

## COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E INSUSTENTABILIDADE

Joaquim Francisco de Carvalho

**INTRODUÇÃO** Graças às radiações solares que incidiram sobre a Terra há centenas de milhões de anos, tiveram origem e se desenvolveram desde microorganismos, como bactérias e micro-algas, até árvores gigantes e grandes animais, cada qual com seu ciclo de vida, terminando em morte e decomposição.

Há cerca de 300 milhões de anos, troncos, raízes, galhos e folhas de árvores que cresceram e morreram em regiões pantanosas, depositaram-se no fundo lodoso e ficaram encobertas. O tempo e a pressão das camadas de terra que foram se acumulando sobre esses resíduos fossilizaram-nos e os transformaram em materiais homogêneos – a turfa e o carvão.

Durante as eras de aquecimento global – que se supõe terem ocorrido há 150 e há 90 milhões de anos – certas micro-algas, principalmente das famílias das *Botryococcus* e das diatomáceas, ricas em lipídeos, além de bactérias e remanescentes de plantas que viveram e morreram sobre superfícies aquáticas, submergiam e se incorporavam aos leitos de mares e lagos, decompondo-se e gerando os componentes básicos do petróleo. E as folhas e outros resíduos de plantas terrestres iam sendo carreados para o fundo do mar pelos rios ou pela erosão, criando, sob elevadas pressões e temperaturas, condições para a formação de gás.

Assim, os combustíveis fósseis consubstanciam energia solar acumulada por fotossíntese em vegetais e em determinados organismos que deles se nutrem, ao longo de milhões de anos.

Neste artigo é descrito, de forma sintética, o processo pelo qual a humanidade evoluiu no emprego de fontes de energia cada vez mais eficientes e é mostrado que os combustíveis fósseis – em particular o petróleo e o gás natural – exerceram uma influência decisiva sobre a criação e desenvolvimento das tecnologias industriais, agrícolas e de transportes em que se baseiam os processos produtivos e, conseqüentemente, os modelos econômicos, os costumes e a própria cultura da sociedade moderna. Em seguida são apresentadas algumas informações básicas sobre o carvão, o petróleo e o gás natural. Por fim, são analisadas as perspectivas que se abrem ao emprego do gás natural no Brasil, diante das importantes descobertas na plataforma continental, recentemente anunciadas pela Petrobras.

**PERSPECTIVA HISTÓRICA** A linha divisória que separou as comunidades neolíticas, das primeiras civilizações humanas foi a cultura irrigada de cereais, que surgiu na Mesopotâmia, há mais de 6 mil anos, tendo como fonte de energia a força muscular dos homens primitivos complementada pelo potencial dos rios. Ainda na Mesopotâmia, começou-se a usar a tração animal e a madeira (lenha para cocção de alimentos, aquecimento de cavernas e fornos primitivos).

Embora seja a madeira um combustível potencialmente renovável, a tecnologia para aproveitá-la em larga escala – a silvicultura – permaneceu estagnada durante muitos séculos. Apesar disso, como as populações primitivas eram rarefeitas, o próprio ciclo natural assegurava a regeneração e reposição das florestas.

Depois, ao longo dos séculos, foram-se agregando outras fontes de energia, tais como os ventos (barcos à vela, pilões, moinhos), o óleo de baleia, a turfa etc.

No limiar do século XVIII as florestas inglesas estavam sendo devastadas pela extração de lenha e materiais de construção (inclusive para os navios da armada) e o carvão era abundante e barato, chegando mesmo a aflorar à superfície do terreno, em determinadas regiões. Em pouco tempo, esse combustível passou à frente da madeira como fonte de energia e as jazidas mais fáceis foram-se esgotando.

A exploração teve então que descer ao subsolo, em poços e minas freqüentemente inundadas, tornando indispensável o bombeamento. Em 1712, Thomas Newcomen inventou a máquina a vapor, inicialmente empregada para acionar as bombas, nas minas de carvão. Essa máquina foi posteriormente aperfeiçoada por James Watt e passou a ser usada em fábricas, locomotivas, navios, etc. Sem ela, a Revolução Industrial não teria tomado o rumo que tomou. No século XIX, entre os anos de 1830 e 1840, o emprego da eletricidade nas comunicações (telégrafo) e na metalurgia (galvanoplastia) despertou o interesse dos empresários industriais, mas o grande impulso só veio em 1878, quando Thomas Edison colocou em condições de uso a lâmpada incandescente de filamento e Werner Siemens apresentou a primeira locomotiva elétrica.

Um pouco mais tarde, Nikola Tesla desenvolveu o motor de corrente alternada, graças ao qual a eletricidade (até então produzida preponderantemente em termelétricas a carvão) passou a ser usada nas fábricas, para o acionamento mecânico. Ao mesmo tempo, aperfeiçoava-se a turbina hidráulica, como alternativa para a turbina a vapor na geração elétrica. Apareceram então as primeiras hidroelétricas de certo porte, com linhas de transmissão que permitiam o uso da energia dos rios, nas cidades e nas fábricas.

Há registros históricos datando do quarto milênio antes de Cristo, relativos a usos de petróleo (do grego *πετρελαιον*, pelo latim *petra* = pedra + *oleum* = óleo) no Oriente Médio, onde são freqüentes as exsudações e afloramentos de hidrocarbonetos.

No início da era cristã, os árabes já o usavam em suas lâmpadas a óleo. E, por volta dos anos 1270 a 1280, no Azerbaijão, Marco Polo viu que o petróleo era produzido comercialmente. Mas foi na virada dos séculos XIX para XX que o petróleo passou a ser usado em larga escala. Começava então a “idade do petróleo”.

Embora o carvão ainda seja um dos combustíveis mais consumidos, foi o petróleo que consolidou o modelo industrial moderno, caracterizado pela produção em massa, com os setores mais dinâmicos forçando o desenvolvimento tecnológico de indústrias ligadas às suas linhas de produção.

O petróleo, abundante e barato, ofereceu as condições básicas para o vertiginoso desenvolvimento da indústria automobilística, com seus fornecedores e sub-fornecedores, e uma poderosa estrutura de distribuição e comercialização que se estende pelo mundo inteiro, em paralelo à indispensável rede de postos de combustíveis. Esse complexo industrial – que, em poucas décadas, consagrou o transporte individual e transformou o automóvel em suprema aspiração de posse das famílias – deu forma aos modernos sistemas de transporte e passou a responder por grande parte do PIB mundial.

Por dependerem diretamente de automóveis, ônibus, caminhões e outros produtos da indústria automobilística, os atuais modelos de urbanização, ocupação do território e uso dos solos constituem a própria imagem da “idade do petróleo”.

A globalização da economia também foi fruto da abundância de petróleo que – transportado por grandes petroleiros – torna-se disponível no mundo inte-

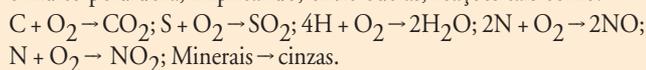
ro, permitindo a instalação de fábricas em países da Ásia, África e América Latina, onde populações que vivem no limiar da subsistência oferecem mão-de-obra por uma fração do custo da oferecida nos países ditos desenvolvidos.

A chamada “revolução verde” eclodiu graças aos fertilizantes e pesticidas de origem petroquímica e à mecanização das atividades rurais, alimentada a combustíveis derivados do petróleo. Essa revolução permitiu que a agricultura e os sistemas de transporte de cargas e conservação e comercialização de produtos agrícolas sustentassem uma explosão demográfica que, dos anos 1950 para cá, isto é, em pouco menos de 60 anos, elevou a população mundial de 2,5 bilhões para 6,5 bilhões de habitantes, sobre bases fisicamente insustentáveis em longo prazo.

A ilusão de que a tecnologia sempre daria ao homem capacidade para sustentar grandes populações em territórios pequenos calou de vez aqueles que ainda defendiam as idéias colocadas pelo economista e pastor anglicano Thomas Malthus, em seu célebre “Ensaio sobre o princípio da população” (1798), no qual escreveu que, se não fosse refreado, o crescimento da população – que obedece a uma lei exponencial – encontraria uma barreira natural na escassez de alimentos, cuja produção cresce apenas em progressão aritmética.

Em resumo, na medida em que ficavam mais problemáticas, as velhas fontes de energia iam sendo complementadas – senão substituídas – por novas fontes, mais eficientes: a força muscular foi complementada pela energia das águas e pela tração animal, que foi complementada pela energia eólica e pela lenha, que cedeu lugar ao carvão, que foi complementado pelo petróleo – ou por este substituído, na indústria, nos transportes e nos modernos sistemas agro-industriais. As novas fontes de energia induziam a criação e desenvolvimento de tecnologias industriais e agrícolas mais avançadas e, concomitantemente, as matrizes energéticas iam-se ajustando a essas fontes. Entretanto, até o presente não foram encontrados substitutos comparáveis ao petróleo e ao gás, no que diz respeito à densidade energética, à transportabilidade e a outras características, que lhes conferem as qualidades para serem usados em larga escala nos transportes, na indústria e na agricultura.

**CARVÃO** Dependendo de sua origem, o carvão pode conter 25% a 97% de carbono; 2% a 6% de hidrogênio; 2% a 20% de oxigênio, traços de nitrogênio e enxofre, além de diferentes minerais. A combustão do carvão é muito poluidora, implicando, entre outras, reações tais como:



Em função do teor de carbono, o carvão é classificado em quatro categorias:

1. Os lignitos (25% a 35% de carbono), que se encontram mais à superfície e são usados, principalmente, em usinas termelétricas.
2. Os carvões sub-betuminosos, com 35% a 45% de carbono. Os carvões brasileiros são, preponderantemente, sub-betuminosos e lignitos, com poder calorífico médio em torno de 3.600 kcal/kg.
3. Os carvões betuminosos, ou hulhas, com 46% a 85% de carbono e poder calorífico que pode chegar a 7.800 kcal/kg. Esses carvões constituíram a principal fonte de energia dos processos produtivos que surgiram com a Revolução Industrial e, até hoje, são os combustíveis mais empregados na geração termelétrica.
4. Os antracitos, com 86% a 97% de carbono, têm elevada dureza, porém seu poder calorífico é um pouco inferior ao dos carvões betuminosos. São empregados, principalmente, na indústria siderúrgica, em altos fornos e na produção de *pellets* de minério de ferro.

**PETRÓLEO** O termo petróleo designa uma grande variedade de misturas de hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos, de diversas massas moleculares. Nos petróleos pesados e betumes a proporção de hidrocarbonetos está em torno de 50% e nos leves pode chegar a 95%.

A rigor, o petróleo abrange três famílias de hidrocarbonetos:

1. Alcanos, que são hidrocarbonetos alifáticos saturados, de fórmula geral  $C_nH_{2n+2}$ , com cadeia linear ramificada ou não. Em função do número de átomos de carbono, ocorrem em estado gasoso, líquido ou sólido, cada um podendo conter, em mistura, traços dos outros dois.

Número de átomos de carbono na cadeia molecular	Estado físico em temperatura ambiente
1 a 4	Gasoso
5 a 15	Líquido
Acima de 15	Sólido

2. Hidrocarbonetos não saturados, com cadeia fechada, como os aromáticos, dos quais o mais simples é o benzeno ( $C_6H_6$ ).

3. Betumes, asfaltos e graxas, que são compostos de elevada massa molecular, ricos em nitrogênio, oxigênio, enxofre, níquel, etc.

A composição do petróleo varia de campo para campo, aproximadamente, da seguinte forma:

Elemento	C	H	N	O	S	Metais
%	83 a 87	10 a 14	0,1 a 2	0,1 a 1,5	0,5 a 6	< 1000 ppm

**GÁS NATURAL** Sendo formado nas mesmas condições e a partir de componentes semelhantes aos do petróleo, o gás geralmente ocorre associado a este – ou nele dissolvido, quando o reservatório está sob pressão elevada. Sua composição é basicamente a seguinte:

Um pouco abaixo da temperatura ambiente, o butano e o propano conden-

Componente	Metano ( $CH_4$ )	Etano ( $C_2H_6$ )	Propano ( $C_3H_8$ )	Butano ( $C_4H_{10}$ )	$CO_2$ ; $H_2S$ ; $N_2$ , etc.
%	75% a 90%	5% a 15%	< 5%	< 5%	Traços

sam-se, formando o gás liquefeito de petróleo ou GLP (não confundir com gás natural liquefeito, em condições criogênicas).

Para os transportes terrestres, marítimos e aéreos, o gás natural não substitui inteiramente os combustíveis derivados de petróleo, porém, apresenta a vantagem de ser extraído sob sua própria pressão, e facilmente transportado em gasodutos ligando os campos de gás às instalações de estocagem, que, por sua vez, são conectadas aos consumidores, por meio de redes de distribuição subterrâneas.

Em 2005 o gás natural respondeu por 21% da energia consumida no mundo, em grande parte, como combustível para usinas termelétricas instaladas em diversos países industrializados.

O gás natural também é matéria-prima para inúmeros produtos petroquím-

micos importantes, destacando-se as matérias plásticas, alguns produtos farmacêuticos e, principalmente, os fertilizantes nitrogenados, dos quais cerca de 80% vêm do gás natural.

**CONCLUSÃO** Graças ao petróleo (e, mais recentemente, ao gás natural), boa parte da humanidade se desenvolveu, nos últimos 120 anos, mais do que se tinha desenvolvido desde o início da era cristã, pelo menos materialmente. Para isso, foi consumida, nesses 120 anos, energia solar acumulada por fotossíntese ao longo de centenas de milhões de anos.

Agora, os mais respeitados geólogos do mundo – com raras divergências – colocam o pico da produção mundial de petróleo e gás em torno dos próximos 15 a 20 anos, o que significa que a “idade do petróleo” está chegando ao fim. Mas, antes de cair abruptamente, o consumo deverá passar por oscilações provocadas pelas crescentes dificuldades na exploração, com o conseqüente comportamento errático da demanda.

O petróleo e o gás abundantes e baratos tiveram uma influência decisiva sobre a criação e desenvolvimento das tecnologias industriais e agrícolas em que se estejam os processos produtivos e, conseqüentemente, os modelos econômicos, os costumes e a cultura da sociedade moderna, que, em muitos países, é calçada num consumismo desenfreado.

Seria ilusório esperar que, no Brasil, onde as instituições ainda são frágeis, os processos produtivos possam ser modificados somente pela ação das forças do mercado.

Ocorre que, sem petróleo e gás, serão inúteis as modernas tecnologias agrícolas, industriais e de transportes, de modo que a produção da economia não será suficiente para sustentar os mais de 220 milhões de habitantes que o país deverá ter quando a oferta daqueles combustíveis estiver escasseando. Não é difícil prever a gravidade da revolução social que então se deflagraria. À vista disso, o princípio da precaução sugere que o governo comece desde já a estudar linhas de ação a serem adotadas pelo Estado, para que este, em sua função de disciplinador das atividades econômicas, adote medidas destinadas a modificar substancialmente a maneira como a energia é hoje consumida.

Seria inútil insistir em que tais medidas devam ser aplicadas antes que sobrevenha um colapso de abastecimento. Para identificá-las e planejá-las é necessário que se tenha alguma informação, ainda que aproximada, sobre o prazo de duração das reservas de petróleo e gás técnica e economicamente aproveitáveis. Assim, apresenta-se, a seguir, um esboço de cálculo da duração das reservas brasileiras de gás natural, baseado na hipótese de que se confirmem – e não sejam apropriadas por empresas de países mais poderosos – as novas descobertas da Petrobras, e que sua exploração seja técnica e economicamente viável. Tal esboço é apenas indicativo e toma como ponto de partida o volume das reservas efetivamente medidas até 2005, que estão indicadas na tabela abaixo, que foi extraída do Balanço Energético Nacional de 2006, ano base de 2005.

**Reservas brasileiras de combustíveis fósseis, conhecidas até 2005**

Fonte: EPE/MME – BEN, 2006

Combustível	Unidade	Medidas	Estimadas	Total	Em mil tEP *
Petróleo	Mil m <sup>3</sup>	1.871.640	693.110	2.564.750	1.667.631
Gás natural	Milhões de m <sup>3</sup>	306.395	148.059	454.454	304.250
Carvão <i>in situ</i>	Milhões de t	10.096	22.240	32.336	2.756.208**

\* Calculado sobre as reservas medidas sendo tEP, tonelada equivalente de petróleo.

\*\* Admitindo-se 70% de recuperação e poder calorífico de 3.600 kcal/kg

Para fazer o cálculo demonstraremos, em primeiro lugar, que, se o crescimento exponencial prosseguir, a quantidade de gás consumida durante um período de duplicação do consumo será igual ao total consumido em todo o tempo precedente. De fato, se o crescimento foi exponencial, a quantidade (C<sub>1</sub>) de gás consumida até a data t<sub>1</sub> foi:

$$C_1 = \int_0^{t_1} A_0 e^{rt} dt = \frac{A_0}{r} e^{rt_1}, \text{ onde:}$$

r = taxa de crescimento do consumo; A<sub>0</sub> = consumo no ano em que se começou a usar gás e t = tempo decorrido. Se o crescimento exponencial prosseguir, a quantidade (C<sub>2</sub>) de gás que será consumida no período de duplicação, de t<sub>1</sub> a t<sub>2</sub>, será:

$$C_2 = \int_{t_1}^{t_2} A_0 e^{rt} dt = \frac{A_0}{r} (e^{rt_2} - e^{rt_1})$$

Tratando-se de um período de duplicação, temos e<sup>rt<sub>2</sub></sup> = 2 e<sup>rt<sub>1</sub></sup>, portanto C<sub>2</sub> =  $\frac{A_0}{r} (2e^{rt_1} - e^{rt_1}) = \frac{A_0}{r} e^{rt_1} = C_1$ , isto é, o consumo no período de duplicação será igual ao total já consumido.

Seja agora R<sub>t</sub> o volume total das reservas de gás que existiam; C a quantidade já consumida; A<sub>0</sub> o consumo anual a partir do presente (t=0), e r a taxa anual de crescimento do consumo. As reservas remanescentes são, portanto:

$$R_t - C = \int_0^t A_0 e^{rt} dt = \frac{A_0}{r} (e^{rt} - e^0) = \frac{A_0}{r} (e^{rt} - 1)$$

Resolvendo para t (tempo em que as reservas remanescentes serão consumidas), obtém-se:

$$e^{rt} = \frac{(R_t - C)r}{A_0} + 1 \Leftrightarrow t = \frac{1}{r} \ln \left[ \frac{(R_t - C)r}{A_0} + 1 \right]$$

Cabe repetir e enfatizar que o modelo de crescimento exponencial oferece apenas uma indicação teórica do prazo de duração das reservas, entre outros motivos, porque não se pode afirmar que a taxa de crescimento da produção permanecerá constante.

Essa taxa depende, entre outros fatores, do crescimento da demanda, de melhorias da produtividade e da eficiência dos sistemas e equipamentos que operam com gás, da elasticidade-preço da demanda, etc.

Segundo a Petrobras, a produção brasileira de gás natural, que em 2005 foi de 17,7 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>, deverá chegar a 25,5 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> /ano, em 2012. Em outras palavras, até lá, a taxa de crescimento da produção de gás passará por valores da ordem de 6,8% ao ano.

Admitamos, ainda, que – em decorrência de aperfeiçoamentos tecnológicos

e ganhos de eficiência, bem como de programas de conservação de energia e do próprio reflexo da elasticidade preço – a taxa de crescimento da produção se estabilize, de forma que seu valor médio, a partir de 2005, fique em torno dos 4,3% ao ano, constatados entre 2004 e 2005, como indica o Balanço Energético Nacional de 2.006, ano base 2005.

Admitamos, para terminar o cálculo, que os valores do volume efetivamente medido das reservas remanescentes e do consumo anual de gás sejam aqueles apresentados no referido Balanço Energético, a saber:

$$R_t - C = 306,4 \times 10^9 \text{ m}^3, e^{A_0} = 17,7 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}.$$

Neste caso, o prazo de duração do volume remanescente das reservas brasileiras de gás natural deveria ser de 13 anos:

$$t = \frac{1}{0,043} \ln \left[ \frac{306,4 \times 10^9 \times 0,043}{17,7 \times 10^9} + 1 \right] = 13 \text{ anos}$$

Suponhamos, por fim, que o consumo continue a crescer exponencialmente a uma taxa de 4,3% ao ano e que as novas descobertas da Petrobras na Plataforma Continental sejam suficientes para quadruplicar o volume das reservas remanescentes. Mesmo assim, sua duração iria para apenas 32 anos:

$$t = \frac{1}{0,043} \ln \left[ \frac{1,225,6 \times 10^9 \times 0,043}{17,7 \times 10^9} + 1 \right] = 32 \text{ anos}$$

Como se vê, apesar das hipóteses otimistas, o prazo parece escasso para as evidentes modificações que se fazem necessárias.

O governo já deveria ter começado a estudar seriamente o assunto.

*Joaquim Francisco de Carvalho é mestre em engenharia nuclear, foi diretor industrial da empresa Nuclebrás Engenharia (Nuclen, atual Eletronuclear) e pertence ao Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo (PIPGE) da USP.*

#### BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Campbell, C. J. *Oil crisis*. Multi-Science Publishing, 2005.  
 Kunstler, J.H. *La fin du pétrole*. Plon, 2005.  
 Bourg, D. e Schlegel, J-L. *Le principe de précaution*. Seuil, 2000.  
 EPE/MME. Balanço Energético Nacional 2006. Ano Base 2005.  
 Dorf, R. *Energy, resources & policy*. Addison Wesley, 1978.

## ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E SOCIAIS DO USO PACÍFICO DA ENERGIA NUCLEAR

Pedro Carajilescov

João Manoel Losada Moreira

**INTRODUÇÃO** Projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês), diante do crescimento populacional mundial, apontam a necessidade de se quintuplicar o fornecimento de energia no mundo até 2050. Essa demanda maior deverá ocorrer em países emergentes como o Brasil, China, Índia e outros da América do Sul, Ásia e África. Esse cenário, associado às preocupações com as mudanças climáticas e a escalada de preços de geração de outras tecnologias, provocou o ressurgimento de usinas nucleares para geração de potência.

Atualmente, existem no mundo 443 usinas nucleares, correspondendo a 370 GW(e) de potência nominal, que representam 17% da potência mundial instalada. No mundo, desde 1980, a produção nuclear de energia elétrica saltou de 0,7 milhão para 2,6 milhões de GWh por ano. No Brasil, com a entrada em operação da usina Angra 2, em 2000, essa produção está em torno de 14 mil GWh por ano (1). Excetuando os acidentes de Three Mile Island e Chernobyl, a partir de 1990, a geração nuclear tem ocorrido de forma eficiente e segura.

Com o mercado nuclear reaquecido, a European Commission, órgão da Comunidade Européia, divulgou, recentemente, o documento “The sustainable nuclear technology platform – a vision report” (2), objetivando garantir a liderança tecnológica européia nesse setor. Nos EUA, a Administração de Informações Sobre Energia (EIA), órgão do Departamento de Energia (DOE), vem promovendo a certificação ou pré-certificação de novos reatores comerciais (3) e, através do apoio e participação no Fórum Internacional da Quarta Geração (GIF), tem acompanhado o desenvolvimento de longo prazo da futura geração de reatores nucleares. No Brasil, além da decisão recente do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), referente à conclusão das obras da usina Angra 3, a retomada do programa nuclear, estagnado desde o início da década passada, deve ocorrer em futuro próximo.

A expansão do aproveitamento nuclear, tendo em vista a evolução tecnológica ocorrida nas últimas décadas, tem levado a uma reavaliação dos aspectos econômicos, tecnológicos, regulatórios e socioambientais deste setor, no Brasil e no mundo.

#### ASPECTOS TÉCNICOS

##### INÍCIO DA GERAÇÃO ELÉTRICA POR ENERGIA NUCLEAR

Após o final da Segunda Guerra Mundial, ocorreu um período de grande criatividade e ebulição no setor nuclear. Os mais diversos tipos de reatores nucleares foram concebidos, projetados e muitos foram, efetivamente, construídos, sendo que alguns operam até nossos dias. Todas as possíveis combinações de material físsil e fértil, de moderadores e de fluidos refrigerantes foram testadas, resultando em reatores que operaram sem maiores impactos ambientais e com segurança. Após algum tempo, a maioria das concepções originais foi abandonada, consolidando aquelas que permaneceram até hoje por razões técnicas e econômicas.