontes para demanda			
	Ano de 1999		Ano de 2008	
	PPT	SPT	PPT	SPT
	η	ε	η	ε
Centro-Oeste	33,7	37,4	54,7	60,4
Sudeste	33,9	37,3	54,9	59,9
Sul	32,3	37,0	52,9	59,9
Norte	29,8	35,7	49,6	58,4
Nordeste	34,8	37,8	55,9	60,6
Brasil	33,4	37,2	54,2	59,9

Implicações na demanda

A geração crescente de energia elétrica é uma das possíveis fontes para atender à demanda de energia elétrica na adoção maciça dos carros elétricos de passeio nos anos de 1999 e 2008. Nos Quadros 11 e 12, apresentam-se as novas cargas requeridas pelas regiões para adoção dos carros elétricos. Na análise de utilização dos carros elétricos, distribuiu-se a demanda requerida em 15% na ponta e 85% fora de ponta. Nos horário de ponta e fora de ponta, consideraram-se duas análises de simultaneidade. Na primeira análise, adotou-se o percentual 100% de simultaneidade de uso dos carros elétricos, independentemente do horário (Quadro 11); na segunda análise, foi adotado o percentual 27,5% de simultaneidade no horário de ponta e 15% no horário fora de ponta (Quadro 12).

Quadro 11 – Aumento da demanda de energia elétrica nas regiões em 1999 e 2008, pela adoção de veículos elétricos com 100% de simultaneidade de uso nos horários do dia

Região	Demanda (MW)			
	1999		2008	
	Ponta	Fora de ponta	Ponta	Fora de ponta
Centro-Oeste	1.034,6	573,1	711,3	394,0
Sudeste	8.40,9	4.952,2	6.146,9	3.404,7
Sul	2.899,7	1.606,1	1.993,5	1.104,2
Norte	301,1	166,8	196,8	109,0
Nordeste	1.469,4	813,9	1.010,2	559,6
Brasil	14.645,8	8.112,1	10.058,8	5.571,4

Quadro 12 – Aumento da demanda de energia elétrica nas regiões em 1999 e 2008, pela adoção de veículos elétricos com 27,5% de simultaneidade no horário de ponta e 15% no horário fora de ponta

Região	Demanda (MW)			
	1999		2008	
	Ponta	Fora de ponta	Ponta	Fora de ponta
Centro-Oeste	284,5	86,0	195,6	59,1
Sudeste	2.458,7	742,8	1.690,4	510,7
Sul	797,4	240,9	548,2	165,6
Norte	82,8	25,0	54,1	16,4
Nordeste	404,1	122,1	277,8	83,9
Brasil	4.027,6	1.216,8	2.766,2	835,7

A maior demanda se concentra nos horários de ponta (Quadros 11 e 12), devido ao menor tempo desses horários (780 horas anuais), em comparação com as 7.980 horas do horário fora de ponta. Para análise de 100% de simultaneidade, o Brasil precisará aumentar sua geração de demanda na ponta em 25,3% para o ano de 1999 e 10,6% para o ano de 2008. Para a análise de simultaneidade diferenciada para o horário de ponta e fora de ponta, a geração de demanda precisará aumentar em 7,0% na ponta para 1999 e 2,9% para 2008. A geração de demanda para atender à adoção dos carros elétricos de passeio com 100% de simultaneidade mostrou-se superior quando comparada com a simultaneidade diferenciada nos horários do dia. Isso indica a importância da adoção de tarifas com custos menores nos horários fora de ponta, principalmente horários noturnos. A demanda poderá diminuir ainda mais e aumentar o fator de carga do sistema nacional de energia elétrica. Nos Quadros 11 e 12, apresentam-se, também, demandas inferiores no ano de 2008 em relação ao ano de 1999, devido ao aumento nas eficiências de primeiro e segundo princípios da termodinâmica dos veículos elétricos naquele ano. O consumo de energia elétrica pela adoção do carro elétrico manteve-se o mesmo nos horários de ponta e fora de ponta.

Fator de carga

A melhoria no fator de carga das regiões é uma das alternativas que se analisou para a adoção dos carros elétricos de passeio nos anos de 1999 e 2008, conforme mostrado nos Quadros 13 e 14. No cálculo do fator de carga,

estabeleceram-se índices diferenciados de demanda para carregamento das baterias dos veículos elétricos nos horários de ponta. Para aumentar o fator de carga, o carregamento de 100% das baterias deve ser no horário fora de ponta, sem acréscimo da demanda na ponta do sistema nacional de energia elétrica. Utilizaram-se os índices crescentes de demanda do carro elétrico na ponta do sistema energético até atingir o fator de carga de 1999 das regiões brasileiras.

Quadro 13 – Variação do fator de carga de cada região em 1999, pela adoção de veículos elétricos, com demanda crescente no horário de ponta

Região	Fator de carga (%) – Ano de 1999							
	Demanda dos carros elétricos na ponta							
	0%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
Centro-Oeste	82,5	76,2	73,4	70,8	68,4	66,1	64,0	62,0*
Sudeste	92,8	84,9	81,5	70,8	75,3	72,6*		
Sul	60,2	56,8	55,3	53,8	52,4*			
Norte	36,3	35,0	34,4	33,9	33,3	32,8*		
Nordeste	60,5	57,0	55,4	53,9	52,5*			

*Valor aproximado do fator de carga das regiões antes da adoção do carro elétrico.

Quadro 14 – Variação do fator de carga de cada região em 2008, pela adoção de veículos elétricos, com demanda crescente no horário de ponta

Região	Fator de carga (%) – Ano de 2008											
	Demanda dos carros elétricos na ponta											
	0%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%
Centro-Oeste	62,0	58,4	56,7	55,2*								
Sudeste	76,0	70,6	68,2	65,9	63,8	61,9	60,0	58,3	56,6	55,1	53,6	52,2*
Sul	60,2	56,8	55,3	53,8	52,4*							
Norte	55,4	52,5*										
Nordeste	67,4	63,1*										

*Valor aproximado do fator de carga das regiões antes da adoção do carro elétrico.

Percebeu-se a melhoria do fator de carga pela adoção do carro elétrico em substituição aos veículos movidos a gasolina. Em várias situações de simulação da demanda devido à adoção dos carros elétricos na ponta, o sistema indicou fatores de carga superiores nos anos de 1999 e 2008. Quanto menor o fator de carga da região, maior foi a penetração da percentagem da demanda requerida para adoção do carro elétrico na ponta. No ano de 2008, a penetração da percentagem da demanda requerida para adoção do carro

elétrico foi menor devido ao aumento do fator de carga das regiões. Somente na Região Sudeste é que a demanda diminuiu no ano de 2008.

O fator carga poderá ser menor se alguns incentivos tarifários forem adotados no horário de ponta do sistema elétrico das regiões. Ressalta-se que a frota de veículos foi constante nos dois períodos de tempo analisados, o que não favoreceu o fator de carga de 2008. Entretanto, avaliou-se também a redução no fator de carga de 2008 devido ao grande rendimento previsto para o carro elétrico nesse ano (74,3% de aumento em relação ao ano de 1999 para a geração de energia elétrica por petróleo). A melhoria no fator de carga poderá ser possível diminuindo as perdas do sistema nacional, que foram de cerca de 15,3% no de 1998, com aumento gradual de carros elétricos fora do horário de ponta (ELETROBRÁS, 2000).

A variação do fator de carga para todo o território nacional pela adoção de veículos elétricos de passeio é mostrada na Figura 1 para o ano de 1999 e na Figura 2 para o ano de 2008.

Nas Figuras 1 e 2, apresentam-se o fator de carga anterior (FCA) à adoção do carro elétrico como parâmetro de comparação, a nova demanda nacional (NDN) e o fator de carga posterior (FCP) à medida que aumentou a percentagem de demanda do carro elétrico no horário de ponta do sistema nacional de energia elétrica.

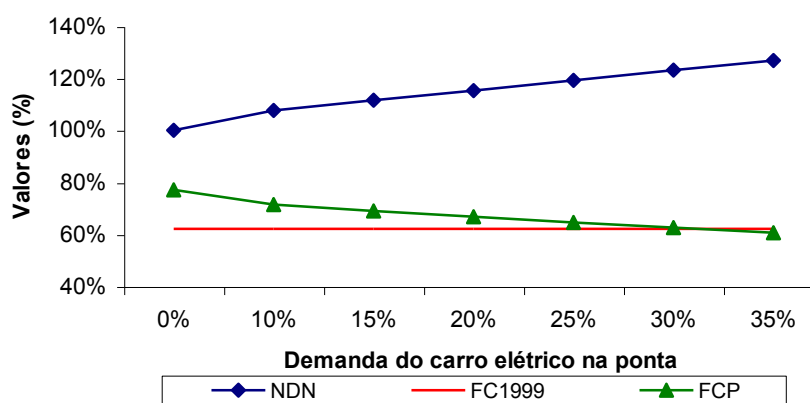


Figura 1 – Variação do fator de carga em função do aumento na percentagem de demanda do carro elétrico na ponta do sistema nacional de energia elétrica no ano de 1999.

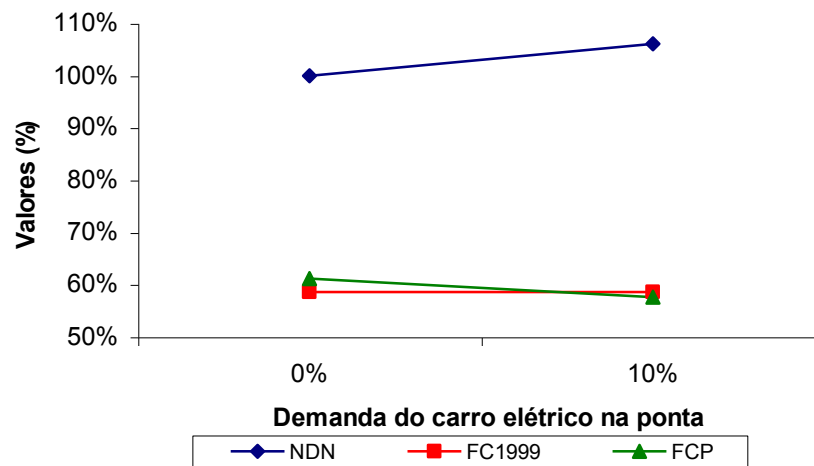


Figura 2 – Variação do fator de carga em função do aumento na percentagem de demanda do carro elétrico na ponta do sistema nacional de energia elétrica no ano de 2008.

Na Figura 1, mostra-se a maior possibilidade de aumento do fator de carga com a participação crescente da demanda do carro elétrico no horário de ponta no ano de 1999. O fator de carga nacional poderá chegar a 80% se a demanda da energia elétrica na adoção maciça do carro elétrico for direcionada para o horário fora de ponta. A maior percentagem de demanda na ponta, mantendo constante o fator de carga anterior à adoção do carro elétrico, é de aproximadamente 34%.

No ano de 2008, a variação do fator de carga foi pequena em função da variação da percentagem de demanda do carro elétrico na ponta. Isso foi devido à redução do fator de carga nacional de 62,1% no ano de 1999 para 58,5% no ano de 2008 e ao aumento da eficiência do carro elétrico no período. Esses valores indicam e reforçam a idéia de implementação de tarifas com preços diferenciados no horário de ponta para, assim, aumentar o fator de carga nacional e possibilitar às concessionárias maior flexibilidade de atendimento de energia elétrica com confiabilidade a novos consumidores.

Redução no uso do petróleo

A percentagem de petróleo economizada no sistema nacional de transportes, com veículos de passeio, pela adoção de carros elétricos é mostrada no Quadro 15. Nos anos de 1999 e 2008, a menor percentagem economizada foi de 73,0% e a maior, de 98,6%. A menor percentagem

economizada foi na Região Norte, pois essa utilizou percentual maior de petróleo na base de sua matriz energética para gerar energia elétrica. A maior percentagem de economia no uso do petróleo foi na Região Centro-Oeste, que teve como característica o maior percentual de uso de hidroeletricidade na base de sua matriz energética. Essa análise apresentou um dos pontos estratégicos na economia de qualquer estado ou país, que foi a possível independência externa de petróleo de todas as regiões, mesmo com o rendimento inferior do carro elétrico, no ano de 1999, em relação ao rendimento do carro a combustão interna. Portanto, a adoção maciça e imediata do carro elétrico no ano de 1999 significou maior gasto com energia. No ano de 2008, a adoção do carro elétrico significou economia de energia e menor índice de poluição, o que indicou importância de ações governamentais na implementação gradual desse veículo.

Quadro 15 – Redução na dependência de petróleo para transporte em uso em veículos de passeio por região nos anos de 1999 e 2008

Região	Petróleo economizado (%)	
	Ano de 1999	Ano de 2008
Centro-Oeste	96,5	98,6
Sudeste	95,0	97,7
Sul	92,9	96,7
Norte	73,0	87,3
Nordeste	96,5	97,1
Brasil	94,4	97,3

Ações do lado da demanda

A adoção do carro elétrico poderá ser viabilizada não somente pela modificação do fator de carga e, ou, construção de novas usinas geradoras, mas por ações do lado da demanda. Adotou-se como ação do lado da demanda o remanejamento de chuveiros para fora do horário de ponta para implementação da adoção do carro elétrico. O chuveiro foi a carga definida por apresentar baixo fator de carga e alta demanda de energia no horário de ponta. A percentagem de chuveiros a serem remanejados do horário de ponta do sistema elétrico de cada região para diferentes demandas de energia elétrica devido ao carregamento das baterias dos carros elétricos é representada no Quadro 16. Estabeleceram-se índices crescentes de 10%, 20%, 30%, 40% e

100% para implementação da demanda de adoção do carro elétrico no horário de ponta nacional. O horário de ponta nacional foi de três horas consecutivas, e a simultaneidade adotada de carregamento das baterias foi de 27,5%.

Quadro 16 – Chuveiros remanejados para fora do horário de ponta para carregamento de baterias dos carros elétricos

Percentagem de chuveiros remanejados da ponta (%)					
Região	Demanda do carro elétrico na ponta				
	10%	20%	30%	40%	100%
Centro-Oeste	8,1	16,1	24,2	32,2	80,6
Sudeste	11,1	22,2	33,2	44,3	*
Sul	10,5	21,1	31,6	42,2	*
Norte	3,3	6,6	9,9	13,1	32,8
Nordeste	2,8	5,5	8,3	11,1	27,6
Brasil	8,0	16,0	24,0	31,9	79,9

* Limite máximo atingido de chuveiros, não sendo possível carregar 100% das baterias simultaneamente.

Obs.: 27,5% de simultaneidade no carregamento das baterias.

Observaram-se índices crescentes de chuveiros a serem remanejados do horário de ponta para atender à demanda de carros elétricos. A maioria das regiões possui chuveiros necessários a serem remanejados para atender a 100% da demanda de carregamento das baterias dos carros elétricos. As demandas de energia no horário de ponta para adoção do carro elétrico foram maiores, nas Regiões Sudeste e Sul, que 100% de chuveiros remanejados dessas regiões. A substituição maciça de carros a combustão interna por carros elétricos não foi possível na análise das regiões de forma isolada, mas em nível nacional. O número de chuveiros nacional foi maior, podendo atender 100% a demanda de adoção do carro elétrico com a reserva de 21% do número de chuveiros.

O remanejamento dos chuveiros do horário de ponta pode ser incentivado pela adoção da tarifa exergética horo-sazonal. Essa tarifa prevê preços diferenciados para cargas de aquecimento, como o chuveiro, no horário de ponta e fora de ponta (COSTA e OLIVEIRA FILHO, 2000). Segundo a CEMIG (1996), pequeno aumento na tarifa de energia elétrica na ponta deslocaria mais de 70% dos consumidores para fora do horário de ponta.

4.4. CONCLUSÕES

Foram estudados nove tipos de configurações no uso dos recursos naturais para geração de energia elétrica, incluindo-se os cálculos das eficiências de primeiro e segundo princípios da termodinâmica para adoção do carro elétrico de passeio em todas as regiões do Brasil, nos anos de 1999 e 2008, em substituição ao carro a combustão interna movido a gasolina. Os rendimentos dessas configurações de geração de energia elétrica nas regiões indicaram que a adoção do carro elétrico é viável.

Para suprir a energia elétrica necessária à adoção do carro elétrico, estabeleceram-se ações de gerenciamento do lado da demanda, de melhoria do fator de carga e de aumento da geração.

Demonstrou-se que o deslocamento de chuveiros para fora do horário de ponta contribui para adesão maciça do carro elétrico, sem que haja aumento no fator de carga. A percentagem de chuveiros remanejados no horário de ponta do sistema nacional ou trocados por outro tipo de sistema de aquecimento (gás, solar, lenha etc.), considerando-se o mesmo fator de carga nacional, foi de, aproximadamente, 79,9% em todo o território nacional.

Estudou-se o aumento do fator de carga do sistema elétrico nacional pela adoção do carro elétrico. O maior índice encontrado para o fator de carga nacional foi de 77,1% no ano de 1999 e de 61,2% no ano de 2008, isso com a demanda total de adoção do carro elétrico no horário fora de ponta. Ressalta-se que a implantação de tarifas noturnas com descontos poderá deslocar a demanda relativa à adoção do carro elétrico e propiciar aumento do fator de carga nacional. Assim, as concessionárias podem cobrir a escassez de energia elétrica nos diferentes horários do dia com a tarifa média de energia elétrica inferior.

O aumento de geração na ponta também poderá prover a energia elétrica demandada do carro elétrico com aumentos de 25,3% para 1999 e de 10,6% para 2008.

A adoção da tecnologia do carro elétrico diminuirá as emissões de poluentes para a atmosfera, inclusive nas regiões que geram energia elétrica utilizando petróleo. As eficiências energética e exergética de uso final das

termoelétricas que usam petróleo para gerar energia elétrica para o carro elétrico foram menores, no ano de 1999, do que as eficiências dos carros a combustão interna movidos a gasolina. Porém, a quantidade de petróleo a ser utilizada será menor, já que a maior participação de termoelétricas tem sido de, aproximadamente, 26,3% na matriz energética da Região Norte.

Outro fator de grande importância na adoção do carro elétrico é a maior flexibilidade de combustíveis na matriz energética do País. Essa flexibilidade permitirá o uso desses combustíveis em sistemas de maior eficiência e menor poluição dos recursos naturais, além da independência nacional do petróleo importado. Portanto, a adoção da tecnologia do carro elétrico poderá vir a contribuir para o planejamento integrado dos recursos com menor impacto ambiental.

Sugere-se como trabalhos futuros a pesquisa do impacto do uso de baterias automotivas, bem como o uso da tecnologia de células de combustível para produção de energia elétrica para adoção do carro elétrico.

4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL. Rio de Janeiro: IBGE. www.ibge.gov.br.
Data da consulta: 12/01/2001.

GEIPOT – EMPRESA BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES. **Anuário estatístico dos transportes**, <http://www.geipot.gov.br/>. Data da consulta: dezembro/2000.

ABRADEE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA. **Plano decenal de expansão 1999/2008**. Minuta publicada em março de 1999. www.abradee.com.br. Data da consulta: 12/12/2000.

BRASIL – MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME. **Balço energético nacional**. Brasília, DF. 2000. 154p.

CABRAL, S. D. **Proposta metodológica para monitoramento da poluição atmosférica provocada pelo sistema de transporte rodoviário urbano – O caso do monóxido de carbono**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997. 290 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.

CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Pesquisa de hábitos de consumo, de posse de eletrodomésticos e de qualidade do fornecimento**. Belo Horizonte: CEMIG, março, 1996. 204p.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Data da consulta: janeiro/2001.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Textos técnicos. www.cnt.org.br. Data da consulta: 12/12/2000.

COSTA, J. M., OLIVEIRA FILHO, D. Tarifas exergéticas horo-sazonais. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, AGRENER 2000. **Anais...** Campinas, SP. (CD-ROM).

ELETROBRÁS – Ministério de Minas e Energia – Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético. **Energia e desenvolvimento sustentável**. Relatório Final, Instituto de Economia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998. 160p.

ELETROBRÁS – Ministério de Minas e Energia – Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético. **Projeções de mercado** <http://www.elektrobras.gov.br> – Data da consulta – dezembro/2000.

GABEIRA – www.gabeira.com.br/ – Em campanha no carro elétrico. Data da consulta – 15/01/2001.

OLIVEIRA FILHO, D. **Electric energy system planning and the second principle of thermodynamics**. Quebec, 1995, 199p. Tese (Doutorado). McGill University, Montreal, 1995.

OLIVEIRA FILHO, D., GALIANA, F. D. A model for the planning of electric energy systems including exergetic considerations. In: POWER INDUSTRY COMPUTER APPLICATIONS CONFERENCE – **Institute of Electrical and Electronic Engineers**. Salt Lake City, Utah, 1995. p.6.

PENNA, C. G. **O estado do planeta – Sociedade de consumo e degradação ambiental**. Rio de Janeiro: Record, 1999. 252p.

PNUMA – PROGRAMA NACIONAL DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. www.rolac.unep.mx . Data da consulta: 05/12/2000.

PROCONVE – PROGRAMA DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR POR VEÍCULOS AUTOMOTORES. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. – **Série Diretrizes – Gestão Ambiental**. 2. ed. Brasília: IBAMA, 1998. 181p.

QUATRO RODAS. **Abasteça na próxima tomada**, Rio de Janeiro, v. 40, 110 – 118, abril/2000.

WANG, Q., DeLUCI, M. A. Impacts of electric vehicles on primary energy consumption and petroleum displacement. **Energy: International Journal**, Great Britain, v. 17, n. 4, p. 351–366, 1992.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DA ANÁLISE EXERGÉTICA EM EQUIPAMENTOS RESIDENCIAIS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

5.1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento energético de qualquer nação está diretamente ligado às bases de recursos naturais disponíveis pela natureza. Já a sustentabilidade dos sistemas depende do uso racional e do planejamento integrado desses recursos. Medidas de contenção de poluentes, conservação do solo, não-contaminação das águas e exploração racional dos recursos fósseis não-renováveis, dentre outras, têm evitado impactos ambientais e gastos adicionais na tentativa de manter a qualidade de vida da sociedade. As conseqüências econômicas da poluição ambiental e o possível racionamento de energia são temas polêmicos que requerem intervenções políticas e legais para que as gerações futuras não sejam excluídas de bem-estar.

A expansão da economia brasileira no período de 1940 a 1980 colocou o País entre as 10 primeiras economias industriais do mundo; o Brasil tornou-se urbano, com cerca de 78% da população nas cidades (OLIVEIRA e GUTIERREZ, 1998). Conseqüentemente, o elevado crescimento das cidades

está vinculado à demanda crescente de energia elétrica e seus benefícios para educação, saúde, iluminação, diversão etc. A aquisição de equipamentos eletrodomésticos, como TVs, refrigeradores, aparelhos de ar-condicionado, ferros de passar, microondas, “freezers”, geladeiras, máquinas de lavar e secar, chuveiros e aquecedores, tem elevado a demanda de energia. A energia elétrica demandada pelo setor residencial no período de 1985 a 1995 teve acréscimo de 125% no consumo, mas, com relação à demanda total de energia elétrica no Brasil, ocorreu redução de 20 (1980) para 15,5% (1995) (ELETROBRÁS, 1998).

As conseqüências desse crescimento colocaram o sistema elétrico nacional em déficit na oferta de energia elétrica. Blecautes nas grandes cidades e a impossibilidade de atender a novos clientes, principalmente no horário de pico de consumo do sistema elétrico nacional, são conseqüências desse crescimento. Novas tarifas de energia elétrica como a horo-sazonal, programas de racionalização como o PROCEL, construções de termoelétricas para atender à demanda no horário de ponta e várias outras medidas foram adotadas para atender a essa demanda crescente de energia.

Procurar atender à demanda de energia para manter o crescimento econômico do País, com menor impacto ao ambiente, é o comportamento exigido pela sociedade às empresas de energia. Assim, deve-se forçar a busca de novas soluções visando aumentar a oferta de energia para o mercado, considerando aspectos como esgotamento das reservas, poluição e inundação de grandes áreas.

Uma das respostas ao apelo da sociedade são as ações de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD), que têm resultado em economias superiores quando comparadas com as ações tomadas no passado, de simplesmente aumentar a oferta de energia sem levar em consideração o ambiente (JANNUZZI e SWISHER, 1997).

Segundo PINHEIRO (1989), as ações de GLD são menos onerosas que o investimento na produção de novas fontes energéticas. A adequação da potência de motores, a utilização de lâmpadas incandescentes econômicas em residências, a melhoria da eficiência dos motores elétricos e a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes têm menor custo que o custo marginal do kWh gerado. O custo de programas de melhoria da eficiência

de motores é altamente vantajoso (US\$0,02/kWh) quando comparado com o custo da geração de energia elétrica (US\$0,03/kWh).

Dentre as várias soluções para o problema energético, um novo conceito foi apresentado por OLIVEIRA FILHO (1995) para avaliar a tomada de decisão no setor de energia elétrica. Esse conceito consiste em considerar a análise exergética, no planejamento de sistemas, como ferramenta de avaliação da qualidade da energia empregada no uso final. Portanto, a análise exergética auxilia na escolha do melhor caminho de conversão de energia desde o recurso natural até o seu uso final.

Na análise exergética, considera-se, além da quantidade de energia empregada em determinado processo, a qualidade dessa energia, qualidade que está diretamente ligada à capacidade de gerar trabalho. Essa análise se baseou no primeiro princípio da termodinâmica (PPT) e no segundo princípio da termodinâmica (SPT). O SPT possibilita avaliar a quantidade de trabalho útil possível a ser realizado pela energia utilizada, quantificando, assim, a irreversibilidade de cada processo (WALL, 1990; OLIVEIRA FILHO, 1995; TANABE, 1998; COSTA, 2000).

Como o planejamento integrado dos recursos (PIR), a análise exergética preocupa-se também com o serviço provido pela energia e não simplesmente com a energia consumida ou demandada. Ambos consideram os impactos ambientais e sociais da utilização dos recursos naturais. As consequências financeiras e estratégicas e o requerimento futuro de energia e não simplesmente ganhos econômicos podem ser incluídos na análise exergética e no PIR (SHEER, 1995).

A evolução das tarifas de energia elétrica monômias para tarifas horo-sazonais é exemplo das tentativas de adequar o consumo a horários do dia e da época do ano de maior disponibilidade de energia. A tarifa monômica taxa a energia elétrica unicamente pelo consumo mensal (kWh), e a tarifa horo-sazonal taxa o consumo (kWh) e a demanda (kW) em função do horário do dia e da época do ano. O setor residencial tem sido alvo de mudanças no sistema de tarifação, de monômica para horo-sazonal, o que, para esse setor, será denominado tarifa amarela. A tarifa amarela aplicada, em caráter experimental, em Juiz de Fora pela concessionária Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) visou obrigar o setor residencial, dentre outros, a pagar diferentes tarifas em horários diferenciados do dia para, assim, promover o

remanejamento de cargas para fora do horário de pico do sistema elétrico de energia e, como consequência, adiar investimentos em usinas geradoras (CEMIG, 1995a; ARRUDA et al., 1998; ANEEL, 1998).

As ações de implementação de tarifas de energia elétrica são iniciativas de gerenciamento do lado da demanda (GLD) implementadas pelas concessionárias e pelos órgãos governamentais reguladores de energia elétrica. Essas ações de GLD englobam várias atividades, como administração da carga, conservação estratégica e aumento do mercado, dentre outras. GELLINGS e TALUKDAR (1986) indicaram várias opções para administração das ações de gerenciamento das cargas, como equipamentos de controle de uso final, equipamentos de controle das concessionárias, armazenamento de energia, geração alternativa de energia, tarifas de incentivo e melhoria do desempenho. Dentre as opções freqüentemente implementadas pelo gerenciamento do lado da demanda, no contexto do planejamento integrado dos recursos energéticos encontra-se a redução da demanda de energia elétrica no horário de pico do sistema elétrico. O controle direto de cargas de aquecimento de água para banho é uma das ações adotadas para reduzir a demanda, dada a facilidade de encontrar recursos energéticos para prover o mesmo bem. Assim, os chuveiros elétricos são cargas atrativas às ações de GLD por apresentarem alta demanda de potência e baixo fator de carga e por se concentrarem, principalmente, no horário de pico do sistema energético nacional. Seu percentual de posse nos lares mineiros é de 90,1% e, em todo o Brasil, de 85%, isso devido ao seu pequeno preço de mercado, à sua facilidade de instalação e ao conforto que este proporciona (CEMIG, 1996). Portanto, uma análise comparativa dos diversos equipamentos residenciais para aquecimento de água, comumente utilizados no Brasil, é imprescindível.

O objetivo deste trabalho foi analisar diferentes equipamentos de aquecimento de água – chuveiros e aquecedores a gás, elétrico e solar – para o setor residencial quanto: i) aos rendimentos dos equipamentos pelo primeiro e segundo princípios da termodinâmica; ii) à energia consumida e à demanda de energia; iii) à implementação das tarifas monômnia exergética e exergética horo-sazonal *versus* a tarifa monômnia vigente e a tarifa horo-sazonal amarela; e iv) à viabilidade de adoção dos equipamentos pelos consumidores com diferentes taxas de mercado e incentivos.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho estudou-se o uso de diferentes equipamentos residenciais de aquecimento de água (chuveiros e aquecedores a gás, elétrico e solar) pela perspectiva dos consumidores, da concessionária e da sociedade. Pela visão do consumidor, analisou-se qual o equipamento de maior economia financeira de acordo com as taxas de mercado vigentes e as tarifas propostas. Pela visão da concessionária, analisaram-se diferentes tarifas de energia e incentivos a serem concedidos ao consumidor, para que este possa trocar seu equipamento por outro mais estratégico, mas mantendo constante a receita anual da concessionária e induzindo a redução da demanda. Pela perspectiva da sociedade, as tarifas exergéticas propostas podem reduzir a irreversibilidade nos processos e, conseqüentemente, o impacto ambiental.

Análise da aplicação de diferentes tarifas de energia elétrica

Para análise de aplicação de diferentes tarifas de energia elétrica, considerou-se a tarifa monômnia energética comum de mercado, tarifa monômnia exergética e tarifas horo-sazonais amarela e exergética.

As tarifas monômnia taxam o consumo de energia e as horo-sazonais, o consumo e a demanda na ponta e fora de ponta dos dias úteis. O horário de ponta considerado foi de três horas consecutivas no pico do sistema, entre 17 horas e 21 horas; não se taxou a ponta complementar (duas horas restantes do horário de pico, entre 17 horas e 21 horas) e nem as diferentes épocas do ano. Utilizou-se o mesmo valor das tarifas de ponta e fora de ponta durante todo o ano, bem como o valor da tarifa fora de ponta para a ponta complementar. As tarifas cobradas dos consumidores residenciais são as apresentadas no Quadro 1, seguindo-se as tarifas da resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) mais o imposto sobre circulação de mercadorias (ICMS) de 30% (ANEEL, 1998).

Quadro 1 – Tarifas de energia elétrica monômnia e horo-sazonal amarela

Tarifa	Consumo (R\$/kWh)			
Monômnia	0,2574			
Horo-sazonal amarela	Consumo (R\$/kWh)		Demanda (R\$/kW)	
	Ponta	Fora de ponta	Ponta	Fora de ponta
	0,5638	0,0847	1,9714	0,0714

Fonte: ANEEL (1998).

Para análise das tarifas energética e exergetica, monômnia e horo-sazonal de cada equipamento, calculou-se o consumo às tarifas monômnia e o consumo e a demanda, na ponta e fora de ponta, às tarifas horo-sazonais. As tarifas exergeticas foram calculadas em função do inverso do rendimento exergetico dos equipamentos. A eficiência exergetica de cada equipamento foi calculada com base no primeiro e segundo princípios da termodinâmica, sendo definida como o trabalho máximo disponível numa massa, fluida ou sólida, como resultado de sua condição de não-equilíbrio relativa a uma condição de referência (LEAL et al., 1993).

A medida da eficiência exergetica (ε) é baseada na relação trabalho útil e disponível, conforme a equação 1.

$$\varepsilon = \frac{\text{Trabalho}_{\text{ÚTIL}}}{\text{Trabalho}_{\text{DISPONÍVEL}}} \quad (1)$$

As tarifas exergeticas beneficiam os equipamentos e processos que possuem alta eficiência exergetica e penalizam os equipamentos cuja energia usada gera maior irreversibilidade (baixa eficiência exergetica) (LOZANO e VALERO, 1993). O valor calculado para tarifas exergeticas foi inversamente proporcional ao rendimento exergetico estimado. Maior rendimento, menor taxa e vice-versa. Na elaboração das tarifas exergeticas de cada equipamento residencial de aquecimento de água foi necessário conhecer o consumo e a demanda de energia deste e as tarifas atuais praticadas pelas concessionárias de energia elétrica, conforme a equação 2, proposta por TANABE (1998):

$$T_i = \frac{T_m \cdot \sum_{j=1}^n C_j}{\varepsilon_i \cdot \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{\varepsilon_j}} \quad (2)$$

em que

- T_i = tarifa exergética do equipamento i , R\$.kWh⁻¹ ou R\$.kW⁻¹ ;
- T_m = tarifa média dos equipamentos, R\$.kWh⁻¹ ou R\$.kW⁻¹;
- ε_i = eficiência exergética de cada equipamento i , %;
- C_j = consumo de energia do equipamento j expresso como fração do consumo total;
- ε_j = eficiência exergética do equipamento j , %; e
- n = número de equipamentos utilizados, decimal.

A arrecadação total das concessionárias de energia elétrica e gás foi considerada constante, conforme evidenciado pela equação 2. Todos os cálculos das tarifas, energéticas e exergéticas, foram estimados utilizando as tarifas médias de consumo de demanda, conforme o tipo de tarifa.

Considerou-se que 70% do total do tempo de utilização dos chuveiros foi no horário de ponta do sistema e 30%, fora de ponta. Com relação aos demais equipamentos residenciais de aquecimento de água, com reservatório de acumulação, adotaram-se 30% de utilização na ponta e 70% fora de ponta, pois equipamentos não necessitam ser ligados no horário de ponta para obtenção de água quente.

O faturamento total das tarifas monômias (F_{TM}) é dado pela equação 3. A variação do faturamento é função das tarifas de consumo aplicadas.

$$F_{TM} = C T_c \quad (3)$$

em que

- C = consumo medido durante o período de faturamento, kWh; e
- T_c = tarifa de consumo, R\$.kWh⁻¹.

O faturamento total das tarifas horo-sazonais (F_{THS}) é dado pela equação 4. A variação do faturamento é função das tarifas de consumo e de demanda aplicadas.

$$F_{THS} = D_P T_{dP} + D_{FP} T_{dFP} + C_P T_{cP} + C_{FP} T_{cFP} \quad (4)$$

em que

D_P = demanda no horário de ponta, kW;

T_{dP} = tarifa de demanda de ponta, R\$.kW⁻¹;

D_{FP} = demanda no horário fora de ponta, kW;

T_{dFP} = tarifa de demanda fora de ponta, R\$.kW⁻¹;

C_P = consumo medido no horário de ponta, durante o período de faturamento, kWh;

T_{cP} = tarifa de consumo no horário de ponta, R\$.kWh⁻¹;

C_{FP} = consumo medido no horário fora de ponta, durante o período de faturamento, kWh; e

T_{cFP} = tarifa de consumo no horário fora de ponta, R\$.kWh⁻¹.

Os valores das eficiências energéticas dos equipamentos residenciais de aquecimento de água foram tomados nos manuais desses fornecidos pelo fabricante; já a eficiência exérgica (ε) de cada equipamento foi calculada conforme a equação 5:

$$\varepsilon = \frac{\text{Exergia de saída}_{\text{DO EQUIPAMENTO}}}{\text{Exergia de entrada}_{\text{DO EQUIPAMENTO}}} \quad (5)$$

A exergia de saída foi calculada pela capacidade do calor, gerado pela água quente, de produzir trabalho útil. Utilizou-se o rendimento de Carnot para o seu cálculo, conforme a equação 6:

$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (6)$$

em que

T_1 = temperatura da fonte fria, (K); e

T_2 = temperatura da fonte quente, (K).

O cálculo da exergia de entrada é feito considerando a capacidade da energia (elétrica, do gás e solar) fornecida a cada equipamento para gerar trabalho útil. Utilizaram-se os rendimentos tecnológicos disponíveis como índices para a estimativa da exergia de entrada: i) 95% para a energia elétrica; ii) 40% para o gás (GLP); e iii) 12% para a energia solar (célula fotovoltaica). Na análise do potencial de transformação da energia em trabalho útil pelos equipamentos, consideraram-se os rendimentos do motor elétrico para energia elétrica, do motor de ciclo Otto para o gás e da célula fotovoltaica para energia solar.

Análise econômica

A análise econômica de cada equipamento residencial de aquecimento de água é baseada nas tarifas monômias e horo-sazonais aplicadas. Nesta análise, utilizaram-se dois índices econômicos, o Valor Presente (VP) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), para avaliar cada equipamento individualmente. Todas as análises apresentadas neste trabalho foram executadas no programa computacional Excel, planilha eletrônica (MICROSOFT, 2000).

No Quadro 2, mostram-se os equipamentos residenciais de aquecimento de água considerados neste trabalho e algumas características importantes para a pesquisa.

Quadro 2 – Características de equipamentos residenciais de aquecimento de água

Equipamento	Potência (kW)	Preço unitário (R\$)	Reservatório de água (L)
Coletor solar	3,5*	1.780,00	300
Aquecedor a gás		850,00	135
Chuveiro	4,4	13,50	
Chuveiro	6,5	140,00	
Aquecedor elétrico	2,5	539,00	150

*Resistência elétrica auxiliar.

Fonte: TANABE (1998), firmas comerciais e manuais dos equipamentos.

As considerações e informações necessárias para realização da análise econômica dos equipamentos residenciais de aquecimento de água foram:

1. Família brasileira típica de cinco pessoas.
2. O valor de sucata foi considerado nulo.
3. O custo de capital de cada equipamento considerado foi a média do Município de Viçosa, MG, e da região.
4. O tempo de utilização da resistência elétrica auxiliar do coletor solar foi estimado em cerca de 20% do tempo total de utilização (CEMIG, 1995b; BRASIL, 1996).
5. O custo de oportunidade ou a taxa de oportunidade foi de 12% ao ano.
6. O aumento da tarifa de energia elétrica foi de 1% ao ano acima da taxa de inflação.
7. O custo de manutenção foi tratado como percentagem anual fixa do custo do capital de cada equipamento.
8. O preço do botijão de gás (GLP) utilizado foi de R\$15,00/13 kg.
9. A energia para aquecimento da água de banho de cada família foi estimada, considerando-se:
 - a) Consumo médio de água quente de 50 litros/pessoa/dia.
 - b) Variação de 20 °C na temperatura da água.
 - c) Dez minutos de tempo médio de banho.
 - d) Para o chuveiro de menor potência, com menor qualidade do banho, adotou-se o consumo médio de 40 litros/pessoa/dia.
 - e) O preço adotado para instalação dos equipamentos foi de 100% do valor de compra para o chuveiro de 4,4 kW e de 25% para os demais equipamentos.
10. A análise econômica foi realizada para um período igual à vida útil dos equipamentos de maior expectativa de vida, 16 anos.

No Quadro 3, mostram-se as considerações efetuadas para a análise econômica individualizada dos equipamentos residenciais de aquecimento de água.

Quadro 3 – Dados para análise econômica dos equipamentos residenciais de aquecimento de água

Item	Coletor solar	Aquecedor a gás	Chuveiro elétrico (kW)		Aquecedor elétrico
			4,4	6,5	
1. Custo do equipamento instalado (R\$)	2.250,0	725,5	27,0	175,0	1.062,5
2. Resistência elétrica (kW)	3,5				2,5
3. Manutenção (%)*	1,0	3,0	1,5	1,5	2,0
4. Consumo de uso final anual (kWh/ano)	2.208,9	2.208,9	1.767,1	2.208,9	2.208,9
5. Expectativa de vida útil (anos)	16	8	8	8	16

* Percentagem anual do custo inicial do equipamento.

Valor Presente

O método do Valor Presente (VP) consiste em atualizar os investimentos no horizonte de planejamento considerado com o valor do custo de oportunidade para o dia da tomada de decisão como capital único (BUARQUE, 1984).

O VP foi calculado nas componentes do custo total como energia (E), manutenção (M) e custo do capital (C_c) ou capital inicial pela metodologia utilizada por TANABE et al. (1997), segundo a equação 7:

$$T = E + M + C_c \quad (7)$$

em que

T = custo total do equipamento, em valor presente, R\$.kWh⁻¹ de uso final;

E = custo com energia do equipamento, em valor presente, R\$.kWh⁻¹ de uso final;

M = custo com manutenção do equipamento, em valor presente, R\$.kWh⁻¹ de uso final; e

C_c = custo do equipamento, em valor presente, R\$.kWh⁻¹ de uso final.

Os custos totais foram calculados por kWh de uso final dos equipamentos de aquecimento de água no horizonte de planejamento. O valor

do custo anual com energia é o faturamento de energia de cada equipamento mais a percentagem de aumento anual nas tarifas. Os custos com manutenção foram diferenciados para cada tipo de equipamento, conforme o Quadro 3. Nos equipamentos com vida útil inferior ao horizonte de planejamento, foi simulada a segunda aquisição destes no final do primeiro intervalo de vida útil.

Taxa interna de retorno (TIR)

A taxa interna de retorno permite a comparação entre dois investimentos, tornando nulo o valor presente (LAPONNI, 1998). Nos cálculos da TIR, com relação às opções de aquecimento de água, tomou-se como base o chuveiro elétrico de 4,4 kW, devido ao fato de ser esse equipamento o mais comum nas residências (CEMIG, 1996).

Análise de sensibilidade

Foi realizada a análise de sensibilidade para verificar economicamente a alternativa de aquecimento de água residencial mais atraente nos diferentes cenários. Nesta análise, avaliaram-se:

- a) A taxa de juros ou o custo de oportunidade.
- b) O custo inicial do capital para aquisição do coletor solar.
- c) O aumento da energia acima da inflação.
- d) O tempo de utilização anual dos equipamentos.
- e) Tarifas diferenciadas.

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise energética e exergética de sistemas de aquecimento de água

As eficiências energéticas e exergéticas dos equipamentos para aquecimento de água são apresentadas no Quadro 4. A eficiência energética dos reservatórios de água quente foram consideradas iguais (80%), independentemente da fonte de aquecimento (solar, gás ou elétrico). As

eficiências energéticas dos chuveiros elétricos são maiores quando comparadas com as eficiências dos demais equipamentos. No entanto, verificou-se que a eficiência exergética dos chuveiros era inferior à dos demais equipamentos, sobressaindo apenas em comparação com o aquecedor elétrico. A maior eficiência exergética observada foi a do coletor solar, ou seja, aproximadamente 1,4 vez maior que a do aquecedor a gás, 3,5 vezes maior que a dos chuveiros e 4,2 vezes maior que a do aquecedor elétrico. Todos os valores de eficiência exergética dos equipamentos foram relativamente baixos. A água quente a baixas temperaturas, com a tecnologia disponível até o momento, tem seu rendimento limitado na transformação de calor em trabalho pelo rendimento de Carnot. Como as temperaturas envolvidas são relativamente baixas, o rendimento de Carnot é também baixo.

Quadro 4 – Eficiências energética e exergética dos equipamentos de aquecimento residencial de água

Eficiência %	Coletor solar	Aquecedor a gás	Chuveiro elétrico (kW)		Aquecedor elétrico
			4,4	6,5	
Energética	80,0	80,0	95,0	95,0	80,0
Exergética	22,9	16,1	6,5	6,5	5,4

No Quadro 5, apresentam-se os novos valores das tarifas exergética, monômnia e horo-sazonal para os equipamentos residenciais de aquecimento de água, com base nas eficiências exergéticas. Para comparação, apresentaram-se, também, o valor das tarifas de energia elétrica monômnia e horo-sazonal amarela e a tarifa do gás (GLP).

Analisando o Quadro 5, observou-se, pela comparação das tarifas monômnia energética e exergética, que a tarifa monômnia exergética apresentou valores maiores que da tarifa monômnia energética para o aquecedor elétrico e para o aquecedor a gás. Isso se deve à menor eficiência exergética desses equipamentos. A tarifa monômnia para o gás foi inferior à tarifa monômnia exergética, os chuveiros tiveram as tarifas constantes e o coletor solar teve a tarifa reduzida em mais que 60%. Essas tarifas poderiam ter valores diferentes se o seu fosse baseado somente no rendimento exergético de cada equipamento e não houvesse a restrição da receita constante da concessionária de energia elétrica.

Quadro 5 – Valores das tarifas monômias e horo-sazonais dos equipamentos residenciais de aquecimento de água

Tarifas		Consumo (R\$/kWh)			
Monômia energética	Energia elétrica	0,25			
	Gás	0,08			
Monômia exergética	Coletor solar	0,07			
	Aquecedor a gás	0,10			
	Chuveiro de 4,4 kW	0,25			
	Chuveiro de 6,5 kW	0,25			
	Aquecedor elétrico	0,29			
Tarifas		Consumo (R\$/kWh)		Demanda (R\$/kW)	
		Ponta	Fora de ponta	Ponta	Fora de ponta
Horo-sazonal amarela	Energia elétrica	0,56	0,08	1,97	0,07
	Gás	0,08	0,08		
Exergética horo-sazonal	Coletor solar	0,16	0,03	0,61	0,02
	Aquecedor a gás	0,04	0,04		
	Chuveiro de 4,4 kW	0,56	0,11	2,18	0,08
	Chuveiro de 6,5 kW	0,56	0,11	2,18	0,08
	Aquecedor elétrico	0,66	0,13	2,59	0,09

A tarifa exergética horo-sazonal apresentou valores, relativamente maiores em todos os equipamentos que utilizaram somente energia elétrica como única fonte para gerar calor. Os equipamentos que utilizaram outros recursos naturais, como o gás e a energia solar, tiveram suas tarifas reduzidas, devido à maior eficiência exergética do coletor solar e do aquecedor a gás. O coletor solar teve sua tarifa reduzida em todos os horários do dia em mais de 62% e o aquecedor a gás, em 50%. A tarifa do gás foi calculada somente para o consumo, já que não se têm restrições quanto à demanda e quanto ao horário de uso desse equipamento.

A tarifa exergética para os chuveiros elétricos permaneceu igual, já que estes tiveram a mesma eficiência exergética e utilizaram a mesma fonte de energia. O aquecedor elétrico teve o maior acréscimo na tarifa por usar energia elétrica para gerar calor e por sua baixa eficiência no seu armazenamento.

A arrecadação total da concessionária de energia elétrica e de gás permaneceu constante na aplicação das tarifas. Para manter a receita da concessionária de energia elétrica constante, houve redistribuição no montante anual a ser pago por equipamento. No Quadro 6, mostra-se a comparação entre o custo de energia no primeiro ano na aplicação das diferentes tarifas aos equipamentos residenciais de aquecimento de água. No Apêndice, apresenta-se esse mesmo quadro, em percentagem.

Quadro 6 – Comparação entre o custo de energia na aplicação das diferentes tarifas aos equipamentos residenciais de aquecimento de água (primeiro ano)

Tarifa	Equipamento	Consumo (R\$/ano)		Demanda (R\$/ano)		Total (R\$)
		Ponta	Fora de ponta	Ponta	Fora de ponta	
Monômia energética	Coletor solar	142,18				142,18
	Aquecedor a gás	210,98				210,98
	Chuveiro de 4,4 kW	478,92				478,92
	Chuveiro de 6,5 kW	598,65				598,65
	Aquecedor elétrico	710,90				710,90
	Total (R\$)	2.141,63				2.141,63
	* Não incluindo o custo do gás	1.930,66				
Monômia exergética	Coletor solar	38,12				38,12
	Aquecedor a gás	271,13				271,13
	Chuveiro 4,4 kW	456,65				456,65
	Chuveiro 6,5 kW	570,81				570,81
	Aquecedor elétrico	804,93				804,93
	Total (R\$)	2.141,63				2.141,63
	* Não incluindo o custo do gás	1.870,50				
Horo-sazonal amarela	Coletor solar	93,41	32,76	82,80	3,00	211,97
	Aquecedor a gás	210,98				210,98
	Chuveiro 4,4 kW	734,18	47,30	104,09	3,77	899,34
	Chuveiro 6,5 kW	917,73	59,12	153,77	5,57	1.136,19
	Aquecedor elétrico	467,06	163,82	59,14	2,14	692,16
	Total (R\$)	2.212,38	513,98	397,44	14,4	3.140,65
	* Não incluindo o custo do gás	2.726,36		414,29		3.140,65
	* Não incluindo o custo do gás	2.929,66				
Exergética horo-sazonal	Coletor solar	26,03	11,73	26,49	0,96	65,21
	Aquecedor a gás	119,16				119,16
	Chuveiro 4,4 kW	727,47	60,21	118,44	4,29	910,40
	Chuveiro 6,5 kW	909,33	75,26	174,96	6,34	1.165,89
	Aquecedor elétrico	549,56	247,63	79,91	2,90	879,99
	Total (R\$)	2.212,38	513,98	399,81	14,49	3.140,65
	* Não incluindo o custo do gás	2.726,36		414,29		3.140,65
	* Não incluindo o custo do gás	3.021,49				

O Quadro 6 indicou que, nas tarifas monômias exergéticas, os chuveiros têm menor custo anual com energia elétrica que o aquecedor elétrico que usa a mesma fonte energética. Já nas tarifas horo-sazonais, os chuveiros têm acréscimo de aproximadamente 50% nos custos. Isso indicou que a tarifa horo-sazonal impõe altas tarifas para as cargas de maior demanda do sistema elétrico nacional, obrigando os consumidores a migrar para os horários de menor tarifa ou para outro tipo de equipamento de aquecimento de água que

forneça menor custo com energia. Os maiores custos com energia na tarifa exergética horo-sazonal foram dos chuveiros, pois, além da aplicação de tarifas diferenciadas a esses equipamentos em horários de uso durante o dia, aplicaram-se também tarifas de uso final.

O aquecedor elétrico, por possuir reservatório e não ter a necessidade de alta demanda durante a ponta do sistema, teve custos menores na tarifa horo-sazonal amarela em relação às tarifas monômias. Porém, seu custo com energia elétrica foi maior na tarifa exergética horo-sazonal, devido à sua baixa eficiência exergética.

O coletor solar apresentou os menores custos de energia na maioria das tarifas aplicadas; somente na tarifa horo-sazonal amarela é que seu custo foi superior em 0,5%, em comparação com o custo do aquecedor a gás.

O custo da energia com o aquecedor a gás permaneceu constante nas tarifas monômias e horo-sazonal amarela por não ter restrições quanto ao horário de uso durante o dia. Nas tarifas exergéticas, o aquecedor a gás apresentou o segundo menor custo com energia, devido ao rendimento exergético. Seu rendimento exergético foi o segundo melhor.

Não havendo restrições quanto ao capital inicial na aquisição dos equipamentos, o coletor solar indicou ser a alternativa na maioria das tarifas e o aquecedor a gás, a segunda melhor opção.

O maior custo anual com energia é o do chuveiro de maior potência, 6,5 kW, nas tarifas horo-sazonais e o do aquecedor elétrico nas tarifas monômias.

Nas tarifas horo-sazonais, o custo total com energia de todos os equipamentos, R\$3.140,65, foi maior que nas tarifas monômias, portanto maior o faturamento da concessionária. Esse aumento da receita da concessionária acontecerá se os consumidores, com os mesmos equipamentos de aquecimento de água, não migrarem seus usos para fora do horário de ponta do sistema energético de eletricidade. Cada consumidor deve analisar cada equipamento, separadamente, para perceber as vantagens e desvantagens de cada um.

Constatou-se com a arrecadação constante da concessionária que a adoção da tarifa monômica exergética aumentou a receita da concessionária com o gás de R\$210,98 para R\$271,13, e a adoção da tarifa exergética horo-sazonal diminuiu a receita com gás de R\$210,98 para R\$119,16.

Aspectos econômicos: valor presente e taxa interna de retorno

Nos Quadros 7, 8, 9 e 10, apresentam-se os resultados do valor presente em R\$/kWh de uso final e da taxa interna de retorno, para os equipamentos, aplicando-se tarifas monômnia energética, monômnia exergética, horo-sazonal amarela e exergética horo-sazonal. O equipamento utilizado como base para o cálculo da TIR foi o chuveiro de 4,4 kW.

Quadro 7 – Taxa interna de retorno e valor presente de sistemas de aquecimento de água para a tarifa monômnia energética

Equipamento de aquecimento de água	TIR (%)	VP (R\$/kWh de uso final)
Coletor solar	13%	0,098
Aquecedor a gás	37%	0,075
Chuveiro de 4,4 kW		0,102
Chuveiro de 6,5 kW		0,133
Aquecedor elétrico		0,184

Quadro 8 – Taxa interna de retorno e valor presente de sistemas de aquecimento de água para a tarifa monômnia exergética

Tarifa monômnia exergética	TIR (%)	VP (R\$/kWh de uso final)
Coletor solar	17%	0,077
Aquecedor a gás	21%	0,088
Chuveiro de 4,4 kW		0,097
Chuveiro de 6,5 kW		0,127
Aquecedor elétrico		0,203

Quadro 9 – Índices econômicos na aplicação da tarifa horo-sazonal amarela

Tarifa horo-sazonal amarela	TIR (%)	VP (R\$/kWh de uso final)
Coletor solar	31%	0,113
Aquecedor a gás	104%	0,075
Chuveiro de 4,4 kW		0,188
Chuveiro de 6,5 kW		0,246
Aquecedor elétrico	17%	0,180

Quadro 10 – Índices econômicos na aplicação da tarifa exergética horo-sazonal

Tarifa exergética horo-sazonal	TIR (%)	VP (R\$/kWh de uso final)
Coletor solar	39%	0,082
Aquecedor a gás	121%	0,056
Chuveiro de 4,4 kW		0,192
Chuveiro de 6,5 kW		0,252
Aquecedor elétrico		0,219

Observou-se que o coletor solar, na maioria das tarifas, mesmo com o maior rendimento exergético, apresentou índices inferiores aos do aquecedor a gás na análise. Portanto, mesmo sendo o coletor solar o equipamento mais eficiente exergeticamente, ações devem ser tomadas para incentivar a sua utilização; por exemplo, subsídio para aquisição desse aparelho. O aquecedor a gás, mesmo com menor rendimento exergético que o coletor solar, maior manutenção e preço elevado na compra do equipamento, indicou ser a melhor opção na análise econômica. O aquecedor a gás apresentou menor VP de uso final, maior TIR (conforme Quadros 7, 8, 9 e 10) e menor tarifa (R\$/kWh) no horizonte de planejamento, na maioria das tarifas aplicadas aos equipamentos residenciais de aquecimento de água. Na Figura 1, apresenta-se o valor presente dos custos totais da energia elétrica (R\$/kWh de uso final) dos equipamentos residenciais de aquecimento de água (Quadros 7, 8, 9 e 10).

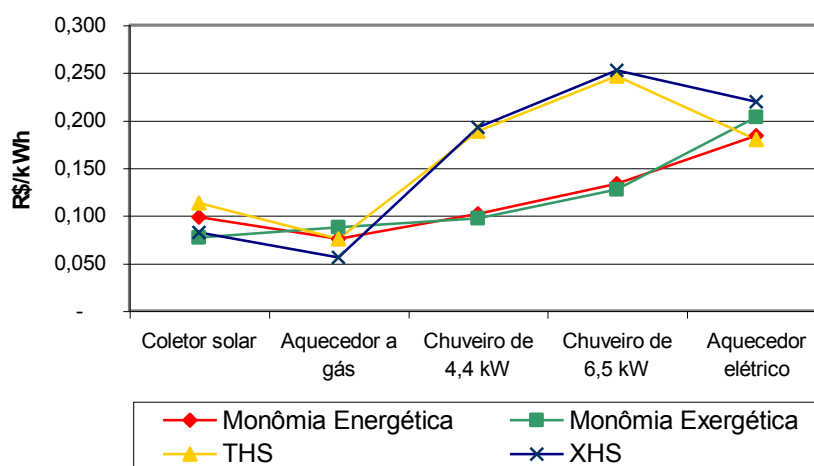


Figura 1 – Custo total dos equipamentos residenciais de aquecimento de água no horizonte de planejamento das tarifas aplicadas.

A Figura 1 indica que o maior custo total, no horizonte de planejamento, foi na aplicação das tarifas horo-sazonais para o chuveiro de 6,5

kW. Isso devido à sua elevada demanda e consumo na ponta e à sua baixa eficiência exergética, pois os chuveiros convertem energia elétrica, que é nobre, em calor. O aquecedor elétrico não se mostrou atraente na maioria das tarifas aplicadas, devido aos baixos rendimentos energético e exergético.

Nas Figuras 1A, 2A, 3A e 4A, do Apêndice, apresentam-se os custos dos equipamentos de aquecimento de água com as tarifas consideradas. Foram discriminados gastos com energia, capital inicial e manutenção.

Os equipamentos com acumuladores de água apresentaram vantagens em relações aos demais, mesmo o aquecedor elétrico, que teve a maior taxação na tarifa exergética horo-sazonal. Esses equipamentos podem ter seu consumo e demanda deslocados totalmente para fora do horário de ponta, por exemplo, por meio de “timers” ou por meio do dimensionamento do reservatório de água. Assim, acumulando água quente suficiente para os banhos no horário de ponta, não haverá necessidade de mudança de hábitos dos consumidores. De todos os equipamentos, o coletor solar apresentou o menor gasto com energia elétrica, podendo reduzir ainda mais esse valor se seu consumo for deslocado para fora do horário de ponta da curva de carga do sistema elétrico.

Análise de sensibilidade de aspectos econômicos dos equipamentos residenciais de aquecimento de água

A variável utilizada para análise de sensibilidade em todas as tarifas aplicadas foi o custo total do equipamento em reais descontados por kWh de uso final consumido (R\$/kWh) no horizonte de planejamento. Analisou-se a variação na taxa de juros ou do custo de oportunidade, bem como incentivos no custo inicial do capital para aquisição do coletor solar, aumento da energia acima da inflação e tempo de utilização anual dos equipamentos e de diferentes valores de tarifas de energia elétrica.

Variação na taxa de juros ou custo de oportunidade

Utilizando como caso-base o valor de 12% ao ano como custo de oportunidade, simulou-se a variação dessas taxas nos valores de 6, 8, 10, 14, 16, 18 e 20% ao ano, para cada tarifa (Figuras 2, 3, 4 e 5).

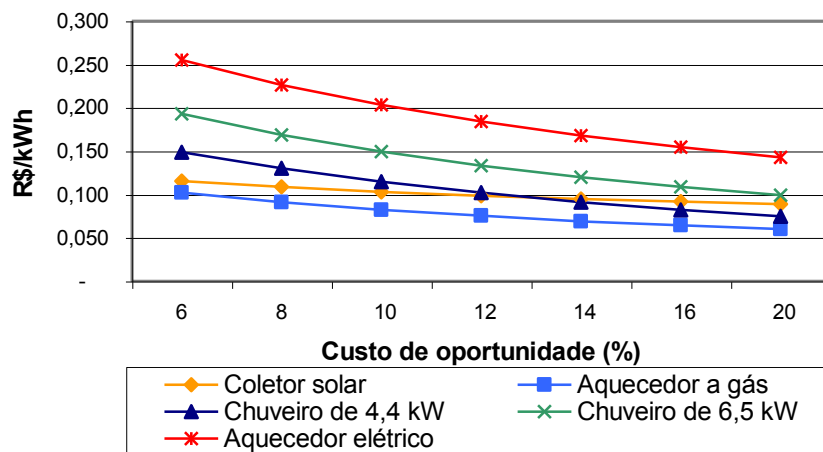


Figura 2 – Variação dos custos totais (R\$/kWh) no horizonte de planejamento com diferentes custos de oportunidade na tarifa monômica energética.

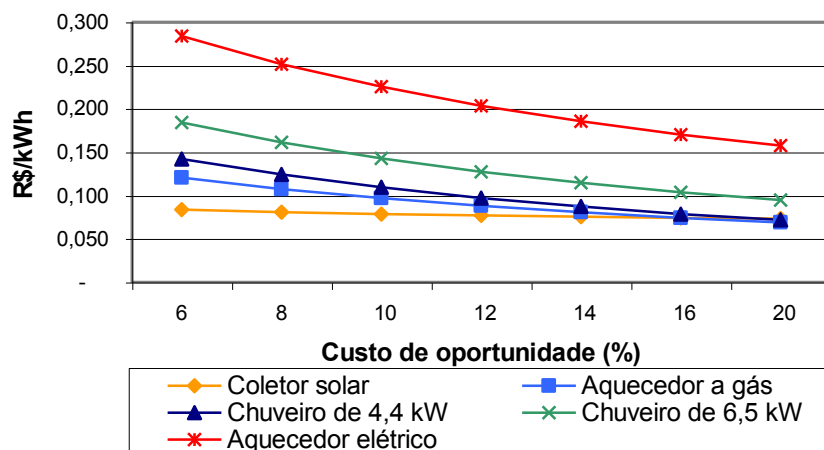


Figura 3 – Variação dos custos totais (R\$/kWh) no horizonte de planejamento com diferentes custos de oportunidade na tarifa monômica exergética.

Para as tarifas monômicas, o custo de oportunidade não influenciou a variação do custo total do aquecedor elétrico e do chuveiro de 6,5 kW. Suas tarifas mantiveram-se as mais altas de todos os equipamentos. O coletor solar, que é o equipamento com menor custo com energia elétrica, apresentou ser viável na tarifa exergética horo-sazonal somente com o custo de oportunidade inferior a 12%. Na tarifa monômica energética, o aquecedor a gás apresentou sempre o menor custo total, independentemente da percentagem do custo de oportunidade. O chuveiro de 4,4 kW é a melhor opção em relação ao coletor solar para o custo de oportunidade superior a 13%. Os equipamentos de maior custo inicial elevado se tornam mais atraentes com taxas reduzidas do custo de oportunidade.

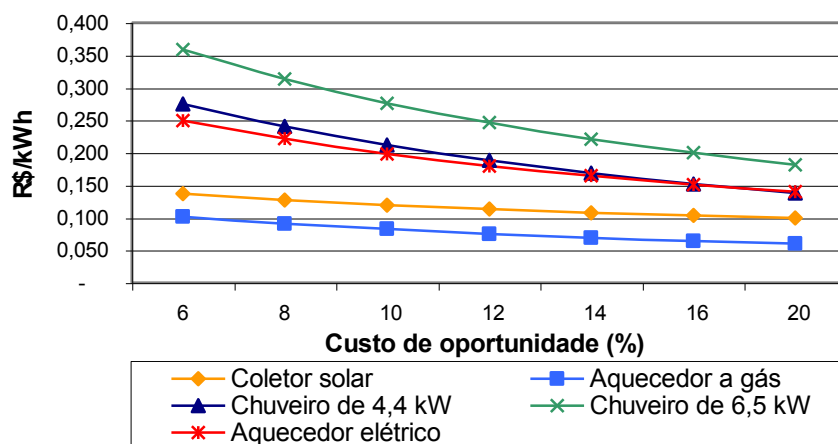


Figura 4 – Variação dos custos totais (R\$/kWh) no horizonte de planejamento com diferentes custos de oportunidade na tarifa horo-sazonal amarela.

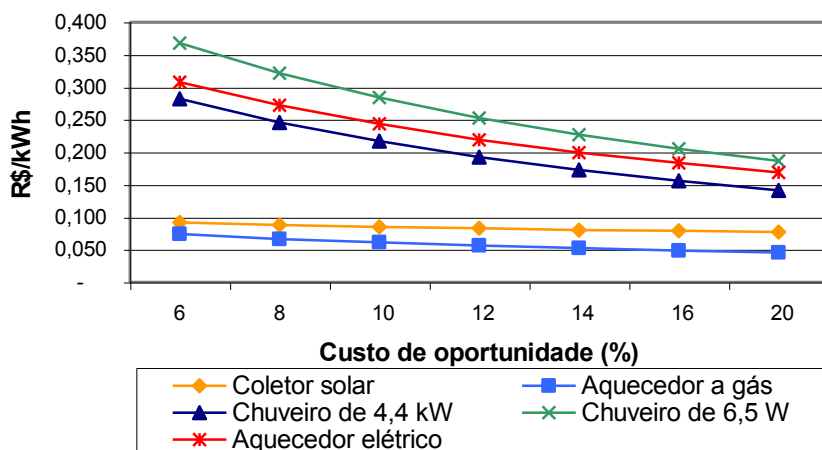


Figura 5 – Variação dos custos totais (R\$/kWh) no horizonte de planejamento com diferentes custos de oportunidade na tarifa exergética horo-sazonal.

Nas tarifas horo-sazonais, os chuveiros e o aquecedor elétrico apresentaram o maior custo total no horizonte de planejamento. Os chuveiros, assim como o aquecedor elétrico, por apresentarem demanda e consumo altos no horário de ponta e baixa eficiência exergética têm tarifas elevadas. O coletor solar e o aquecedor a gás não tiveram grandes variações nas tarifas, indicando que o aquecedor a gás é a melhor opção, seguido do coletor solar. Praticamente não houve variações nas posições dos equipamentos, em relação as tarifas no horizonte de planejamento, com a mudança dos índices do custo de oportunidade das tarifas horo-sazonais.

Variação do custo total do coletor solar em razão do custo inicial

Simulou-se a aplicação de subsídios de 25 e 50% no valor do custo do capital inicial para a aquisição do coletor solar, bem como o aumento no custo desse equipamento de 25 e 50%. O coletor solar não foi o equipamento mais viável economicamente, devido ao alto custo inicial. A redução no custo do capital pode atrair os consumidores residenciais a adquirir esse equipamento, principalmente, pelo menor custo com energia elétrica e manutenção, durante o horizonte de planejamento (GELLINGS e TALUKDAR, 1986). Nas Figuras 6, 7, 8 e 9, mostra-se essa variação no preço do coletor solar nas diferentes tarifas aplicadas aos equipamentos residenciais de aquecimento de água.

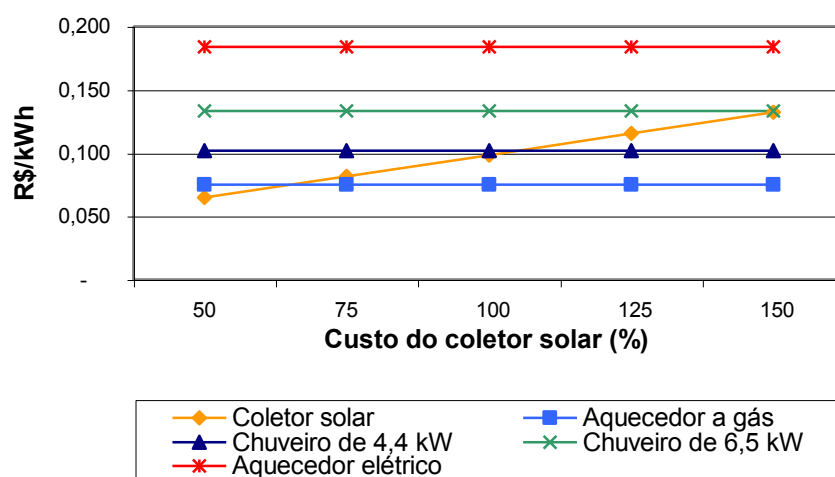


Figura 6 – Variação do custo total do coletor solar em relação aos demais equipamentos na tarifa monômnia energética.

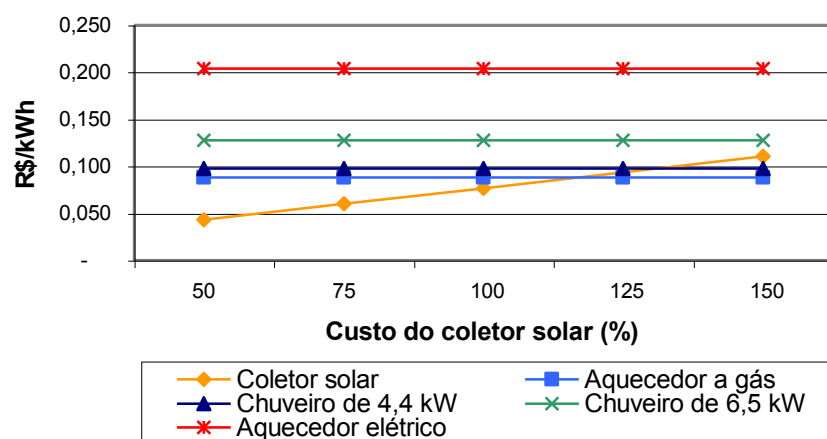


Figura 7 – Variação do custo total do coletor solar em relação aos demais equipamentos na tarifa monômnia exergética.

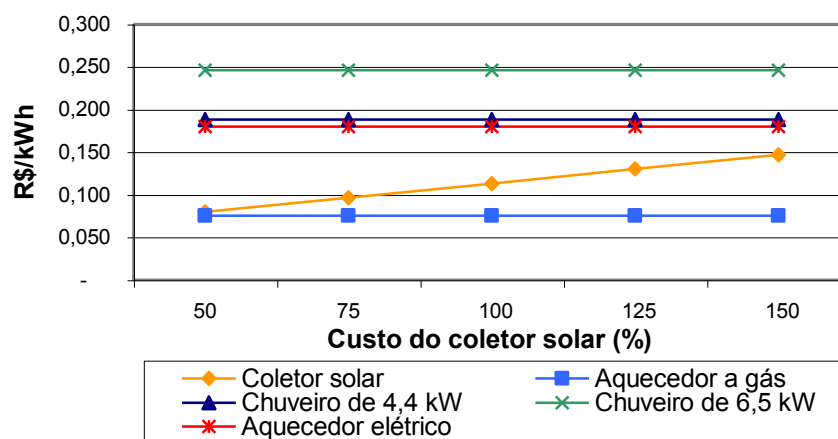


Figura 8 – Variação do custo total do coletor solar em relação aos demais equipamentos na tarifa horo-sazonal amarela.

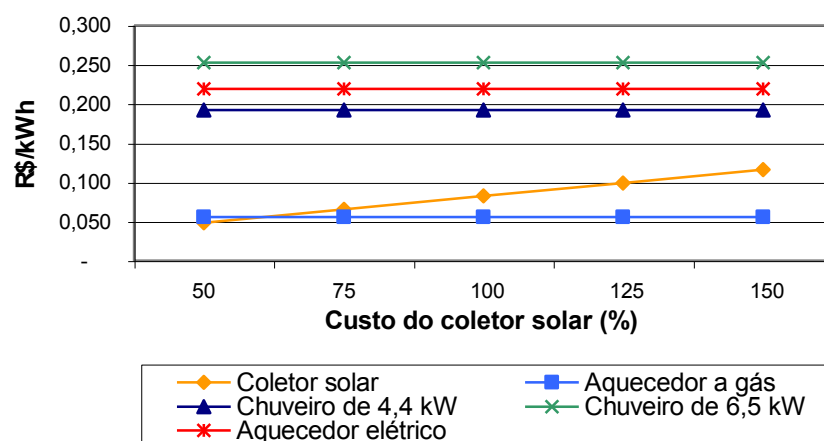


Figura 9 – Variação do custo total do coletor solar em relação aos demais equipamentos na tarifa exergética horo-sazonal.

O coletor solar apresentou a maior eficiência exergética em relação aos demais equipamentos, mas seu custo total torna-se atraente somente após 50% de subsídio no capital para a maioria das tarifas. Exceto na tarifa monômnia exergética, o coletor solar, sem subsídio, indicou ser o equipamento mais viável economicamente. Na tarifa horo-sazonal amarela, o aquecedor a gás ainda é o melhor equipamento para aquisição. Somente com o subsídio de 56,5% é que o coletor solar terá o mesmo custo total do aquecedor a gás no horizonte de planejamento. Ressalta-se que os subsídios trazem vantagens para o consumidor, para a concessionária de energia elétrica e para a sociedade. Para o consumidor, esse subsídio tornará possível a aquisição do equipamento, trará maior economia com energia e manutenção, além de aumentar a qualidade do banho. Para a concessionária, o resultado maior é a

retirada de carga do horário de ponta, melhorando seu fator de carga, com conseqüente menor custo marginal por kWh a ser gerado. Para a sociedade, o subsídio proporcionará a utilização racional dos recursos naturais e menores perturbações ao meio ambiente. No entanto, ressalta-se que há outras possíveis aplicações de recursos sociais.

O aumento de preço do coletor solar em 50% implica, ainda, atratividade econômica maior que o aquecedor elétrico e o chuveiro de 6,5 kW em todas as tarifas estudadas.

Aumento da energia acima da inflação

O aumento da tarifa de energia no horizonte de planejamento é um dos fatores que altera consideravelmente os custos totais dos equipamentos que utilizam somente a energia elétrica como fonte energética.

Nas Figuras 10, 11, 12 e 13, mostram-se os custos totais dos equipamentos para as diferentes tarifas adotadas.

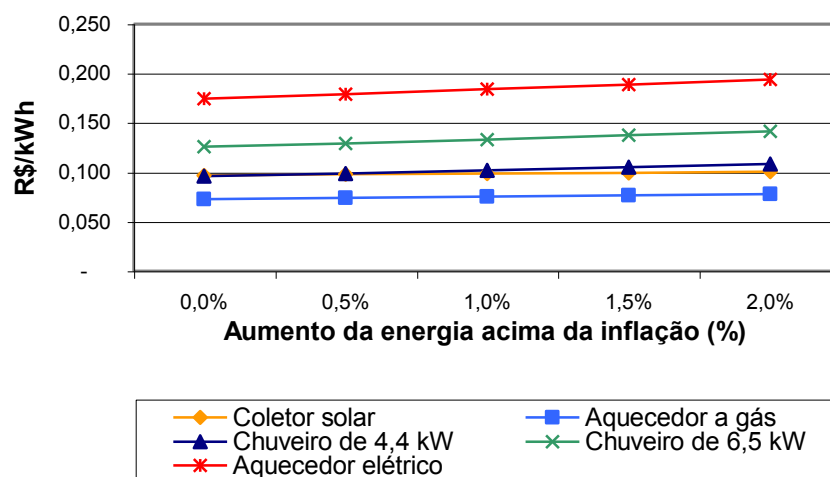


Figura 10 – Variação do custo total dos equipamentos em relação ao custo da energia na tarifa monômnia energética.

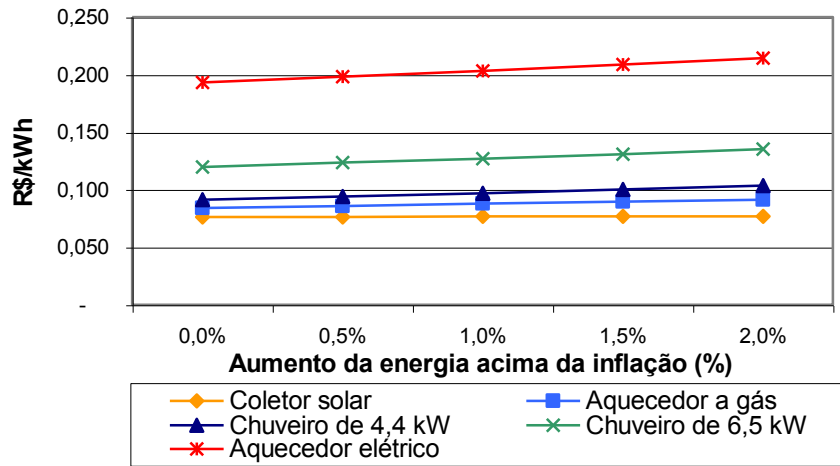


Figura 11 – Variação do custo total dos equipamentos em relação ao custo da energia na tarifa monômnia exergética.

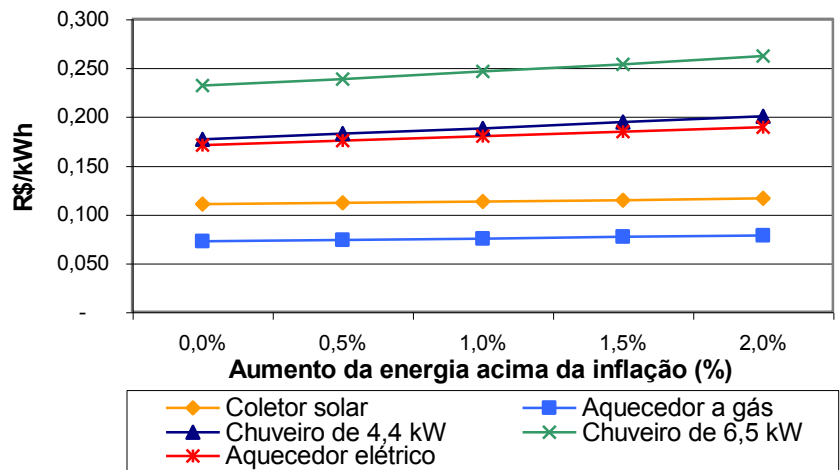


Figura 12 – Variação do custo total dos equipamentos em relação ao custo da energia na tarifa horo-sazonal amarela.

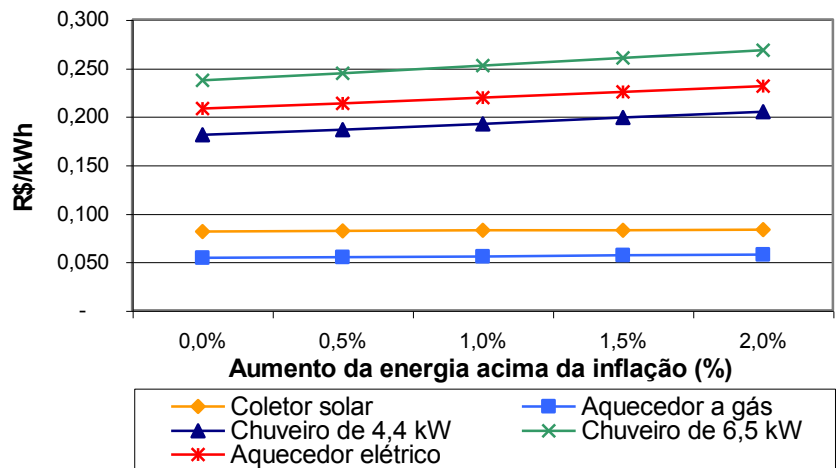


Figura 13 – Variação do custo total dos equipamentos em relação ao custo da energia na tarifa exergética horo-sazonal.

O aumento da energia de 0,5% ao ano acima da inflação na tarifa monômnia energética iguala os custos totais do chuveiro de 4,4 kW com o coletor solar. Isso se deve ao pequeno investimento de capital inicial do chuveiro em relação ao alto capital inicial do coletor solar. Nas demais tarifas, o coletor solar e o aquecedor a gás se mostraram mais atrativos. Custos crescentes da energia elétrica ou de gás indicaram que o coletor solar e o aquecedor a gás se tornaram cada vez mais vantajosos. A pequena dependência de energia tributável no coletor solar causou menor impacto no custo total. Nas tarifas monômias, com valores de tarifa maiores no custo da energia, o aquecedor elétrico foi o equipamento com as maiores tarifas. Nas tarifas horo-sazonais, o chuveiro de 6,5 kW teve o maior custo total devido ao seu maior preço de capital inicial comparado ao chuveiro de 4,4 kW.

Tempo de utilização anual dos equipamentos

Avaliaram-se os equipamentos residenciais de aquecimento de água em relação ao tempo de utilização. Nas Figuras 14, 15, 16 e 17, apresentam-se os resultados dessas simulações.

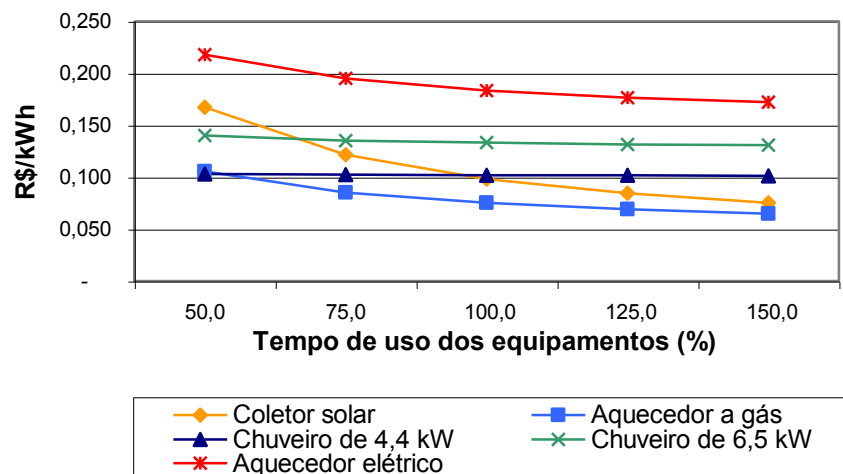


Figura 14 – Variação do custo total dos equipamentos em relação ao tempo de utilização na tarifa monômnia energética.

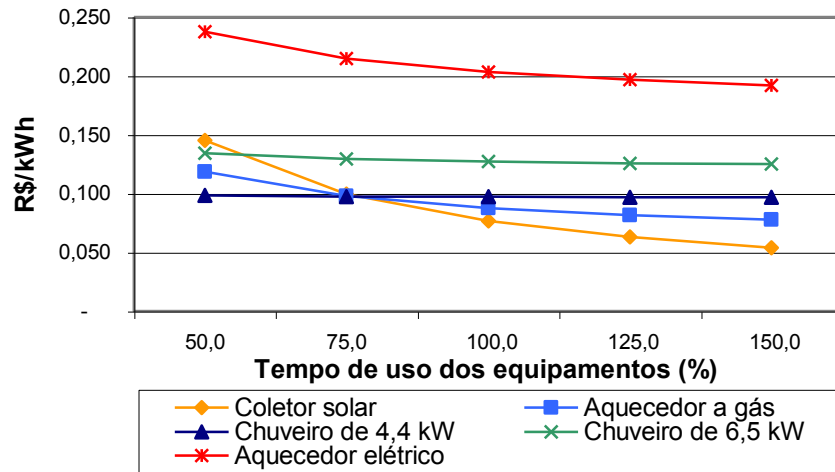


Figura 15 – Variação do custo total dos equipamentos em relação ao tempo de utilização na tarifa monômnia exergética.

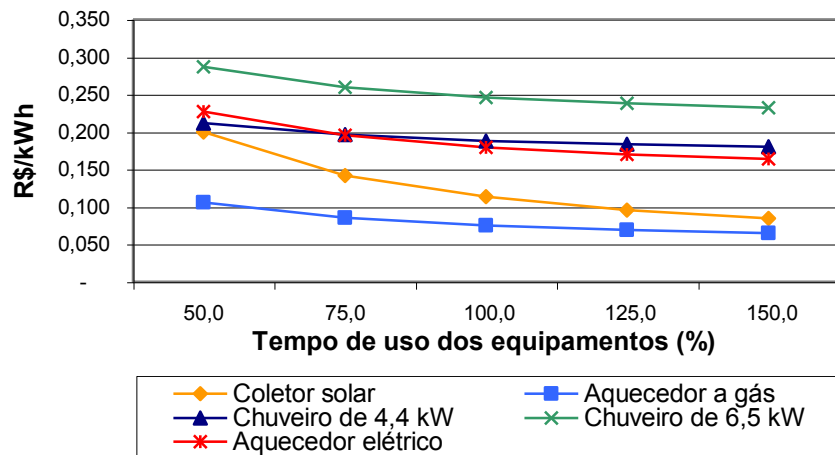


Figura 16 – Variação do custo total dos equipamentos em relação ao tempo de utilização na tarifa horo-sazonal amarela.

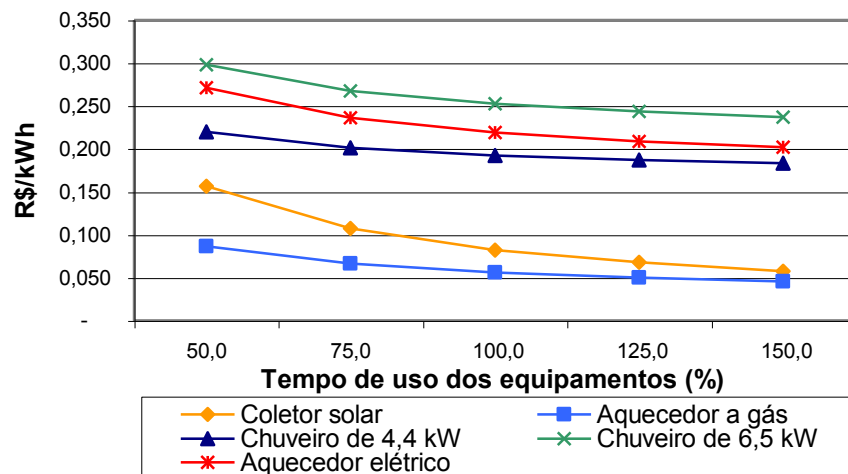


Figura 17 – Variação do custo total dos equipamentos em relação ao tempo de utilização na tarifa exergética horo-sazonal.

A relação dos custos totais dos equipamentos nas tarifas monômias e tarifas horo-sazonais diferiu bastante.

As tarifas monômias para o aquecedor elétrico foram superiores em qualquer variação do tempo de uso desse equipamento e mantiveram-se praticamente constantes no aquecedor a gás. A maior variação nas tarifas quanto ao tempo de uso dos equipamentos foi do coletor solar, e o chuveiro de 4,4kW teve suas tarifas constantes independentemente do tempo de uso. Percebeu-se que, quanto maior o custo inicial do equipamento, maior variação ocorre nas tarifas no horizonte de planejamento. Equipamentos com custo inicial pequeno pouco influenciaram a tarifa no horizonte de planejamento. Para o tempo de utilização dos equipamentos inferior a 50%, em relação ao tempo adotado no caso-base, o chuveiro de 4,4 kW mostrou ser o investimento mais econômico, com menores tarifas monômias no horizonte de planejamento. Somente para valores acima de 50% do tempo de utilização do caso-base é que o coletor solar passará ser o equipamento mais atrativo, com menores tarifas.

Considerando-se as tarifas horo-sazonais aplicadas no chuveiro elétrico de 6,5 kW, esse, mesmo sendo o segundo equipamento mais acessível em relação ao custo inicial, apresentou as maiores tarifas ao longo do horizonte de planejamento em qualquer percentagem de tempo de uso. A diferenciação de tarifas durante o dia e por uso final indicou que os equipamentos supridos com energia elétrica têm as maiores tarifas. Na tarifa exergética horo-sazonal, o aquecedor elétrico, por possuir reservatório de acumulação de água, teve suas tarifas reduzidas com mais de 50% do tempo de uso em relação ao chuveiro de 4,4 kW. Dentro da percentagem estudada para a variação do tempo de uso, o aquecedor a gás apresentou as menores tarifas horo-sazonais. As tarifas do coletor solar se aproximaram muito das do aquecedor a gás quando o tempo de uso aumentou. O coletor solar só terá custo total inferior, menores tarifas no horizonte de planejamento em relação ao custo total do aquecedor a gás, quando o tempo de uso aumentar em mais de 300%.

Valores diferenciados nas tarifas de energia

Nas diferentes tarifas aplicadas aos equipamentos de aquecimento de água, variaram-se os valores da tarifa de energia para obter o melhor custo total por equipamento. Nas tarifas monômias, os valores adotados foram de 80, 120, 130 e 150% do preço considerado no caso-base. Nas tarifas horo-sazonais, variaram-se tanto os valores da tarifa do consumo quanto as da demanda, em diferentes relações ponta e fora de ponta. A tarifa horo-sazonal amarela em regime experimental apresentou variação 27,6 vezes maior que a tarifa de demanda na ponta em relação à tarifa de demanda fora de ponta e 6,65 vezes maior que a tarifa de consumo na ponta em relação à tarifa de consumo fora de ponta (ANEEL, 1998). Os valores considerados como base nos cálculos foram as tarifas de consumo (x) e demanda (y) utilizadas para o horário fora de ponta da tarifa horo-sazonal amarela. Adotaram-se índices multiplicativos para as tarifas de demanda e consumo na ponta em relação à fora de ponta. Utilizaram-se os índices apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 – Índices utilizados nos valores das tarifas na ponta em relação às tarifas fora de ponta

Índices	Demanda		Consumo	
	Fora de ponta	Ponta	Fora de ponta	Ponta
D10-C2	x*	10x	y*	2y
D20-C4	x	20x	y	4y
D30-C8	x	30x	y	8y

* Letras representativas dos valores adotados nas tarifas fora de ponta.

Nas Figuras 18, 19, 20 e 21, apresentam-se os novos custos totais de cada equipamento residencial de aquecimento de água residencial em relação à variação nos preços dos valores de tarifa cobradas nas tarifas monômias e horo-sazonais.

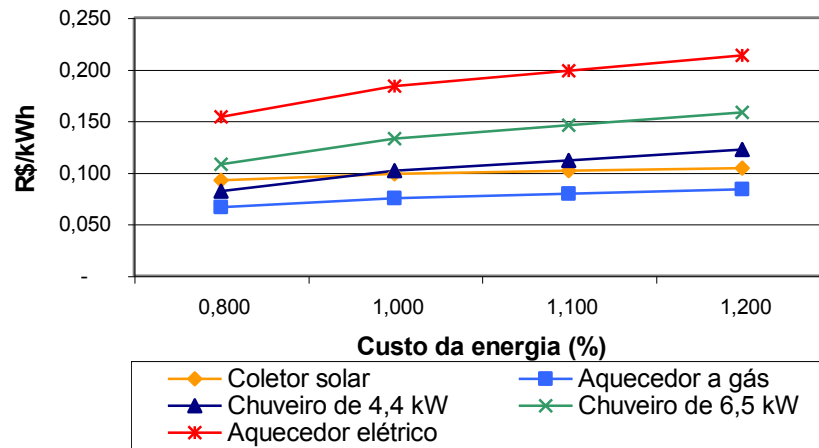


Figura 18 – Variação do custo total dos equipamentos em relação aos valores da tarifa monômnia energética.

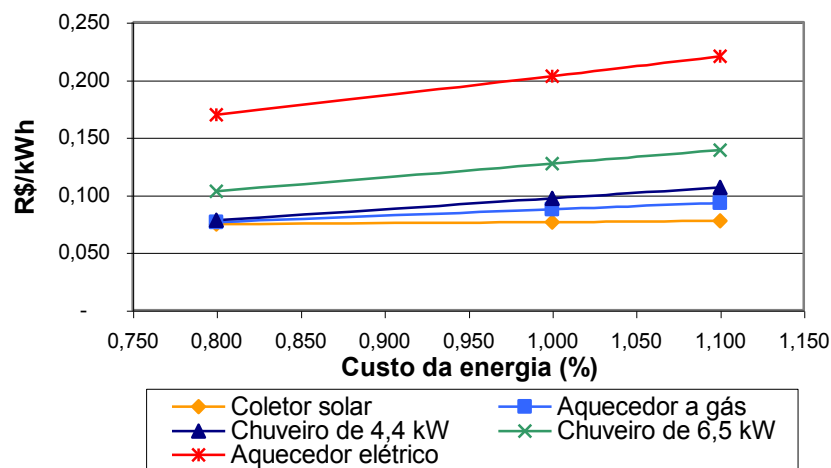


Figura 19 – Variação do custo total dos equipamentos em relação aos valores da tarifa monômnia exergética.

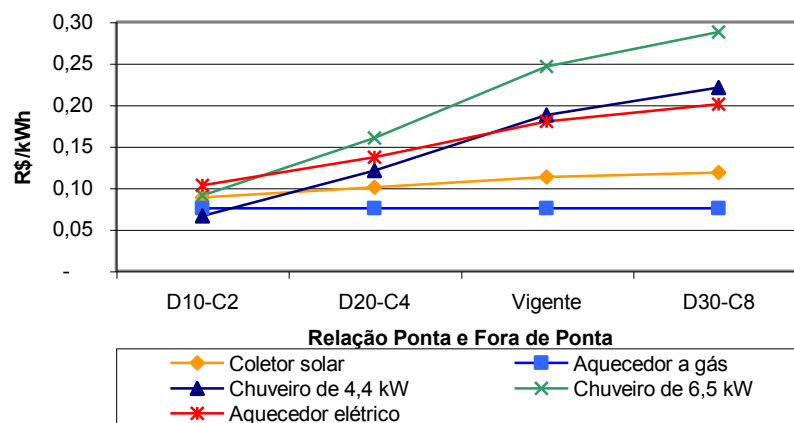


Figura 20 – Variação do custo total dos equipamentos em relação aos valores da tarifa horo-sazonal amarela.

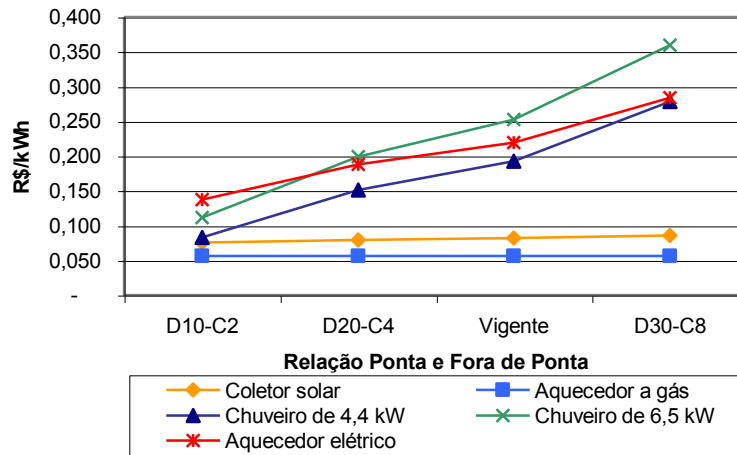


Figura 21 – Variação do custo total dos equipamentos em relação aos valores da tarifa exergética horo-sazonal.

O coletor solar nas tarifas monômias, comparado aos demais equipamentos, sofreu menores variações no custo total com o aumento da energia, o que se deve ao pequeno gasto desse equipamento com energia. Constatou-se que, quanto menor o custo da energia, mais se favorece o custo total dos demais equipamentos de menor preço de mercado e mais eficientes, no horizonte de planejamento. Conseqüentemente, quanto maior a tarifa de energia, maior o custo total de cada equipamento que utiliza somente energia elétrica como insumo para gerar calor.

Nas tarifas horo-sazonais, o preço do aquecedor a gás se manteve constante por não se enquadrar em qualquer critério de variação de preços durante o dia. Percebe-se que, quanto menor as tarifas horo-sazonais, mais se aproximam os custos totais dos equipamentos. Na tarifa horo-sazonal amarela, o chuveiro de 4,4 kW indicou o menor custo total na relação D10-C2; à medida que a relação consumo e demanda na ponta e fora de ponta aumentou, o aquecedor a gás e o coletor solar passaram a ser novamente os equipamentos de menor custo total.

Na tarifa exergética horo-sazonal, o gás permaneceu com o menor custo total, independentemente de como variou a energia na ponta ou fora de ponta. O chuveiro de 4,4 kW, com menor custo de capital e menor eficiência exergética, equiparou-se ao coletor solar, na simulação D10-C2. Com a elevação das tarifas, aumentou a diferença entre os custos totais dos equipamentos que utilizaram somente energia elétrica em relação aos demais. O chuveiro de 6,5 kW, devido à sua maior demanda, passou a ter o pior custo

total para aquisição ao longo do horizonte de planejamento, na simulação D30-C8.

5.4. CONCLUSÕES

De acordo com a metodologia apresentada de tarifar os equipamentos residenciais de aquecimento de água considerando o segundo princípio da termodinâmica, mostrou-se a importância do conceito exergético na avaliação da qualidade da energia nas diversas tarifas de energia vigentes e propostas neste trabalho para o setor residencial. Realizaram-se as análises exergética e econômica de cinco equipamentos residenciais de aquecimento de água (coletor solar, aquecedor a gás, chuveiro de 4,4 kW, chuveiro de 6,5 kW e aquecedor elétrico). Estudou-se a aplicação das tarifas monômias e horosazonais energéticas e exergéticas. O coletor solar apresentou a melhor eficiência exergética e o aquecedor elétrico, a pior.

A análise exergética que qualifica a energia e o uso adequado dos recursos naturais foi utilizada na proposição de tarifas de energia. Perceberam-se contribuições significativas dessas tarifas para o consumidor, para a concessionária e para a sociedade. O aquecedor a gás apresentou, na maioria das análises realizadas, o menor custo total, mas com o menor rendimento exergético que o coletor solar. Portanto, a adoção de equipamentos exergeticamente mais eficientes depende de intervenções da sociedade. A adoção de equipamentos com alta eficiência exergética, como o coletor solar, dependerá de subsídios para reduzir o custo total do equipamento. A adoção do coletor solar melhora o fator de carga do sistema e aumenta a confiabilidade de suprir energia elétrica durante os momentos de maior demanda, horário de ponta elétrico. Esse é um forte argumento para chamar a atenção das concessionárias e da sociedade para programas de gerenciamento pelo lado da demanda que possam aplicar as tarifas exergéticas e subsidiar processos e equipamentos mais eficientes como o coletor solar.

Neste trabalho, propôs-se a implementação de tarifas de uso final, baseadas no primeiro e segundo princípios da termodinâmica, para valorizar o recurso natural e aproveitá-lo, com o máximo de rendimento, na conversão de

sua energia em trabalho útil. A aplicação de tarifas exergeticas necessita da atualização constante de informações sobre o uso final da energia por setor ou atividade para avaliar seu rendimento e ajustar os índices de cobranças.

A participação da sociedade organizada na decisão por essas tarifas é fundamental para incentivar novas tecnologias que valorizem a energia de uso final. Assim, idéias simples, como a modificação do sistema auxiliar de aquecimento de água do coletor solar de elétrico para gás, possam ser implementadas com sucesso.

5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução n. 56, de 3 de março de 1998**. <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res1998056.pdf>. Brasília, DF. Data da consulta: 8 de fevereiro de 2001.

ARRUDA L. F., DOMINGOS, M. M., ALVES, T. M. M. Gerenciamento de cargas de consumidores de baixa renda. **Eletricidade Moderna**, n. 290, p. 154-160, maio, 1998.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME. **O aquecedor solar de água para o setor elétrico e para o usuário final**. São Paulo: MME, 1996. 34p.

BUARQUE, C. **Avaliação econômica de projetos: uma apresentação didática**. Rio de Janeiro: Campus, 1984. p. 266.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. Departamento de Utilização da Energia. **Gerenciamento pelo lado da demanda, GLD, da região do Vale do Jequitinhonha**. Belo Horizonte: CEMIG, 1995a. 33p.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. **Energia solar para aquecimento de água**. Belo Horizonte: CEMIG/PROCEL, 1995b. 40p.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. Departamento de Marketing e Gestão Comercial. **Pesquisa de hábitos de consumo, de posse de eletrodomésticos e de qualidade do fornecimento**. Belo Horizonte: CEMIG, 1996. 122p.

COSTA, J. M., OLIVEIRA FILHO, D. Tarifas exergeticas horo-sazonais. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, AGRENER. 2000. Campinas, SP. (CD ROM)

- ELETROBRÁS – Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético. **Energia e desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Instituto de Economia da UFRJ, 1998. 160p.
- GELLINGS, A. C. W., TALUKDAR, S. N. **Load management concepts**. New York: Institute of Electric and Electronic Engineers, 1986. 207p.
- JANNUZZI G. M., SWISHER, J. N. P. **Planejamento integrado de recursos energéticos: meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis**. Campinas, SP: Ed. Autores Associados, 1997. 246p.
- LAPONNI, J. C. **Avaliação de projetos de investimento: modelos em Excel**. São Paulo: Laponni Treinamento e Editora Ltda., 1998. 264p.
- LEAL, P. A. M., de PEREZ, S. A. N., CORTEZ, L. A. B. **Avaliação exergetica do processo psicrométrico: Resfriamento evaporativo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, Ilhéus, 1993, **Anais...** Ilhéus, BA, 1993. p. 632–645.
- LOZANO, M. A., VALERO, A. Theory of the exergetic cost. **Energy**, Great Britain, v. 18, n. 9, p. 939-960, 1993.
- MICROSOFT. Excel – 2000.
- PINHEIRO, S. F. Conservação de energia elétrica: recurso energético renovável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 1, Campinas, 1989. **Anais...** Campinas, SP: [s.n.], 1989. p 95–108.
- OLIVEIRA, de A., GUTIERREZ, M. M. S. As dimensões do desenvolvimento energético sustentado. In: **Energia e desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro, RJ: Instituto de Economia da UFRJ – Eletrobrás, 1998. p. 28–59.
- OLIVEIRA FILHO, D. **Electric energy system planning and the second principle of thermodynamics**. Quebec, 1995, 199p. Thesis (Doutorado) – McGill University, Montreal, 1995.
- SHERR, H. **O manifesto solar: energia renovável e a renovação da sociedade**. Rio de Janeiro, RJ: Creserb – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito/ Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 1995. 263p.
- TANABE, C. S., OLIVEIRA FILHO, D., CORRÊA, G. A. Tarifas exergeticas para irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27 – CONBEA, 1997. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba/SBEA. (CD-ROM).

TANABE, C.S. **Viabilidade da análise exergética na elaboração de tarifas de energia elétrica**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1998. 72p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.

VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1985. 318p.

WALL, G. **Exergy conversion in the japanese society**. *Energy*, Great Britain, v. 15, n. 5, p. 435–440, 1990.

APÊNDICE

APÊNDICE A

Quadro 1A – Comparação entre o custo de energia na aplicação das diferentes tarifas aos equipamentos residenciais de aquecimento de água (primeiro ano)

Tarifas	Consumo (%)		Demanda (%)		Total (%)	
	Ponta	Fora da ponta	Ponta	Fora da ponta		
Monômia energética	Coletor solar		6,6		6,6	
	Aquecedor a gás		9,9		9,9	
	Chuveiro de 4,4 kW		22,4		22,4	
	Chuveiro de 6,5 kW		28,0		28,0	
	Aquecedor elétrico		33,2	-	33,2	
	Total (R\$)		100,0			100,0
	* Não incluindo o custo do gás		90,1			
Monômia exergética	Coletor solar		1,8		1,8	
	Aquecedor a gás		12,7		12,7	
	Chuveiro 4,4 kW		21,3		21,3	
	Chuveiro 6,5 kW		26,7		26,7	
	Aquecedor elétrico		37,6	-	37,6	
	Total (R\$)		100,0			100,0
	* Não incluindo o custo do gás		1,8			
Horo-sazonal amarela	Coletor solar	4,2	6,4	20,8	20,8	6,7
	Aquecedor a gás	9,5			-	6,7
	Chuveiro 4,4 kW	33,2	9,2	26,2	26,2	28,6
	Chuveiro 6,5 kW	41,5	11,5	38,7	38,7	36,2
	Aquecedor elétrico	21,1	31,9	14,9	14,9	22,0
	Total (R\$)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
		86,8		13,2		
	* Não incluindo o custo do gás		93,3			
Exergética horo-sazonal	Coletor solar	1,2	2,3	6,6	6,6	2,1
	Aquecedor a gás	5,4				
	Chuveiro 4,4 kW	32,9	11,7	29,6	29,6	29,0
	Chuveiro 6,5 kW	41,1	14,6	43,8	43,8	37,1
	Aquecedor elétrico	24,8	48,2	20,0	20,0	28,0
	Total (R\$)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
		86,8		13,2		
	* Não incluindo o custo do gás		96,2			

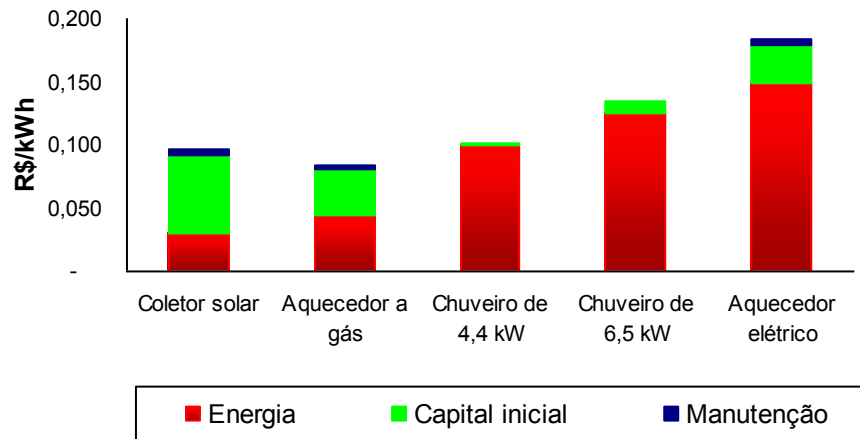


Figura 1A – Custos totais dos equipamentos residenciais de aquecimento de água na tarifa monômia energética.

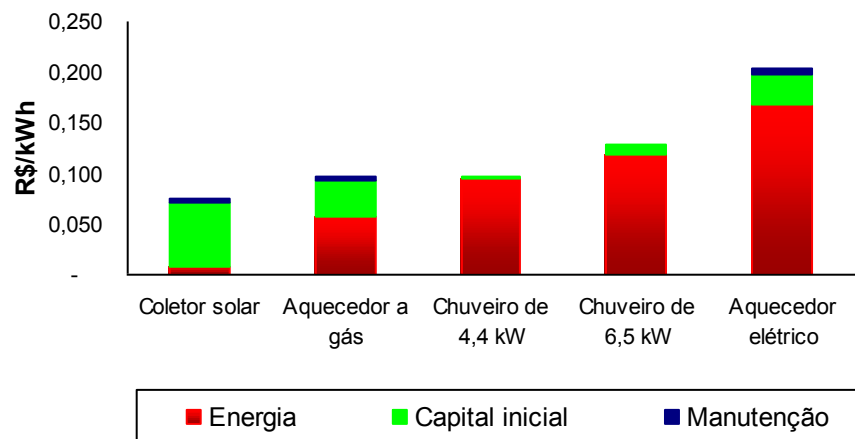


Figura 2A – Custos totais dos equipamentos residenciais de aquecimento de água na tarifa monômia exergetica.

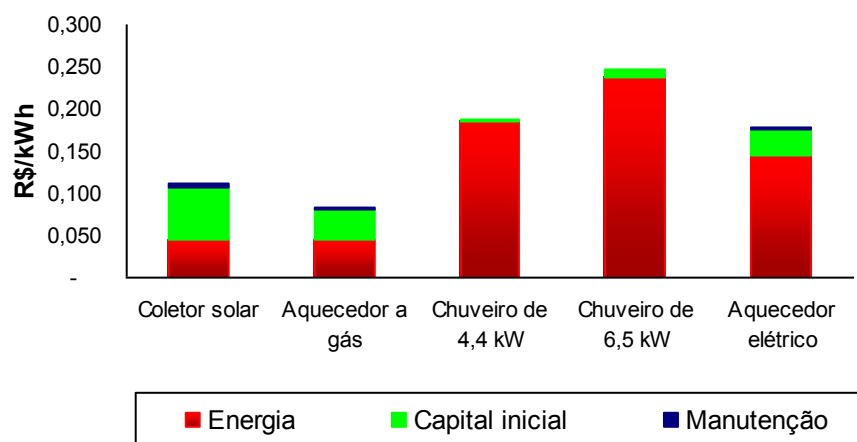


Figura 3A – Custos totais dos equipamentos residenciais de aquecimento de água na tarifa horo-sazonal amarela.

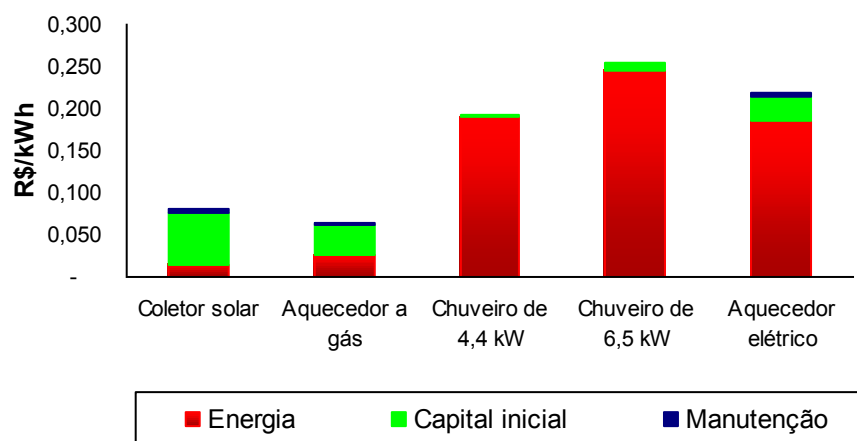


Figura 4A – Custos totais dos equipamentos residenciais de aquecimento de água na tarifa exergética horo-sazonal.

CONCLUSÕES GERAIS

Nesta tese, demonstrou-se a importância de taxar a energia elétrica pelo uso final dado a ela, possibilitando racionalizar o seu uso e, conseqüentemente, o dos recursos naturais. Ressalta-se que o uso racional de recursos naturais resulta em menor impacto ambiental, valorizando a importância do seu planejamento integrado. Essa visão integrada do planejamento vai desde o recurso natural até o uso final da energia.

Mostrou-se neste estudo a importância do uso conjunto do primeiro e do segundo princípio da termodinâmica como ferramenta para gerenciar o uso racional da energia. Primeiramente, discutiu-se a importância de atribuir tarifas diferenciadas para priorizar o uso de energia no que tange à sua qualidade. Mostrando o desafio da análise exergética, juntamente com o planejamento integrado dos recursos e o desenvolvimento sustentável, de taxar o uso do recurso natural e da utilização final para a escolha certa do par “recurso natural” e “uso final” da energia. Assim, demonstrou-se a importância de se atender às diferentes demandas dos consumidores, sem restringir o uso quanto ao horário do dia, mas com taxaçaõ específica – tarifa tipo de uso.

Em segundo lugar, considerou-se a análise exergética das tarifas de energia elétrica aplicadas em diversos setores da economia do Estado de Minas Gerais, ou seja, a aplicação de tarifa exergética de energia elétrica em setores da economia, como irrigação, comercial, industrial e residencial, com base no consumo de cada setor. Assim, constataram-se a importância da substituição de chuveiros elétricos por outros equipamentos que não utilizam energia elétrica no setor residencial; a compensação do setor de irrigação com

tarifas menores por usar a energia elétrica em grande parte para gerar tração; e a taxação da energia elétrica considerando a análise exergética.

Em terceiro lugar, propôs-se uma nova tarifa exergética horo-sazonal baseada na análise exergética e na tarifa horo-sazonal vigente. Valorizaram-se as tarifas pelo horário de uso e tipo de uso. Com a mesma estrutura da tarifa horo-sazonal, a tarifa exergética horo-sazonal quantificou o consumo e a demanda de energia, aliados ao uso dado a esta. Aplicou-se essa tarifa nos diversos setores da economia do Estado de Minas Gerais, como residencial, rural, industrial e comercial. Mostrou-se a aplicação da análise exergética na tarifação da energia elétrica em detrimento do atual sistema de cobrança de tarifas pelo rateamento de despesas da concessionária com os consumidores. O resultado da aplicação dessa tarifa revelou que o setor residencial deveria pagar maiores tarifas no horário de ponta do sistema elétrico, devido ao baixo fator de carga e elevado consumo e à baixa eficiência exergética pelo aquecimento de água por chuveiros elétricos. No horário fora de ponta, o setor comercial pagaria maior tarifa devido à baixa eficiência exergética da iluminação nesse setor.

Estudou-se, também, a avaliação exergética da adoção de carros elétricos em substituição aos carros a combustão interna que utilizam gasolina nas cinco regiões brasileiras, nos anos de 1999 e 2008. Estudaram-se nove tipos de configurações de uso dos recursos naturais para geração de energia elétrica, incluindo os cálculos das eficiências do primeiro e segundo princípios da termodinâmica. A eficiência dessas configurações indicou que a adoção do carro elétrico é viável nas regiões estudadas. Estabeleceram-se ações de gerenciamento do lado da demanda para remanejamento de cargas como chuveiros para fora do horário de ponta; e de melhoria do fator de carga nacional e aumento de geração de energia. Demonstrou-se que o deslocamento de 79,9% dos chuveiros, com o atual fator de carga nacional, seria necessário para atender à demanda de adoção dos carros elétricos no horário de ponta. O fator de carga encontrado para adoção do carro elétrico foi de 77% no ano de 1999 e de 61% para o ano de 2008. O aumento da geração de energia teria que ser de 25,3% em 1999 e 10,6% em 2008 para a adoção do carro elétrico. Tal adoção diminuiria a poluição, contribuiria, estrategicamente, para redução da importação do petróleo e diminuiria o impacto ambiental do setor de transportes.

Por último, estudaram-se, de forma integral, as análises exérgica, energética e econômica de equipamentos residenciais para aquecimento de água. Foram simulados quatro tipos de tarifas: monômia energética, monômia exérgica, horo-sazonal amarela e exérgica horo-sazonal. Perceberam-se contribuições significativas dessas tarifas para com o consumidor, a concessionária e a sociedade. Na maioria das análises realizadas, o menor custo total foi do aquecedor a gás, mas com rendimento exérgico menor que o do coletor solar. A adoção de equipamentos com alta eficiência exérgica, como o coletor solar, dependerá de subsídios para reduzir o custo total desse equipamento. A implementação do coletor solar indicou aumento do fator de carga do sistema e maior confiabilidade de suprir energia elétrica durante os momentos de maior demanda, especialmente o horário de ponta.

Foi demonstrada, então, por meio de estudos micro e macroeconômicos, a importância da análise exérgica no planejamento de sistemas elétricos. Este trabalho simulou o impacto da adoção de tarifas exérgicas monômias (taxação pelo consumo) e binômias em função do horário do dia (taxação pelo consumo e pela demanda). A taxação exérgica poderá contribuir para diminuição da dependência de combustíveis estratégicos, melhoria do fator de carga do sistema elétrico e, finalmente, para desenvolvimento econômico com menor impacto ambiental.