



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## IMPACTO DA QUALIDADE EXERGÉTICA DA ENERGIA FINAL NO CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA: CASO GÁS NATURAL

Alexandre Betinardi Strapasson<sup>1</sup>, Murilo Tadeu Werneck Fagá<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo. Rua Fernando Cretella, 372, Curitiba - PR, CEP 82600-460.  
Tel.: (41) 2577714. abs@iee.usp.br

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo. Av. Prof. Luciano Gualberto, 1289, São Paulo - SP, CEP  
05508-900. Tel.: (11) 30912634. murfaga@iee.usp.br

**Resumo** – O presente trabalho traz uma análise sobre a qualidade da energia utilizada em processos que demandam calor. Foram realizadas várias simulações de substituição de eletricidade por gás natural, nos usos finais térmicos de todos os setores de consumo da matriz energética nacional, com o objetivo de quantificar o potencial de economia de energia primária. Os rendimentos de primeira lei da termodinâmica e os rendimentos térmicos utilizados no processo de cálculo seguiram os valores adotados pelo Balanço Energético Nacional, na geração de eletricidade, e pelo Balanço de Energia Útil, nas transformações de energia final em energia útil. Em todas as simulações o gás natural apresentou vantagens sobre a eletricidade.

Palavras-Chave: eficiência energética; gás natural; planejamento energético; energia útil

**Abstract** - The present paper brings an evaluation about the energy quality used in processes that demand heat. Several simulations of substitution of the electricity by natural gas were estimated, in the thermal uses of all consumption sectors of the Brazilian energy mix. The first law efficiency of thermodynamics and thermal efficiency used in the evaluation followed the values adopted by National Energy Balance, about the electricity generation, and by Useful Energy Balance, about the transformations in useful energy. The natural gas presented advantages to the electricity in all simulations.

Keywords: energy efficiency; natural gas; energy planning; useful energy

## 1. Introdução

Ao longo das últimas décadas, o uso racional da energia tornou-se uma questão essencial às políticas de desenvolvimento e à manutenção da sustentabilidade ambiental. Com os grandes potenciais hidroelétricos já explorados, o país tende a diversificar sua matriz para poder aumentar a oferta de energia e garantir o suprimento de sua crescente demanda. As principais alternativas são: o gás natural, a biomassa, as pequenas centrais hidroelétricas e as energias solar e eólica. Dentre elas, o gás natural tem ocupado uma posição de maior destaque, devido a conclusão do gasoduto Bolívia-Brasil e a descoberta de novas reservas em território nacional (Santos et al., 2002). No entanto, pode-se atuar também sobre a redução da demanda e, com isto, reduzir o montante de investimentos em potência instalada. Uma das formas é utilizar racionalmente a energia, conforme a sua qualidade exergética. Entende-se como qualidade exergética o potencial de uma determinada forma de energia em produzir energia útil na forma de trabalho, uma vez que exergia é trabalho ou habilidade em produzir trabalho (Wall, 1990). Os programas de eficiência energética, historicamente, utilizam somente o conceito da primeira lei da termodinâmica na análise dos processos de conversão de energia, dando pouca relevância aos rendimentos térmicos decorrentes da geração de eletricidade, fato também observado nos estudos de Schaeffer (1990), Haddad et al. (1999).

A proposta deste trabalho é analisar a eficiência global de processos que demandam calor, envolvendo todas as etapas da cadeia, energia primária - energia final - energia útil (calor), a fim de trazer novos elementos ao planejamento energético nacional. A hipótese é que o uso adequado dos recursos energéticos, quanto a sua qualidade e finalidade, pode reduzir significativamente o consumo de energia primária. Para avaliar esse potencial de economia, foi realizada uma análise sobre o uso do gás natural no Brasil, segundo os rendimentos de eficiência energética. Foram realizadas algumas simulações de substituição da eletricidade por gás natural, sendo este de menor qualidade exergética, nos usos finais térmicos (calor de processo e aquecimento direto), para a obtenção de energia útil na forma de calor. A partir dessa análise são apresentadas propostas de uso adequado dos recursos energéticos, com o objetivo de reduzir o consumo de energia primária. Não foi objetivo deste estudo realizar uma análise econômica, porém, uma vez descobertos os potenciais de economia, ela será fundamental para a implantação efetiva de programas de eficiência energética; tampouco de realizar uma análise exergética ou uma discussão conceitual sobre exergia.

## 2. Objetivos

- Apresentar a importância do uso adequado da energia, quanto a sua qualidade exergética, para o planejamento energético nacional;
- Avaliar o potencial de economia de energia obtido através da substituição da eletricidade por gás natural nos usos finais: calor de processo e aquecimento direto.

## 3. Metodologia

### 3.1. Sobre a base de dados

Foram utilizados como base de dados o Balanço de Energia Útil - BEU (FDTE, 1996) e o Balanço Energético Nacional - BEN (MME, 2000). O BEU apresenta os rendimentos de eficiência energética na produção de energia útil para todos os usos finais, obtidos através de estudos anteriores da COPEL, CEMIG e IPT, e de um levantamento em mais de 350 empresas do país. Seguindo as orientações desse balanço, considerou-se como calor de processo, a geração de vapor, o aquecimento de água e de fluidos térmicos e, como aquecimento direto, a transferência direta de calor, sem o aquecimento de fluidos intermediários. O uso de refrigeradores foi considerado como força motriz, não sendo, portanto, contabilizado neste estudo.

### 3.2. Metodologia de cálculo

Através da base de dados foi elaborada uma nova matriz, pela qual pôde-se observar as principais transformações de energia final em energia útil, bem como, as perdas envolvidas nos processos de geração de energia. Não foram consideradas as perdas em transmissão e distribuição da eletricidade, assim como, na produção, transporte e distribuição do gás natural. Posteriormente, foram estimados os potenciais de economia de energia possíveis de serem obtidos através da substituição da eletricidade por gás natural, para os usos aquecimento direto e calor de processo, em todos os setores de consumo. Na tabela 1 são apresentadas as equações utilizadas na metodologia de cálculo.

Tabela 1: Equações

Energia útil (Q)		Energia primária (P)
$Q = \eta_{1el} E_{el}$	$Q = \eta_{1q} E_q$	$P = P_{el} - P_q$
$E_q = \frac{\eta_{1el} E_{el}}{\eta_{1q}}$	$E_{el} = \frac{Q}{\eta_{1el}}$	$P = \frac{Q}{\eta_t \eta_{1el}} - \frac{\eta_{1el} E_{el}}{\eta_{1q}}$
<p>Q = Energia útil na forma de calor  <math>E_{el}</math> = Energia final elétrica substituída  <math>E_q</math> = Energia final química equivalente  <math>\eta_1</math> = Rendimento da transformação de energia final elétrica (el) ou química (q) em energia útil na forma de calor</p>		<p>P = Energia primária economizada  <math>P_{el}</math> = Energia primária correspondente à energia final elétrica, para a produção de energia útil na forma de calor  <math>P_q</math> = Energia primária equivalente à substituição da eletricidade por energia final química  <math>\eta_t</math> = Rendimento térmico da geração de eletricidade</p>

Os valores iniciais de consumo de energia foram obtidos do BEN. Como a energia útil (Q) dos processos é a mesma, a energia elétrica substituída ( $E_{el}$ ) deverá ser compensada por uma quantidade equivalente de energia química ( $E_q$ ). A substituição de energia elétrica por química segue um comportamento linear, portanto, foram originadas retas que possibilitam visualizar o potencial de economia de energia primária (P) para diferentes percentuais de substituição. A energia útil foi calculada utilizando-se os rendimentos ( $\eta_1$ ) da FDTE. Enquanto que os rendimentos térmicos ( $\eta_t$ ) foram estimados para duas situações distintas: eficiência média atual do parque gerador térmico (27% - valor adotado pelo BEN, 2000); e eficiência média das novas plantas térmicas de alto rendimento sendo implantadas no Brasil (50% - valor estimado, segundo ordem de grandeza). Apesar da geração estar concentrada em aproveitamentos hídricos, até mesmo o Balanço Energético Nacional a considera com tendo rendimentos equivalentes aos da termoeletricidade. Portanto, nas simulações realizadas, toda a eletricidade foi considerada como sendo de fonte térmica, uma vez que o objetivo foi identificar quais são os melhores usos para o gás natural.

#### 4. Resultados e discussão

Na tabela 2 pode-se observar uma simulação do potencial de economia de energia primária obtida pela substituição de 50% da eletricidade por gás natural, para usos em calor de processo e aquecimento direto. Para calcular o potencial de economia para outros percentuais de substituição, mais próximos da realidade, pode-se fazer uma relação diretamente proporcional com os potenciais específicos de cada setor, pois o comportamento é linear. Optou-se em fazer neste trabalho apenas uma simulação para apresentar a relevância da análise e a ordem de grandeza do potencial de economia de energia, uma vez que ainda não existem dados detalhados e confiáveis da distribuição dos usos finais, por percentual de consumo e para cada setor. No entanto, através de alguns estudos específicos sobre a demanda de gás natural no Estado de São Paulo (PLE, 1993; SPG, 1993; Gomes, 1996; Mendes, 1996) já pode-se observar o imenso mercado dos setores residencial, comercial, automotivo e industrial.

Tabela 2: Simulação da economia de energia primária obtida para 50% de substituição de eletricidade por gás natural, nos usos calor de processo (CP) e aquecimento direto (AD), em ktep

Setores	Consumo total de energia*	Consumo total de eletricidade*	Consumo de eletricidade por uso**	$\eta_l^{**}$		Economia de energia	
				<i>el</i>	<i>q</i>	$\eta_l = 27\%$	$\eta_l = 50\%$
Energético	15390	2915	9 CP	0,97	0,90	11	4
			0 AD	0,90	0,90	0	0
Residencial	36696	23586	5354 CP	0,95	0,60	5676	1115
			755 AD	0,75	0,50	832	189
Comercial	13422	12638	240 CP	0,95	0,80	302	98
			827 AD	0,80	0,50	869	165
Público	8832	8036	40 CP	0,95	0,80	51	16
			346 AD	0,80	0,50	363	69
Agropecuário	9951	3590	7 CP	0,93	0,70	9	2
			29 AD	0,85	0,45	26	2
Transportes total	47489	342	0 CP			0	0
			0 AD			0	0
Industrial total	86328	40154	1621 CP			2059	679
			7931 AD			10931	4175
Cimento	4224	1309	27 CP	0,95	0,80	35	11
			33 AD	0,50	0,43	42	14
Ferro-gusa e aço	16221	4140	62 CP	0,95	0,80	78	25
			2711 AD	0,55	0,75	4027	1717
Ferro-ligas	2036	1505	0 CP	0,93	0,70	0	0
			1297 AD	0,55	0,55	1754	649
Mineração	2425	1637	33 CP	0,95	0,80	41	13
			83 AD	0,50	0,50	113	42
Pelotização	854	314	0 CP	0,95	0,80	0	0
			18 AD	0,50	0,50	24	9
Não-ferrosos	3449	2743	3 CP	0,95	0,80	3	1
			233 AD	0,55	0,50	304	105
Alumínio	6499	5462	5 CP	0,95	0,80	6	2
			1677 AD	0,55	0,50	2184	755
Química	9157	4731	293 CP	0,97	0,90	385	135
			293 AD	0,70	0,60	372	122
Alim. e bebidas	8773	3995	811 CP	0,95	0,80	1020	329
			224 AD	0,60	0,50	280	89
Açúcar	8575	469	0 CP	0,97	0,90	0	0
			0 AD	0,60	0,50	0	0
Têxtil	2288	1831	75 CP	0,97	0,90	99	35
			31 AD	0,50	0,50	42	16
Papel e celulose	8197	3297	175 CP	0,97	0,90	229	81
			10 AD	0,50	0,50	13	5
Cerâmica	3494	786	2 CP	0,93	0,70	2	1
			145 AD	0,55	0,50	189	65
Outros	10136	7937	135 CP	0,93	0,70	160	45
			1175 AD	0,50	0,50	1588	587
Total por uso final			7271 CP			8108	1914
			9887 AD			13021	4600
TOTAL	218108	91261	17157			21129	6514

\* Dados do Balanço Energético Nacional (MME, 2000)

\*\* Dados do Balanço de Energia Útil (FDTE, 1996)

Os resultados mostram que o uso do gás natural para obtenção de energia útil na forma de calor é muito mais interessante do que para a geração de eletricidade, seja através de plantas convencionais ou em plantas modernas de alto rendimento. Ao serem realizadas outras simulações, constatou-se que o gás é mais competitivo que a eletricidade para qualquer percentual de substituição, tanto para um rendimento térmico de 27% (gráficos 1 e 2), quanto para 50%. No entanto, em processos de geração de eletricidade que utilizem cogeração, o uso do gás natural pode ser adequado para geração de eletricidade, uma vez que o calor rejeitado ainda pode ser parcialmente convertido em energia útil (Mendes, 1996).

Gráfico 1: Economia de energia obtida pela substituição de eletricidade por gás natural, em diferentes percentuais, para uso em calor de processo, considerando-se uma eficiência média do parque gerador de 27%

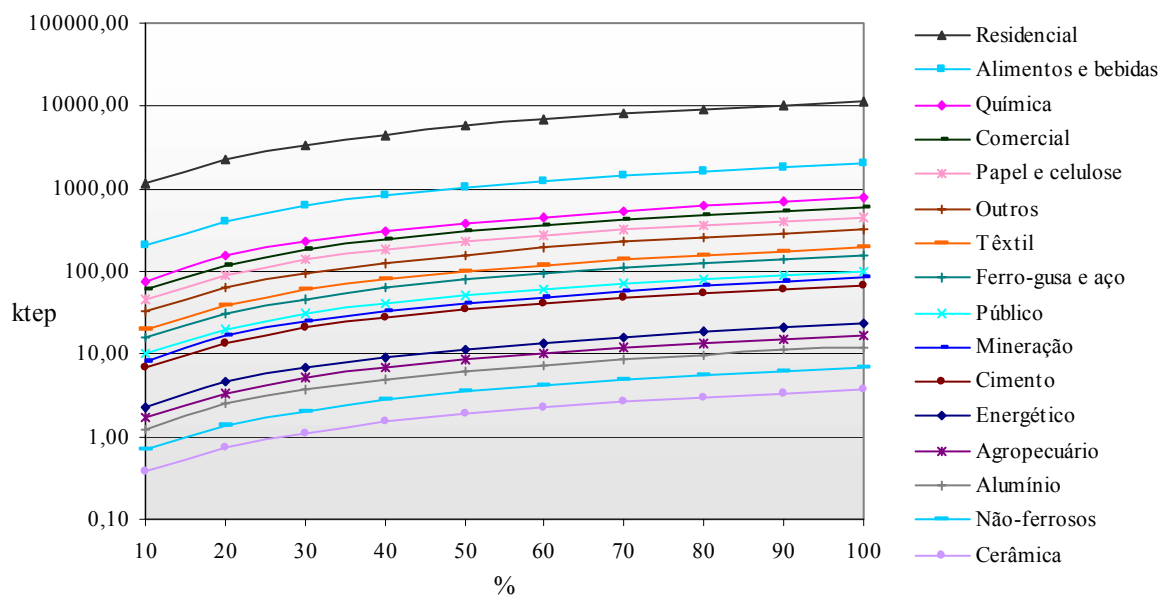
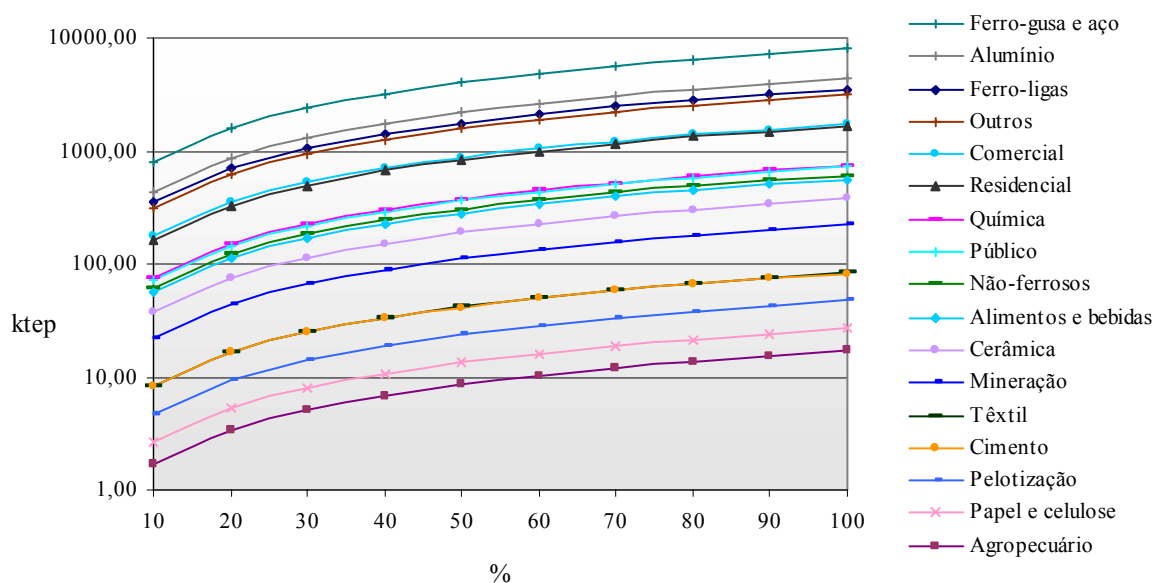


Gráfico 2: Economia de energia obtida pela substituição de eletricidade por gás natural, em diferentes percentuais, para uso em aquecimento direto, considerando-se uma eficiência média do parque gerador de 27%



## 5. Conclusão

O aumento da participação do gás natural na matriz energética nacional deve estar vinculado a um destino apropriado do combustível quanto a sua qualidade e finalidade. Este estudo mostrou que o uso do gás natural, como substituto da eletricidade em processos de uso térmico é, sensivelmente, mais vantajoso. O uso do gás natural no Brasil através da implantação de termelétricas deve ser melhor avaliado, uma vez que o seu uso difuso apresenta um grande potencial de substituição da eletricidade. Com a ampliação da geração térmica no país, surge um novo paradigma para o planejamento energético nacional, onde os programas de uso racional da energia devem analisar, além dos rendimentos de primeira lei da termodinâmica, a qualidade exergética da energia de acordo com o seu uso final.

## 6. Referências

- FDTE - Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia. *Balanço de Energia Útil: Modelo de Avaliação do Potencial de Economia de Energia*. São Paulo: FDTE, 1996. 170p.
- GOMES, I. A. *Uma Análise do Mercado e do Preço Competitivo de Gás Natural em São Paulo*. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1996. 217p.
- HADDAD, J. (Org.) et al. *Eficiência Energética: Integrando Usos e Reduzindo Desperdícios*. Brasília: ANEEL, ANP, 1999. 432p.
- MENDES, A. C. T. *Estudo dos Usos de Gás Natural no Estado de São Paulo, Considerando-se a Implantação do Gasoduto Brasil-Bolívia*. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1996. 174p.
- MME - Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional 2000: Ano Base 1999*. Brasília: MME, 2000. 57p.
- PLE - Pipeline Engineering GmbH. *Feasibility Study Assessment of Market Potential: Basic Study and Investment Estimate for Lateral Connection*. Germany: PLE, 1993.
- SANTOS, E. M. DOS (Org.) et al. *Gás Natural: Estratégias para uma Energia Nova no Brasil*. São Paulo: Annablume, 2002. 352p.
- SCHAEFFER, R. *Generalization of the Concept of Exergy at a National Level: A Tool for Energy Planning Using Brazil as a Case Study*. Tese de doutorado. Philadelphia, USA: University of Pennsylvania, 1990.
- SPG - Sociedade Privada do Gás. *Bolivia-Brasil integrated Gas Project: Prospects for the Participation of the Private Sector*. São Paulo: Technoplan & Jaako Poyry, 1993.
- WALL, G. Exergy Conversion in the Japanese Society. *Energy*. Vol. 15. N. 5. p. 435-444. Great Britain: Pergamon Press, 1990.