



Ministério de Minas e Energia  
Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético

# Plano Nacional de Energia 2030



2006 - 2007





Ministério de Minas e Energia  
Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético

# Plano Nacional de Energia 2030



2006 - 2007



**Ministério das Minas e Energia – MME**

**Ministro**

Silas Rondeau Cavalcante Silva  
Nelson Jose Hubner Moreira (interino)

**Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético**

Márcio Pereira Zimmermann

**Diretor do Departamento de Planejamento Energético**

Iran de Oliveira Pinto

**Ministério das Minas e Energia – MME**

Esplanada dos Ministérios Bloco U – 5º andar  
70065-900 – Brasília – DF  
Tel.: (55 61) 3319 5299 Fax : (55 61) 3319 5067  
www.mme.gov.br



Empresa de Pesquisa Energética

**Empresa de Pesquisa Energética – EPE**

**Presidente**

Maurício Tiomno Tolmasquim

**Diretor de Estudos Econômicos e Energéticos**

Amílcar Gonçalves Guerreiro

**Diretor de Estudos de Energia Elétrica**

José Carlos de Miranda Farias

**Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Bioenergia**

José Alcides Santoro Martins

**Diretor de Gestão Corporativa**

Ibanês César Cássel

**Empresa de Pesquisa Energética – EPE**

Sede: SAN – Quadra 1 – Bloco “B” – 1º andar | 70051-903 – Brasília – DF  
Escritório Central: Av. Rio Branco, 01 – 11º Andar 20090-003 – Rio de Janeiro – RJ  
Tel.: (55 21) 3512 3100 | Fax : (55 21) 3512 3199  
www.epe.gov.br

**Catálogo na Fonte**  
**Divisão de Gestão de Documentos e Informação Bibliográfica**

Brasil. Ministério de Minas e Energia.

Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . \_ Brasília : MME : EPE, 2007.

12 v. : il.

Conteúdo: v. 1. Análise retrospectiva – v. 2. Projeções – v. 3. Geração hidrelétrica – v. 4. Geração termelétrica a partir de Petróleo e derivados – v. 5. Geração termelétrica a partir do gás natural – v. 6. Geração termelétrica a partir do carvão mineral – v. 7. Geração term nuclear – v. 8. Geração termelétrica a partir da biomassa – v. 9. Geração de energia elétrica a partir de outras fontes – v. 10. Combustíveis líquidos – v. 11. Eficiência energética – v. 12. Transmissão.

1. Energia elétrica – Brasil. 2. Fonte alternativa de energia. 3. Plano Nacional de Energia Elétrica. I. Empresa de Pesquisa Energética. II. Título.

CDU 621.3(81)“2030” : 338.28

# Plano Nacional de Energia **2030**

---

Geração Termelétrica – Carvão Mineral

## Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético – SPE/MME

### Coordenação Geral

Márcio Pereira Zimmermann

### Coordenação Executiva

Francisco Romário Wojcicki

Iran de Oliveira Pinto

Paulo Altaur Pereira Costa

### Departamento de Planejamento Energético

#### Diretor

Iran de Oliveira Pinto

#### Consultores

Albert Cordeiro Geber de Melo – CEPEL

Altino Ventura Filho – MME

Antônio Carlos Tatit Holtz – MME

Maria Elvira Piñeiro Maceira – CEPEL

#### Equipe Técnica

Adriano Jeronimo da Silva

Andrea Figueiredo

Artur Costa Steiner

Christiany Salgado Faria

Eduardo de Freitas Madeira

Fernando Colli Munhoz

Fernando José Ramos Mello

Flávia Xavier Cirilo de Sá

Gilberto Hollauer

Jarbas Raimundo de Aldano Matos

João Antônio Moreira Patusco

John Denys Cadman

José Luiz Scavassa

Osmar Ferreira do Nascimento

Renato Augusto Faria de Araújo

Sophia Andonios Spyridakis Pereira

Vanessa Virgínio de Araújo

#### Equipe de Apoio

Gilda Maria Leite da Fonseca

Leonardo Rangel de Melo Filardi

Maria Soares Correia

Maurílio Amaro de Souza Filho

#### Coordenação Editorial

Gabriela Pires Gomes de Sousa Costa

#### Equipe Editorial

Alex Weiler Magalhães

Ana Klea Sobreira de Moraes

Carlos Teixeira da Silva

Daniele de Oliveira Bandeira

Eduardo Gregório

Paulo Alfredo Perissin

Rafael Santiago de Carvalho

### Departamento de Outorgas de Concessões, Permissões e Autorizações

#### Diretor

Sidney do Lago Júnior

#### Equipe Técnica

Celso Luiz Fioravanti dos Santos

Dirceu Bonecker de Souza Lobo Júnior

Gilberto Aristeu Beltrame

Jefferson Chaves Boechat

José Carlos Vilela Ribeiro

Maurício de Oliveira Abi-chahin

Ticiania de Freitas Sousa

Willian Rimet Muniz

### Departamento de Desenvolvimento Energético

#### Coordenação Geral

Ceres Cavalcanti

## Apresentação

O Plano Nacional de Energia - PNE 2030 tem como objetivo o planejamento de longo prazo do Setor Energético do país, orientando tendências e balizando as alternativas de expansão desse segmento nas próximas décadas.

O PNE é composto de uma série de estudos que buscam fornecer insumos para a formulação de políticas energéticas segundo uma perspectiva integrada dos recursos disponíveis. Estes estudos estão divididos em volumes temáticos cujo conjunto subsidiará a elaboração do relatório final do PNE.

Este volume, cujo tema é Carvão Mineral, é resultado do conjunto de cinco notas técnicas, fruto de trabalhos contratados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), empresa pública vinculada ao MME.

Na concepção do referido plano, bem como para os aperfeiçoamentos necessários e, sobretudo, para garantir os melhores resultados possíveis, foram realizadas no MME apresentações dos estudos preliminares através de seminários públicos, assegurando a efetiva participação dos agentes setoriais e da sociedade no processo de planejamento.

Foram realizados nove seminários cujo cronograma se vinculava ao estágio de desenvolvimento dos estudos temáticos do PNE 2030. O primeiro seminário ocorreu em abril de 2006 e o último em novembro do mesmo ano. O seminário de Carvão Mineral ocorreu no dia 14 de junho de 2006, e as contribuições realizadas neste seminário foram, na medida de sua pertinência, incorporadas nos trabalhos desenvolvidos de que trata este volume.

O presente volume encontra-se dividido em cinco Notas Técnicas enumeradas a seguir:

1. Inventário dos recursos e reservas de carvão mineral no Brasil;
2. Oferta de carvão mineral: estrutura de produção, transporte, logística e tecnologia;
3. Geração termelétrica a partir do carvão mineral: caracterização técnico-econômica;
4. Geração termoelétrica a partir do carvão mineral: potencial de geração;
5. Geração termoelétrica a partir do carvão mineral: avaliações dos impactos ambientais.

A nota técnica “Inventário dos recursos e reservas de carvão mineral no Brasil” tem como objetivo analisar a disponibilidade atual e futura de fontes nacionais e importadas de petróleo, levando-se em consideração o panorama atual das reservas, produção e consumo desse energético no Brasil e no mundo, assim como a capacidade nacional de produção nos próximos anos.

A nota técnica “Oferta de carvão mineral: estrutura de produção, transporte, logística e tecnologia” apresenta a estrutura de demanda, de oferta e de transporte de carvão mineral, no mundo e no Brasil, identificando o patamar tecnológico atual e as tendências de evolução tecnológica da produção desse energético.

Na nota técnica “Geração termelétrica a partir do carvão mineral: caracterização técnico-econômica”, é focado o aspecto técnico e econômico da geração termelétrica a partir do carvão mineral, tais como: características técnicas e operacionais de usinas termelétricas a carvão, caracterização dos custos envolvidos na geração termelétrica e avaliação econômica dessa geração.

A nota técnica “Geração termelétrica a partir do carvão mineral: potencial de geração” é apresentar o potencial de geração elétrica a carvão mineral de modo a subsidiar as análises da viabilidade técnico-econômica de expansão do uso desse energético como alternativa para a expansão da oferta de energia elétrica no Brasil.

Finalizando este volume, a nota técnica “Geração termoelétrica a partir do carvão mineral: avaliações dos impactos ambientais” objetiva apresentar os efeitos socioambientais decorrentes da utilização de carvão para a produção de energia elétrica.

Como auxílio à elaboração destas notas técnicas, que compõem um dos estudos da oferta de energia que subsidiarão a elaboração do PNE 2030, a EPE promoveu, no seu escritório central, uma série de reuniões temáticas entre os meses de fevereiro e março de 2006. Em cada reunião tomavam assento especialistas, estudiosos e profissionais reconhecidamente competentes em relação ao tema objeto da reunião. No dia 14 de março teve lugar o tema “Carvão”, e foram convidados os senhores: João Eduardo Berbigier – Tractebel; Carlos Henrique Brasil de Carvalho – Casa Civil; Fernando Luis Zancan – Siescsc/CEDRIC; Ignácio Resende – COPELMI Mineração; Irineu Capeletti – MME/SGM; e José Lourival Magri, Tractebel ; aos quais cumpre registrar os agradecimentos de toda diretoria e equipe de técnicos da EPE. Os depoimentos e os esclarecimentos colhidos nessa reunião foram especialmente importantes, seja por sua relevância intrínseca, dada qualificação dos profissionais convidados, seja por sua atualidade.

Tal processo despendeu esforço de um sem número de profissionais, estudiosos e interessados no tema e, ainda que tais esforços cumpram com seu objetivo, como todo trabalho de natureza complexa, cíclica e, necessariamente, vinculada a um horizonte temporal, o PNE e seus estudos correlatos estão sujeitos a atualizações e aperfeiçoamentos, sendo necessário refazê-los periodicamente.

Assim, com a publicação deste volume, o Ministério de Minas e Energia busca apresentar à sociedade o resultado de estudos que constituem a gênese de um processo que culminará com a publicação do Plano Nacional de Energia – 2030, este que é uma das principais formas de materialização do planejamento energético de longo prazo brasileiro que, paulatinamente, caminha rumo a uma mais intensa e efetiva participação da sociedade em sua elaboração.





## SUMÁRIO GERAL

---

<b>INVENTÁRIO DOS RECURSOS E RESERVAS DE CARVÃO MINERAL NO BRASIL.....</b>	<b>11</b>
<b>OFERTA DE CARVÃO MINERAL: ESTRUTURA DE PRODUÇÃO, TRANSPORTE, LOGÍSTICA E TECNOLOGIA .....</b>	<b>27</b>
<b>GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DO CARVÃO MINERAL: CARACTERIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA.....</b>	<b>53</b>
<b>GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DO CARVÃO MINERAL: POTENCIAL DE GERAÇÃO .....</b>	<b>89</b>
<b>GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DO CARVÃO MINERAL: AVALIAÇÕES DOS IMPACTOS AMBIENTAIS .....</b>	<b>113</b>

## **Participantes da Empresa de Pesquisa Energética – EPE**

### **Coordenação Geral**

Mauricio Tiomno Tolmasquim  
Amílcar Gonçalves Guerreiro

### **Coordenação Executiva**

Renato Pinto de Queiroz  
Juarez Castrillon Lopes

### **Coordenação Técnica**

Ricardo Gorini de Oliveira

### **Equipe Técnica**

Amaro Olímpio Pereira Junior  
Marina Elisabete Espinho Tavares  
Filipe S.de Sousa (estagiário)

# INVENTÁRIO DOS RECURSOS E RESERVAS DE CARVÃO MINERAL NO BRASIL

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	13
2. Conceitos básicos empregados na definição de reservas de carvão mineral .....	14
3. Panorama mundial das reservas de carvão .....	15
4. Panorama brasileiro das reservas de carvão .....	18
5. Tecnologia e custos de extração do carvão .....	20
6. Disponibilidade atual e futura de carvão.....	21
7. Considerações finais .....	24
8. Referências bibliográficas.....	25



## 1. Introdução

---

O carvão mineral é uma mistura de hidrocarbonetos formada pela decomposição de matéria orgânica durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. De acordo com o Atlas da Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2005), esse combustível fóssil é classificado, de acordo a sua qualidade, em: turfa, de baixo conteúdo carbonífero, que constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%; linhito, que apresenta teor de carbono que varia de 60% a 75%; carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, que contém entre 75% e 85% de carbono; e antracito, o mais puro dos carvões, que apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%.

Apesar de ser um combustível potencialmente poluente, o carvão deve continuar desempenhando um importante papel como fonte de energia no cenário mundial, devido à disponibilidade de enormes reservas que estão geograficamente espalhadas no mundo e ao desenvolvimento de tecnologias limpas de carvão (clean coal technologies). Tal característica livra o abastecimento energético das limitações geopolíticas ou de questões de segurança. Dessa maneira, o carvão apresenta um grande potencial de contribuir, por exemplo, para aumento das taxas de eletrificação nos países em desenvolvimento contribuindo para redução dos níveis de pobreza, para industrialização e para melhoria da qualidade de vida.

Além disso, o carvão está disponível em uma grande variedade de formas e pode ser facilmente estocado nas proximidades dos centros consumidores. Mais do que isso, não depende de condições climáticas, podendo ser utilizado como backup para geração eólica e hidrelétrica.

Cabe acrescentar que o investimento para a extração do carvão é cerca de 5 vezes inferior ao investimento necessário à extração do gás natural e cerca de 4 vezes inferior ao investimento para extração do petróleo.<sup>1</sup>

O transporte de carvão também é vantajoso por não necessitar de dutos de alta pressão ou rotas dedicadas. Além disso, não necessita de nenhuma proteção adicional, aumentando a sua vantagem competitiva.

Todos esses argumentos elevam a posição do carvão em mercados competitivos de energia e ajudam a estabilizar os preços através da competição entre energéticos. Dessa maneira, torna-se importante avaliar a disponibilidade de tal recurso no Brasil. A presente nota técnica, nesse sentido, tem por objetivo caracterizar potenciais fontes de carvão mineral no país e no mundo, de modo a estabelecer um panorama quanto às perspectivas de abastecimento para os próximos vinte e cinco anos.

---

1 WEC, Global Coal Study, 2004.

## 2. Conceitos básicos empregados na definição de reservas de carvão mineral

---

A quantificação das reservas de carvão é baseada em critérios geológicos, de mineração e econômicos. Entretanto, a forma como essas estimativas são feitas varia de país para país, pois não há até o momento nenhuma padronização internacional. O que existe, segundo a IEA (2005), são algumas definições que são comumente aplicadas, como a de recursos e reservas. O primeiro termo se refere à quantidade do combustível que pode ser encontrada na mina, sem considerar se a extração do carvão é economicamente viável. Assim, pode se dizer que nem todos os recursos são recuperáveis usando a tecnologia disponível. A quantidade que é recuperável constitui as reservas. Estas podem ser ainda classificadas como provadas (ou medidas) e prováveis (ou indicadas), baseado nos resultados da exploração e no grau de confiança nesses resultados. Neste sentido, as reservas prováveis são estimadas com um grau de confiança menor que as provadas.

No Brasil, os critérios de quantificação das reservas minerais são definidos pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Nos anuários estatísticos da DNPM, são divulgados dados de reservas medidas, indicadas e inferidas. Esta classificação é feita de acordo com o grau de conhecimento da jazida. No anuário mineral de 2005 da DNPM (DNPM, 2005), as reservas são definidas da seguinte maneira:

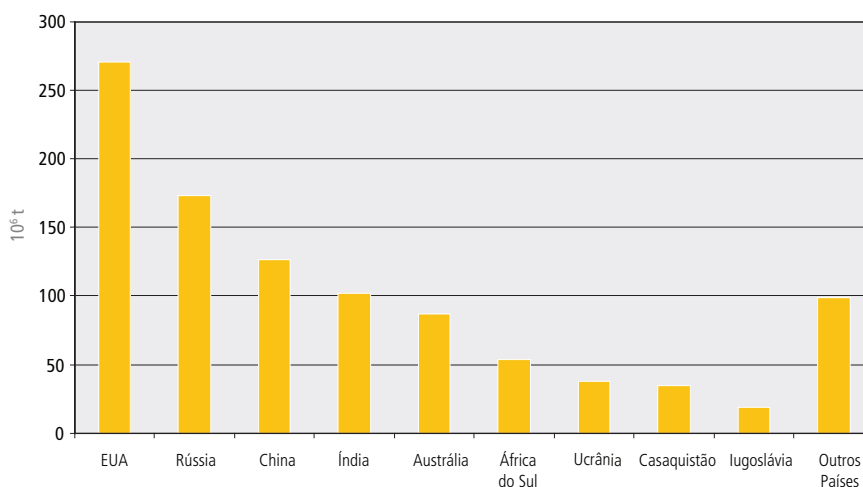
- Reserva Medida - Volume ou tonelagem de minério computado pelas dimensões reveladas em afloramentos, trincheiras, galerias, trabalhos subterrâneos e sondagens. O teor é determinado pelos resultados de amostragem pormenorizada, devendo os pontos de inspeção, amostragem e medida estarem tão proximamente espaçados e o caráter geológico tão bem definido que as dimensões, a forma e o teor da substância mineral possam ser perfeitamente estabelecidos. A reserva computada deve ser rigorosamente determinada nos limites estabelecidos, os quais não devem apresentar variação superior a 20% (vinte por cento) da quantidade verdadeira;
- Reserva Indicada - Volume ou tonelagem de minério computado a partir de medidas e amostras específicas, ou de dados da produção, e parcialmente por extrapolação até distância razoável, com base em evidências geológicas. As reservas computadas são as aprovadas pelo DNPM nos Relatórios de Pesquisa e/ou reavaliação de reservas;
- Reserva Inferida - Estimativa do volume ou tonelagem de minério calculada com base no conhecimento da geologia do depósito mineral, havendo pouco trabalho de pesquisa.

De acordo com Borges (2004), para se avaliar se uma mina é economicamente viável, observa-se a relação estéril-minério, a quantidade de camadas e a profundidade das camadas de carvão para se determinar o tipo de lavra: a céu aberto ou por métodos subterrâneos. Verifica-se também o tipo do carvão para decidir o método de beneficiamento que deverá ser utilizado para separar os materiais desejáveis daqueles que não serão aproveitados. As características do carvão bruto (ou seja, sem beneficiamento) necessárias para o estabelecimento de um esquema de beneficiamento são, essencialmente, o tamanho ideal de britagem, as curvas granulométricas do carvão britado, as curvas de lavabilidade de cada fração granulométrica acima de 0,5mm e os estudos de degradação do carvão, entre outras.

### 3. Panorama mundial das reservas de carvão

Segundo o *International Energy Outlook 2005* (EIA/DOE, 2005), o carvão é o combustível fóssil com a maior disponibilidade no mundo. Suas reservas totalizam 1 trilhão de toneladas, quantidade suficiente para suprir o consumo nos níveis atuais por 190 anos. Além disso, ao contrário do que ocorre com o petróleo e com o gás natural, as reservas de carvão apresentam uma distribuição geográfica no mundo muito mais eqüitativa, sendo que 75 países possuem reservas expressivas. Ainda assim, 57% dessas reservas encontram-se em três países: Estados Unidos (27%), Rússia (17%) e China (13%). Outros seis países respondem por 33%: Índia, Austrália, África do Sul, Ucrânia, Cazaquistão e Iugoslávia. Em 2002, esses nove países juntos representavam 90% das reservas recuperáveis mundiais e eram responsáveis por 78% da produção. A Figura 1 apresenta as nove maiores reservas do mundo.

Figura 1 - Reservas mundiais de carvão



Fonte: EIA/DOE, 2005

Dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2005) mostram que a produção e o consumo mundial de carvão concentram-se em dois tipos do mineral, o betuminoso/sub-betuminoso e o linhito. O primeiro, de maior valor térmico, é o mais comercializado internacionalmente. O valor térmico do linhito é bem menor e, por isso, é mais utilizado para geração termelétrica local.

Conforme pode ser observado na Tabela 1, a produção de carvão betuminoso alcançou a marca de 4.648 milhões de toneladas em 2004, representando um crescimento de 8,7% em relação a 2003, que já tinha sido significativo em relação a 2002, 8,8%. O principal responsável por este crescimento é a China (ou o “Efeito China”), país que tem apresentado taxas de crescimento econômico surpreendentes nos últimos anos.

Tabela 1 - Produção mundial de carvão betuminoso (Mt)

	2002	2003	2004
China	1.140	1.428	1.676
EUA	1.010	984	1.026
Índia	376	398	411
Austrália	301	303	314
África do Sul	244	263	266
Rússia	169	183	217
Indonésia	114	127	142
Polônia	114	113	110
Cazaquistão	86	93	91
Ucrânia	53	55	54
Outros	325	330	341
<b>Total</b>	<b>3.932</b>	<b>4.277</b>	<b>4.629</b>

Fonte: IEA, 2005.

Em comparação à produção mundial, o comércio internacional de carvão é relativamente pequeno. Cinco países exportadores dominam o mercado: Austrália, China, Indonésia, África do Sul e Colômbia.

De acordo com o *World Coal Institute* (WCI, 2005), durante os anos 80 a Austrália tornou-se líder na exportação de carvão, atendendo principalmente às necessidades de carvão da Ásia. Atualmente, 50% das exportações de carvão australiano são destinados ao Japão, o maior importador. Outros dois fornecedores de carvão para os mercados asiáticos são a China e a Indonésia. Em 2003, a China exportou 94 milhões de toneladas para outros países do continente, representando 24% do total das importações da Ásia. A Indonésia exportou 78 milhões de toneladas, o que representa 20% das importações totais de carvão no ano. No entanto, o aumento da demanda doméstica nesses países nos próximos anos deverá limitar a sua capacidade de exportação. Os EUA, que já foram um importante fornecedor de carvão para a Ásia, hoje contribuem com uma participação minoritária nesse mercado. As importações de carvão norte-americano na Ásia passaram de 28%, em 1980, para menos de 0,1% em 2003.



Colômbia e Venezuela são importantes exportadores de carvão de baixo custo da América do Sul e, de acordo com o EIA/DOE (2005), deverão aumentar a sua participação nas importações européias deslocando fornecedores dos EUA e da Polônia.

Em 2003, o frete marítimo para o transporte de carvão atingiu níveis bastante elevados. Grande parte da elevação de preços é atribuída ao aumento das importações de ferro pela China, que ocasionou uma escassez de navios para o transporte de carvão. Espera-se que os fretes diminuam a partir do final de 2007, quando novos navios estarão prontos, aliviando a escassez de capacidade de transporte atual (EIA/DOE, 2005). Os preços de exportação de carvão começaram a aumentar no final de 2003 e continuaram a escalada em 2004, o que pode ser explicado pela limitada capacidade de exportação verificada naquele período<sup>2</sup>. A elevação de preços de exportação e de fretes contribuiu para a elevação geral dos preços do carvão vapor e do carvão metalúrgico. Entretanto, até o momento, os preços elevados de carvão parecem não ter tido um efeito significativo sobre a demanda de carvão no mercado internacional, mesmo porque, no setor elétrico, o preço do gás natural, o principal competidor do carvão, também tem se apresentado elevado.

Segundo o EIA/DOE (2005), a evolução da demanda futura por carvão no mundo dependerá essencialmente dos seguintes fatores:

- taxa de penetração do gás natural no mundo;
- preço relativo do gás natural em relação ao carvão e ao petróleo;
- integração energética entre os países; e
- disponibilidade de novas reservas de gás natural.

Considerando que as perspectivas de preço futuro do gás natural apontam para uma tendência de alta e que as recentes tensões políticas nas regiões importantes para o gás podem limitar a sua demanda futura, o carvão surge como uma alternativa energética relativamente barata e de suprimento seguro.

<sup>2</sup> Isso se explica devido aos atrasos de navios em portos australianos, à redução da capacidade de exportação de carvão vapor da África do Sul e à redução das exportações da China, concomitante ao aumento das suas importações.

#### 4. Panorama brasileiro das reservas de carvão

O Balanço Mineral Brasileiro (BORBA, 2001) mostra que linhito e carvão sub-betuminoso podem ser encontrados em vários estados brasileiros, tais como Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Pernambuco, Piauí, Maranhão, Pará, Amazonas e Acre. As principais reservas estão localizadas na região Sul, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. A Tabela 2 abaixo mostra os dados relevantes de reservas de carvão no Brasil.

Tabela 2 – Reserva de carvão na Região Sul

Unidade da federação	Quantidade (t)		
	Medida	Indicada	Inferida
Paraná	4.600.006	-	-
Rio Grande do Sul	5.280.804.946	10.100.265.668	6.317.050.409
Santa Catarina	1.424.834.833	601.476.077	217.248.427

Fonte: DNPM, 2005.

De acordo com Borba (2001), a principal jazida brasileira é Candiota. Localizada no sul do estado do Rio Grande do Sul, ela possui as maiores reservas e também as camadas de carvão de maior espessura, com grande continuidade e pequena cobertura. Essas características proporcionam a tal mina uma lavra em larga escala com grande rentabilidade. O mineral pode ser usado na forma *run-of-mine* (ROM), ou seja, na forma bruta, ou ser beneficiado para redução de cinza e enxofre. O consumo tende a ser feito na boca da mina, pois se justifica economicamente seu transporte.

No mesmo estado, na região central, existem jazidas cujo carvão admite beneficiamento para produção de produtos de maior valor agregado e viabilidade econômica de transporte a curta distância. São várias jazidas, dentre elas destacam-se Charqueadas, Leão, Iruí e Capané.

Ainda no Rio Grande do Sul, entre a cidade de Porto Alegre e litoral, encontram-se as jazidas de Morungava/Chico Lomã e Santa Terezinha, com aproximadamente 16% das reservas medidas do país. Trata-se de um carvão de melhor qualidade. Nessas jazidas, existe uma fração coqueificável para uso na siderurgia e em fundições que, teoricamente, permitiria transporte a médias e longas distâncias. Contudo, tratam-se de jazidas profundas (até 800m de profundidade), a serem mineradas predominantemente em subsolo. Para o seu aproveitamento, seriam necessários altos investimentos em novas minas, pois atualmente não há nenhuma infra-estrutura mineira na região. A Tabela 3 apresenta algumas características do carvão encontrado nas jazidas localizadas no Rio Grande do Sul.

Tabela 3 – Jazidas do Rio Grande do Sul

Jazida	PC (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Candiota	3.200	23,3	52,5	1,6
S.Terezinha	3.800 – 4.300	28,0 – 30,0	41,0 – 49,5	0,5 – 1,9
Morungava/ Chico Lomã	3.700 – 4.500	27,5 – 30,5	40,0 – 49,0	0,6 – 2,0
Charqueadas	2.950	24,3	54	1,3
Leão	2.950	24,1	55,6	1,3
Iruí	3.200	23,1	52	2,5
Capané	3.100	29,5	52	0,8

Fonte: Carvalho, 2005.

No estado de Santa Catarina, segundo Borba (2001), as jazidas Barro Branco e Bonito estão localizadas na bacia sul-catarinense e representam cerca de 21% das reservas medidas oficiais brasileiras. A camada Barro Branco apresenta propriedades coqueificantes, com características plásticas importantes para uso em blendagem com o carvão importado para a siderurgia. Quanto ao poder energético, pode ser classificado como de pobre a médio, admitindo beneficiamento. As jazidas a céu aberto já foram quase todas mineradas. Nas minas subterrâneas, há uma crescente dificuldade de mineração em função da profundidade e da complexidade estrutural. A Tabela 4 abaixo apresenta as características do carvão da jazida Sul Catarinense.

Tabela 4 – Jazida Sul Catarinense

Camada	PC (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Barro Branco	2.700	21,4	62,1	4,3
Bonito	2.800	26,5	58,3	4,7

Fonte: Carvalho, 2005.

Finalmente, têm-se na região central do Paraná as jazidas de Cambuí e Sapopema, com um carvão de poder energético médio, representando menos de 1% das reservas medidas oficiais do país. A Tabela 5 abaixo apresenta as características do carvão de tais jazidas.

Tabela 5 – Jazidas do Paraná

Jazida	PC (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Cambuí	4.850	30	45	6
Sapopema	4.900	30,5	43,5	7,8

Fonte: Carvalho, 2005.

## 5. Tecnologia e custos de extração do carvão

---

Segundo *World Coal Institute* (WCI, 2005), existem dois métodos de mineração do carvão: a lavra a céu aberto ou a subterrânea. A escolha entre um deles é determinada pela geologia do depósito do mineral, ou seja, pela altura da cobertura da mina. Assim, no caso de um depósito raso, o carvão poderá ser lavrado a céu aberto, dependendo do terreno onde a mina está localizada. Nas reservas onde tal método não é economicamente viável, o combustível será lavrado por mineração subterrânea.

A maior parte da oferta mundial de carvão mineral (60%, de acordo com o WCI, 2005) é extraída através da mineração subterrânea, embora em alguns importantes países produtores predominem minas a céu aberto. Na Austrália, por exemplo, aproximadamente 80% da produção vêm de tais minas e, nos EUA, 67%.

Existem dois métodos de lavra subterrânea: câmara e pilares (*room-and-pillar*); e frente larga (*longwall mining*). No primeiro método, os depósitos de carvão são recuperados de maneira a formar galerias, onde os pilares são formados pelo próprio mineral que sustentam a cobertura da mina e controlam o fluxo de ar. As câmaras normalmente têm de 5 a 10 metros de largura e os pilares, 30 metros de extensão. O mineral extraído é carregado através de esteiras para a superfície. Na medida em que a mineração avança em direção ao limite do depósito, inicia-se a retirada da mina (*retreat mining*). Este processo consiste na mineração do carvão que forma os pilares, de forma a permitir que a cobertura tombe. Ao final deste processo, a mina é abandonada.

O método da frente larga (*longwall mining*) envolve a extração total do carvão de uma seção da cobertura ou da frente (larga) utilizando cortadeiras mecânicas. Antes de iniciar a lavra, é necessário um planejamento cuidadoso para assegurar que a aplicação do referido método seja realmente adequada à geologia da mina. A frente do depósito do mineral (*longwall*) varia de 100 a 350 metros e a cobertura é sustentada por macacos hidráulicos. Uma vez que o carvão é totalmente extraído da área, permite-se que o teto da mina tombe, e então a seção é abandonada. O *longwall* é muito intensivo em capital, porém é o método de maior produtividade no mundo.

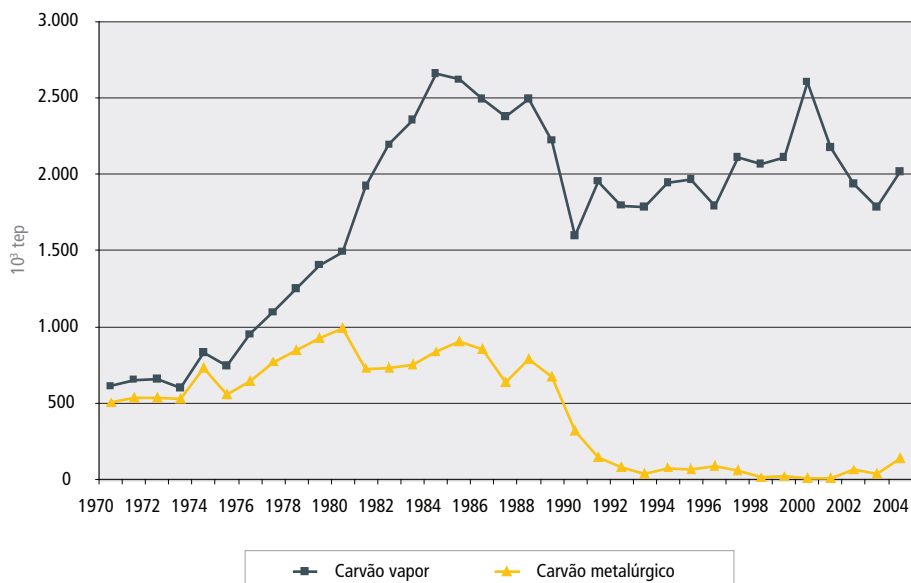
A mineração a céu aberto, segundo Monteiro (2004), consiste na retirada da cobertura do solo e da extração do carvão propriamente dito. A taxa de recuperação pode atingir 95% se toda a camada puder ser explorada. Este valor é bem superior ao dos métodos empregados na mineração subterrânea, porém, a taxa de recuperação (e, portanto, a viabilidade econômica) de uma mina a céu aberto depende relação estéril-minério.

Tais minas podem ocupar extensas áreas e, por isso, exigem grandes equipamentos, tais como escavadeiras de arrasto (*draglines*), pás mecânicas (*power shovels*), caminhões e correias transportadoras. A remoção do solo para posterior recomposição ambiental é feita por escavadeiras e caminhões e o desmonte das rochas pode ser feito por explosivos. Em seguida, o capeamento é retirado pelas escavadeiras ou pelas pás mecânicas. Uma vez que a camada de carvão é minerada, o carvão é transportado por caminhões ou por esteiras para o local onde será beneficiado.

## 6. Disponibilidade atual e futura de carvão

De acordo com o DNPM (2005), as reservas medidas de carvão mineral no Brasil somaram 6,7 bilhões de toneladas em 2004. A produção de carvão foi de 5,4 milhões de toneladas<sup>3</sup> (BEN, 2005). Do total de energia primária produzida internamente, o carvão representa pouco mais de 1%. Conforme pode se verificado na Figura 2 abaixo, 94% da produção atende a demanda de carvão vapor e o restante de carvão metalúrgico.

Figura 2 – Produção de carvão mineral

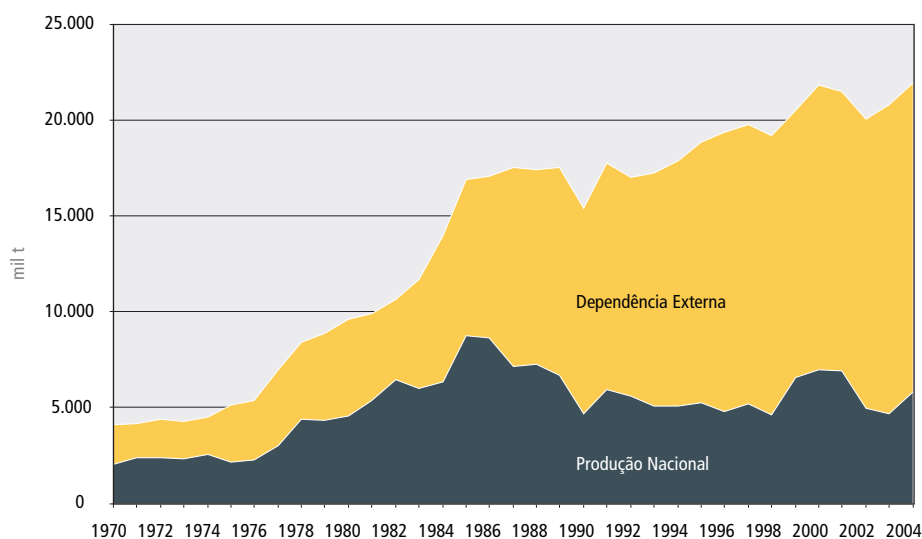


Fonte: MME/EPE, 2005.

3 ou 2.153 mil tep

Nota-se, entretanto, que a composição de produção de carvão mineral era bem diferente entre na década de 1970. Na época, ainda vigorava um decreto do presidente Getúlio Vargas, da década de 30, que determinava a compulsoriedade de compra do carvão metalúrgico nacional pela indústria siderúrgica (a recém construída Companhia Siderúrgica Nacional - CSN). A partir da década de 90, com a desregulamentação do setor, o carvão metalúrgico nacional utilizado na siderurgia, que não era economicamente competitivo, foi sendo substituído pelo importado. A Figura 3 abaixo mostra a dependência externa do carvão mineral em termos de quantidade física.

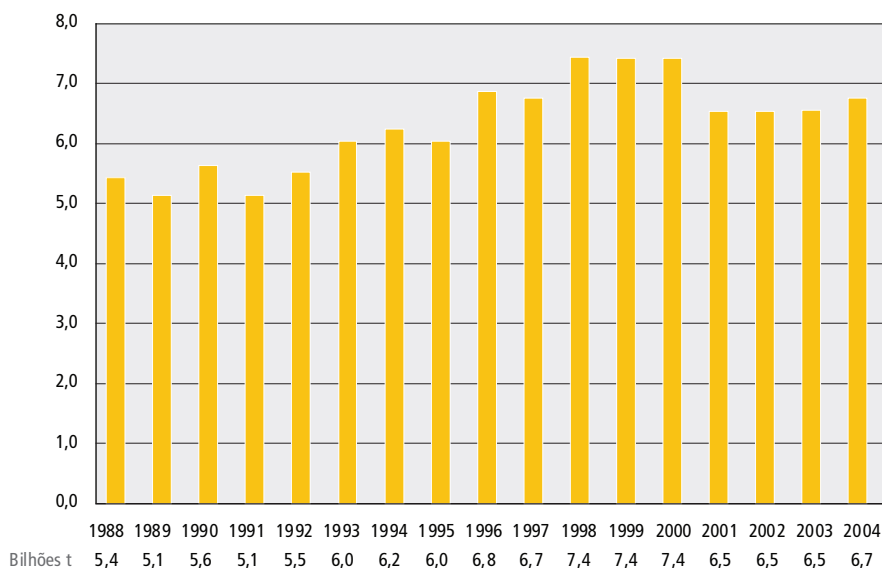
Figura 3 – Dependência externa de carvão mineral



Fonte: MME/EPE, 2005.

Entre 1988 a 2004, a taxa média de crescimento anual das reservas medidas oficiais brasileiras foi de 1,4%, passando de 5,4 bilhões de toneladas para 6,7 bilhões de toneladas. Todavia, como pode ser observado na Figura 4, não houve um crescimento contínuo. De acordo com Carvalho (2005), tal se deu pela drástica redução da pesquisa mineral na segunda metade da década de 80, fazendo com que os números flutuassem em torno de um patamar devido a trabalhos de reavaliação e recompilação de reservas já existentes, sem aporte de novos dados. Carvalho (2005) também mostra que, em 1996, houve a aprovação, por parte do Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM), de uma última série de relatórios finais positivos de pesquisa e de trabalhos realizados ainda na década de 80. Com base nestes, as reservas atingiram seus valores presentes. A tendência é de que o patamar atual se mantenha por tempo indeterminado, caso não haja uma drástica mudança positiva na perspectiva do carvão brasileiro para que, conseqüentemente, sejam retomados os trabalhos prospectivos.

Figura 4 – Evolução das reservas de carvão



Fonte: Carvalho, 2005

## 7. Considerações finais

---

O carvão mineral, apesar de ser um combustível potencialmente poluente, deve ainda desempenhar um papel importante no setor energético mundial. Isto se deve à grande disponibilidade do recurso e aos atuais níveis de preços do petróleo e do gás natural, seus principais concorrentes.

No texto, pôde-se perceber também que as reservas de carvão são bem distribuídas, mas há alguns países com grande potencial de exportação, sejam eles Austrália, África do Sul, EUA e Colômbia, de onde o Brasil pode vir a obter o combustível caso opte por ampliar seu uso no país.

É importante ressaltar também que o Brasil possui grandes reservas de carvão, de qualidade variada, das quais pode fazer uso. Porém, grandes investimentos em trabalhos prospectivos e em infra-estrutura são necessários para a recuperação do mineral, além de pesquisa em tecnologias mais limpas que minimizem os impactos ambientais causados em todas as etapas do processo produtivo e no consumo de carvão.



## 8. Referências bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). "Atlas da Energia Elétrica do Brasil". 2ª Ed. Brasília: ANEEL, 2005.

BORBA, R. F. "Balanço Mineral Brasileiro". Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Brasília, 2001.

BORGES, Ítalo Lopes. "Processo de Adequação Ambiental na Indústria Carbonífera: Estudo de Caso sobre a Implantação de um Sistema de Gestão Ambiental". Tese de Mestrado. PPE/COPPE/UFRJ, 2004.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). "Excursão Virtual Pela Serra do Rio do Rastro". Superintendência Regional de Porto Alegre, 2002.

CARVALHO, C.H.B. "Oportunidades de Negócios no Setor Elétrico com Uso do Carvão Mineral Nacional". Apresentação EPE, 2005.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Anuário Mineral de 2005. Brasília, 2005.

EIA/DOE. "International Energy Outlook". Energy Information Administration – Department of Energy, 2005.

IEA. "Coal Information". International Energy Agency, 2005.

World Coal Institute (WCI). Clean Coal-Building a future through technology. Website:www.wci-coal.com. Publicação disponível on-line desde 2005.

## Participantes da Empresa de Pesquisa Energética – EPE

### **Coordenação Geral**

Mauricio Tiomno Tolmasquim  
Amílcar Gonçalves Guerreiro

### **Coordenação Executiva**

Renato Pinto de Queiroz  
Juarez Castrillon Lopes

### **Coordenação Técnica**

Ricardo Gorini de Oliveira

### **Equipe Técnica**

Amaro Olimpio Pereira Junior  
Marina Elisabete Espinho Tavares  
Filipe S.de Sousa (estagiário)

# OFERTA DE CARVÃO MINERAL: ESTRUTURA DE PRODUÇÃO, TRANSPORTE, LOGÍSTICA E TECNOLOGIA

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	29
2. Produção .....	30
2.1. Antecedentes .....	30
2.2. Métodos de mineração .....	30
2.3. Mineração a céu aberto .....	31
2.4. Mineração subterrânea .....	33
2.5. Recuperação de áreas degradadas .....	35
3. Beneficiamento .....	37
4. Transporte e logística .....	40
4.1. Generalidades .....	40
4.2. Transporte e logística do carvão nacional .....	43
4.3. Infra-estrutura das minas nacionais .....	47
4.4. Carvão metalúrgico nacional .....	47
4.5. Carvão importado .....	48
5. Tecnologia .....	48
6. Conclusões .....	49
7. Referências bibliográficas .....	51
7.1. Reuniões temáticas na EPE: carvão mineral .....	51
7.2. Bibliografia .....	51



## 1. Introdução

---

O carvão é a mais abundante fonte de energia primária disponível no planeta. Além disso, seu preço, apesar de refletir algum impacto das tendências do custo da energia, influenciadas pela flutuação nos preços internacionais do petróleo, apresenta um grau de volatilidade relativamente baixo.

Por outro lado, combustíveis fósseis são os principais contribuintes para o volume de emissões de gases no planeta. Apesar do importante progresso havido, sobretudo nos últimos anos, na redução das emissões por sua combustão, o carvão permanece sendo, dentre esses combustíveis, aquele que apresenta o maior coeficiente de emissões, quase o dobro do gás natural (DERMAUT *et al*, 2005).

Porém, com os grandes avanços tecnológicos e os vultosos investimentos em andamento, objetiva-se viabilizar um uso mais intenso do carvão com o menor impacto ambiental possível. Nesse sentido, destacam-se a importante evolução na eficiência da geração termelétrica a carvão e, especialmente, as tecnologias de “queima limpa” desse energético (*clean coal technologies*).

Todo esse esforço em pesquisa e desenvolvimento parece indicar que o mundo não descarta, absolutamente, o uso do carvão como fonte primária para a geração de energia elétrica. A abundância das reservas de carvão, os avanços tecnológicos já consolidados e os que são esperados nos próximos anos, o aumento esperado da demanda de energia, em especial da demanda por energia elétrica, são, portanto, os elementos básicos que sustentam a visão de que a expansão da geração termelétrica a carvão faz parte da estratégia da expansão da oferta de energia.

A participação do carvão mineral na matriz energética brasileira sempre foi muito pequena. Em 2005, na oferta total de energia primária, o mineral representou apenas 6,4% e na produção de eletricidade, essa participação foi ainda menor, de 1,6% (MME/EPE, 2005).

Essa tímida participação do carvão – na oferta mundial de eletricidade, o carvão mineral responde por cerca de 40% (IEA, 2005) – deve-se às características das reservas do mineral no país, tanto com relação à sua localização – concentrada na Região Sul – como, e principalmente, ao seu elevado teor de cinzas e de outras impurezas, baixa concentração de carbono e baixo poder calorífico.

Assim, o destino principal do carvão nacional tem sido a geração de energia elétrica em usinas localizadas na “boca da mina”. Já a demanda da indústria pelo combustível é atendida, quase que totalmente, pela importação do produto.

A oferta de tecnologias que permitem o uso de carvões mais pobres e oferecem a possibilidade da “queima limpa”, a alta do preço de seus principais concorrentes no mundo – gás natural e petróleo – e a perspectiva de dificuldades no aproveitamento dos recursos hidrelétricos ainda disponíveis no país aumentaram as atenções para uma possível expansão do parque termelétrico a carvão, principalmente dentro da perspectiva de longo prazo, com que se trabalha no PNE 2030.

Nesse contexto, se insere o estudo documentado nesta nota técnica. Estarão sendo examinados aqui os aspectos relacionados à infra-estrutura do carvão mineral, especialmente no que se refere à estrutura de sua produção, ao transporte, à logística e à tecnologia. O objetivo é reunir subsídios para avaliar a viabilidade de expansão, a longo prazo, do uso de tal alternativa no Brasil.

## 2. Produção

---

### ■ 2.1. Antecedentes

Conforme relata Gomes *et al* (1998):

*“A história do carvão fóssil no Brasil teve início em 1795 com a descoberta, por técnicos ingleses, que construíam ferrovias na região do baixo Jacuí, Rio Grande do Sul, da ocorrência deste recurso. Em 1801 houve a primeira notícia sobre a existência de carvão na região de Candiota, próximo à fronteira com o Uruguai, também a partir dos ingleses. A mineração de carvão na região foi iniciada na segunda metade do século passado, ainda por trabalhadores ingleses, alguns dos quais migraram para a região do baixo Jacuí. O imperador D. Pedro II visitou o Rio Grande do Sul e inaugurou uma mina de carvão em Arroio dos Ratos, que foi denominada de Princesa Isabel.*

*A mineração de carvão durante décadas foi intermitente e primitiva, somente passando a adquirir estatura de uma indústria moderna a partir da Segunda Guerra Mundial, ainda que em ritmo lento e cheio de altos e baixos. Desde então, até 1990, a primazia em termos de volume de produção, número e mecanização de minas, trabalhadores empregados e valores econômicos foi da região sul-catarinense. Quando da desregulamentação, com desobrigação de compra de carvão metalúrgico nacional pelas siderúrgicas de alto-forno integradas, a mineração catarinense sofreu drástica queda. Apenas recentemente ocorreu alguma recuperação, com a elevação dos preços e o maior consumo de carvão no complexo termoelétrico de Tubarão - SC”.*

### ■ 2.2. Métodos de mineração

Conforme abordado em nota técnica anterior, existem dois métodos de mineração do carvão: a lavra a céu aberto e a subterrânea. Segundo o *World Coal Institute* (WCI, 2005), a escolha entre um deles é determinada pela geologia do depósito do mineral, ou seja, pela altura da cobertura da mina.

No caso de depósitos rasos, o carvão poderá ser lavrado a céu aberto, dependendo do terreno onde mina está localizada. Naturalmente, carvões minerados a céu aberto tendem a apresentar um custo de extração mais competitivo, de modo que apenas nas reservas onde tal método não é economicamente viável, o combustível é lavrado por mineração subterrânea. A Figura 1 ilustra uma mina a céu aberto.

Figura 1 – Mineração de carvão a céu aberto



Fonte: WCI, 2006.

Ainda conforme nota técnica anterior, a maior parte da oferta mundial de carvão mineral (60%, de acordo com o WCI, 2005) é extraída através da mineração subterrânea, embora em alguns importantes países produtores predominem minas a céu aberto. Na Austrália, por exemplo, aproximadamente 80% da produção vêm de tais minas e, nos EUA, 67%. Não por acaso, a Austrália é hoje, de longe, o maior exportador do minério, tanto de carvão vapor, quanto de carvão metalúrgico.

### ■ 2.3. Mineração a céu aberto

Mineração a céu aberto refere-se ao método de extração de rocha ou de minerais da terra por sua remoção de um poço aberto ou de uma área de empréstimo. O termo é usado para diferenciar esta forma de mineração dos métodos extrativos que requerem perfuração de túneis na terra. Incluem-se entre os materiais normalmente extraídos de minas a céu aberto a argila, a coquina, o granito, a gravilha, o gesso, o calcário, o mármore, a areia e o cascalho, o arenito e, ainda, o carvão e mesmo alguns metais, como cobre e ferro. A Figura 2 ilustra a mineração de carvão a céu aberto no Brasil.

Figura 2 – Mineração de carvão a céu aberto no Brasil  
Mina do Recreio, Rio Grande do Sul



Fonte: COPELMI Mineração Ltda, 2006.

A mineração a céu aberto é usada quando depósitos de mineral ou rocha comercialmente úteis são encontrados perto da superfície, isto é, quando a camada de recobrimento é relativamente estreita, ou quando é estruturalmente inapropriada a perfuração de túneis (por exemplo, no caso de mineração de areia ou cascalho). Quando o mineral ocorre em camadas profundas ou como veios de rocha, túneis em rocha podem ser necessários para extrair o material.

Conforme abordado anteriormente, a mineração a céu aberto consiste na retirada da cobertura do solo e da extração do carvão propriamente dito. A taxa de recuperação pode atingir 90% se toda a camada puder ser explorada. Este valor é bem superior ao dos métodos empregados na mineração subterrânea. Entretanto, a taxa de recuperação de uma mina a céu aberto e, portanto, a viabilidade econômica, depende da espessura da cobertura da mina (MONTEIRO, 2004). Essas minas podem ocupar extensas áreas e, por isso, exigem grandes equipamentos, tais como escavadeiras de arrasto (*draglines*), pás mecânicas (*power shovels*), caminhões e esteiras. O trabalho de desmonte do solo e das rochas é feito por explosivos. Em seguida, o capeamento é retirado pelas escavadeiras ou pelas pás mecânicas. Uma vez que a camada de carvão é recuperada, o mineral é fracionado e empilhado para ser transportado por caminhões ou por esteiras para o local onde ele será beneficiado.

De acordo com Beynon (1999):

*“A mineração a céu aberto está se tornando cada vez mais comum no mundo todo. Novas máquinas, maiores e mais sofisticadas, permitem que veios situados em superfícies cada vez mais profundas sejam explorados a partir da superfície. Minas gigantescas (como a de Carajás, no Pará) produzem milhões de toneladas de minério a cada ano. Na Grã-Bretanha, essas minas a céu aberto são chamadas de opencast mines (nos Estados Unidos, o termo usado para a mineração a céu aberto é strip mining). Lá, elas são menores do que em Carajás, mas estão mais próximas de aglomerados populacionais. Por sua própria natureza, as minas a céu aberto são mais agressivas em relação ao meio ambiente local do que as minas profundas, e sua proximidade de cidades e vilas sempre causou certa preocupação”.*



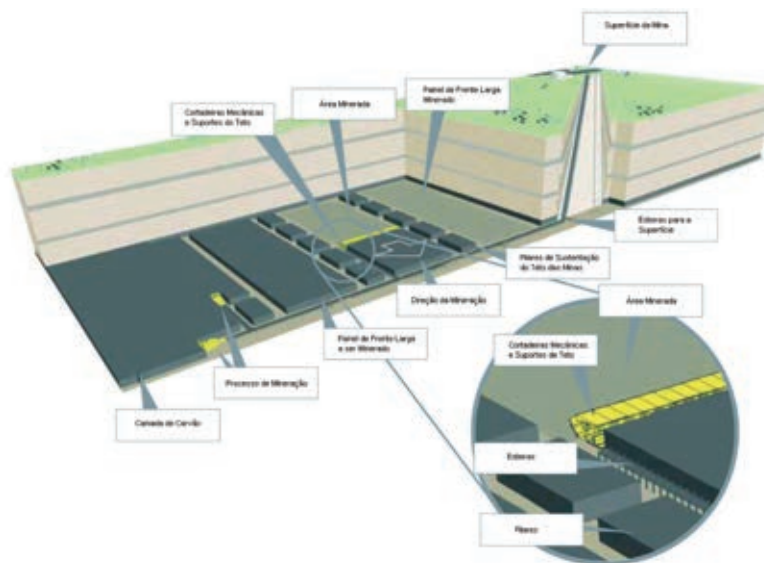
Tipicamente, as minas a céu aberto são ampliadas até que o recurso mineral se esgote. Quando não são mais produtivas para a extração do material, podem ser transformadas em aterros sanitários. Mesmo assim, é muitas vezes necessário drenar a água para a mina não se tornar uma lago. Modernamente, tem sido crescente a preocupação com a recuperação das áreas degradadas pela mineração.

#### ■ 2.4. Mineração subterrânea

Conforme abordado anteriormente, existem dois métodos de lavra subterrânea: câmara e pilares (*room-and-pillar*); e frente larga (*longwall mining*). A Figura 3 ilustra a operação em uma mina subterrânea.

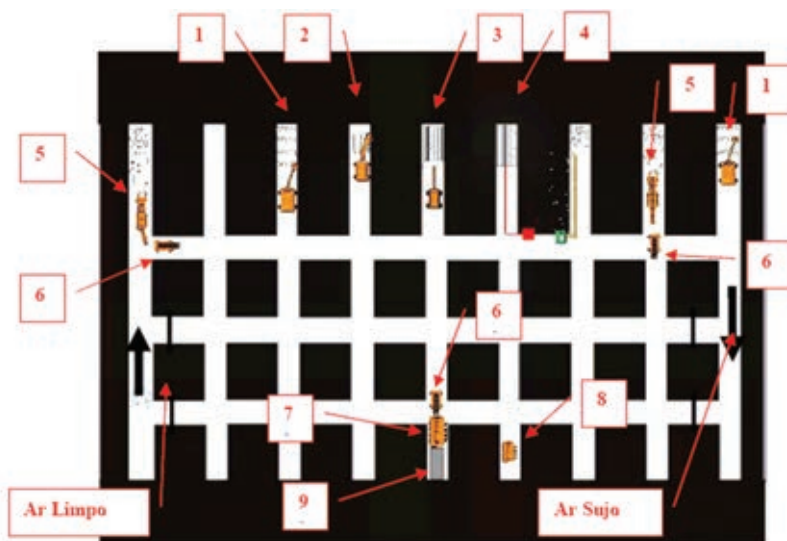
No primeiro método, os depósitos de carvão são recuperados de maneira a formar galerias, onde os pilares são formados pelo próprio mineral que sustentam a cobertura da mina e controlam o fluxo de ar. As câmaras normalmente têm de 5 a 10 metros de largura, e os pilares, 30 metros de extensão. O mineral extraído é carregado através de esteiras para a superfície. Na medida em que a mineração avança em direção ao limite do depósito, inicia-se a retirada da mina (*retreat mining*). Esse processo consiste na mineração do carvão que forma os pilares, de forma a permitir que a cobertura tombe. Ao final deste processo, a mina é abandonada. Uma representação esquemática do processo de lavra de câmaras e pilares é apresentada na Figura 4.

Figura 3 – Operação de uma mina subterrânea



Fonte: WCI, 2006.

Figura 4 – Representação esquemática de mineração de câmaras e pilares



Legenda: 1- perfuratriz de teto; 2- cortadeira; 3- perfuratriz de frente; 4- explosivo; 5- loader; 6- shuttle car; 7- alimentador; 8- centro força; 9- correia transportadora.

Fonte: Borges, 2004.

O método da frente larga (*longwall mining*) envolve a extração total do carvão de uma seção da cobertura ou da frente (larga) utilizando cortadeiras mecânicas (ver Figura 5). Antes de iniciar a lavra, é necessário um planejamento cuidadoso para assegurar que a aplicação do referido método seja realmente adequada à geologia da mina. A frente do depósito do mineral (*longwall*) varia de 100 a 350 metros e a cobertura é sustentada por macacos hidráulicos. Uma vez que o carvão seja totalmente extraído da área, permite-se que o teto da mina tombe e, então, a seção é abandonada. De acordo com Borges (2004), este tipo de método é proibido no Brasil. Pesa ainda sobre esse tipo de lavra o fato de o maquinário custar dez vezes do que aquele utilizado no método *room-and-pillar*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Segundo a WCI (2005), o maquinário utilizado no método longwall custa aproximadamente US\$ 50 milhões e o do room-and-pillars, US\$ 5 milhões.

Figura 5 – Mineração subterrânea método da frente larga (*longwall mining*)

Fonte: WCI, 2006.

#### ■ 2.5. Recuperação de áreas degradadas

De acordo com Campos *et al* (2003):

*“Ambos os processos [mineração a céu aberto e mineração subterrânea] acarretam problemas ambientais, pois modificam a estrutura do meio natural, pela disposição inadequada dos resíduos da mineração, causando contaminação de águas superficiais e subterrâneas, promovendo alterações na atmosfera ao redor das minas pela geração de gases e poeiras e perdas de solo fértil”.*

As primeiras iniciativas de recuperação de áreas degradadas da mineração datam de 1985. O primeiro Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA-RIMA) de mineração de carvão foi elaborado pela COPELMI Mineração e aprovado no Rio Grande do Sul em 1986/87.

A Resolução nº 001/86 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA instituiu a obrigatoriedade da apresentação de Estudo de Impacto Ambiental e de Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) para o licenciamento de empreendimentos de mineração. Esses estudos devem compreender, além do plano de lavra, o de reabilitação da área a ser minerada. O Decreto nº 97.632, de 10 de abril de 1989, regulamenta a obrigação de reabilitar áreas degradadas.

Ainda de acordo com Campos *et al* (2003):

*“No processo de reabilitação de áreas de mineração de carvão a céu aberto são utilizados o solo e as litologias subjacentes às camadas de carvão para a construção topográfica da paisagem, devendo ser proporcionadas, ao solo assim construído, condições para desenvolvimento da vegetação”.*

Esse mesmo artigo relaciona as etapas de reabilitação das áreas degradadas pela mineração que são assumidas atualmente como ambientalmente aceitas pelos órgãos de fiscalização e registra que tais etapas foram observadas em vários projetos de mineração apresentados ao Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM como “plano de recuperação de área degradada”. Essas etapas, de uma forma geral, são:

- (1) remoção do sólun no sentido perpendicular ao corte, para estocagem em local pré-determinado;
- (2) retirada do regolito argiloso e camadas subjacentes ao carvão no sentido do espaço criado pelo corte para último recobrimento;

- (3) após a retirada do carvão, preenchimento da cava com o “estéril” piritoso e o arenito;
- (4) recobrimento do “estéril” repostado com parte do regolito argiloso proveniente do corte adjacente;
- (5) reposição do sólum previamente estocado sobre o corte já preenchido e recoberto;
- (6) conformação e drenagem do terreno, e
- (7) plantio e/ou semeadura de espécies vegetais para fixação do solo.

Não obstante, os diferentes processos de lavra utilizados podem conduzir a deficiências no processo de reconstrução da área degradada, não sendo raro resultar na contaminação das camadas superficiais do solo construído com os resíduos do carvão.

As características dos solos construídos após a mineração de carvão dependem da variabilidade herdada dos materiais geológicos e dos diferentes processos construtivos. As operações de mineração a céu aberto tendem a misturar materiais de várias partes da coluna geológica, sendo essa é a razão por que as propriedades dos solos construídos após mineração de carvão variam muito em escalas de distâncias menores do que as do solo natural.

Evidência disso são os resultados obtidos do estudo de Campos *et al* (2003), em que foram avaliadas três áreas de solo construídas após a mineração a céu aberto em Lauro Muller, Santa Catarina. As áreas são relativas às minas Juliana, do Apertado e Rio do Meio. Os resultados foram diferenciados e a razão está fundamentalmente ligada ao processo de construção, porém o estudo evidenciou também que é possível obter resultados satisfatórios. Embora tenham sido detectadas deficiências em todas as áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto avaliadas em Lauro Muller houve um modo de construção que resultou em maior uniformidade das características químicas e do teor de argila entre os pontos amostrados, bem como melhores condições para o estabelecimento de espécies vegetais. Trata-se da Mina Juliana, onde, segundo os autores, o plano de reabilitação da área minerada apresentado pela mineradora ao DNPM parece ter sido seguido com mais rigor.

Ao proceder à recuperação de áreas mineradas, uma mineradora tem como obrigações e objetivos:

- Recomposição do solo, se possível com melhoria das características físico-químicas e biológicas;
- Revegetação, com utilização de espécies nativas e exóticas de desenvolvimento herbáceo e arbóreo;
- Restauração da topografia, com recuperação dos aspectos estéticos das áreas mineradas;
- Utilização econômica das áreas recuperadas, para exploração agropastoril, por exemplo, e conservação de locais pré-determinados.

A utilização econômica é uma alternativa real. Spathelf *et al* (2001) demonstra, por exemplo, que a plantação de acácias negras, com uma idade de rotação de 5 anos, em áreas mineradas em Butiá, Rio Grande do Sul, pode produzir taxas de retorno de até 11,9% ao ano.

Atualmente, já existem no Brasil áreas de mineração totalmente reabilitadas, onde são desenvolvidas outras atividades. A COPELMI, por exemplo, além de áreas recuperadas com plantações de acácias (Figura 6), apresenta um lago utilizado para abastecimento de água para a cidade de Butiá e uma estação experimental de piscicultura.

Figura 6 – Recuperação de área degradada com plantação de acácias



Fonte: COPELMI Mineração, 2006.

A recuperação das áreas mineradas deve ser feita conjuntamente com as atividades de lavra. Deve-se cuidar, ainda, da disposição de rejeitos provenientes do beneficiamento do carvão lavrado, eventualmente necessário. Há casos implantados em que os efluentes do lavador, assim como os da mina, são conduzidos a um sistema de sedimentação de material em suspensão, sendo a água clarificada pelo sistema reutilizada no beneficiamento do carvão mineral.

A evolução técnica desenvolvida nos últimos anos tem tornado possível a adequação entre a lavra e o beneficiamento do carvão, melhorando o controle ambiental e mitigando os impactos.

### 3. Beneficiamento

A matéria carbonosa que constitui o carvão é formada por carbono, oxigênio, nitrogênio, enxofre e traços de outros elementos. Essa matéria normalmente está associada, em maior ou menor quantidade, a rochas, como arenito, siltito, folhelhos e diamictitos, e a minerais como a pirita. Em um certo sentido, essa matéria associada é considerada como “impureza” do carvão. Assim sendo, a separação desse material indesejável melhora a qualidade do carvão bruto extraído da mina, também denominado *run-of-mine* (ROM), de forma que melhora o rendimento do carvão no seu uso final.

Esse processo de separação dos materiais desejáveis e indesejáveis existentes no carvão bruto chama-se beneficiamento. Resultam desse processo duas frações: uma de produto ou carvão lavado e outra de rejeito.

O tratamento dado depende das propriedades do mineral e do destino do mesmo. Dessa maneira, pode-se proceder ao beneficiamento através de uma simples trituração (Figura 7) ou de um processo complexo para redução das impurezas.

Figura 7 – Carvão triturado (Briquetes)



Fonte: Griffin Coal, 2006.

De qualquer modo, o objetivo do beneficiamento é alcançado através da separação do material mediante características físicas. Conforme explica Borges (2004), as características do carvão bruto necessárias para o estabelecimento de um esquema de beneficiamento são, essencialmente:

- tamanho ideal de britagem;
- curvas granulométricas do carvão britado;
- curvas de lavabilidade de cada fração granulométrica acima de 0,5mm; e
- estudos de degradação do carvão.

Para remover o material indesejado, o carvão bruto (ROM) é esmagado e então dividido em várias frações. As maiores são retiradas aproveitando-se das diferentes densidades. Nesse processo, o carvão, que é mais leve, é separado das outras impurezas fazendo-o flutuar em um tanque contendo um líquido de densidade específica (Figura 8). As frações menores são tratadas de várias maneiras, normalmente valendo-se das diferenças de massa, como ocorre quando se utiliza centrífugas. Esses equipamentos giram um contêiner em alta velocidade em torno de um eixo, separando assim o material sólido dos líquidos. Para carvões de fácil lavabilidade, aplicam-se processos mais simples utilizando-se aparelhos como jiques e mesas vibratórias. Para carvões de difícil lavabilidade, são aconselhados sistemas de meio denso, cuja precisão de corte é maior (Borges, 2004).

Figura 8 – Planta de beneficiamento



Fonte: World Coal, 2006.

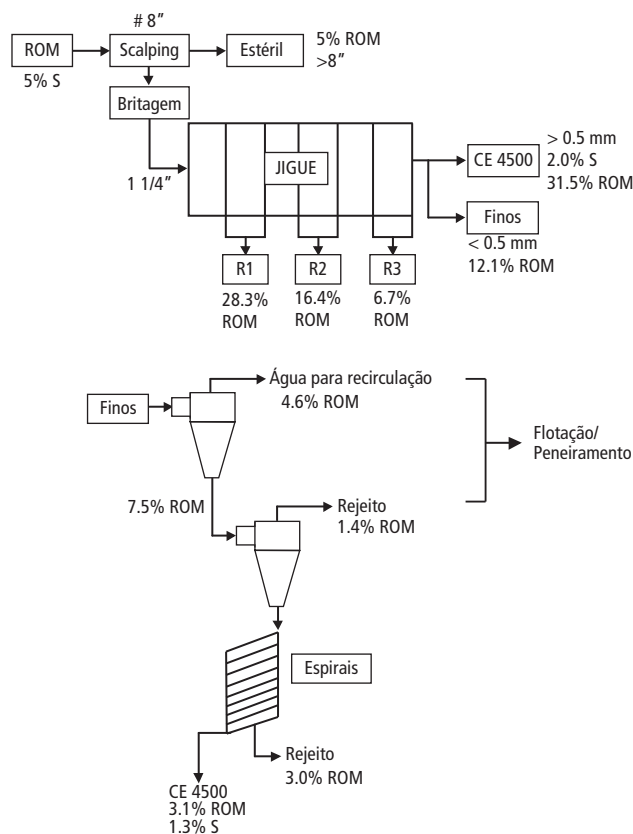
A prática usual no Brasil é alimentar o circuito de beneficiamento (lavador) com o carvão ROM, de elevado teor de cinzas. Inicialmente, a alimentação sofre um *scalping* em grelha de 8" e a fração passante, britada abaixo de 1 1/4", alimenta o jig. Já nessa operação são gerados três tipos de rejeitos: piritoso; xistoso e argiloso. Em seguida, o produto flutuado no jig é peneirado a 0,5 mm e o retido, menos de um terço do ROM, já constitui o primeiro produto do processo: um carvão com poder calorífico mais elevado e menor teor de cinzas. Em Santa Catarina, nessa etapa se produz um carvão energético com 4.500 kcal/kg e 35% de cinzas.

O material que passou na peneiragem, com granulometria inferior a 0,5 mm, é desaguado e classificado em ciclones. O produto grosseiro é concentrado em espirais. O concentrado das espirais (cerca de 3% do ROM) é um segundo produto do processo: um carvão também com maior poder calorífico, porém com um teor de cinzas um pouco mais elevado. No beneficiamento em Santa Catarina, é nessa fase que se extrai um carvão com 4.500 kcal/kg, mas com 42% de cinzas.

O estéril e rejeitos grosseiros de todo esse processo correspondem, no caso do carvão brasileiro, a mais de 50% do ROM. São, em geral, estocados em pilhas. A água e o rejeito dos ciclones, juntamente com o rejeito das espirais, perfazem 9% do ROM e são estocados em bacias de decantação (Borges, 2004).

Para melhor compreensão, apresenta-se na Figura 9 a representação esquemática de um circuito típico de beneficiamento.

Figura 9 – Circuito típico de beneficiamento nos lavadores de Santa Catarina



Do exposto, pode-se concluir que, considerando as características do carvão nacional, o beneficiamento propicia a recuperação de um volume não superior a 50% do carvão bruto.

## 4. Transporte e logística

### 4.1. Generalidades

O modal mais indicado para o transporte do carvão depende de vários fatores, mas principalmente da distância a ser coberta.

No mundo inteiro, grande parte do carvão produzido é usada para a geração de energia elétrica. Não raro, as termelétricas localizam-se próximas às minas, de modo a reduzir os custos de transporte. Com efeito, o transporte da energia elétrica, via redes de transmissão, apresenta-se, em geral, uma solução mais econômica do que o transporte do carvão.

Quando a mina de carvão e a planta de geração termelétrica estão próximas, o combustível pode ser transportado da mina para a planta por meio de esteiras (Figura 10). Para curtíssimas distâncias, as esteiras são, de fato, o meio de transporte mais eficiente para o carvão.



Figura 10 – Usina termelétrica junto à mina de carvão



Fonte: World Coal, 2006.

Para distâncias maiores, entretanto, caminhões, trens e barcaças são mais eficientes (Figuras 11 e 12). Alternativamente, o carvão pode ser misturado com água formando uma lama (*slurry*), de forma a ser transportado através de dutos. Normalmente, essas regras valem para mercados domésticos.

Para o transporte internacional, os navios são mais comumente utilizados, em tamanhos que variam a partir de 40.000 DWT:

- Handysize - 40-45.000 DWT
- Panamax - 60-80.000 DWT
- Capesize vessels – superior a 80.000 DWT.

Figura 11 – Transporte de carvão por caminhões



Fonte: Griffin Coal, 2006.

Figura 12 – Transporte de carvão por trem



Fonte: FTC, 2006.

Em 2004, mais de 750 milhões de toneladas de carvão foram comercializadas internacionalmente (IEA, 2005) e 90% desse volume foi transportado por navios de grande tonelagem, como o que ilustra a Figura 13. O custo de transporte de carvão, neste caso, costuma ser elevado. Em 2004, o preço-CIF (incluindo seguro e frete) de uma tonelada de carvão metalúrgico no Japão era, praticamente, de US\$ 61 (BP, 2005) e o custo do frete chegou a 49,50 US\$/t (COAL MARKET INTELLIGENCE, 2006).

Do volume de carvão mineral comercializado no mercado internacional em 2004, 70% referiram-se ao carvão-vapor, de uso principal na geração termelétrica. Importa ressaltar que, em 1995, essa proporção era de 40% (IEA, 2005).

Figura 13 – Transporte internacional do carvão



Fonte: World Coal, 2006.

Uma boa referência de preço do carvão, na hipótese de importação do mineral pelo Brasil, é o carvão da África do Sul, seja pela quantidade comercializada do carvão sul-africano no mercado internacional, seja por sua qualidade e localização estratégica em relação ao país. No final de 2004, o preço-FOB deste carvão estava em torno de US\$ 52 por tonelada. O preço do frete marítimo, estimado para a distância entre África do Sul e Rio de Janeiro com base no custo do frete entre África do Sul - Europa (ARA – Amsterdam, Rotterdam e Antuérpia), situava-se em US\$ 18 por tonelada. Assim, uma referência para o preço-CIF do carvão importado no Brasil é US\$ 70 por tonelada.

Em qualquer caso, o carvão transportado deve ter um conteúdo energético que justifica o seu transporte. No caso de carvões de alto teor de cinzas e relativamente baixo teor de carbono, dificilmente se justifica transporte a longas distâncias. Esse é precisamente o caso do carvão brasileiro.

#### ■ 4.2. Transporte e logística do carvão nacional

É no estado do Rio Grande do Sul onde se localizam as maiores jazidas do carvão nacional, correspondendo a cerca de 90% do total desses recursos no país. A maior delas é a de Candiota, que representa, sozinha, 38,7% do total nacional. De acordo com Gomes *et al.* (2003), a espessura média da camada total é de 4,5m e apresenta coberturas menores que 50m, possibilitando uma lavra a céu aberto. Tais características tornam a jazida economicamente atraente. Entretanto, o carvão bruto dessa jazida possui alto teor de cinzas (entre 51% e 54%) e de enxofre (1%), o que faz como o rendimento do combustível seja baixo (30% a 52%).

A Companhia Riograndense de Mineração – CRM opera a mina de Candiota, ininterruptamente, desde 1961, objetivando, em especial, a produção de carvão termelétrico. A produção abastece a Usina Termelétrica Presidente Médici, com 446 MW instalados. Segundo informações da empresa, a mineração a céu aberto é realizada com a utilização de uma escavadeira *dragline* para a retirada da cobertura do mineral. A unidade de britagem funciona em duas linhas independentes, com capacidade total de 800 t/h. O transporte do carvão entre a unidade de britagem e a usina termelétrica é feito através de uma correia transportadora com 2,3 km de extensão.

A segunda maior jazida do país é a de Santa Terezinha. Conforme Gomes *et al.* (1998), essa jazida

está situada na região nordeste do Rio Grande do Sul, com uma área superior a mil km<sup>2</sup>, tem os limites oeste, norte e sul razoavelmente bem definidos, enquanto suas extensões para noroeste e para leste na plataforma continental são ainda desconhecidas. Foi descoberta em 1979 pela equipe da CPRM, pela combinação de critérios geológicos, métodos geofísicos e furos de sonda, já que não aflora em ponto algum.

O carvão dessa jazida possui propriedades coqueificantes, podendo apresentar rendimento de 60%, com 15% de teor de cinzas e 1% de enxofre. Entretanto, o mineral encontra-se sob coberturas mínimas de 500m, com espessura média de 2,3m (Gomes *et al.*, 2003), o que exigiria elevados investimentos na construção de infra-estrutura para o escoamento do produto. Em linhas gerais, o investimento consistiria na construção de dois trechos de linha férrea: um, a partir da cidade de Canoas, que se ligaria à Ferrovia Tereza Cristina (existente), em Criciúma, com 260 km, a um custo de R\$ 350 milhões; e outro, a partir do porto de Imbituba até a cidade de Araquari, ligando a Ferrovia Tereza Cristina à América Latina Logística (ALL), um trecho de 236 km ao custo de R\$ 448 milhões (ver Figura 14). Esta estrutura poderia ser aproveitada para o transporte de outros minérios, e até mesmo subprodutos da queima do carvão como sulfato de amônia, que saíria da USITESC (em projeto) em direção ao porto de Imbituba.

Figura 14 – Infra-estrutura para escoamento da produção da jazida Santa Terezinha



Fonte: FTC, 2006.

Com características semelhantes à jazida de Santa Terezinha, Morungava-Chico Lomã também possui carvão com propriedades coqueificantes com coberturas entre 50m e 300m. Tal jazida nunca foi minerada, porém a construção de uma infra-estrutura adequada, do tipo da descrita anteriormente, pode viabilizar a obtenção de uma fração nobre do carvão desse depósito, com baixo teor de cinzas e de enxofre, que poderia ser utilizada em misturas com outros carvões, para a produção de coque, por exemplo (Gomes *et al.*, 2003).

Ainda no Rio Grande do Sul, a jazida de Charqueadas apresenta um carvão com baixo rendimento (35%),

porém com baixo teor de cinzas e enxofre. A unidade, de propriedade da COPELMI, é composta por uma mina subterrânea, que operou até 1990, e um entreposto que abastece a Usina Termelétrica Charqueadas e a COPE-SUL, no pólo petroquímico de Triunfo.

As jazidas de Capané e Iruí possuem carvões com baixo rendimento (40%), porém com teor de cinza entre 35 e 45% e de enxofre abaixo de 0,6%. A espessura varia entre 1,5 e 2m e o mineral está sob uma cobertura inferior a 50m. A jazida de Capané atualmente é operada pela Companhia Palermo. A de Iruí é de propriedade da CRM, porém a mina está desativada atualmente.

No Rio Grande do Sul, há ainda as minas Leão I e II. A primeira situa-se no município de Minas do Leão, a 90 Km de Porto Alegre, às margens da BR-290. A mina, que é de propriedade de CRM, iniciou sua operação em 1963 com 125 metros de profundidade. De acordo com a empresa, os trabalhos de subsolo foram interrompidos em 2002 devido, principalmente, aos altos custos da mineração. Atualmente, a mina produz a partir da área da Boa Vista, uma mineração a céu aberto que emprega equipamentos tradicionais de terraplanagem em seus trabalhos.

A mina Leão II também se localiza no município de Minas do Leão, a 6 km ao norte da Mina do Leão I. A infra-estrutura existente no local constitui-se de dois túneis inclinados de acesso à camada de carvão; seis quilômetros de galerias no subsolo; silos subterrâneos para carvão; poço de ventilação com 220 metros de profundidade; prédios com 10.000 m<sup>2</sup> de área útil e equipamentos diversos para a lavra e beneficiamento do minério. Esse carvão deverá suprir a Usina Termelétrica de Jacuí, em construção, distante cerca de 60 km da mina. O transporte será feito por barcaças.

As jazidas de carvão do Rio Grande do Sul têm, todas, fácil acesso rodoviário, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 – Rio Grande do Sul – Acesso rodoviário às jazidas de carvão



Fonte: CRM, 2006.

Em Santa Catarina, encontra-se a jazida Sul Catarinense, onde ocorrem dez camadas de carvão, sendo Barro Branco e Bonito as mais importantes, em termos econômicos.

De acordo com Gomes *et al.* (2003), estes depósitos são os mais intensamente explorados nas últimas décadas no Brasil, devido às propriedades coqueificáveis do mineral e do consumo nas plantas termelétricas do complexo Jorge Lacerda, em Tubarão (SC). As espessuras médias nas áreas mineradas são em torno de 1,6m e as coberturas vão de camadas aflorantes até mais de 800 m, entretanto, os setores lavráveis a céu aberto estão quase esgotados para a camada Barro Branco. O rendimento do combustível desses depósitos varia de 30 a 35% sobre o carvão bruto (ROM).

Finalmente, na região central do Paraná encontram-se as jazidas de Cambuí e Sapopema que representam menos de 1% dos recursos nacionais. O combustível da primeira tem alto teor de cinzas (45%) e de enxofre (6%). A produção é consumida na usina termelétrica de Figueira, localizada a 5km da mina. Há um projeto de repotenciação dessa usina que ampliaria a capacidade instalada dos atuais 20 MW para 125 MW. Neste caso, segundo Campaner e Espoladore (2004), será necessário lançar mão do carvão da jazida de Sapopema.

Considerando que as termelétricas a carvão nacional devem se localizar na “boca da mina” ou próximas a elas, a questão de infra-estrutura de transporte não se mostra uma restrição relevante à expansão da geração a carvão. Contudo, deve-se frisar que investimentos adicionais em infra-estrutura podem intensificar o uso do carvão nacional, inclusive em outras aplicações, como na mistura para o carvão metalúrgico e viabilizar o escoamento de subprodutos do carvão na geração termelétrica, eventualmente melhorando a competitividade desses projetos.

#### ■ 4.3. Infra-estrutura das minas nacionais

De acordo com Gomes *et al.* (2003), as minas de Santa Catarina são predominantemente de encostas e de subsolo, com acesso por meio de planos inclinados ou poços. Nas minas subterrâneas, o método de mineração do carvão é por câmaras e pilares com poços de ventilação, sendo o mineral bruto transportado por correias, guinchos sem fio ou vagonetas sobre trilhos de aço. Nas minas a céu aberto, o método de mineração é o cortes em tiras, com equipamentos de terraplanagem. No beneficiamento são utilizados britadores, jigues, ciclones, mesas concentradoras e flotação. As mineradoras catarinenses ainda reaproveitam antigos rejeitos para a produção de finos de carvão e de CE-4.500<sup>2</sup> para a Usina Termelétrica Jorge Lacerda, em Tubarão.

A CRM, no Rio Grande do Sul, também utiliza o método de mineração câmara e pilares na mina Leão I, onde o poço tem 135m de profundidade. O sistema possui máquinas de abertura de galerias, carregadeiras frontais elétricas, correias transportadoras e ventiladores axiais. O beneficiamento é feito utilizando jigue metálico tipo Baum e hidrociclones no Lavador Eurico Rômulo Machado. Já a mina subterrânea Leão II, ainda inoperante, está semi-equipada para operar no método *long-wall*. Conforme dito anteriormente, a mina de Candiota é a céu aberto e utiliza o método de mineração por tiras, com a utilização de uma escavadeira *dragline* para a retirada do carvão. A unidade de britagem funciona em duas linhas independentes, com capacidade total de 800 t/h. O transporte do carvão entre a unidade de britagem e a usina termelétrica é feito através de uma correia transportadora com 2,3 km de extensão.

A mineradora COPELMI utiliza também o método de mineração por tiras na mina de Seival. Nas jazidas de Recreio, Faxinal e Butiá Leste, o método utilizado é o *truck/shovel*. O beneficiamento é feito por jigues Baum e Menally, ciclones e espirais. A carbonífera Palermo opera a jazida Capané utilizando os métodos de mineração por tiras e *truck/shovel*. O beneficiamento é feito por jigues Baum, peneiramento e ciclones (Gomes et alii, 2003).

No Paraná, a Companhia Carbonífera Cambuí opera a mina subterrânea Amando Simões utilizando o método *short-wall*, com câmaras estreitas. O transporte é feito por vagonetas, cabo sem fim e correias. A usina de beneficiamento é equipada com jigue-hartz e britador de rolos (Gomes *et al.*, 2003).

#### ■ 4.4. Carvão metalúrgico nacional

De acordo com Borba (2001), com exceção do carvão colombiano comprado pela indústria cimenteira, quase toda a importação do mineral no Brasil é para uso siderúrgico. Essa situação não deve se modificar, pois dificilmente as siderúrgicas brasileiras voltarão a consumir carvão coqueificável proveniente de Santa Catarina.

A indústria siderúrgica brasileira, segundo Gomes *et al.* (2003), foi implantada após a Segunda Guerra Mundial, calcada no carvão importado. Pretendia-se que os alto-fornos consumissem 40% de carvão metalúrgico nacional, extraído das jazidas Sul-Catarinenses, e 60% de importado. Entretanto, nas três décadas seguintes, houve um esforço por parte das siderúrgicas estatais de reduzir custos e aumentar a produtividade. Com isso, a parcela importada aumentou para 80% e, logo em seguida, para 90%. Ainda assim, em 1980, a produção de carvão siderúrgico nacional atingiu o seu nível máximo, 1,305 milhões de toneladas, correspondendo a 23,9% da demanda das coquerias, favorecida, sobretudo, pelos choques do petróleo.

<sup>2</sup> CE significa Carvão Energético e 4.500 representa o poder calorífico do combustível, em kcal/kg.

A superação do choque nos preços do petróleo, aliado ao aumento dos custos de extração do carvão, causado pela exaustão das minas economicamente mais favoráveis, fez com que a produção nacional caísse gradualmente para menos de 10% do consumo das coquerias. Por fim, a desregulamentação do setor, em 1990, encerrou de vez o uso do carvão nacional na siderurgia.

Dessa maneira, são poucas as perspectivas de retorno do consumo do carvão metalúrgico nacional no setor siderúrgico. As únicas possibilidades reais estariam nas jazidas de Chico Lomã-Morungava e Santa Terezinha. Segundo Gomes *et al.* (2003), testes executados em ambas as jazidas mostraram que o carvão bruto pode ser beneficiado para obtenção de uma parcela de uso siderúrgico, com rendimento de duas a seis vezes maior que o usual das minas Sul-Catarinenses, com baixos teores de cinzas e enxofre.

#### ■ 4.5. Carvão importado

O Brasil importou, em 2004, 18,5 milhões de toneladas de carvão, basicamente para uso na siderurgia.

Devido a existência em abundância de carvão vapor no Sul do país, não parece razoável cogitar a instalação de termelétricas a carvão importado nessa região. Por outro lado, dadas as características do carvão nacional, não parece aceitável cogitar a instalação de termelétricas a carvão nacional fora dessa região.

Assim, as regiões brasileiras naturalmente candidatas a instalar termelétricas a carvão importado seriam o Nordeste e o Sudeste, quer pelas dimensões do mercado de energia elétrica, quer pela necessidade de alternativas de geração de porte. Ambas as regiões possuem portos estrategicamente localizados, com amplas condições de receber, ou de se preparar para tal, grandes volumes de carvão.

Alguns desses portos já funcionam como terminais de carvão para atendimento à indústria siderúrgica, como Sepetiba, no Rio de Janeiro, e Vitória, no Espírito Santo. Pelo menos um porto no Nordeste, Pecém, no Ceará, em breve estará atendendo à siderúrgica local. Outros portos no Nordeste, como Suape, em Pernambuco, e Itaqui, no Maranhão, também reúnem condições para receber esse tipo de carga, ainda que investimentos adicionais possam ser necessários. Nesses três casos, um outro fator relevante é a possibilidade de integração com o modal ferroviário, aumentando a flexibilidade para a localização de usinas termelétricas.

Essa integração é uma possibilidade real tendo em vista o projeto da Ferrovia Nova Transnordestina, que prevê a construção de uma moderna ferrovia com 1.800 km de extensão, ligando Eliseu Martins, no Piauí, aos portos de Pecém e Suape. No Maranhão, o porto de Itaqui, já servido pela Estrada de Ferro Carajás, está na área da Ferrovia Norte-Sul, em construção.

---

## 5. Tecnologia

Com a crescente pressão ambiental, especialmente a preocupação com o aquecimento global e as mudanças climáticas, o fator tecnológico se coloca, dentro de uma perspectiva de longo prazo, como um dos condicionantes do potencial de geração termelétrica a partir do carvão mineral.

O panorama atual do estágio de desenvolvimento de alternativas tecnológicas para geração de energia elétrica a partir do carvão é resumido na tabela abaixo.



Tabela 1 – Tecnologias de geração termelétrica a carvão.

Tecnologia	Situação	Eficiência na conversão	Investimento (US\$/kW) <sup>(1)</sup>
Combustão pulverizada	C	38-46%	1.300-1.500
Combustão em Leito Fluidizado			
Pressão atmosférica	C/D	34-37%	1.450-1.700
Circulação <sup>(2)</sup>	C/D	37-39%	1.459-1.700
Pressurização <sup>(2)</sup>	D	42-45%	1.450-1.700
Gaseificação integrada			
Com ciclo combinado	D	45-48%	1.450-1.700
Com célula combustível	P&D	40-60%	1.700-1.900
Combustão direta			
Turbina	P&D	35-45%	1.200
Diesel	P&D	35-40%	500-1.000

Situação: C = comercial; D = demonstrado; P&D = pesquisa e desenvolvimento

(1) preços internacionais; (2) vapores sub e supercríticos

Fonte: International Energy Agency, 1997.

Considerando o estágio de desenvolvimento dessas tecnologias e as características do carvão nacional, considera-se que, no horizonte do PNE 2030, as tecnologias de combustão pulverizada e leito fluidizado são as que apresentam as melhores perspectivas para aplicação nas futuras termelétricas a carvão nacional.

Esse entendimento é corroborado pelos projetos disponíveis: as Usinas de Jacuí e Candiota Fase C, que estão em construção, utilizam a tecnologia da combustão pulverizada; outros dois projetos, a Usina Sul Catarinense – USITESC e Seival, no Rio Grande do Sul, utilizarão, respectivamente, a combustão em leito fluidizado circulante e a combustão pulverizada.

Em todas elas poder-se-á utilizar, total ou quase totalmente, o carvão bruto ROM (*run-of-mine*), isto é, sem necessidade de beneficiamento.

Para termelétricas a carvão importado, a qualidade do carvão a ser utilizado poderá permitir a introdução de tecnologias mais eficientes. A partir de 2015 é admissível considerar a combustão pressurizada, possibilitando eficiência de até 45%.

Em qualquer caso, no horizonte do PNE 2030, tendo em vista, principalmente, o estágio de seu desenvolvimento, afasta-se a consideração da tecnologia de gaseificação integrada.

## 6. Conclusões

Nesta nota técnica, procurou-se examinar a estrutura da indústria do carvão mineral com relação à produção, ao transporte e à logística. Pode-se inferir dessa análise que em todas as etapas da cadeia produtiva, desde a extração até o escoamento da produção para o consumo final do energético, são exigidos elevados investimentos.

Os dois processos de produção de carvão, mineração a céu aberto e mineração subterrânea, acarretam problemas ambientais na medida em que modificam a estrutura do meio natural, pela disposição inadequada dos resíduos da mineração. Por sua própria natureza, a mineração a céu aberto, que está se tornando cada vez mais comum no mundo todo, é mais agressiva em relação ao meio ambiente local, e sua proximidade de

idades e vilas sempre causou certa preocupação.

Contudo, a evolução técnica tem tornado possível a adequação entre a lavra e o beneficiamento do carvão, melhorando o controle ambiental e mitigando os impactos. Atualmente, já existem, no Brasil, áreas de mineração totalmente reabilitadas, onde são desenvolvidas outras atividades, inclusive de valor comercial. Há exemplos de áreas recuperadas com plantações comerciais de acácias, além de um lago para abastecimento de água e uma estação experimental de piscicultura.

A recuperação das áreas mineradas deve ser feita conjuntamente com as atividades de lavra. Deve-se cuidar, ainda, da disposição de rejeitos provenientes do beneficiamento do carvão lavrado, eventualmente necessário.

O beneficiamento é o processo de separação dos materiais desejáveis e indesejáveis existentes no carvão bruto que é extraído da mina. Resultam desse processo duas frações: uma, de produto ou carvão lavado, e outra, de rejeito. Considerando as características do carvão nacional, o beneficiamento propicia a recuperação de um volume não superior a 50% do carvão bruto.

Devido a existência em abundância de carvão vapor no Sul do país, não parece razoável cogitar a instalação de termelétricas a carvão importado nessa região. Por outro lado, dadas as características do carvão nacional, não parece aceitável cogitar a instalação de termelétricas a carvão nacional fora dessa região.

No caso da região Sul, a análise da infra-estrutura existente revela que a questão do transporte não se mostra uma restrição relevante à expansão da geração a carvão. Contudo, deve-se frisar que investimentos adicionais em infra-estrutura podem intensificar o uso do carvão nacional, inclusive em outras aplicações, como na mistura para o carvão metalúrgico. Além disso, podem viabilizar o escoamento de subprodutos do carvão na geração termelétrica, eventualmente melhorando a competitividade desses projetos.

As regiões brasileiras naturalmente candidatas a instalar termelétricas a carvão importado seriam o Nordeste e o Sudeste, quer pelas dimensões do mercado de energia elétrica, quer pela necessidade de alternativas de geração de porte. Ambas as regiões possuem portos estrategicamente localizados, com amplas condições de receber, ou de se preparar para tal, grandes volumes de carvão. Alguns desses portos já funcionam hoje como terminais de carvão, para atendimento à indústria siderúrgica. No caso do Nordeste, em particular, a integração com o modal ferroviário é uma possibilidade real, haja vista os projetos ferroviários em construção e previstos para a região.

Assim, quanto à importação de carvão, tudo indica que a infra-estrutura portuária tem condições de se adaptar, em uma perspectiva de longo prazo, a uma eventual solicitação adicional.

Por fim, quanto às tecnologias de geração de energia elétrica a partir do carvão mineral, ratificou-se as indicações de que, no caso do carvão nacional, tecnologias de combustão pulverizada e leito fluidizado são as que apresentam as melhores perspectivas para aplicação nas futuras termelétricas. No caso do carvão importado, a qualidade do carvão a ser utilizado poderá permitir o uso da combustão pressurizada, possibilitando eficiência maior, de até 45%. Em qualquer caso, no horizonte do PNE 2030, tendo em vista, principalmente, o estágio de seu desenvolvimento, afastou-se a consideração da tecnologia de gaseificação integrada.

## 7. Referências bibliográficas

### 7.1. Reuniões Temáticas na EPE: Carvão Mineral

CARVALHO, C.H.B., **Oportunidades de negócios no setor elétrico com o uso do carvão mineral nacional**. Apresentação em powerpoint. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2006.

RESENDE, I. **Carvão Mineral no Brasil**. Apresentação em powerpoint. 2006

TRACTEBEL ENERGIA, **Carvão, usinas termelétricas e meio ambiente. Considerações**. Apresentação em powerpoint. 2006.

TRACTEBEL ENERGIA, **Carvão Mineral. Visão Estratégica Mundial**. Apresentação em powerpoint. 2006.

ZANCAN, F.L., **Carvão Mineral no Brasil**. Apresentação powerpoint. 2006.

### 7.2. Bibliografia

BEYNON, H. **Protesto ambiental e mudança social no Reino Unido**. In: Mana, vol. 5, nº 1: Rio de Janeiro, 1999

BORBA, R. F. **Balanco Mineral Brasileiro**. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM: Brasília, 2001.

BORGES, I. L.. **Processo de Adequação Ambiental na Indústria Carbonífera: Estudos de Caso sobre a Implantação de um Sistema de Gestão Ambiental**. Tese de Mestrado, CPPE/UFRJ, Planejamento Energético: Rio de Janeiro, 2004.

CAMPANER, V. P.; ESPOLADORE, A. **A Exploração de Carvão como Fator de Desenvolvimento Regional- O Caso de Figueira, PR**. In: IV Congresso Brasileiro de Geógrafos: Goiânia, 2004.

CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, J. A.; SOUZA, L. S. **Avaliação de três áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina** in Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol.27, nº 6: Viçosa, 2003.

DERMAUT, J., GEERAERT, B. E. A. **A Better Understanding of Greenhouse gas Emissions for Different Energy Vectors and Applications**. World Energy Council: Brussels, 2005

GOMES, A. P.; CRUZ, P. R.; BORGES, L. P. **Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio**. In: Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. CPRM: [s.n.], 2003.

GOMES, A. P.; FERREIRA, J. A.; ALBUQUERQUE, L. F.; SÜFF, T. **Carvão fóssil** in Estudos Avançados, vol.12, nº 33: São Paulo, 1998 (disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40141998000200006&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40141998000200006&script=sci_arttext&tlng=pt) ISSN 0103-4014>)

IEA - International Energy Agency. **Energy technologies for the 21st Century**. IEA: Paris, 1997.

IEA – International Energy Agency. **Key World Energy Statistics 2005**. IEA: Paris, 2005.

MME/EPE **Balanco Energético Nacional - BEN 2005 - Ano base 2004**. Brasília 2005.

SPATHELF, P.; SELING, I.; BORGES, R. Z. **Avaliação Econômica da Recuperação de Áreas Mineradas na Empresa Copelmi Mineração S.A., BUTIÁ, RS, BRASIL**. In Ciência Rural, vol.31, nº 5: Santa Maria, 2001.

WCI – World Coal Institute. **Clean Coal-Building a future through technology**. Disponível *on-line* desde 2005 em <<http://www.wci-coal.com>>.

COPEL MI MINERAÇÃO S.A. <<http://www.copelmi.com.br/protecao.htm>>

GRIFFIN COAL <<http://www.griffincoal.com.au/processing.html>>, <<http://www.griffincoal.com.au/mining.html>>

WORLD COAL <<http://www.worldcoal.org>>

FERROVIA TEREZA CRISTINA - FTC <<http://www.ftc.com.br>>

COAL MARKET INTELLIGENCE <<http://www.e-coal.com>>, acesso em junho de 2006.

COMPANHIA RIO-GRANDENSE DE MINERAÇÃO - CRM <<http://www.crm.rs.gov.br>>

## **Participantes da Empresa de Pesquisa Energética – EPE**

### **Coordenação Geral**

Mauricio Tiomno Tolmasquim  
Amílcar Guerreiro

### **Coordenação Executiva**

Renato Pinto de Queiroz  
Juarez Castrillon Lopes

### **Coordenação Técnica**

Ricardo Gorini

### **Equipe Técnica**

Amaro Olímpio Pereira Junior  
Marina Elisabete Espinho Tavares

# GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DO CARVÃO MINERAL: CARACTERIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA

## SUMÁRIO

1. Panorama da geração termelétrica a carvão .....	55
1.1. Panorama mundial .....	55
1.2. Parque termelétrico a carvão mineral brasileiro .....	56
2. Caracterização do combustível .....	58
3. Componentes básicos de uma usina termelétrica a carvão .....	61
3.1. Caldeira .....	62
3.2. Grupo turbina-gerador .....	62
3.3. Condensador .....	63
3.4. Caracterização quanto aos ciclos termodinâmicos.....	63
4. Tecnologias de geração .....	65
4.1. Panorama .....	65
4.2. Carvão pulverizado (PF) .....	66
4.3. Combustão em Leito Fluidizado .....	67
4.4. Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado (IGCC) .....	69
4.5. Sequestro de carbono .....	70
4.6. Perspectivas tecnológicas no Brasil .....	71
5. Caracterização operacional .....	73
6. Custos .....	74
6.1. Geral .....	74
6.2. Custos de investimento .....	74
6.3. Custos de combustível .....	76
6.4. Custos de operação e manutenção .....	79
6.5. Custos de transmissão.....	79
6.6. Impostos .....	80
7. Avaliação econômica .....	81
7.1. Bases de cálculo .....	81
7.2. Resultados .....	82
8. Considerações finais .....	85
9. Referências bibliográficas .....	86
9.1. Reuniões temáticas na EPE: carvão .....	86
9.2. Bibliografia .....	86

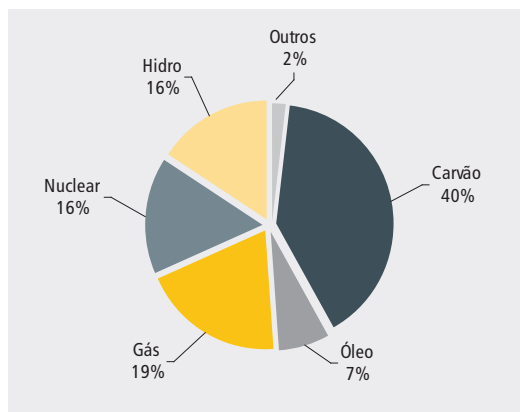


## 1. Panorama da geração termelétrica a carvão

### ■ 1.1. Panorama mundial

De acordo com o *World Coal Institute – WCI* (2003), o carvão mineral é a principal fonte primária de geração de energia elétrica, sendo responsável por cerca de 40% de toda a eletricidade gerada no planeta em 2003 (Figura 1).

Figura 1 – Participação de fontes primárias na geração de energia elétrica



Fonte: WCI, 2005.

Nesse ano, conforme dados da *International Energy Agency – IEA* (2005), foi gerado por usinas térmicas movidas a carvão mineral um volume de energia elétrica de 6.681 TWh, sendo que mais da metade em apenas dois países: Estados Unidos (2.083 TWh) e China (1.515 TWh), conforme Tabela 1.

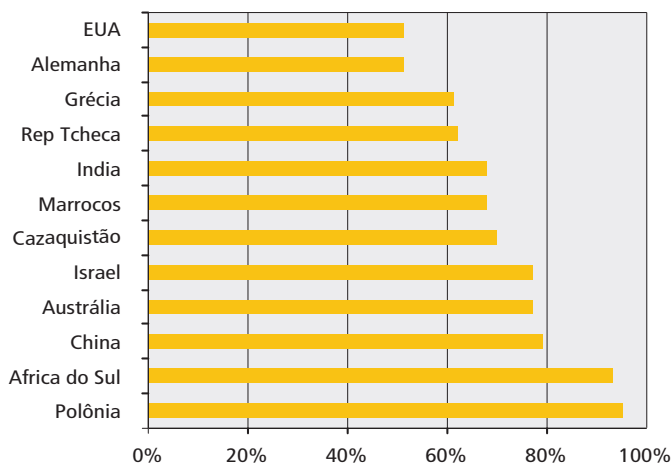
Tabela 1 – Mundo: produção de eletricidade a partir de termelétricas a carvão mineral

País	TWh	%
Estados Unidos	2.083	31,2
China	1.515	22,7
Índia	433	6,5
Alemanha	314	4,7
Japão	293	4,4
África do Sul	214	3,2
Austrália	176	2,6
Rússia	172	2,6
Polônia	143	2,1
Reino Unido	140	2,1
Resto do mundo	1.198	17,9
<b>Total</b>	<b>6.681</b>	<b>100,0</b>

Fonte: IEA, 2005.

Diversos países são majoritariamente dependentes do carvão como insumo para a geração de energia elétrica (Figura 2). O domínio da tecnologia de geração e as relativas abundância, estabilidade de preço e fornecimento desse energético permitem supor que esse panorama, em futuro próximo, não deverá sofrer alterações significativas.

Figura 2 – Participação do carvão na geração de energia elétrica de diversos países



Fonte: WCI, 2003.

Por outro lado, os efeitos ambientais danosos resultantes das emissões provocadas pela queima do carvão vêm provocando questionamentos crescentes. De acordo com dados da EIA (2005), o carvão tem sido responsável, há 30 anos, por 35 a 38% das emissões totais de CO<sub>2</sub> no mundo<sup>1</sup>. Tais emissões incluem óxidos de carbono, nitrogênio e enxofre (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>), além de particulados, que têm impactos tanto no aquecimento global quanto na ocorrência de chuva ácida. A mitigação desses efeitos tem exigido o desenvolvimento de novas tecnologias, conhecidas como *clean coal technologies*.

Outro aspecto a ser considerado, que pode ser importante fator de estímulo ao desenvolvimento tecnológico, é a necessidade de substituição das usinas a carvão existentes. Na Comunidade Européia, 50% da capacidade total de 600 GW têm idade superior a 25 anos, enquanto nos Estados Unidos 80% das usinas têm mais de 20 anos (CARVALHO, 2005).

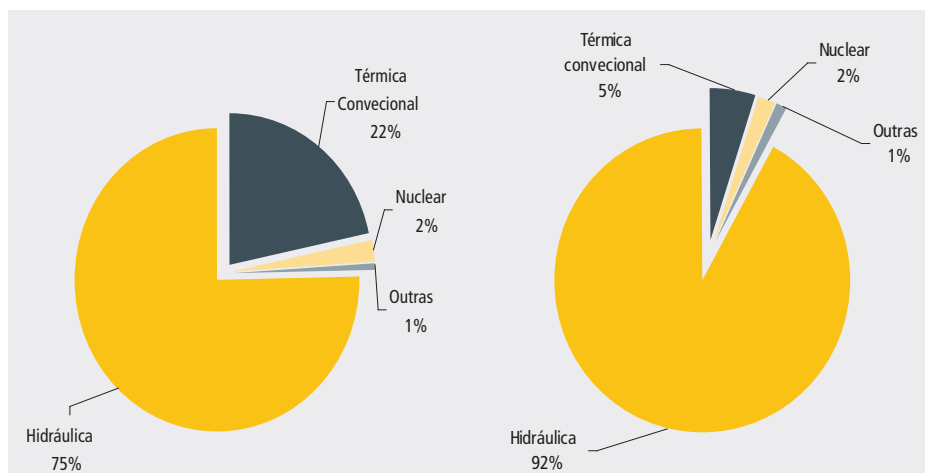
### ■ 1.2. Parque termelétrico a carvão mineral brasileiro

No Brasil, embora as usinas termelétricas, como um todo, representem 22% da potência instalada (Figura 3), apenas 5% da energia gerada no Sistema Interligado Nacional – SIN em 2005 foi derivada de fontes térmicas convencionais e pouco mais que 1% do carvão mineral (ONS-2005).

<sup>1</sup> Em 1973, o nível de emissões era de 15.662 milhões de toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>, sendo 34,9% em razão da queima do carvão. Em 2003, a despeito do avanço das emissões do gás, o carvão respondeu por 38,4% de um total de emissões de 24.983 milhões de toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>.



Figura 3 – Repartição da potência instalada e da energia gerada em 2005



Elaboração: EPE.

A potência total instalada e em operação em termelétricas a carvão mineral no Brasil é de 1.415 MW. Todas as usinas estão localizadas nos estados da região Sul, próximas às minas de carvão (Tabela 2). Assim como parcela significativa das usinas termelétricas existentes no mundo, as usinas brasileiras estão no final de sua vida útil, embora deva ser considerado que o nível de utilização (fator de capacidade médio) é bem menor no Brasil que em outros países.

Tabela 2 – Brasil: usinas termelétricas a carvão mineral em operação

Usina	Empresa	Município	UF	Potência (MW)
São Jerônimo	CGTEE	São Jerônimo	RS	20
Presidente Médici A/B	CGTEE	Candiota	RS	446
Figueira I	Copel	Figueira	PR	20
Jorge Lacerda A	Tractebel	Capivari de Baixo	SC	232
Jorge Lacerda B	Tractebel	Capivari de Baixo	SC	262
Jorge Lacerda IV	Tractebel	Capivari de Baixo	SC	363
Charqueadas	Tractebel	Capivari de Baixo	SC	72
<b>Total</b>				<b>1.415</b>

Fonte: EPE, 2006.

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica – PDEE 2006-2015 (MME/EPE, 2006), encontram-se em construção, com início de operação prevista para 2009 e 2010, mais dois empreendimentos na região Sul totalizando 700 MW. A energia dessas usinas já foi totalmente contratada no leilão de energia nova realizado em dezembro de 2005 (Tabela 3).

Tabela 3 – Brasil: novas usinas termelétricas a carvão mineral (entrada prevista até 2010)

Usina	Empresa	Município	UF	Potência (MW)
Jacuí	ELEJA	Charqueadas	RS	350
Candiota III	CGTEE	Candiota	RS	350
<b>Total</b>				<b>700</b>

Fonte: MME/EPE, 2006.

Em fase de estudos de viabilização técnico-econômica e sócio-ambiental, existem cinco outros projetos (Tabela 4) que totalizam uma potência instalada de 3.148 MW (MME, 2006). Desses, apenas o projeto de Sepetiba, no Estado do Rio de Janeiro, prevê a utilização de carvão importado.

Tabela 4 – Projetos de usinas termelétricas a carvão mineral em estudos

Usina	Empresa	Município	UF	Potência (MW)
Seival	COPELMI	Candiota	RS	562
CTSul	CTSul	Cachoeira do Sul	RS	650
Figueira II	Copel	Figueira	PR	126
Usitesc	Usitesc	Treviso	SC	440
Sepetiba	Itaguaí Energia	Itaguaí	RJ	1.370
<b>Total</b>				<b>3.148</b>

Fonte: MME/EPE, 2006.

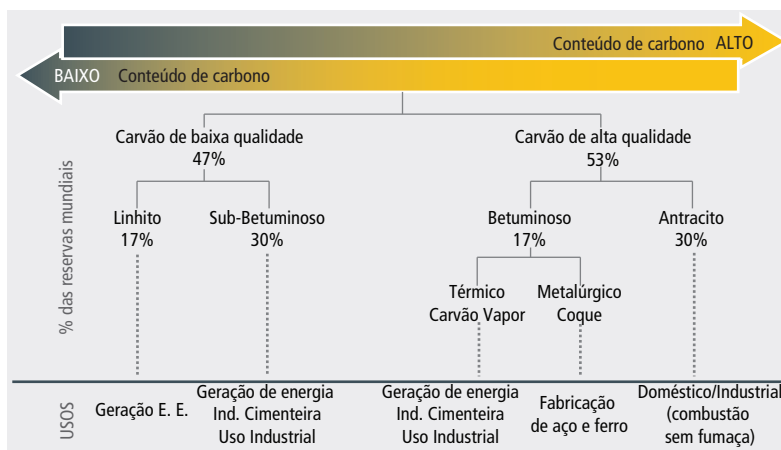
## 2. Caracterização do combustível

Conforme visto anteriormente, o carvão mineral é uma mistura de hidrocarbonetos formada pela decomposição de matéria orgânica durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. De acordo com o Atlas da Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2005), esse combustível fóssil é classificado, conforme sua qualidade, em:

- turfa, de baixo conteúdo carbonífero, que constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%;
- linhito, que apresenta teor de carbono que varia de 60% a 75%;
- carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, que contém entre 75% e 85% de carbono;
- antracito, o mais puro dos carvões, que apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%.

A Figura 4 mostra a composição das reservas mundiais totais (provadas e inferidas) e usos por tipo de carvão.

Figura 4 – Composição das reservas mundiais totais e usos por tipo de carvão



As reservas mundiais provadas, conforme o *World Energy Council apud IEA (2004)*, superavam, em 2002, 907 bilhões de toneladas, ou quase 190 anos da produção, considerada as taxas de uso atuais. “Em termos de equivalência energética, isto excede, por longa margem, as reservas provadas somadas de óleo e gás. Hard coal – carvão vapor e carvão metalúrgico (coqueificável) correspondem a mais de 83% das reservas provadas. O resto é brown coal (carvão sub-betuminoso e linhito, com teor de carbono inferior a 75%)” (EIA, 2004).

Os carvões considerados de boa qualidade têm, em geral, baixos teores de material inerte (cinzas) e de enxofre e poder calorífico superior a 5.500 kcal/kg. Austrália, África do Sul, Colômbia e Estados Unidos respondem por metade das exportações mundiais de carvão<sup>2</sup>. As características básicas de carvões típicos desses países são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades de alguns carvões internacionais

	Austrália	África do Sul	Colômbia	EUA (Ohio)
Poder Calorífico (kcal/kg)	5.370	6.760	7.000–8.000	6.378-7.728
Umidade (%)	6,9	4,3	2,0-7,0	nd
Voláteis (%)	24,8	35,3	34,0-39,0	38,1
Carbono (%)	44,3	50,3	nd	64,2-77,4
Cinzas (%)	24,0	10,1	1,0 – 6,0	7,5-19,8
Enxofre (%)	0,35	0,70	0,35 – 1,0	1,0-2,5

Fonte: LORA, 2004.

O carvão brasileiro é classificado como um carvão de baixa qualidade por apresentar, como características básicas, elevado teor de inertes (cinzas) e enxofre. Conforme abordado anteriormente, as reservas brasileiras de carvão estão localizadas na região Sul, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Em termos energéticos, o carvão nacional pode ser caracterizado conforme os indicadores apresentados na Tabela 6.

<sup>2</sup> Dados da International Energy Agency (EIA, 2005). O comércio mundial de carvão atingiu 755 milhões de toneladas em 2004. A Austrália é o maior exportador mundial, seguida da Indonésia. Além dos países citados, figuram entre os maiores exportadores: China, Rússia e Canadá.

O baixo poder calorífico tem como consequência um maior consumo do energético para a produção de energia elétrica. Em relação ao padrão norte-americano para especificação de caldeiras a vapor (6.210 kcal/kg), pode-se dizer que se gasta praticamente o dobro da quantidade de carvão de Candiota para produzir a mesma quantidade de energia elétrica.

Adicionalmente, o elevado conteúdo de inertes do carvão nacional inviabiliza seu transporte, em termos econômicos. Desse modo, todas as iniciativas para desenvolver o uso do carvão nacional na termelétricidade sempre acolheram o paradigma de que as usinas deveriam situar-se nas proximidades das minas, com utilização, preferencialmente, do carvão *in natura*. De fato, todas as termelétricas a carvão em operação no Brasil, e mesmo as em construção ou projeto, localizam-se na “boca da mina”. Nessas condições, a hipótese de térmicas a carvão fora da região Sul tem sido associada à importação do energético.

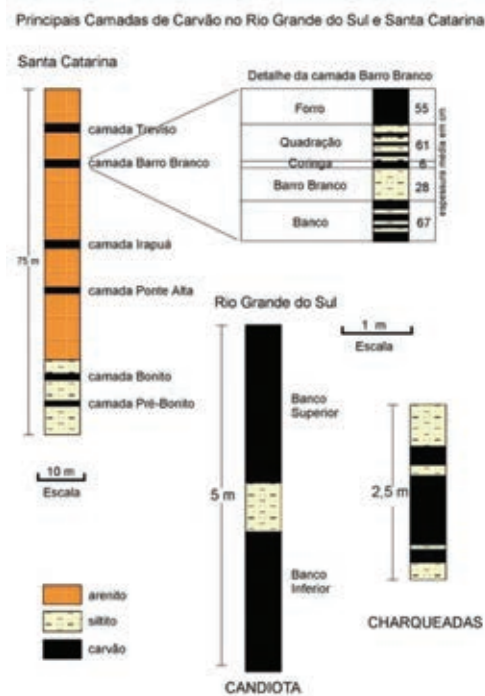
Tabela 6 – características dos carvões das jazidas nacionais

Estado	Jazida	Poder Calorífico (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Paraná	Cambuí	4.850	30	45	6,0
	Sapopema	4.900	30,5	43,5	7,8
Santa Catarina	Barro Branco	2.700	21,4	62,1	4,3
	Bonito	2.800	26,5	58,3	4,7
Rio Grande do Sul	Candiota	3.200	23,3	52,5	1,6
	Santa Teresinha	3.800-4.300	28,0-30,0	41,0-49,5	0,5-1,9
	Morungava/Chico Lomã	3.700-4.500	27,5-30,5	40,0-49,0	0,6-2,0
	Charqueadas	2.950	24,3	54,0	1,3
	Leão	2.950	24,1	55,6	1,3
	Iruí	3.200	23,1	52,0	2,5
	Capané	3.100	29,5	52,0	0,8

Fonte: DNPM, 2000.

Em Santa Catarina, as reservas remanescentes são para lavra subterrânea. As condições geológicas das ocorrências de carvão, mais complexas, dificultam e tendem a onerar a lavra. No RS, a principal restrição na lavra subterrânea está relacionada com a fragilidade das encaixantes. As condições de mineração a céu aberto em Candiota são as mais favoráveis.

Figura 5 – Detalhe das principais ocorrências de carvão no Sul do Brasil



Fonte: CPRM, 1972.

Ao lado dos aspectos acima apontados (características do combustível e condições geológicas), os produtores alinham ainda, como fatores que tendem a aumentar os custos de produção e desestimular a implantação de novas tecnologias de lavra e beneficiamento, a sub-utilização da capacidade de produção e os contratos de suprimento com o setor elétrico de prazos relativamente curtos (em torno de três anos).

### 3. Componentes básicos de uma usina termelétrica a carvão

O procedimento geral para a queima do carvão em térmicas consiste nas seguintes etapas:

- o carvão é levado às usinas e acumulado em pilhas;
- por meio de correias transportadoras, o carvão segue ao setor de preparação de combustível, o que inclui uma trituração preliminar e uma etapa de pulverização nos moinhos;
- o carvão, na granulometria requerida, é armazenado em silos;
- dos silos, o carvão é enviado para a sua queima na fornalha da caldeira, sendo ali injetado por meio de queimadores.

Nas superfícies de aquecimento, é gerado o vapor superaquecido que é fornecido à turbina. O vapor condensa nas superfícies do tubo do condensador, sendo o calor latente removido utilizando a água de resfriamento de uma fonte fria que é levada ao condensador pelas bombas de circulação. O condensado, logo após

as bombas, passa pelo aquecedor de baixa pressão, o desaerador, a bomba de alimentação e os aquecedores de alta pressão, retornando de novo para a caldeira, a fim de fechar o ciclo. A eletricidade produzida no gerador é convertida para a tensão requerida e fornecida aos consumidores por meio das linhas de transmissão.

### ■ 3.1. Caldeira

A caldeira pode ser definida como o equipamento que, utilizando a energia térmica liberada durante a combustão de um combustível, promove a mudança de fase da água do estado líquido para o de vapor, a uma pressão muito maior que a atmosférica. O vapor resultante é utilizado para o acionamento de máquinas térmicas, para a geração de potência mecânica e elétrica, assim como para fins de aquecimento em processos industriais.

O tipo e a qualidade do combustível influenciam na construção da fornalha, do queimador e da caldeira. O carvão é geralmente empregado em fornalha de queima em suspensão para combustíveis sólidos.

Fornalhas de leito fluidizado apresentam vantagens importantes, sendo a principal a flexibilidade de operação. Fornalhas dessa natureza admitem diferentes tipos de combustíveis, mesmo os que apresentam baixo teor de carbono, alto teor de enxofre e/ou cinzas, e, ainda, a possibilidade de utilização de combustíveis com uma granulometria relativamente grossa, reduzindo o custo de preparação.

Os tipos de leito fluidizado mais utilizados são: o convencional ou borbulhante e o circulante. Vale ressaltar, contudo, que os sistemas de combustão em leito fluidizado têm limites de dimensionamento, pois para leitos com áreas acima de 100m<sup>2</sup>, o ar de sustentação não se distribui uniformemente, influenciando negativamente a eficiência de combustão (LORA, 2004).

### ■ 3.2. Grupo turbina-gerador

Uma central termelétrica de geração com ciclo vapor tem como máquina térmica uma turbina a vapor, com o único objetivo de produzir eletricidade. A introdução de alternativas térmicas de recuperação de calor, como o aquecimento regenerativo e o reaquecimento, permite alcançar uma maior eficiência da central.

A temperatura na qual a turbina opera é muito importante. Quanto mais elevada a temperatura, maior sua eficiência. O gás que flui pela turbina pode chegar a 1.260°C, mas alguns metais que a constituem não suportam temperaturas superiores a 900°C. Por isso, emprega-se ar para resfriamento dos componentes da turbina, o que acaba limitando a sua eficiência térmica.

A turbina a vapor é um equipamento mecânico que extrai a energia térmica do vapor pressurizado e o converte para trabalho mecânico rotacional. Uma turbina ideal é considerada um processo isentrópico (ou de entropia constante), onde a entropia do vapor entrante na turbina é igual à entropia do vapor que sai dela. Nenhuma turbina é verdadeiramente isentrópica, porém as eficiências isentrópicas típicas se situam entre 20% e 90%.

Para maximizar a eficiência da turbina, o vapor é expandido em vários estágios para gerar trabalho. Tais estágios são caracterizados pela forma como a energia é extraída deles e são conhecidos como turbinas de impulso ou de reação. Várias turbinas modernas são uma combinação dos dois tipos, de modo que as seções de maior pressão são do tipo impulso e as seções de menor pressão são do tipo reação.

Atualmente, as plantas geradoras de energia empregam diferentes tipos de turbina em série, o que proporciona uma maior eficiência, sendo superior à eficiência de grandes motores diesel.

### ■ 3.3. Condensador

O condensador é um trocador de calor no qual se realiza a conversão do vapor de exaustão da turbina ao estado líquido, utilizando água como fluido de resfriamento. O vapor de exaustão vai para o condensador através da seção de exaustão da turbina e condensa ao entrar em contato com a superfície dos tubos resfriados internamente pela água que circula por meio de bombas. O ejetor a vapor remove os gases incondensáveis do condensador e mantém um nível de vácuo ótimo para a operação da turbina. A temperatura e a pressão de vapor e a sua pressão no condensador dependem da temperatura e da vazão de água de resfriamento. O condensado acumulado na parte inferior do condensador é bombeado através do sistema de aquecimento regenerativo para a caldeira de vapor, fechando o ciclo (LORA, 2004).

### ■ 3.4. Caracterização quanto aos ciclos termodinâmicos

As usinas térmicas em geral podem ser classificadas de acordo com seu ciclo termodinâmico.

Boa parte das termelétricas a carvão mineral atualmente em operação usa um único ciclo termodinâmico, o de Rankine, tecnologia surgida na virada do século 19 para o século 20. São as usinas de ciclo simples, onde o calor da queima do combustível é usado para a produção de vapor.

Entre 1902 e 1932, a eficiência da transformação térmica dessas usinas saltou de 3,7% para 16,5%. Por volta de 1965, essa tecnologia atingiu seu apogeu, com eficiência aproximada de 33% (*Center for Energy Efficiency and Renewable Energy, University of Massachusetts*).

Basicamente, o processo envolve a queima do combustível térmico numa câmara de combustão (caldeira) onde o calor gerado aquece, por radiação e convecção, água em tubos de alta pressão para a produção de vapor. O vapor superaquecido é enviado à turbina, onde se expande e gera o movimento circular que aciona o gerador elétrico. O vapor saído da turbina, em baixa pressão, é resfriado no condensador e bombeado de volta à caldeira, reiniciando o ciclo térmico, como ilustra a parte superior da Figura 6. Os gases da combustão, já refrigerados, são lançados à atmosfera em temperatura próxima a 130°C.

A eficiência do ciclo de geração depende apenas da diferença de temperatura da fonte de calor no início e no final do processo. Atualmente, as usinas que operam em ciclo subcrítico alcançam eficiência de até 39%, com temperatura de vapor de 500°C e pressão de 180 bar. Acredita-se que o ciclo subcrítico esteja no limite de desenvolvimento tecnológico e que apenas pequenas melhorias na eficiência, da ordem de 1 a 2%, ainda possam ocorrer.

Nos anos 70, foram introduzidas as primeiras usinas térmicas a carvão em ciclo supercrítico<sup>3</sup>, usando pressões de vapor em torno de 240 bar e temperatura de 500°C, desenvolvendo potências entre 400 e 900 MW. Porém, a maioria das usinas apresentava pouca confiabilidade e necessitava de manutenção excessiva, problemas que somente foram solucionados no início dos anos 90.

Hoje, cerca de 400 modernas usinas térmicas a carvão operam em ciclo supercrítico (WORLD BANK, 2006), com temperaturas da ordem de 570°C, o que permite elevar a eficiência a 45% e reduzir a emissão de poluentes. Esta é uma tecnologia bem desenvolvida no Japão, Estados Unidos e Alemanha<sup>4</sup>.

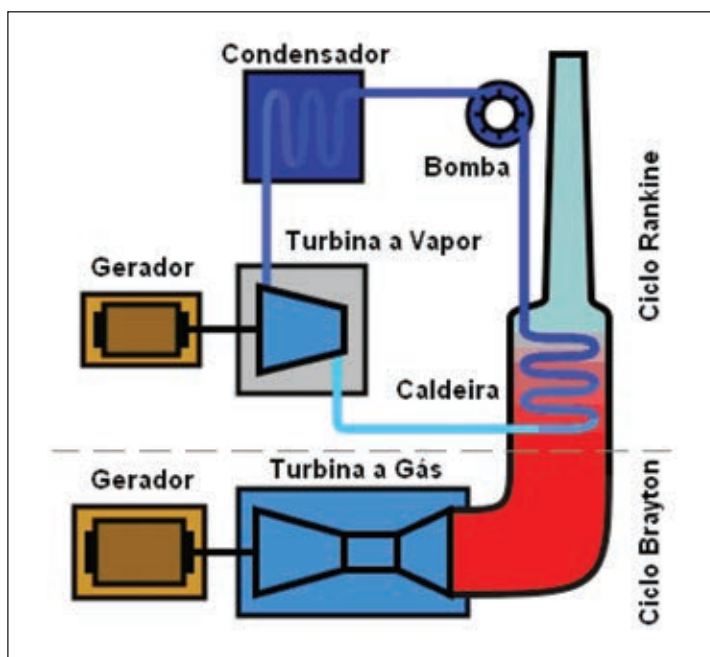
3 O termo supercrítico se aplica ao estado da água em que não há distinção entre o líquido e o vapor, atingido em pressão superior a 221,2 bar e temperatura acima de 374,15°C.

4 A maior usina do mundo que usa linhito como energético está localizada na Alemanha, equipada com duas turbinas a vapor de 800MW, e opera nas condições supercríticas (250 bar de pressão e temperaturas entre 544 e 562°C). Tal planta opera com eficiência de 41%, que é considerado um valor elevado de eficiência para uma planta que usa linhito como energético.

Ainda em estágio de evolução tecnológica estão as usinas em ciclo ultra supercrítico, que utilizam pressão do vapor acima de 300 bar e temperaturas da ordem de 620°C, em unidades entre 400 MW e 600 MW. Pesquisas em condições de operação de até 700°C têm sido realizadas e espera-se que a eficiência aumente nos próximos anos, atingindo valores de até 50 %.

As usinas térmicas mais modernas e eficientes trabalham com dois ciclos termodinâmicos: são as usinas a ciclo combinado, onde a queima direta do combustível produz energia numa turbina a gás (ciclo termodinâmico de Brayton ou Joule) e o calor residual dos gases de exaustão dessa turbina é usado para produzir energia adicional numa turbina a vapor, elevando a eficiência do processo de geração de energia elétrica (Figura 6).

Figura 6 – Diagrama esquemático do ciclo combinado



Em contraste às turbinas a vapor, as turbinas a gás trabalham a temperaturas por vezes superiores a 1200°C.

O conjunto de turbina a gás é constituído de compressor, queimador e a turbina a gás propriamente dita, sendo a temperatura de entrada do gás na turbina relativamente elevada (entre 900 e 1.350°C) e a temperatura de saída entre 450 e 650°C. Tal temperatura é suficiente para a geração de vapor no segundo ciclo (ciclo Rankine), sendo a temperatura final do vapor entre 420°C e 580°C.

A eficiência de uma planta de ciclo combinado chega a atingir 58%. Uma medida sintética dessa eficiência é dada pelo *heat rate*, parâmetro expresso em BTU/kWh ou kcal/kWh, que indica a quantidade de energia térmica necessária para produzir uma unidade de energia elétrica.



## 4. Tecnologias de geração

### ■ 4.1. Panorama

O carvão mineral, combustível tipicamente utilizado em centrais termelétricas com ciclo vapor, requer um tratamento caro e complexo e é caracterizado por emissões pesadas de óxidos de enxofre ( $SO_x$ ), óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ),  $CO_2$  e particulados.

Com as crescentes pressões ambientalistas, diversas iniciativas têm sido empreendidas no sentido de reduzir as emissões de gases ou de mitigar seus efeitos.

A Comissão Europeia criou, em 1998, a diretiva “*Large Combustion Plants Directive*” (LCPD), restringindo as emissões de  $NO_x$ ,  $SO_2$  e material particulado a partir de plantas de geração de eletricidade. Legislação similar foi criada em outros países desenvolvidos, o que motivou o aperfeiçoamento de tecnologias para mitigar a quantidade de emissões de poluentes de plantas a carvão, com apoio de várias agências governamentais. Mais recentemente, as atenções se voltaram para a melhoria da eficiência do uso do carvão com o objetivo de redução das emissões de  $CO_2$ .

Nos Estados Unidos vem sendo executado, desde 1985, o “*Clean Coal Technology Program*”, que tem como objetivo principal o desenvolvimento e a introdução, no mercado norte-americano, de novas tecnologias de aproveitamento do carvão para fins energéticos que permitam a construção de processos mais produtivos, aliados a uma drástica redução da poluição ambiental que tradicionalmente se verifica nessa área de aproveitamento energético. Esse programa tem sua origem fundamentada nos esforços feitos para eliminar o problema das chuvas ácidas e seu desenvolvimento está de acordo com as recomendações do Encontro Diplomático Canadense-Americano sobre Chuva Ácida.

As tecnologias limpas de uso do carvão (*clean coal technologies*) devem ser desenvolvidas, demonstradas e melhoradas para acompanhar a evolução da legislação ambiental, cada vez mais restritiva quanto ao uso do carvão, e para manter a competitividade dessa fonte energética em relação às demais. Em particular, os avanços já obtidos pelo programa americano, em termos tecnológicos e comerciais, sugerem o exame da questão no Brasil tendo em vista a disponibilidade no país de reservas de carvão mineral classificadas como do tipo energético.

As seguintes áreas mereceram maior enfoque no sentido de melhorar as perspectivas de uso de carvão em plantas de geração de energia elétrica:

- tecnologias de redução de emissões de  $NO_x$ ;
- tecnologias de redução de emissões de  $SO_2$  (aperfeiçoamento das tecnologias existentes para redução dos custos operacionais e de capital);
- técnicas de mistura e preparação do carvão para melhorar a qualidade do mesmo;
- métricas de fluxos de carvão e de técnicas para assegurar uma melhor distribuição nos pontos de injeção do combustível;
- técnicas de classificação de granulometria de carvão para melhorar a distribuição do combustível na caldeira;
- sistemas de controle avançado, baseados em redes neurais ou lógica *fuzzy*, para melhorar o desempenho da caldeira e reduzir emissões;
- desenvolvimento de materiais avançados que resistam a elevadas temperaturas e pressões;

- previsões a respeito do impacto da qualidade do carvão nas emissões e no desempenho da combustão.

O desenvolvimento e a aplicação das *clean coal technologies* deverá conduzir a uma diversidade de opções com emissões baixíssimas de qualquer tipo de poluente. Atualmente, as rotas tecnológicas mais importantes de *clean coal technologies* são a combustão pulverizada supercrítica, a combustão em leito fluidizado e a gaseificação integrada a ciclo combinado (IEA, 2005).

Além da busca pela redução de emissões de CO<sub>2</sub>, existe um crescente interesse no uso de hidrogênio. A gaseificação, por exemplo, é uma rota tecnológica que permite produzir eletricidade e outros produtos, tais como hidrogênio e produtos químicos.

Nos Estados Unidos, o projeto *FutureGen*, orçado em US\$ 1bilhão e com previsão de início de operação em 2017, é uma iniciativa do Departamento de Energia Americano – US DOE para demonstrar uma planta de “emissões zero”, com capacidade de 275 MW, que usa carvão como combustível e a tecnologia de gaseificação integrada com ciclo combinado, produzindo hidrogênio e permitindo o seqüestro de carbono. Existe também um projeto da alemã RWE para uma planta de larga escala (450 MW) com níveis de emissão zero que deverá estar operando até 2014.

O desenvolvimento de técnicas de seqüestro de carbono permitirá a instalação de térmicas com emissões zero de CO<sub>2</sub> a longo prazo. Acredita-se que testes em plantas de escala comercial sejam possíveis até 2015. E até 2020, uma primeira planta em escala comercial deverá estar operando.

Assim, diversas tecnologias de redução de emissões e associadas aos sistemas de limpeza de gases estão sendo desenvolvidas e aplicadas em termelétricas. Isto, contudo, tem se traduzido em aumento de custos de investimentos.

Em resumo, as principais tecnologias usadas para geração de eletricidade e descritas nos itens a seguir, são (CARVALHO, 2005):

- Carvão Pulverizado (PF);
- Usinas Supercríticas e Ultra Supercríticas (*Supercritical & Ultra supercritical Power Plant Technologies*);
- Combustão em Leito Fluidizado, a Pressão Atmosférica (AFBC) e com Pressurização (PFBC);
- Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado (IGCC).

Vale ressaltar que a escolha de uma tecnologia não se baseia apenas na eficiência, mas depende de muitos critérios específicos, associados ao tamanho da unidade, ao regime de operação e à legislação ambiental.

Adicionalmente, turbinas a gás somente podem ser operadas com combustíveis livres de cinzas. De modo que, para empregar o carvão como combustível em ciclo combinado, é exigida alguma combinação tecnológica. Dentre as possibilidades, destacam-se a unidade combinada ao processo de gaseificação e ao processo de combustão pulverizada pressurizada.

#### ■ 4.2. Carvão Pulverizado (PF)

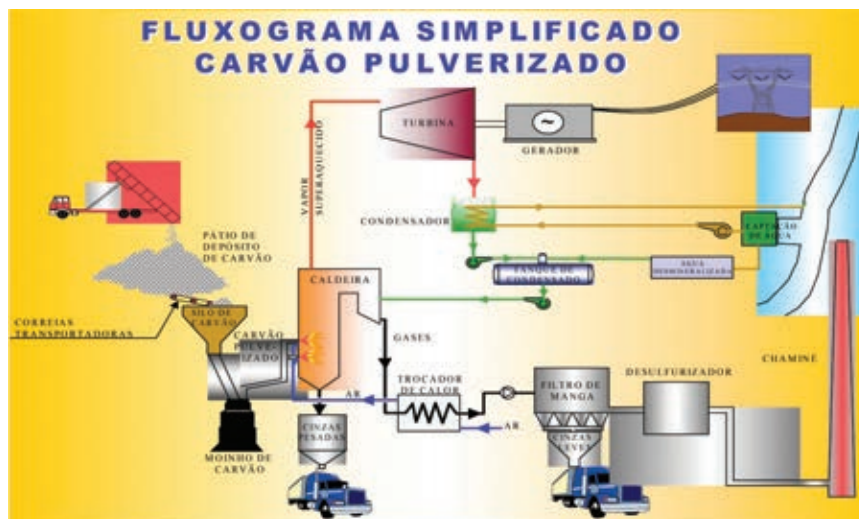
A tecnologia de carvão pulverizado, desenvolvida nos anos 20, é a mais difundida e utilizada nas usinas termelétricas em operação, permitindo a queima de carvões de baixa qualidade.

O carvão é moído em partículas finas (entre 75 e 300 microns) e injetado, juntamente com ar, numa câmara de combustão onde é queimado, alcançando-se temperaturas da ordem de 1.400°C (Figura 7). A eficiência desse processo de combustão é similar àquela alcançada na queima de óleo ou gás natural.

Essa tecnologia é utilizada nas usinas de ciclo simples, tanto nas de ciclo subcrítico quanto nas de ciclo supercrítico e ultra supercrítico. Todas as usinas brasileiras em operação e em construção usam essa tecnologia em ciclo subcrítico.

O carvão pulverizado é considerado uma tecnologia de queima limpa quando complementada por sistemas modernos de controle de  $\text{NO}_x$ , de dessulfurização de gases (FGD) e de remoção de material particulado. Os sistemas de FGD podem ser projetados para utilizar calcário ou amônia como absorventes, possibilitando a remoção de até 96% do enxofre e de até 99,99% do material particulado.

Figura 7 – Esquema simplificado de usina a carvão pulverizado



Fonte: CARVALHO, 2005.

#### ■ 4.3. Combustão em Leito Fluidizado (AFBC)

Conforme dito anteriormente, a combustão em leito fluidizado pode ser à pressão atmosférica (AFBC) ou com pressurização (PFBC). A AFBC é uma tecnologia comercial que pode ser utilizada com uma grande variedade de combustíveis, incluindo combustíveis sólidos de baixa qualidade (Figura 8).

Po meio de um fluxo contínuo de ar, cria-se turbulência numa mistura de material inerte e partículas de carvão (leito). A velocidade do fluxo assegura que as partículas permaneçam em suspensão e em movimento livre, se comportando como um fluido – em outras palavras, o leito se torna “fluidizado”.

Quando o combustível é adicionado ao leito fluidizado quente, a mistura constante promove a rápida transferência de calor e a combustão completa. O calor gerado é recuperado por meio de trocadores de calor e utilizado para gerar vapor tanto para a geração de energia elétrica quanto para o uso industrial.

A eficiência obtida com a aplicação deste tipo de tecnologia é de 40%, podendo chegar a 44%.

A grande vantagem no emprego da AFBC é a redução na quantidade de emissões de poluentes, sem necessidade de sistemas de equipamentos de dessulfuração e de redução de emissões de  $\text{NO}_x$ . O leito fluidizado permite a queima do combustível em temperaturas relativamente mais baixas, o que reduz a produção de  $\text{NO}_x$  no gás de saída em torno de 90%.



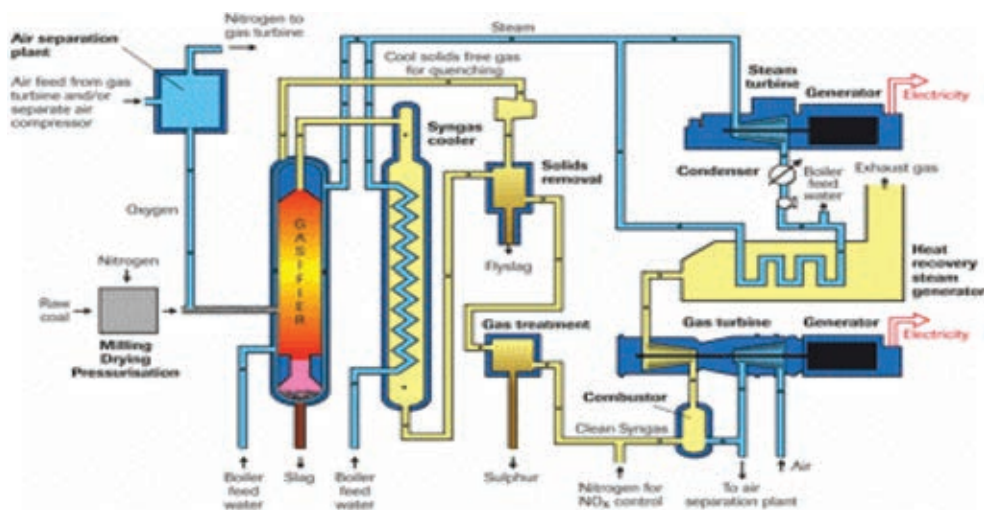
A eficiência térmica do processo é de aproximadamente 44% e o impacto ambiental dessa tecnologia é considerado baixo.

#### ■ 4.4. Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado

A gaseificação integrada com ciclo combinado (IGCC) é uma combinação de duas tecnologias já estabelecidas: a gaseificação do carvão, para a produção do combustível *syngas* (gás de síntese), e a tecnologia da turbina a gás em ciclo combinado (GTCC) para geração de eletricidade.

Nos sistemas IGCC, o carvão não é queimado diretamente, mas aquecido num vaso pressurizado (gaseificador) contendo quantidade controlada de oxigênio (ou ar) e vapor de água. O gás produzido é uma mistura de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$ , que é purificada e queimada numa turbina a gás para gerar energia elétrica. O gás de combustão que sai da turbina, ainda em alta temperatura, é usado num gerador de vapor ligado a um turbo-gerador convencional. Esta tecnologia, assim como a PFBC, combina turbinas a gás e a vapor (ciclo combinado). O esquema dos sistemas IGCC é mostrado na Figura 9.

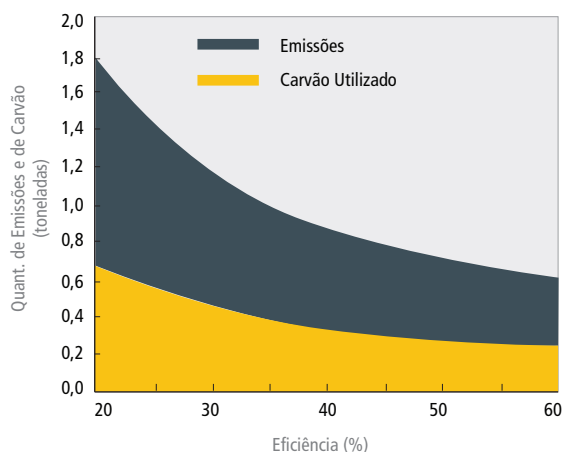
Figura 9 – Esquema do sistema de gaseificação integrada com ciclo combinado



Dentre os gaseificadores atualmente em desenvolvimento, o tipo mais adequado para o carvão de alto teor de cinzas é o de leito fluidizado pressurizado sem formação de escória (*non-slugging, pressurized fluidized bed*). Esta tecnologia de gaseificação de segunda geração está em demonstração no âmbito do Programa Tecnologia do Carvão Limpo do Departamento de Energia dos Estados Unidos (*Clean Coal Technology Program – US DOE*).

Enquanto a eficiência de uma termelétrica convencional a carvão é de 34%, em uma planta IGCC é de 45%, podendo chegar a 52% nas plantas mais modernas. Além disso, as emissões de  $\text{CO}_2$  são 35% menores que em plantas convencionais, e as de  $\text{NO}_x$  se reduzem em cerca de 90%. O custo de investimento é de aproximadamente US\$ 1.500/kW, para uma usina de 100 a 450 MW (CTA, 2006). Conforme se observa na Figura 10, o aumento de eficiência das plantas termelétricas significa redução de emissões de  $\text{CO}_2$ .

Figura 10 – Relação entre eficiência de usinas térmicas e emissões de poluentes



Fonte: World Coal Institute, 2005.

Atualmente, existe uma quantidade muito pequena de plantas de IGCC no mundo, comparativamente à quantidade de plantas de carvão pulverizado, por serem mais caras e complexas. Existem plantas operando nos Estados Unidos e na Europa, especialmente na Holanda e na Espanha.

A evolução das tecnologias existentes em direção às tecnologias de emissões zero se traduz na incorporação de sistemas de captura de CO<sub>2</sub> e em aumento de custos de investimento das tecnologias de carvão pulverizado e de IGCC. Esses custos podem se elevar de 56 a 82%, no caso da primeira tecnologia, e de 27 a 50%, no caso da segunda.

#### ■ 4.5. Seqüestro de carbono

O seqüestro de carbono consiste na captura das emissões gasosas provenientes das usinas termelétricas a carvão e de sua armazenagem em reservatórios naturais existentes na crosta terrestre.

Atualmente, a estocagem de CO<sub>2</sub> em reservatórios de petróleo e gás é favorecida, e existe um grande potencial para estocagem em aquíferos, que vem sendo pesquisado na Europa, nos Estados Unidos e no Japão. Conseqüentemente, no futuro as usinas podem ter sua localização decidida não em função do combustível, da disponibilidade da água de resfriamento ou da necessidade de energia, mas das opções de estocagem de CO<sub>2</sub> (ZANCAN, 2006).

O desenvolvimento de técnicas de captura e seqüestro de carbono permite visualizar uma planta de emissões zero no longo prazo. Entretanto, uma planta em escala comercial não deverá ser implementada antes de 2020. Os custos atuais associados ao seqüestro de carbono são estimados em US\$ 50 a US\$ 100 por tonelada de CO<sub>2</sub>. De acordo com a bibliografia consultada, acredita-se ser possível a redução de tais custos para patamares em torno de US\$ 25 a US\$ 50 por tonelada até 2030, considerando os avanços tecnológicos.

Um projeto denominado "Zero Emission Coal to Hydrogen Alliance" – ZECA está sendo desenvolvido no *Los Alamos National Laboratory*. O conceito se baseia em vários processos envolvendo a geração de eletricidade a partir do carvão, sem emissões de CO<sub>2</sub>. Neste projeto, uma emulsão de carbono e água passa pelo processo

de gaseificação, gerando hidrogênio e  $\text{CO}_2$ . Este, ao reagir com óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), transforma-se em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). O hidrogênio gerado alimenta uma célula combustível, gerando energia elétrica e calor. O carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) produzido é quebrado novamente em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), por meio do calor gerado na célula combustível. O óxido de cálcio é alimentado novamente no processo e o  $\text{CO}_2$  reage com silicato de magnésio e cálcio para gerar carbonatos e  $\text{SiO}_2$ , que são quimicamente estáveis e podem ser dispostos com segurança.

#### ■ 4.6 Perspectivas tecnológicas no Brasil

Das principais tecnologias para geração de energia a partir do carvão, as de leito fluidizado e do carvão pulverizado são consideradas, no momento, as mais viáveis para utilização do carvão nacional. Em vista de se encontrar ainda em fase de desenvolvimento e de ter custo de investimento mais elevado, a opção IGCC é menos competitiva para introdução no Brasil (CARVALHO, 2005).

Desse modo, no horizonte do Plano Nacional de Energia (2030), futuras usinas brasileiras que utilizem o carvão nacional deverão, provavelmente, contemplar uma das seguintes tecnologias:

- Carvão Pulverizado (PF), com dessulfuração de gás de combustão com base em calcário ou amônia (FGD);
- Combustão em Leito Fluidizado à pressão Atmosférica (AFBC), com ou sem a etapa de beneficiamento do carvão<sup>5</sup>;
- Combustão em Leito Fluidizado à pressão Atmosférica (AFBC) com dessulfuração de gás de combustão com base em amônia (FGD).

No caso dos carvões de Santa Catarina e do Paraná, o beneficiamento resulta em rejeitos com alta concentração de enxofre e que podem causar danos ao meio ambiente caso não sejam convenientemente descartados. Isto tende a elevar significativamente os custos de operação. No caso do carvão de Candiota, testes e análises executadas para avaliar o potencial de beneficiamento concluíram que o processo é ainda antieconômico, devido principalmente às propriedades higroscópicas do carvão da região.

5 Além da evolução nas tecnologias de processamento do carvão para produção de energia, os processos de beneficiamento do mineral para remoção de enxofre e cinzas antes da sua combustão também contribuem para a redução de emissões. Para se obter eficácia em custo, deve ser selecionado um processo tal que se obtenha uma redução nos níveis de enxofre e cinzas sem uma perda desproporcional do produto (toneladas de carvão) e sem custos excessivos de capital e de operação. Vale ressaltar que as novas tecnologias que vêm sendo introduzidas são mais apropriadas à queima direta, dispensando as etapas de beneficiamento.

Considerando-se a expansão do setor de geração termelétrica a carvão no Paraná, deve-se ter em conta que as reservas da região têm elevado teor de enxofre, o que implica na necessidade de instalação de equipamentos e uso de produtos redutores de emissões óxidos de enxofre. As reservas paranaenses de carvão - que no ano 2000, eram de 95,4 milhões de toneladas - também limitam a implantação de térmicas a carvão no estado. Pode-se estimar que essas reservas são suficientes apenas para atender uma potência próxima a 1.400 MW pelo prazo de 25 anos. O tipo de tecnologia mais indicado é a de leito fluidizado associado ao prévio beneficiamento do carvão ou à dessulfuração do gás de combustão.

Em Santa Catarina, as minas de carvão são subterrâneas e a extração deve ser mecanizada, o que torna o seu custo mais elevado. Neste caso, a extração das minas é limitada pela tecnologia. Essa região caracterizou-se, no passado, pela mineração sem preocupação com o meio ambiente, o que resultou em um passivo ambiental significativo que deve ser recuperado. A degradação ambiental pode ser mitigada pela mistura dos rejeitos de elevada concentração de enxofre com carvão energético originário de nova produção, como combustível em usinas termelétricas. A tecnologia recomendada para os projetos na região é a de leito fluidizado com dessulfuração de gás com amônia, cuja capacidade máxima unitária da caldeira é limitada entre 250 e 350 MW. Como existe pouca experiência comprovada internacionalmente com unidades acima de 250MW, é recomendada a instalação de módulos unitários neste limite máximo de capacidade.

O projeto USITESC prevê a instalação de uma usina térmica em Treviso, no sul de Santa Catarina, por meio de uma parceria entre as carboníferas Criciúma e Metropolitana, integrando mineradoras, usina de geração de eletricidade, indústrias que utilizam cinzas de termelétricas e indústrias que produzem fertilizantes. Boa parte do sulfato de amônia usado no Brasil é importada e a produção estimada da USITESC, de 307.000 t/ano, contribuirá para reduzir as importações do país.

No Rio Grande do Sul, as minas são geralmente a céu aberto, o que reduz o custo de extração do carvão. Os projetos de geração termelétrica de maior competitividade localizam-se junto às áreas de extração e próximos à fronteira com o Uruguai, onde a legislação ambiental é mais rigorosa quanto às emissões de poluentes.

Na região carbonífera próxima a Porto Alegre, junto ao Baixo Jacuí, são necessários maiores investimentos para implantação de projetos de geração de energia elétrica, devido à maior densidade populacional e à concentração industrial. A extração do carvão na região do Baixo Jacuí é realizada a céu aberto, porém, as minas são mais profundas que as de Candiota, o que se reflete no preço do produto extraído.

Para a região de Candiota, as tecnologias atuais que mais se adaptam, do ponto de vista econômico, são as de Carvão Pulverizado (PF) com dessulfuração de gás de combustão e de leito fluidizado à pressão atmosférica (AFBC). A maior potência possível para uma caldeira única de carvão pulverizado (PF) está na faixa de 500 a 600 MW e é adequada sob ponto de vista de trazer benefícios por economia de escala nos custos de mineração, capital e operação.

A dessulfuração de gás de combustão (FGD), utilizada nos projetos, pode ser com calcário da região e do Uruguai ou com amônia importada. Além disso, são obtidos como subprodutos o sulfato de amônia e o gesso, que podem ser comercializados no País, tornando-se insumos para a instalação de um pólo industrial na região, ou exportados.



## 5. Caracterização operacional

Num sistema elétrico de base hidráulica, a flexibilidade de aquisição e uso do combustível térmico é uma característica desejável do regime operativo das termelétricas. Além disso, quanto mais flexível for esse regime operativo, maior tende a ser a competitividade da geração termelétrica, pela apropriação possível do excedente hidráulico em períodos de hidrologia favorável.

De fato, a grosso modo, a lógica econômica impõe que essas usinas devam permanecer praticamente desligadas nos períodos de abundância hidrológica, gerando energia elétrica apenas nos períodos em que as aflúências e o estoque de água dos reservatórios são insuficientes para o atendimento da carga. Esse regime operacional é denominado complementar.

O desconhecimento prévio de datas, prazos e quantidades de utilização do combustível, resultante desse regime operacional, porém, transfere parte das incertezas do regime hidrológico para a logística de suprimento e manutenção das usinas térmicas. É justamente a possibilidade de solução adequada do problema logístico, pela estocagem ou aquisição não regular, que faz da geração térmica com base no carvão uma das principais alternativas para a operação em complementação.

A relação entre a geração mínima obrigatória da usina térmica, seja pelo regime contratual de aquisição do combustível, seja pela necessidade de manutenção da operacionalidade dos equipamentos, e sua potência nominal é denominada fator de capacidade mínimo, normalmente expresso como um percentual da potência nominal.

No caso da utilização do carvão nacional, também para a viabilização econômica da indústria carvoeira do País, tem-se reconhecido a necessidade de se manter um despacho permanente mínimo entre 40% e 50% da potência instalada, o que, em parte, limita a utilização dessas térmicas em complementação.

As interrupções da geração da usina para a manutenção de seus equipamentos, tanto aquelas programadas, quanto as não programadas (forçadas), definem o fator de capacidade máximo, com valores típicos entre 88% e 91% em unidades geradoras de 250 MW e 500 MW.

A otimização econômico-energética promovida pela operação das térmicas em regime de complementação e a ordenação do despacho dessas usinas pelo custo operacional (custo variável associável ao custo do combustível e aos custos de operação e manutenção) levam à definição de dois outros fatores, sendo eles o fator de capacidade médio e o fator de capacidade crítico.

Esses fatores, calculados a partir do poder calorífico do energético, da eficiência do processo de transformação, dos custos variáveis de geração (combustível, operação e manutenção), dos fatores de capacidade mínimo e máximo e do custo marginal de operação do sistema hidrotérmico indicam, respectivamente, a geração média esperada ao longo da vida útil da usina e a geração esperada em período de hidrologia crítica ou desfavorável.

A geração esperada em período crítico determina o valor energético da usina para o sistema elétrico (à semelhança da energia firme ou garantida das usinas hidráulicas) e a geração média ao longo da vida útil determina os gastos a serem incorridos com a aquisição do combustível.

Em regime de complementação, a maior flexibilidade proporcionada por um baixo fator de capacidade mínimo tende a favorecer economicamente as usinas térmicas de ciclo simples. A menor eficiência dessas usinas é compensada pelo menor investimento exigido.

Alternativamente, a caracterização operacional das térmicas pode ser feita quanto à alocação da geração da usina na curva de carga do sistema ao qual está integrada, em função da maior ou menor capacidade ou economicidade de atendimento às variações diárias da demanda.

As usinas térmicas a carvão são prioritariamente alocadas na base em razão da menor capacidade de tomada de carga. Tipicamente, têm taxa de variação de potência da ordem de 9 MW por minuto, o que as torna pouco propícias ao acompanhamento da curva diária de carga e atendimento à demanda de ponta.

A melhoria da confiabilidade elétrica é outro importante benefício que caracteristicamente tem sido associado às usinas térmicas em geral, pela possibilidade de instalação próxima aos centros de carga. No caso das usinas brasileiras a carvão, a necessidade econômica de localização próxima às minas reduz a importância desse benefício.

---

## 6. Custos

### ■ 6.1. Geral

Como os demais empreendimentos energéticos voltados para a geração de energia, os custos para as plantas termelétricas podem classificar-se em (LORA, 2004):

#### 1) Custos de investimento (custos associados à formação de capital)

- a. Custos de equipamentos
- b. Custos de montagem dos equipamentos
- c. Custos da construção civil
- d. Outros custos
- e. Custos indiretos

#### 2) Custos de geração (custos representativos da operação da usina)

- a. Combustível
- b. Mão de obra
  - i. Operação
  - ii. Manutenção
  - iii. Administração de Pessoal
- c. Materiais de manutenção
- d. Produtos consumidos no processo
  - i. Água de alimentação e resfriamento
  - ii. Óleo lubrificante
  - iii. Calcário e outros reagentes
- e. Serviços diversos

### ■ 6.2. Custos de investimento

O custo de investimento de um projeto de geração de energia elétrica pode ser decomposto em custo

direto (basicamente, terreno, obras civis, equipamento, montagem e subestação) e custo indireto (canteiro, acampamento e administração). De acordo com Lora (2004), 70% do custo de investimento em plantas convencionais a vapor, com utilização de carvão como combustível, são custos diretos, que apresentam a composição apresentada na Tabela 7.

Tabela 7- Composição típica dos custos diretos de investimento de uma central termelétrica a carvão

Item de custo	Participação
<b>Equipamentos eletromecânicos</b>	<b>60%</b>
Caldeira	27%
Turbina	21%
Tubulação e acessórios	6%
Subestação	3%
Outros equipamentos	3%
<b>Montagem dos equipamentos</b>	<b>12%</b>
Construção	21%
Obras civis	15%
Circuito de água	6%
<b>Outros custos</b>	<b>7%</b>
Terreno, benfeitorias	3%
Projeto, organização	4%

Fonte: LORA, 2004.

A Tabela 8 resume os custos de investimento (direto + indireto) para plantas termelétricas a carvão, considerando as diferentes tecnologias, incluindo as menos poluentes (*clean coal technologies*).

Tabela 8 – Referências internacionais para o custo de investimento (US\$/kW) em plantas térmicas a carvão

Tecnologia	ANEEL (2005)	University of Chicago (2004)	Lora (2004)
Combustão Pulverizada	1.300-1.500	1.120	ND
Combustão Pulverizada <sup>1</sup>	ND	1.190	1.060-1.095
Leito Fluidizado	ND	1.200	ND
Leito Fluidizado <sup>2</sup>	1.450-1.700	ND	1.510
Leito Fluidizado <sup>3</sup>	1.450-1.700	ND	ND
Leito Fluidizado <sup>4</sup>	1.450-1.700	ND	1.290
Gaseificação Integrada	1.450-1.700	1.340	1.290

1 Em região com maiores restrições ambientais

2 Pressão atmosférica

3 Circulação (vapores sub e supercríticos)

4 Pressurização (vapores sub e supercríticos)

Para termelétricas a carvão no Brasil, Tolmasquim (2005) adota o valor de US\$ 816/kW como estimativa para o investimento. Entretanto, as informações disponibilizadas pela Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica – CGTEE, a respeito do Projeto C da Usina Termelétrica de Presidente Médici, indicam custo de investimento de aproximadamente US\$ 1.220/kW para uma planta empregando tecnologia de carvão pulverizado, com processo de dessulfuração de gases.

Importa observar que os investimentos por unidade de capacidade (MW) tendem a diminuir na medida em que o tamanho das plantas aumenta, devido aos ganhos de escala. Em países como China e Índia, plantas

com capacidade de 500 a 900 MW se justificam devido ao extenso sistema elétrico existente. Em países com sistemas menores, plantas com capacidade de 300 MW são mais apropriadas.

Outro fator que pode afetar as estimativas do investimento em plantas a carvão é a grande variação dos custos em função das datas em que são estimados. Os custos de usinas térmicas dependem, principalmente, do preço do aço e da demanda de usinas. Atualmente, no caso do carvão, os custos de investimento estão avançados devido à alta demanda de usinas desse tipo no mundo.

No caso brasileiro, ainda se deve considerar outros aspectos, tais como o risco cambial (uma parcela significativa dos equipamentos é importada) e o custo de capital adicional, devido aos fatores de risco. Entende-se que, em um contexto de maior demanda por usinas térmicas a carvão no País, definindo uma escala industrial em um patamar competitivo, os custos unitários de investimento (por KW instalado) e de operação, incluindo-se o de combustível, tenderão a diminuir.

Por outro lado, os custos das tecnologias dependem do grau de eficiência e das exigências ambientais. Por exemplo, as usinas ultra supercríticas que estão sendo construídas hoje na Alemanha com eficiência acima de 43% têm seu custo acrescido em cerca de 30%, se comparadas às usinas tradicionais de carvão pulverizado com eficiência de 35%, vendidas no mercado chinês.

### ■ 6.3. Custos de combustível

Um dos fatores de maior peso no custo da energia gerada por centrais termelétricas é o preço do combustível, determinado predominantemente pelo conteúdo energético (em geral, expresso em kcal/kg ou em BTU/lb) e pelo conteúdo de enxofre. No caso do carvão, a quantidade de cinzas tem importância secundária para a formação do preço.

As publicações de preço usam diferentes unidades de medida e especificações de carvão, além de diferentes localizações de origem e destino.

Os preços do mercado interno norte-americano são publicados pela “*Coal Trader*” e “*Coal Outlook*” em US\$/short ton (1 short ton = 907,18 toneladas) FOB na ferrovia de embarque e a especificação do carvão inclui o local de origem, o conteúdo energético em BTU/lb e o conteúdo de enxofre.

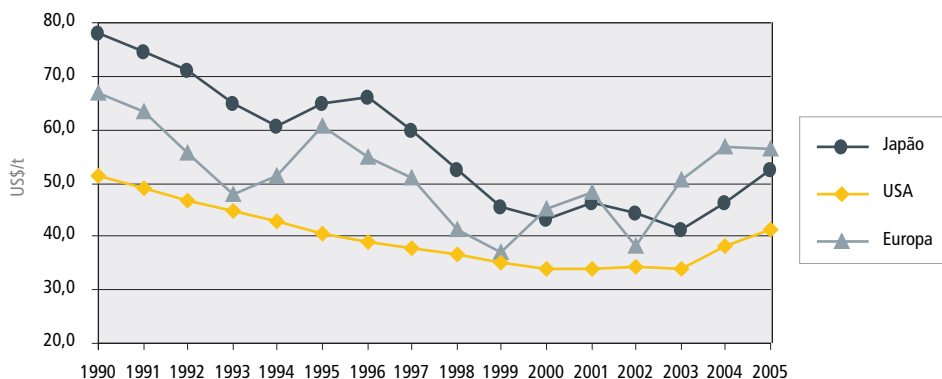
Os preços internacionais publicados pela “*Coal Trader International*” e “*International Coal Report*” são informados em US\$/tonelada FOB no porto de origem, exceto para a Europa ARA (portos de Amsterdam, Rotterdam e Antuérpia), Japão e Coreia, cujos preços são CIF.

Em geral, os preços internacionais são cotados em base GAR (*gross as received*), exceto para a Europa ARA, Japão e Coreia e, para o carvão procedente de Richards Bay, cotados em base NAR (*net as received*).

As especificações internacionais padronizadas são CIF ARA 6.500 kcal/kg NAR, 1% de enxofre (máximo) e 16% de cinzas (máximo), Richards Bay FOB (África do Sul) 6.000 kcal/kg NAR, 1% de enxofre e 16% de cinzas e Newcastle FOB (Austrália) 6.300 kcal/kg GAR, 0,8% de enxofre e 13% de cinzas.

Entre 1990 e 2002, coincidindo com a expansão da oferta e utilização do gás natural para a geração de energia elétrica, os preços internacionais do carvão eram declinantes, como se percebe da Figura 11. Esse quadro, porém, aparentemente alterou-se a partir de 2003, assumindo uma trajetória de alta que continua em 2006.

Figura 11 – Evolução dos preços internacionais do carvão mineral



Fonte: BP, 2005.

Entre 21 de outubro de 2005 e 10 de março de 2006, observaram-se altas de até 30% no preço do carvão *spot* para entrega imediata, como mostra a tabela 9.

Apesar desse comportamento recente dos preços do carvão, a *Energy Information Administration*, em sua publicação *Annual Energy Outlook 2006*, prevê pouca variação do preço do carvão no mercado interno norte-americano, estimando em cerca de US\$ 41 /short ton (US\$ 45,20 por tonelada métrica) seu preço no horizonte de 2030.

Tabela 9 – Variação recente de preços *spot* do carvão vapor  
(FOB, 6.700 kcal/kg, cinzas 15% max, enxofre 1% max)

Origem	21/out/05	10/mar/06	%
África do Sul	40,00	52,05	30,1
Colômbia	44,15	54,60	23,7
Venezuela	46,10	56,50	22,6
Rússia (Báltico)	46,20	54,10	17,1
Polônia	49,00	52,00	6,1
Newcastle	40,00	50,60	26,5
Queensland	40,50	51,70	27,7
China	45,10	48,30	7,1
Rússia (Leste)	45,80	51,80	13,1

Fonte: Coal Market Intelligence, 2006.

Também no Brasil a expectativa é de estabilidade de preços, ainda que influenciados pela demanda de mercado e pelos custos inerentes a cada jazida a ser explorada.

Adicionalmente, no caso do carvão, o preço do combustível posto na usina é influenciado por diversos fatores, dentre os quais se destacam:

- Natureza da mineração (céu aberto ou subsolo);
- Grau de beneficiamento requerido;
- Distância e meio de transporte;
- Quantidades contratadas (economia de escala);
- Qualidade do carvão.

A Tabela 10 apresenta a origem do carvão empregado em cada usina térmica brasileira, assim como o preço pago por cada um deles.

Tabela 10 – Origem e preços do carvão empregado em térmicas brasileiras

Usina	Contrato (t/mês)	Fornecedor	Mina	Preços maio/2005 (R\$/t)	Mês de reajuste
Presidente Médici	133.333	CRM	Candiota	40,63	Abril
São Jerônimo	6.500	CRM	Leão I	100,06	Maio
Jorge Lacerda	200.000	CCCE	SIECESC	138,68	Setembro
Charqueadas	28.886	COPELMI	Recreio	68,69	Maio
Figueira	6.500	CAMBUÍ	CambuÍ	208,49	Janeiro

CRM: Companhia Rio Grandense de Mineração

CCCE: Consórcio Catarinense de Carvão Energético

COPELMI: Companhia de Pesquisas e Lavras Minerais

CAMBUÍ: Companhia Carbonífera do Cambuí

Fonte: CARVALHO, 2005.

Em Santa Catarina, o carvão bruto é minerado em subsolo e apresenta aproximadamente 65% de cinzas, necessitando ser beneficiado para reduzir este teor de cinzas a 42%, tendo em vista o suprimento ao Complexo Jorge Lacerda. Esse quadro determina o aproveitamento de apenas 35-40% de todo o minério extraído.

No Rio Grande do Sul, no caso da usina de Presidente Médici, o carvão é minerado a céu aberto e é queimado na forma bruta, sem necessidade de beneficiamento. O combustível de Charqueadas, apesar de minerado a céu aberto, é transportado por maiores distâncias e requer algum grau de beneficiamento.

No Paraná, o carvão de Figueira tem seu preço elevado determinado por fatores de economia de escala, profundidade e características da camada de carvão e grau de beneficiamento requerido, este último em consequência do mais alto teor de enxofre apresentado por esse carvão.

Deve-se considerar que, para novos projetos termelétricos, o preço do carvão pode ser bem diferente daqueles apresentados na Tabela 9. Novas usinas com carvão nacional deverão continuar sendo locadas na boca da mina, porém com o projeto específico para o tipo de carvão, em alguns casos, sem o necessário beneficiamento.

#### ■ 6.4. Custos de operação e manutenção

Os custos de operação e manutenção das usinas térmicas devem ser classificados em fixos e variáveis. Em adição ao custo do combustível, as parcelas variáveis, dependentes do despacho da usina, são determinantes no cálculo dos fatores de capacidade, como sugerido anteriormente.

No entanto, a diversidade de tecnologias associadas à geração térmica a carvão e, principalmente, a heterogeneidade do próprio combustível e das legislações ambientais, acabam por particularizar esses custos, tanto os fixos quanto os variáveis, dificultando a escolha de valores de referência.

A Tabela 11 a seguir dá uma medida dessa dificuldade.

Tabela 11 – Custos fixos e variáveis segundo diferentes fontes

Tecnologia	Custos variáveis de O&M (US\$/MWh)			Custos fixos de O&M (US\$/kW-ano)		
	EPRI (2004)	EIA (2006)	Média de fontes variadas <sup>2</sup>	EPRI (2004)	EIA (2006)	Média de fontes variadas <sup>2</sup>
Combustão Pulverizada (ciclo subcrítico)	1,7	4,2 <sup>1</sup>	6,4 <sup>1</sup>	40,5	25,1	28,0
Combustão Pulverizada (ciclo supercrítico)	1,6	-	-	41,1	-	-
Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado	0,9	2,7	4,2	56,1 – 52,0	35,2	36,0
Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado e com Seqüestro de Carbono	ND	4,0	-	ND	41,4	-

1 Plantas com dessulfurização, em região com maiores restrições ambientais

2 EPRI, NETL, DOE, GTC, ConocoPhillips, GE, Bechtel

Fontes: DOE-EIA, EPRI, NETL, DOE, GTC, ConocoPhillips, GE, Bechtel, 2006.

Vale ressaltar que os valores descritos são representativos de usinas submetidas a um regime operacional diferente das usinas brasileiras e operam com fator de capacidade elevado, próximo a 80%, o que tende a reduzir os custos de O&M por MWh gerado. Adicionalmente, essas usinas utilizam combustível com menor conteúdo de cinzas e enxofre.

#### ■ 6.5. Custos de transmissão

A atividade de transmissão de energia elétrica é um monopólio com tarifas reguladas. O pagamento destes custos é realizado por intermédio de tarifas de transmissão, cobrados de geradores e de cargas. Assim, um gerador cuja presença em determinado local representa um impacto ao sistema de transmissão existente estará sujeito a uma tarifa de uso de transmissão elevada, enquanto um gerador localizado em um ponto da rede onde sua presença alivia o uso do sistema estará sujeito a uma tarifa de transmissão baixa. A mesma filosofia prevalece em relação às cargas. Deve-se adicionar ao componente locacional um outro componente denominado *selo*, que é constante em todos os pontos do sistema. Esta parcela constitui um custo fixo, rateado igualmente entre os usuários de forma a garantir que o valor total da arrecadação com os usuários da rede básica seja igual à receita devida às concessionárias de transmissão pela disponibilização de seus ativos da rede básica (TOLMASQUIM, 2005).

As tarifas de uso do sistema de transmissão –TUST- são reajustadas anualmente na mesma data em que ocorrem, simultaneamente, os reajustes das Receitas Anuais Permitidas - RAP das concessionárias de transmissão, conforme determinam seus Contratos de Concessão. Esse período tarifário vai de 1º de julho do ano

em que são publicadas até 30 de junho do ano subsequente.

Tolmasquim (2005) usa como referência o valor de R\$5,27/MWh para tarifa de transmissão. Já a CGTEE usa o valor de R\$7,76/MWh. Em estudo de viabilidade técnico-econômica das usinas de Seival e Usitec, a Fundação Getúlio Vargas admitiu um custo de R\$4,60/MWh para ambas as usinas.

Na Tabela 12 são apresentadas tarifas de uso do sistema de transmissão aplicáveis a algumas centrais térmicas geradoras a carvão para o período 2005/2006.

Tabela 12 – TUST aplicáveis a algumas centrais geradoras – exercício 2005 - 2006

Usina	TUST (R\$/kW.mês)
Charqueadas	1,270
Figueira	1,064
Jorge Lacerda	1,704
Presidente Médici	1,900

Fonte: ANEEL, 2006.

Observa-se, portanto, que tais valores são bastante variáveis, conforme a localização da usina.

#### ■ 6.6. Impostos

Na elaboração e análise de projetos do setor elétrico, devemos considerar a incidência dos seguintes tributos e encargos (LORA, 2004):

##### a. COFINS – Contribuição para Financiamento da Seguridade Social

De competência da União, o fato gerador é a percepção do faturamento. A base de cálculo é o faturamento mensal. A alíquota é de 7,60%.

##### b. PIS – Contribuição para o Programa de Integração Social

Também de competência da União, o fato gerador é a percepção do faturamento. A base de cálculo é o faturamento mensal. A alíquota é de 1,65%.

##### c. TFSEE – Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica

É devida à ANEEL pelas concessionárias que produzem, transmitem, distribuem, comercializam energia elétrica. A base de cálculo é o benefício econômico, sendo que o valor devido é deduzido das cotas de Reserva Global de Reversão. A taxa é de 0,5% sobre a receita.

##### d. CPMF – Contribuição Provisória sobre Movimentação Financeira

De competência da União, a CPMF tem como fato gerador a movimentação ou transmissão financeira, com alíquota de 0,38% sobre a receita bruta.

##### e. IRPJ – Imposto de Renda de Pessoa Jurídica

De competência da União, o IRPJ incide sobre o lucro real das pessoas jurídicas. Lucro real é base de cálculo do imposto sobre a renda apurada segundo registros contábeis e fiscais autorizadas efetuados sistematicamente de acordo com as leis comerciais e fiscais, com alíquota de 25%.

##### f. CSSL – Contribuição Social sobre o Lucro Líquido

De competência da União, a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido é aplicada às mesmas normas de apuração estabelecidas para o imposto de renda das pessoas jurídicas, mantidas a base de cálculo e as alíquotas previstas na legislação, com alíquota de 9%.



## 7. Avaliação econômica

### ■ 7.1. Bases de cálculo

A avaliação econômica aqui apresentada tem como objetivo determinar o menor preço de venda da energia assegurada de uma usina térmica a carvão, suficiente para remunerar o capital investido na construção e os custos operacionais da usina (tarifa de equilíbrio).

Embora expressa como uma tarifa monômnia nesta Nota Técnica, essa tarifa de equilíbrio pode ser desagregada numa tarifa binômnia equivalente, onde uma parcela representaria o custo anualizado do capital (R\$/kW-ano) e outra parcela representaria o custo variável esperado de geração (R\$/MWh).

Para a avaliação das térmicas a carvão, necessariamente paramétrica em razão da variabilidade dos componentes do fluxo de caixa e da própria taxa de atratividade do investimento, os fatores de capacidade crítico e médio (que determinam a energia assegurada e a geração média esperada) foram obtidos a partir da simulação estática do sistema hidrotérmico considerando-se um custo marginal de operação de R\$ 130/MWh e três alternativas de combustível, diferentes em preço e poder calorífico, a saber:

- Alternativa A: 3.200 kcal/kg, R\$ 40,63/t (Candiota);
- Alternativa B: 4.850 kcal/kg, R\$ 208,49/t (Cambuí);
- Alternativa C: 6.700 kcal/kg, R\$ 138,00/t (África do Sul).

As duas primeiras alternativas refletem as situações limite, em termos de preço, hoje observadas no país. A alternativa C reflete uma situação hipotética de uso de carvão importado da África do Sul (*Richards Bay*), a cujo preço FOB foi acrescido um custo de frete de US\$ 8,00/t.

Os fatores de capacidade mínimo e máximo considerados foram de 40% e 91%, respectivamente, e a eficiência da usina a carvão pulverizado, de 33%, correspondente a um *heat rate* de 10.347 BTU/kWh.

Como custo fixo de operação e manutenção, assumiu-se o valor de 40 US\$/kW-ano e, como custo variável, assumiu-se um valor constante de 4 US\$/MWh, independentemente do fator de capacidade da usina e do tipo de carvão empregado.

O custo unitário da potência instalada foi parametrizado entre US\$ 1.000/kW e US\$ 1.800/kW e o prazo de construção, até o início da operação comercial, estimado em 4 anos, com desembolsos anuais de 20%, 40%, 30% e 10% no ano final de construção. Considera-se, por hipótese, que todas as receitas e despesas referentes a um determinado período são concentradas ao final desse período.

A vida útil estimada em projetos para usinas térmicas vai de 20 a 30 anos. Vale ressaltar, no entanto, que a operação de usinas térmicas pode ser prolongada por mais 25 a 30 anos, após uma completa avaliação de sua integridade no final de sua vida útil estimada. O custo de extensão de vida para uma planta termelétrica que utiliza combustíveis fósseis está em torno de 20 a 30% do custo de construção de uma planta nova (FURTADO, 2001). Na análise aqui apresentada considerou-se que as térmicas a carvão têm vida útil de 25 anos.

No cálculo da tarifa de equilíbrio foram considerados os seguintes encargos e impostos:

#### *Encargos setoriais*

- Custo de acesso e uso da rede (TUST): 3,0 R\$ / MWh
- Taxa de fiscalização (ANEEL): 0,5% da receita
- Investimento em pesquisa e desenvolvimento: 1,0% da receita líquida

*Impostos sobre a receita*

- alíquota do PIS = 1,65%
- alíquota da COFINS = 7,60%
- alíquota da CPMF = 0,38%

*Impostos sobre os resultados*

- alíquota do IR = 25%
- alíquota da CSLL = 9%

A taxa de câmbio utilizada na conversão dos valores expressos em US\$ para R\$ foi de 1 US\$ = 2,30 R\$. Finalmente, a taxa interna de retorno do projeto foi parametrizada entre 8 e 12%.

## ■ 7.2. Resultados

A análise econômica realizada, baseada em três alternativas de fornecimento de combustível e parametrizada em relação ao custo unitário de instalação da usina e taxa interna de retorno exigida pelo investidor, buscou calcular a tarifa monômica, expressa em R\$/MWh, suficiente para a remuneração dos investimentos e custos incorridos na geração de energia elétrica.

Para cada alternativa de combustível, custo de instalação e taxa de retorno, foram calculadas:

- uma tarifa que remunera os custos de instalação e de geração, desconsiderados todos os impostos e encargos incidentes sobre a atividade (custo de produção);
- uma tarifa que remunera os custos de instalação e geração, considerados todos os impostos e encargos incidentes sobre a atividade (tarifa de equilíbrio).

Os resultados são apresentados nas Tabelas 13 a 15.

Tabela 13 – Tarifas calculadas para os diferentes tipos de carvão considerando Taxa Interna de Retorno de 8% (R\$/MWh)

Taxa Interna de Retorno - 8%						
Instalação (US\$/kW)	Alternativa A		Alternativa B		Alternativa C	
	Produção	Tarifa	Produção	Tarifa	Produção	Tarifa
1000	86,07	109,51	148,13	179,87	98,51	123,66
1200	92,78	118,68	155,34	189,72	105,35	133,00
1400	99,50	127,85	162,56	199,57	112,19	142,33
1600	106,21	137,01	169,77	209,42	119,02	151,66
1800	112,93	146,18	176,99	219,27	125,86	161,00

Tabela 14 – Tarifas calculadas para os diferentes tipos de carvão considerando Taxa Interna de Retorno de 10% (R\$/MWh)

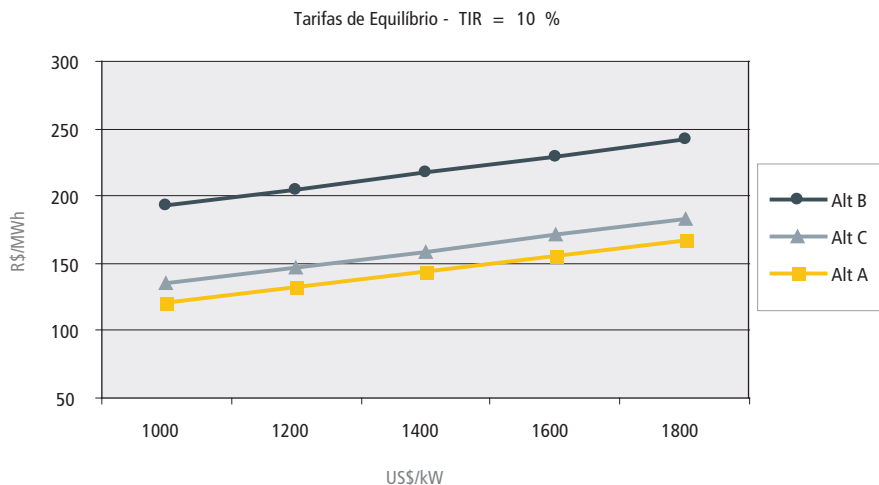
Taxa Interna de Retorno - 10%						
Instalação	Alternativa A		Alternativa B		Alternativa C	
(US\$/kW)	Produção	Tarifa	Produção	Tarifa	Produção	Tarifa
1000	92,96	121,18	155,53	192,41	105,53	135,54
1200	101,05	132,68	164,23	204,77	113,77	147,25
1400	109,15	144,18	172,92	217,12	122,01	158,96
1600	117,24	155,68	181,62	229,48	130,25	170,67
1800	125,33	167,18	190,32	241,84	138,49	182,38

Tabela 15 – Tarifas calculadas para os diferentes tipos de carvão considerando Taxa Interna de Retorno de 12% (R\$/MWh)

Taxa Interna de Retorno - 12%						
Instalação	Alternativa A		Alternativa B		Alternativa C	
(US\$/kW)	Produção	Tarifa	Produção	Tarifa	Produção	Tarifa
1000	100,56	134,06	163,70	206,24	113,27	148,65
1200	110,18	148,13	174,03	221,37	123,06	162,99
1400	119,79	162,21	184,36	236,49	132,85	177,32
1600	129,40	176,28	194,69	251,62	142,64	191,65
1800	139,02	190,36	205,02	266,74	152,42	205,98

Os resultados obtidos indicam que a importação de carvão sul africano para a geração térmica (Alternativa C), nas bases atuais de preço do combustível e frete, é competitiva, mesmo em relação ao carvão nacional de menor preço (Figura 12).

Figura 12 – Comparação das tarifas de acordo com o tipo de carvão para uma mesma Taxa Interna de Retorno



Finalmente, apenas como referência para balizamento de limites superiores de preços do carvão nacional que ainda viabilizam seu uso nas usinas térmicas, foi levantada uma “curva de indiferença” preço x poder calorífico, tendo como base o binômio preço x poder calorífico do carvão sul africano.

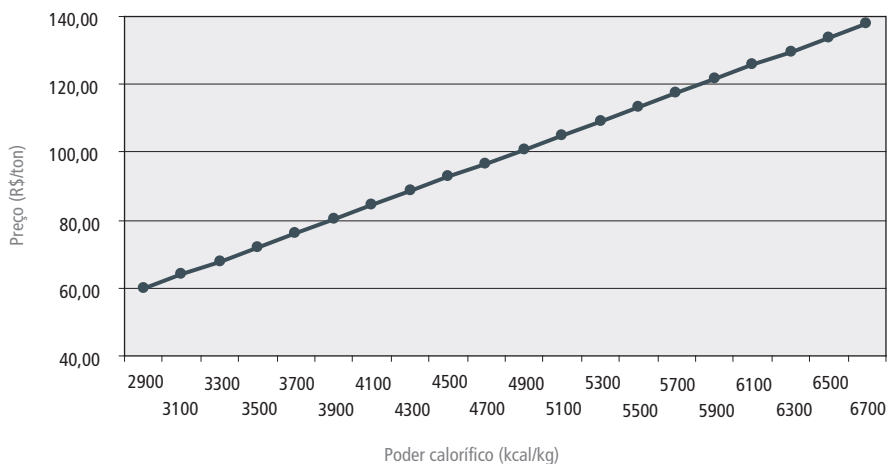
Mantidas as bases de cálculo estabelecidas anteriormente no item 7.1, e para cada conteúdo energético do carvão (poder calorífico expresso em kcal/kg), foi calculado o máximo preço por tonelada desse carvão tal que a tarifa de equilíbrio seja idêntica àquela do carvão importado da África do Sul.

Como resultado, obteve-se a relação linear apresentada na Figura 13, que independe da taxa interna de retorno do projeto ou do custo de investimento.

Dado o poder calorífico do carvão nacional, obtém-se o máximo preço por tonelada de carvão competitivo com a alternativa de importação da África do Sul.

Assim, por exemplo, pode-se dizer que o máximo preço atrativo de um carvão com 4.700 kcal/kg seria em torno de R\$ 96,80 por tonelada. Em termos de tarifa de equilíbrio, é indiferente utilizar esse carvão ou um outro carvão de, digamos, 3.100 kcal/kg ao preço de R\$ 63,85.

Figura 13 – Preços de carvões nacionais competitivos com o carvão importado da África do Sul (6.700kcal/kg)



## 8. Considerações finais

Ainda que caracterizado pelo seu baixo poder calorífico e elevado teor de cinzas e enxofre, a disponibilidade de reservas dessa fonte fóssil<sup>6</sup> e o desenvolvimento de tecnologias menos poluentes sugerem que não se descarte a geração térmica a carvão como alternativa para a expansão da oferta de energia elétrica no Brasil.

O uso do carvão nacional, com as reservas atuais conhecidas, confina a construção de novas unidades geradoras aos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e a perspectiva tecnológica mais concreta para o curto e médio prazo aponta para a tecnologia já provada de carvão pulverizado em ciclo subcrítico, com eficiência média da ordem de 33% a 35 %. A tecnologia de leito fluidizado está restrita a plantas de capacidade máxima de 350MW.

A exclusão do Paraná se deve principalmente à possibilidade de esgotamento das reservas do estado. Suas reservas montam 100 milhões de toneladas, a grosso modo suficientes apenas para a manutenção de uma usina de 1.300 MW pelo período de 25 anos.

Também o preço do energético pesa desfavoravelmente ao Paraná. Ao preço atual de R\$ 208,49/t, a viabilização econômica de uma térmica a carvão paranaense exige um preço de venda da energia assegurada superior ao de uma térmica operando com carvão importado da África do Sul.

Considerando finalmente a hipótese de construção de usinas térmicas a carvão na região Nordeste do país, a alternativa aparentemente mais viável em termos econômicos é pelo uso do carvão importado, devido ao desconhecimento a respeito de reservas de carvão na região.

Em 2002, na esteira de uma lei principalmente voltada para o incentivo de fontes renováveis de energia, o gás natural e o carvão mineral também foram contemplados com incentivos na Conta de Desenvolvimento Energético - CDE<sup>7</sup>.

6 De acordo com o Balanço Energético Nacional – BEN (MME/EPE, 2005), as reservas de carvão mineral no Brasil somavam 32 bilhões de toneladas em 2004 e a produção bruta foi de aproximadamente 5,4 milhões de toneladas. Isto possibilitou a produção de 2.153 mil tep de energia a partir dessa fonte fóssil. Do total da produção de carvão, apenas 5 milhões de toneladas foram vendáveis e aproximadamente 80% das vendas destinaram-se à geração de energia elétrica.

7 Criada em 2002, visa o desenvolvimento energético dos Estados, a universalização dos serviços e a competitividade da geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, do gás natural e do carvão mineral nacional. Os recursos desta conta serão provenientes, principalmente, da atual arrecadação para a CCC dos sistemas interligados (a ser extinta), das multas aplicadas pela ANEEL e dos pagamentos de uso de bem público, resultante dos processos de licitação (LORA, 2004).

## 9. Referências bibliográficas

### 9.1 Reuniões temáticas na EPE: carvão

CARVALHO, C.H.B., **Oportunidades de negócios no setor elétrico com o uso do carvão mineral nacional**. Apresentação. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2005.

FGV. **Programa Termelétrico: Carvão Mineral nacional x Gás Importado**.

TRACTEBEL ENERGIA, **Carvão, usinas termelétricas e meio ambiente. Considerações**. Apresentação. 2006.

TRACTEBEL ENERGIA, **Carvão Mineral. Visão Estratégica Mundial**. Apresentação. 2006.

ZANCAN, F.L., **Carvão Mineral no Brasil**. Apresentação. 2006.

### 9.2 Bibliografia

ANEEL. **Tarifas de uso no sistema de transmissão**. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>. 2006.

BÉÉR, J.M., "Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges". **Progress in Energy and Combustion Science**. pp 301-327. 2000.

BP, **BP Statistical Review**. Disponível em <http://www.bp.com>. 2005

CTA, **Carvão, Gaseificação, IGCC**. Disponível em 2006. <http://www.ieav.cta.br/hpenu/yuji/carvao.html>. Acesso em 27/03/2006.

DALTON, S., **Cost comparison IGCC and advanced coal**. Roundtable on deploying – Advanced clean coal plants. July. 2004.

DE LUCA, F.J., **Modelo cluster eco-industrial de desenvolvimento regional: o pólo da mineração do carvão de Santa Catarina**. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2001.

MME/EPE, **Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2006-2015**. Disponível em <http://www.epe.gov.br>. 2006

FURTADO, H.C., **Avaliação de Integridade e Extensão de Vida Útil de Usinas Termelétricas**. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. 21 a 26 de outubro. 2001.

IEA, **Coal information**. OECD. 2005.

IEA, **Roadmapping coal's future**. Zero Emissions Technologies for fossil fuels. Working party on fossil fuels – Coal industry advisory board. 2005.

LORA, E.E.S, DO NASCIMENTO, M.A.R., **Geração Termelétrica –Planejamento, Projeto, Operação**. Volumes 1 e 2. Editora Interciência. 2004.

MME/EPE, **Balço Energético Nacional - BEN 2005 - Ano base 2004**. Brasília, 2005.

NOWAK, W., Clean coal fluidized- bed technology in Poland. **Applied Energy**. v 74. pp 405-413. 2003.

SNIEC, **Emissões fugitivas da mineração e do tratamento de carvão mineral – Relatório de Referência**. Ministério de Ciência e Tecnologia. 2002.

TOLMASQUIM, M.T., **Geração de Energia Elétrica no Brasil**. CENERGIA. Editora Interciência. Rio de Janeiro. 2005.

UNIVERSITY OF CHICAGO, **The Economic Future of Nuclear Power**. August. 2004.

WCI, **Coal Facts 2005**. Disponível em [www.worldcoal.com](http://www.worldcoal.com). 2005.

WCI, **Clean Coal-Building a future through technology**. Disponível em [www.wci-coal.com](http://www.wci-coal.com). 2006.

ZANCAN, F.L., **Coal Based Power Plant Technology.and Clean Coal Technologies**. 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM, **Informativo anual da indústria carbonífera, 2000**.

COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS - CPRM, **Pesquisa de carvão no Brasil**, 1972.

UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS - *Center for Energy Efficiency and Renewable Energy*.

WORDBANK, 2006.

COAL MARKET INTELLIGENCE <<http://www.e-coal.com>>

## **Participantes da Empresa de Pesquisa Energética – EPE**

### **Coordenação Geral**

Mauricio Tiomno Tolmasquim  
Amílcar Gonçalves Guerreiro

### **Coordenação Executiva**

Renato Pinto de Queiroz  
Juarez Castrillon Lopes

### **Coordenação Técnica**

Ricardo Gorini de Oliveira

### **Equipe Técnica**

Amaro Olimpio Pereira Junior  
Marina Elisabete Espinho Tavares  
Filipe S.de Sousa (estagiário)



# GERAÇÃO TERMOELÉTRICA A PARTIR DO CARVÃO MINERAL: POTENCIAL DE GERAÇÃO

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	91
2. Disponibilidade do carvão nacional .....	94
3. Disponibilidade do carvão importado.....	96
4. Competitividade do carvão nacional .....	97
5. Cenário tecnológico.....	99
6. Potencial de geração.....	101
6.1. Carvão nacional .....	101
6.2. Carvão importado.....	104
7. Emissões.....	105
7.1. Emissões de CO <sub>2</sub> .....	105
7.2. Outras emissões.....	107
8. Conclusões.....	108
9. Referências bibliográficas .....	110
9.1. Reuniões temáticas na EPE: Carvão Mineral .....	110
9.2. Bibliografia .....	110



## 1. Introdução

Conforme abordado anteriormente, o carvão mineral sempre figurou como uma das principais fontes de energia no mundo. Apesar do avanço do petróleo como principal fonte de energia global no século passado (e, mais recentemente, do gás natural), o carvão mineral, de acordo com dados da *International Energy Agency* (IEA, 2004), ainda representa 24% da oferta total de energia primária no mundo, constituindo-se na segunda mais importante fonte de energia mundial.

Já na produção de energia elétrica, este energético continua liderando, dentro de uma perspectiva mundial, o *ranking* das fontes primárias, não obstante as pressões ambientais que explicam, em grande parte, a contenção da expansão da geração a carvão em contrapartida ao aumento de outras fontes, principalmente o gás natural, observada nos últimos 30 anos.

De fato, conforme registrado na nota técnica anterior, o carvão mineral é a principal fonte primária de geração de energia elétrica, sendo responsável por cerca de 40% de toda a eletricidade gerada no planeta em 2003 (WCI, 2005). Além disso, no mesmo ano foi gerado, por usinas térmicas movidas a carvão mineral, um volume de energia elétrica de 6.681 TWh, sendo que mais da metade em apenas dois países: Estados Unidos (2.083 TWh) e China (1.515 TWh) (IEA, 2005).

A restrição à expansão da geração termelétrica a carvão nos últimos anos está diretamente relacionada à preocupação mundial com o controle das emissões de CO<sub>2</sub> e com o baixo preço do gás natural. Esse movimento tem-se refletido especialmente nos países mais desenvolvidos. Com efeito, segundo a IEA (2005), nos anos 70 a produção de carvão pelos países integrantes da *Organisation for Economic Co-operation and Development* – OECD, que compõem a porção mais industrializada e desenvolvida do planeta, representava 50% do total mundial. Em 2004, essa proporção caiu para pouco mais de 31%.

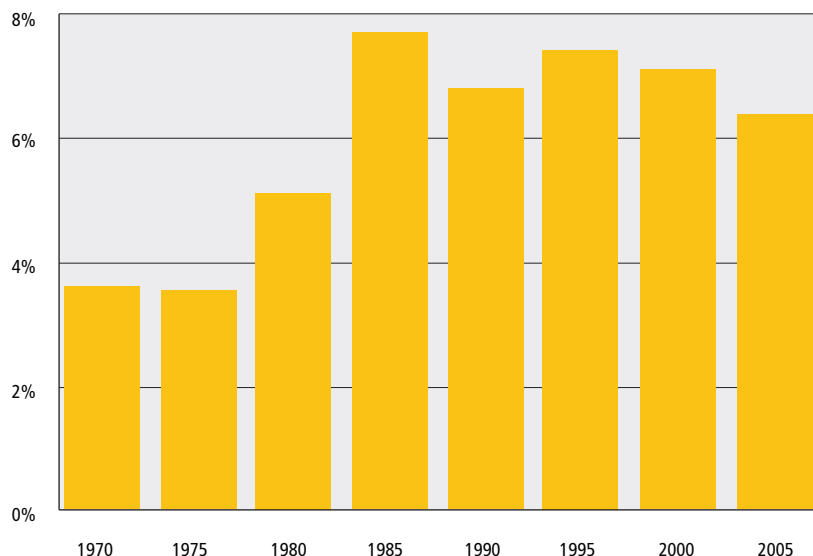
Em grande parte, essa redução se explica pelo avanço no consumo de outras regiões. Atualmente, o crescimento do consumo mundial de energia, em geral, e do carvão em particular, tem sido liderado por países que não integram a OECD, tais como a China, a Índia, a Rússia, a Indonésia e a Colômbia.

Porém, houve também redução na termelétrica a carvão nos países dessa organização: em 1971, 39,6% da energia elétrica gerada provinham de térmicas a carvão; em 2002, essa proporção foi reduzida para 38,3%, cedendo espaço para fontes primárias que não emitem ou emitem menor volume de CO<sub>2</sub>, principalmente o gás natural (IEA, 2004). Essa redução só não foi maior porque, paralelamente a esse movimento, reduziu-se de forma significativa a geração de energia elétrica a partir de derivados de petróleo.

No Brasil, a participação do carvão sempre foi muito pequena, tanto no total da oferta de energia primária quanto, e especialmente, na geração de energia elétrica.

A Figura 1 a seguir, composta com dados do Balanço Energético Nacional (MME/EPE, 2005, e EPE 2006b), revela que a participação do carvão mineral na oferta interna de energia situou-se abaixo de 4% na década de 70. Elevou-se na década seguinte, atingindo um máximo de 7,7% em 1985, refletindo políticas governamentais de incentivo ao uso do carvão nacional, até como parte da estratégia de enfrentamento da crise energética deflagrada com os choques nos preços internacionais do petróleo, em 1973 e 1979.

Figura 1 – Brasil. Participação do carvão mineral na oferta interna de energia (1970-2005)



Fonte: MME/EPE, 2005, e EPE 2006b.

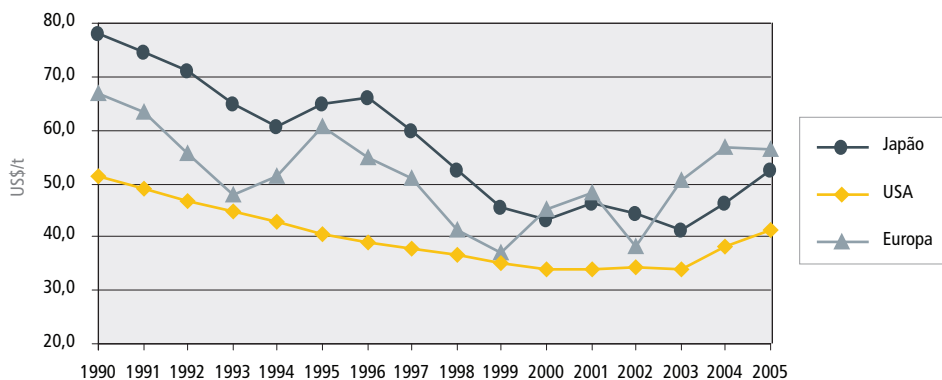
Em razão da grande disponibilidade de energia hidráulica barata e da baixa competitividade econômica do carvão nacional, seu uso para a geração de energia elétrica tem sido limitado. Com efeito, grande parte do carvão consumido no país é do tipo metalúrgico, basicamente importado e utilizado na indústria, especialmente na siderurgia. O carvão nacional, do tipo carvão vapor, é majoritariamente (85%) destinado à produção de energia elétrica. Em 2005, apenas 1,6% da oferta interna de energia elétrica foi proveniente da geração termelétrica a partir do carvão (EPE, 2006b)

Esse quadro não autoriza, contudo, que se exclua o carvão mineral como fonte de energia primária relevante nos próximos anos, seja dentro de uma perspectiva mundial, seja como parte da estratégia doméstica para atendimento à expansão da demanda de energia.

Em primeiro lugar, o carvão é a mais abundante fonte de energia primária disponível no planeta. Ainda que concentradas em três grandes regiões (Ásia e Oceania, 32,7%; Eurásia, 31,6% e América do Norte, 28,0%), as reservas de carvão (somente as reservas provadas) são abundantes o suficiente para suportar todo o consumo mundial por aproximadamente 190 anos. Mesmo as reservas nacionais, apesar da virtual paralisação dos estudos e pesquisas de prospecção nos últimos anos, podem ser consideradas relativamente expressivas em termos mundiais: o Brasil detém a 10ª maior reserva do mundo, 1,1% das reservas totais, suficiente para atender a produção atual por mais de 500 anos.

Além disso, o preço do carvão, não obstante refletir algum impacto das tendências do custo da energia, influenciadas pela flutuação nos preços internacionais, apresenta um grau de volatilidade relativamente baixo. Nos últimos 10 anos, situou-se em uma faixa de variação entre US\$ 40 e US\$ 60 por tonelada, conforme mostrado na nota técnica anterior por meio da Figura 11, rerepresentada na página seguinte (Figura 2).

Figura 2 – Preços internacionais do carvão



Obs.: Japão: CIF-porto; Europa: CIF-ARA; EUA: CIF-usina  
 Fonte: BP, 2005.

Conforme abordado anteriormente, apesar desse comportamento recente dos preços do carvão, a *Energy Information Administration*, em sua publicação *Annual Energy Outlook 2006*, prevê pouca variação do preço do carvão no mercado interno norte-americano, estimando em cerca de US\$ 41,0 /short ton (US\$ 45,2 por tonelada métrica) seu preço no horizonte de 2030.

Não por acaso, grandes investimentos têm sido orientados para a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico de modo a viabilizar um uso mais intenso do carvão, com o menor impacto ambiental possível. Nesse sentido, destacam-se a importante evolução na eficiência da geração termelétrica a carvão e, especialmente, as tecnologias limpas de carvão (*clean coal technologies*).

A partir de 1980, houve um avanço mundial na redução de emissões de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> e melhorias significativas na redução de material particulado produzido na geração de eletricidade a partir do carvão. Esses resultados positivos foram alcançados a partir da experiência operativa, da otimização das instalações e, também, com base em pesquisas governamentais e de empresas privadas. Contudo, os gastos com proteção ambiental adicionaram, em média, 30% dos custos totais de EPC de uma usina a carvão (RESENDE, 2006). No mesmo período, a Alemanha gastou mais de US\$ 20 bilhões em pesquisas na área de *clean coal technology*. E os Estados Unidos têm orçamento de US\$ 10 bilhões para o desenvolvimento do uso sustentável do carvão para os próximos 15 anos.

Em particular, são dignos de registro os esforços na direção do que se convencionou chamar seqüestro de carbono. Em linhas gerais, o seqüestro de carbono consiste na captura de emissões de CO<sub>2</sub> e em sua armazenagem em reservatórios naturais. Essa tecnologia ainda está em fase de pesquisa e desenvolvimento, havendo a expectativa de que possa estar comercialmente disponível nos próximos 20-25 anos.

O destaque nessa linha de pesquisa é o Projeto FutureGen<sup>1</sup>, patrocinado pelo governo norte-americano, que tem por meta construir uma térmica a carvão com “emissão zero”, produzindo hidrogênio e eletricidade e capturando e armazenando o carbono.

<sup>1</sup> FutureGen será uma instalação de geração de energia elétrica com capacidade de 275 MW, demandando um prazo de 10 anos de construção e pesquisas e investimentos de US\$ 870 milhões (US\$ 620 milhões do U.S. DOE e US\$ 250 milhões de um consórcio privado). O projeto pretende seqüestrar emissões de CO<sub>2</sub> de 1 milhão de ton por ano, de modo a testar adequadamente as condições geológicas de um reservatório representativo.

Todo esse esforço parece indicar que o mundo não descarta, absolutamente, o uso do carvão como fonte primária para a geração de energia elétrica. É verdade que a Agência Internacional de Energia (IEA, 2004) considera, em seu cenário de referência, uma redução na participação da geração a carvão na produção de eletricidade nos países da OECD, em 2030, para 33,3%. Mas essa mesma instituição projeta que, em termos mundiais, o carvão deverá virtualmente manter sua participação, respondendo por mais de 38% da produção global de eletricidade. Nesse cenário, a expansão da capacidade instalada evolui de 1.135 GW, em 2002, para 2.156 GW, em 2030, perfazendo uma média de instalação de novos 36.500 MW a cada ano.

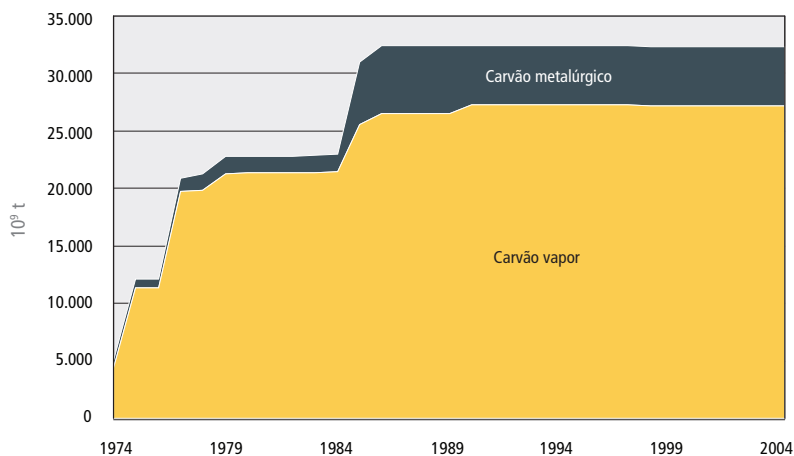
A abundância das reservas de carvão, os avanços tecnológicos já consolidados e em desenvolvimento, o aumento esperado da demanda de energia, em especial da demanda por energia elétrica, são os elementos básicos que sustentam a visão de que a expansão da geração termelétrica a carvão faz parte da estratégia da expansão mundial da oferta de energia. No Brasil, além da problemática ambiental, as questões relevantes na discussão do potencial da geração termelétrica a carvão estão muito relacionadas à disponibilidade do energético (reservas e importação), à infra-estrutura (especialmente de transporte), aos aspectos de natureza tecnológica e econômica (refletido no custo da geração) e aos de natureza geopolítica e estratégica (por exemplo: dependência de importações).

## 2. Disponibilidade do carvão nacional

Além dos critérios clássicos que envolvem aspectos geológicos, de mineração e econômicos, o tamanho das reservas de qualquer recurso energético depende do nível do conhecimento que se tem do solo e do subsolo. Depende, portanto, do volume de recursos financeiros aplicados na pesquisa e na prospecção desse recurso energético.

Conforme abordado anteriormente, as pesquisas na área do carvão no Brasil estão virtualmente paralisadas há 20 anos. Evidência disso é que o volume de reservas totais (medidas, indicadas e inferidas), de acordo dados do Balanço Energético Nacional (MME/EPE, 2005), está em torno de 32 bilhões de toneladas desde 1985, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 – Brasil. Evolução das reservas totais de carvão mineral



Fonte: MME/EPE, 2005.

Os números do Anuário Mineral Brasileiro (DNPM, 2005) são ainda mais restritivos. De acordo com essa fonte, e conforme registrado na nota técnica sobre o inventário de recursos e reservas de carvão mineral no Brasil vista anteriormente, as reservas estão concentradas, basicamente, em dois estados (Rio Grande do Sul, com 90,58% das reservas, e Santa Catarina, 9,36%<sup>2</sup>), sendo que o volume total de recursos de carvão não atinge 24 bilhões de toneladas.

Desses recursos, são considerados medidos (maior nível de certeza) apenas 28%, ou o equivalente a 6,7 bilhões de toneladas, dos quais 78,7% no Rio Grande do Sul e 21,2% em Santa Catarina.

Na edição de 2005 do Anuário, foi introduzido o conceito de reserva lavrável. Conforme o documento, o intuito foi indicar com maior acuidade as reservas disponíveis, correspondendo a reserva lavrável à reserva técnica e economicamente aproveitável levando-se em consideração a recuperação da lavra<sup>3</sup>. Nesse conceito, a reserva hoje disponível de carvão é ainda um pouco menor, de 6,6 bilhões de toneladas.

Esse panorama reforça a idéia de que, para compor alternativas para atendimento à demanda de energia nos próximos 25 anos (horizonte dos estudos do PNE 2030), será necessária a aplicação de recursos financeiros na pesquisa e prospecção dos recursos energéticos. Medidas dessa natureza, seja pelo investimento por meio de órgãos do Estado, ou por meio de incentivos à iniciativa privada, devem compor a estratégia de ação futura no setor energético.

Nessas condições, é lícito supor que, havendo aporte adequado de recursos financeiros, o volume de reservas totais, mas especialmente o de reservas medidas, deva crescer ao longo do horizonte de estudos do PNE 2030.

Mesmo assim, seria de muito otimismo supor crescimento nas reservas superiores aos apontados no histórico, quando havia atividades de pesquisa minimamente regulares e, ainda, o estímulo de uma crise energética internacional, decorrente da elevação dos preços do petróleo na década de 70.

De fato, o último avanço expressivo no volume das reservas (40%) ocorreu entre 1984 e 1986, conforme indicado no Balanço Energético Nacional (MME/EPE, 2005), como reflexo de iniciativas ainda da década anterior.

Considerando que hoje ainda não foram retomados os investimentos em estudos prospectivos na área do carvão e que há um prazo mínimo para que, uma vez retomados esses estudos, eles possam produzir os resultados esperados, afigura-se razoável supor que a expansão das reservas não se dê antes de 2015.

Assim, para efeito de avaliação do potencial de geração de eletricidade a partir do carvão, considerando o carvão nacional, foram formulados dois cenários que variam entre um mais conservativo, em que o potencial está limitado ao volume reconhecido como reserva lavrável, até um mais otimista, em que as reservas lavráveis crescem 40% no período. Nessa hipótese, as reservas de carvão nacional, de 6,6 bilhões de toneladas, evoluiriam, somente após 2015, para 9,2 bilhões de toneladas.

Além disso, devido às características do carvão nacional, já discutidas nas notas técnicas anteriores, pode-se admitir que grande parte deste carvão esteja disponível para a geração de energia elétrica.

2 Os restantes 0,06% das reservas estão nos estados do Paraná, São Paulo e Maranhão.

3 Conforme o Anuário Mineral Brasileiro 2005, reserva lavrável é a reserva in situ estabelecida no perímetro da unidade mineira determinado pelos limites da abertura de exaustão (cava ou flanco para céu aberto e realces ou câmaras para subsolo), excluindo os pilares de segurança e as zonas de distúrbios geo-mecânicos. Corresponde à reserva técnica e economicamente aproveitável levando-se em consideração a recuperação da lavra, a relação estéril/minério e a diluição (contaminação do minério pelo estéril) decorrentes do método de lavra.

### 3. Disponibilidade do carvão importado

---

O carvão mineral é uma *commodity* e, como tal, é comercializado em escala mundial. Diferentemente do petróleo, para o qual o comércio internacional (exportações/importações) corresponde a mais de 50% da produção (EIA, 2005), apenas 16% da produção mundial de carvão é transacionada entre os países.

Do volume de carvão mineral comercializado em 2004, 755 milhões de toneladas (EIA, 2005), 70% referiram-se ao carvão-vapor, de uso principal na geração termelétrica. Importa ressaltar que, em 1995, essa proporção era de 40% (EIA apud WCI).

Outro dado relevante é que mais de 90% da comercialização internacional do carvão se faz por via marítima. A concentração de grandes exportadores e importadores na Ásia e na Oceania<sup>4</sup> explica porque cerca de 60% desse volume navega pelo Pacífico. De qualquer modo, a quantidade comercializada pelo Atlântico, segmento que eventualmente pode mais interessar ao Brasil na hipótese de importação de carvão, é expressivo. Aqui, ainda que haja transações relevantes entre Austrália e Europa, os atores principais são, do lado exportador, África do Sul e Colômbia e, do lado importador, Estados Unidos, Alemanha e Reino Unido.

Ao se considerar a alternativa de importação de carvão pelo Brasil, surgem imediatamente como referência os carvões da Austrália, da África do Sul e da Colômbia. Em quaisquer casos, tratam-se de carvões com poder calorífico entre 5.000 e 7.500 kcal/kg, bem superior ao dos carvões nacionais. Segundo o WCI (2005) isso significa que um parque termelétrico de 600 MW, com rendimento médio de 38% (compatível com as tecnologias mais modernas comercialmente disponíveis), operando com fator de capacidade médio de 75%, demandaria, em um ano, algo como 1,5 milhões de toneladas para um carvão de 6.000 kcal/kg.

Observe-se que, em 2004, o Brasil importou 18,5 milhões de toneladas. Ou seja, a instalação de 10.000 MW em termelétricas a carvão importado significaria apenas dobrar a importação atual de carvão. Se se tem em conta o horizonte de 25 anos, há que se convir que essa proporção é perfeitamente admissível.

Por extensão, pode-se considerar que a infra-estrutura portuária teria condições de se adaptar a essa eventual solicitação adicional.

Conforme visto anteriormente, no horizonte do PNE 2030, as regiões brasileiras naturalmente candidatas a instalar termelétricas a carvão importado seriam o Nordeste e o Sudeste, quer pelas dimensões do mercado de energia elétrica, quer pela necessidade de alternativas de geração de porte (aqui é preciso ter em conta as ocorrências conhecidas de carvão nacional, de valor comercial competitivo, estão concentradas na Região Sul).

---

4 Os maiores exportadores mundiais são Austrália e Indonésia, respectivamente com 218 e 107 milhões de toneladas. De outro lado, os maiores importadores são Japão, Coreia do Sul e Taiwan, respectivamente com 183, 79 e 60 milhões de toneladas (dados de 2004 – EIA, 2005)



Ambas as regiões possuem portos estrategicamente localizados, com amplas condições de receber, ou de se preparar para tal, grandes volumes de carvão. Alguns desses portos já funcionam como terminais de carvão, para atendimento à indústria siderúrgica, como Sepetiba, no Rio de Janeiro, e Vitória, no Espírito Santo. Pelo menos um porto no Nordeste, Pecém, no Ceará, em breve estará atendendo à siderúrgica local. Outros portos no Nordeste, como Suape, em Pernambuco, e Itaqui, no Maranhão, também reúnem condições para receber esse tipo de carga, ainda que investimentos adicionais possam ser necessários. Nesses três casos, um outro fator relevante é a possibilidade de integração com o modal ferroviário, aumentando a flexibilidade para a localização de usinas termelétricas<sup>5</sup>.

Diante do exposto, para efeito de avaliação do potencial de geração de eletricidade a partir do carvão, considerando o carvão importado, pode-se concluir que, no horizonte do PNE 2030, não existem restrições relevantes quanto à disponibilidade de carvão, sendo perfeitamente plausível admitir, na formulação de alternativas para a expansão da oferta de energia elétrica, a possibilidade de instalação de 10.000 MW em termelétricas a carvão nas regiões Nordeste e Sudeste.

#### 4. Competitividade do carvão nacional

---

O modal mais indicado para o transporte do carvão depende de vários fatores, porém, o principal deles é a distância a ser coberta.

Conforme abordado anteriormente, no mundo, o carvão é geralmente transportado por correias ou caminhões por curtas distâncias. Trens e barcaças, ou mesmo pequenos navios, são usados no caso de distâncias mais longas, porém, quase sempre, restrito ao transporte doméstico. Alternativamente, o carvão pode ser misturado com água, de modo a formar uma pasta, permitindo o transporte por dutos.

Navios são comumente usados no transporte internacional, em tamanhos que variam a partir de 40.000 DWT:

- Handysize - 40-45.000 DWT
- Panamax - 60-80.000 DWT
- Capesize vessels – superior a 80.000 DWT.

Em todos os casos, o carvão transportado tem um conteúdo energético que justifica tal transporte. No caso de carvões de alto teor de cinzas e relativamente baixo teor de carbono, dificilmente se justifica transporte a longas distâncias. Esse é precisamente o caso do carvão brasileiro *run of mine*.

Conforme indicado na nota técnica anterior, o carvão brasileiro proveniente das jazidas do Rio Grande do Sul tem teor de cinzas nunca inferior a 40% e teor de carbono nunca superior a 30%. Essa condição torna antieconômico seu transporte a longas distâncias<sup>6</sup>.

---

5 A integração com o modal ferroviário é uma possibilidade real tendo em vista o projeto da Ferrovia Nova Transnordestina, que prevê a construção de uma moderna ferrovia com 1.800 km de extensão, ligando Eliseu Martins, no Piauí, aos portos de Pecém e Suape. No Maranhão, o porto de Itaqui, já servido pela Estrada de Ferro Carajás, está na área da Ferrovia Norte-Sul, em construção.

6 No passado, o transporte do carvão do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina chegou a ser feito, por cabotagem, até o Rio de Janeiro, porém a custo de subsídios. A suspensão desses benefícios no final dos anos 80 e início dos 90 eliminou esse transporte.

Assim, a utilização do carvão nacional tem-se justificado apenas em usinas localizadas próximas às minas, portanto na região Sul. Usinas a carvão em outras regiões demandariam preferencialmente carvão importado.

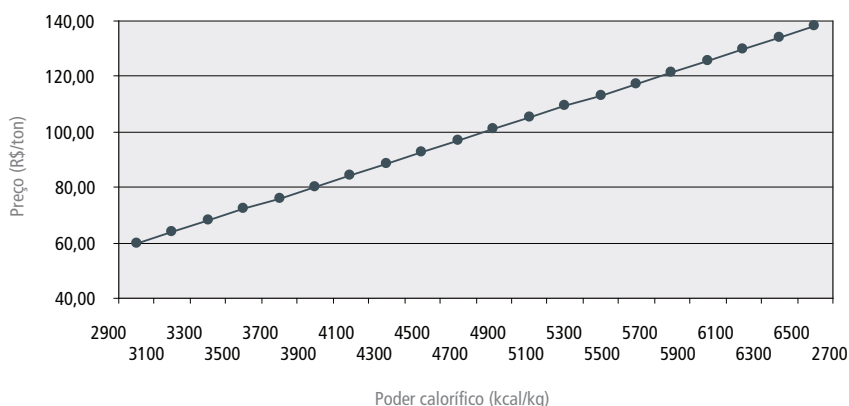
Não obstante, mesmo para o uso em usinas na boca da mina é possível estabelecer um parâmetro de preço para o carvão nacional a partir de uma referência internacional selecionada. Isto é, é possível definir um valor para o preço do carvão nacional que torna indiferente, do ponto de vista econômico, seu uso ou sua substituição por carvão importado.

Naturalmente, essa abordagem é eminentemente teórica. Não se quer dizer que uma usina a carvão em operação na boca da mina poderá substituir seu combustível (no caso, o carvão extraído da mina próxima por um carvão importado) sempre que ele atingir certo nível de preço. Até porque, na prática, por razões de ordem técnica e de logística, essa elasticidade de fato não existe. Todavia, uma referência de preço parece útil, sobretudo quando se trata de estudo de planejamento.

Nessas condições, é possível determinar uma curva de indiferença que estabelece o preço máximo de competitividade do carvão nacional, em R\$/t, em função do poder calorífico, tomando como referência o preço internacional do carvão.

Para efeito de cálculo tomou-se como referência o carvão da África do Sul. De acordo com a nota técnica anterior, o preço internacional do carvão da África do Sul, FOB-porto de origem, estava em torno de US\$ 52 por tonelada, em fins de 2004. O preço do frete marítimo foi estimado para a distância entre África do Sul e Rio de Janeiro, com base no custo do frete entre África do Sul - Europa (ARA – Amsterdam, Rotterdam e Antuérpia), em US\$ 18 por tonelada. Assim, para efeito desta curva, o custo de referência do carvão importado utilizado foi de US\$ 70 por tonelada (CIF-porto no Brasil). Nessas condições, a curva de indiferença obtida foi apresentada na Figura 13 da referida nota técnica, rerepresentada abaixo (Figura 4).

Figura 4 – Carvão nacional: limite de competitividade



Para formar uma idéia da competitividade atual do carvão nacional, podem ser comparados os preços atualmente praticados no país com a curva apresentada na Figura 4, observando que a mineração em Candiota é a céu aberto, e a em Santa Catarina, subterrânea, e que o carvão de Jorge Lacerda sofre beneficiamento:

Mina	Usina	Poder Calorífico	Preço CIF-usina
Candiota	P. Médici	3.300 kcal/kg	R\$ 38/t
SIESESC	J. Lacerda	4.500 kcal/kg	R\$ 127/t

## 5. Cenário tecnológico

Com a crescente pressão ambiental, especialmente a preocupação com o aquecimento global e as mudanças climáticas, o fator tecnológico se coloca, dentro de uma perspectiva de longo prazo, como um dos condicionantes do potencial de geração termelétrica a partir do carvão mineral. Até porque, conforme abordado na nota técnica que tratou sobre a caracterização técnico-econômica da geração a carvão, o carvão mineral requer um tratamento caro e complexo e é caracterizado por emissões pesadas de óxidos de enxofre ( $SO_x$ ), óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ),  $CO_2$  e particulados.

É esperado que o desenvolvimento e a aplicação das *clean coal technologies* conduza a uma diversidade de opções com emissões baixíssimas de qualquer tipo de poluente. Atualmente, as rotas tecnológicas mais importantes dessas tecnologias são a combustão pulverizada em ciclo supercrítico e ultra-supercrítico, a combustão em leito fluidizado e a gaseificação integrada a ciclo combinado (IEA, 2005).

Além da busca pela redução de emissões de  $CO_2$ , existe um crescente interesse no uso de hidrogênio. A gaseificação, por exemplo, é uma rota tecnológica que permite produzir eletricidade e outros produtos, tais como hidrogênio e produtos químicos. Por fim, conforme abordado anteriormente, estão em desenvolvimento pesquisas sobre técnicas de seqüestro de carbono. Essa tecnologia permitirá, a longo prazo, a instalação de térmicas com emissões zero de  $CO_2$  a longo prazo.

A Tabela 1 da nota técnica “Oferta de carvão mineral: estrutura de produção, transporte, logística e tecnologia”, rerepresentada na página seguinte (Tabela 1) resume o panorama atual do estágio de desenvolvimento das tecnologias para aproveitamento do carvão na geração termelétrica.

Tabela 1 - Tecnologias de geração termelétrica a carvão.

Tecnologia	Situação	Eficiência na conversão	Investimento (US\$/kW) <sup>(1)</sup>
Combustão pulverizada	C	38-46%	1.300-1.500
Combustão em Leito Fluidizado			
Pressão atmosférica	C/D	34-37%	1.450-1.700
Circulação <sup>(2)</sup>	C/D	37-39%	1.450-1.700
Pressurização <sup>(2)</sup>	D	42-45%	1.450-1.700
Gaseificação integrada			
Com ciclo combinado	D	45-48%	1.450-1.700
Com célula combustível	P&D	40-60%	1.700-1.900
Combustão direta			
Turbina	P&D	35-45%	1.200
Diesel	P&D	35-40%	500-1.000

Situação: C = comercial; D = demonstrado; P&D = pesquisa e desenvolvimento

(1) preços internacionais; (2) vapores sub e supercríticos

Fonte: International Energy Agency, 1997.

Conforme visto anteriormente, tendo em vista o estágio de desenvolvimento dessas tecnologias e as características do carvão nacional, considera-se que, no horizonte do PNE 2030, as tecnologias de combustão pulverizada e leito fluidizado são as que apresentam as melhores perspectivas para aplicação nas futuras termelétricas a carvão nacional. Esse entendimento é corroborado pelos projetos disponíveis: as Usinas de Jacuí e Candiota Fase C, que estão em construção, inclusive com parte da energia a ser produzida já contratada, com início de operação previsto para 2009 e 2010, respectivamente, utilizam a tecnologia da combustão pulverizada. Outros dois projetos, a Usina Sul Catarinense – USITESC e Seival, no Rio Grande do Sul, utilizam, respectivamente, a combustão em leito fluidizado circulante e a combustão pulverizada. Em todas elas poder-se-á utilizar, total ou quase totalmente, o carvão bruto ROM (*run-of-mine*), isto é, sem necessidade de beneficiamento.

Para as termelétricas a carvão importado, a qualidade do carvão a ser utilizado poderá permitir a introdução de tecnologias mais eficientes. A partir de 2015 é admissível considerar a combustão pressurizada, possibilitando eficiência de até 45%.

Em qualquer caso, no horizonte do PNE 2030, tendo em vista, principalmente, o estágio de seu desenvolvimento, afasta-se a consideração da tecnologia de gaseificação integrada. Mesmo que essa tecnologia se torne comercialmente disponível ao final do horizonte do estudo, não considerá-la se revela um posicionamento conservador, em favor de alternativas de menor impacto ambiental. De fato, essas tecnologias sugerem eficiências de até 60%, o que significa menor consumo de carvão e, portanto, menor nível de emissões para a mesma quantidade de energia.

Ainda dentro do tema tecnologia, outra importante questão a resolver é o tamanho típico a ser considerado nas futuras unidades a carvão.

As termelétricas nacionais em construção ou projeto compreendem unidades com potência instalada entre 120 e 500 MW. Em nível mundial, na tecnologia de combustão pulverizada, estão demonstradas e comercialmente disponíveis unidades de 800 e 1.000 MW, propiciando economias de escala. Dessa maneira, o fator tecnologia não parece ser limitante na definição da potência unitária. Fatores locais, tais como disponibilidade de água para refrigeração ou adequação ao tamanho da carga têm maior influência. Unidades menores oferecem maior flexibilidade operativa para o Sistema Interligado Nacional - SIN, inclusive no que

se refere à reserva de potência. Desse modo, entende-se que unidades tipo de 500 MW podem ser tomadas como referenciais para termelétricas a carvão na formulação de alternativas para expansão da oferta de energia elétrica no PNE 2030.

## 6. Potencial de geração

Na perspectiva do uso do carvão mineral como fonte primária no horizonte do PNE 2030, o potencial de geração de energia elétrica será dado pela potência que poderia instalada a partir da disponibilidade do energético.

Trata-se, evidentemente, de um valor teórico, que tem utilidade como delimitador do uso dessa fonte. A participação efetiva do carvão na futura matriz de oferta de energia do país dependerá do exame de outros aspectos, tais como competitividade relativa a outras fontes, estratégia nacional para diversificação da matriz, avaliação da dependência externa de energia, etc.

Além disso, outros fatores poderão limitar a participação do carvão, ainda que se tenha em conta somente seu uso potencial. Nesse caso, surgem os aspectos ambientais e regulatórios, que poderão impor, no horizonte de análise, restrições que superam as limitações técnicas.

Isto posto, no caso do carvão nacional, a questão que se coloca é avaliar qual a potência instalável a partir da disponibilidade do mineral. No caso do carvão importado, a questão se coloca de uma forma um pouco diferente: dada uma potência a ser instalada, qual o volume de carvão a importar.

### ■ 6.1. Carvão nacional

Para determinar o potencial de geração termelétrica a carvão mineral nacional, foram considerados os dois cenários discutidos na seção 2 desta nota técnica, quais sejam:

- Cenário Conservador: considera que os recursos para geração de energia elétrica estão limitados ao valor hoje definido para as reservas lavráveis;
- Cenário Progresso: considera que há avanço no conhecimento dos recursos decorrente de investimentos em pesquisa e prospecção, admitindo-se os recursos para a geração de energia elétrica como sendo superiores em 40% ao valor hoje definido para as reservas lavráveis.

A Tabela 2 apresenta o volume de carvão considerado em cada caso e sua proporção das reservas totais, hoje estimadas em 32 bilhões de toneladas.

Tabela 2 – Cenários de disponibilidade do carvão nacional

Cenário	Disponibilidade (10 <sup>9</sup> ton)	% Recursos Totais
Conservador	6,6	20,6%
Progresso	9,2	28,8%

É oportuno registrar as considerações feitas por Borba (2001) quanto às reservas. Esse autor usa o conceito de reservas provadas e prováveis definindo-as como aquelas cuja viabilidade econômica é demonstrada. Em adição, considera também recursos viáveis e pré-viáveis, aqueles cuja viabilidade econômica é potencial.

Para demonstrar a viabilidade econômica, Borba considerou critérios como regularidade do solo, continuidade das jazidas, quantidade de recursos já minerada, infra-estrutura necessária para a recuperação e escoamento do minério, além do conhecimento geológico próprio sobre as jazidas. Dessa maneira, as reservas provadas e prováveis podem ser entendidas como a quantidade de carvão mineral cujo aproveitamento é economicamente justificável no curto ou médio prazo. Os recursos viáveis e pré-viáveis, por sua vez, podem ser entendidos como de aproveitamento economicamente justificável a mais longo prazo.

Mesmo tendo em conta que os valores com que Borba trabalha são referentes ao ano 2000, os volumes que o autor indica para as classificações de reserva que apresenta parecem ser muito reduzidos. Para as reservas provadas e prováveis, Borba indica 930 milhões de toneladas. Para as reservas viáveis e pré-viáveis, o volume é bem maior, de 5,2 bilhões de toneladas, mas, de qualquer modo, ainda inferior às reservas lavráveis indicadas pelo DNPM.

Além das reservas (volume de carvão potencialmente disponível para geração de eletricidade), há que discutir ainda outros aspectos importantes para a quantificação do potencial de geração. Trata-se das questões do beneficiamento (sua necessidade ou não) e do rendimento na geração (fator de conversão de kcal [do carvão] para MWh)<sup>7</sup>.

O carvão extraído das minas na forma bruta, *run-of-mine* (ROM), normalmente contém impurezas associadas ao mineral. Assim sendo, o beneficiamento do mineral, que consiste na separação desse material indesejável, assegura a qualidade desejada ao carvão, ou seja, assegura melhor rendimento do carvão de acordo com o seu uso final. O tratamento que deve ser dado depende das propriedades do mineral e do destino do mesmo.

Em geral, as usinas térmicas em operação no Rio Grande do Sul utilizam carvão ROM e a Usina de Jorge Lacerda, em Capivari, Santa Catarina, carvão beneficiado. Mesmo as usinas em projeto, utilizarão carvão ROM, com exceção da Usina Sul Catarinense, que queimará uma mistura de carvão ROM e beneficiado, na proporção 70:30, permitido pela tecnologia de geração empregada (combustão em leito fluidizado).

Como resultado prático, tem-se que o consumo específico das usinas em operação no Rio Grande do Sul não é, hoje, inferior, a 1.200 kg/MWh enquanto que na usina de Jorge Lacerda não supera, em média, a 700 kg/MWh. Todas as usinas em projeto estimam um consumo específico entre 1.000 e 1.100 kg/MWh.

Para efeito de cálculo do potencial de geração, considerou-se aqui as duas possibilidades: uso de carvão bruto (ROM) e de carvão beneficiado. Nessa última hipótese, considerou-se um fator de 60% de perda do volume bruto do mineral, correspondente à experiência do beneficiamento realizado em Santa Catarina.

Quanto ao rendimento, a experiência mundial revela uma performance média de 32%. No Brasil, essa média deve ser mais baixa, a julgar pelos elevados consumos específicos de combustível, mesmo tendo em conta a característica do carvão nacional e seu regime operativo inserido em um parque predominantemente hidrelétrico. Contudo, as térmicas mais novas, incluindo as brasileiras, como Jorge Lacerda IV, apresentam, de fato, rendimentos mais elevados. Na tecnologia convencional, de combustão pulverizada, os fabricantes asseguram rendimentos não inferiores a 35%, podendo chegar a mais de 40% na hipótese de do ciclo supercrítico.

7 Entende-se que a questão da recuperação da lavra em cada jazida perde importância na medida em que, para efeito desta avaliação, somente estão sendo consideradas reservas lavráveis, em cuja definição o aspecto da recuperação já está implicitamente considerado.

Todas as quatro termelétricas nacionais em construção e projeto deverão operar com rendimento mínimo de 35%. É natural esperar que a expansão futura parta desse patamar, o que é tecnologicamente possível.

Por outro lado, rendimentos mais elevados somente são admissíveis com o emprego de tecnologias que estão, todas, em fase de pesquisa e desenvolvimento e que foram, por hipótese, desconsideradas nos estudos do PNE 2030.

Nessas condições, para efeito da quantificação do potencial de geração de energia elétrica com o carvão nacional, parametrizou-se o rendimento das futuras unidades entre 35 e 45%.

Complementarmente, foram adotadas as seguintes hipóteses de cálculo:

- Fator de capacidade médio operativo: 60%;
- Vida útil: 175.000 horas, equivalente a um período de 25 anos, com fator de capacidade de 80% ou de cerca de 35 anos com fator de capacidade de 60%;
- Poder calorífico do carvão: 2.400 kcal/kg, quando utilizado o carvão ROM e 4.500 kcal/kg, quando utilizado o carvão beneficiado (referência carvão da Usina de Jorge Lacerda);
- Poder calorífico da energia elétrica: 860 kcal/kWh.

O cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do carvão nacional é realizado com aplicação da seguinte expressão analítica:

$$P = \frac{\left( \frac{R \cdot F_b}{N} \right) * \left( \eta * \frac{PC_{\text{carvão}}}{PC_{\text{en.elet.}}} \right)}{8766 * FC}$$

onde:

- P = potencial de instalação de novas termelétricas a carvão, em MW;
- R = volume de reservas de carvão nacional, função do cenário considerado e descontando o carvão demandado pelas termelétricas existentes, em construção e em projeto, em toneladas;
- Fb = fator de volume de carvão bruto obtido no beneficiamento, em p.u. (para uso do carvão ROM, Fb = 1);
- N = vida útil das novas usinas, em anos;
- η = rendimento das usinas térmicas, em p.u.;
- PC<sub>carvão</sub> = poder calorífico do carvão, em kcal/kg;
- PC<sub>en.elet.</sub> = poder calorífico da energia elétrica, em kcal/kWh;
- 8766 = número médio de horas em um ano;
- FC = fator de capacidade médio operativo durante a vida útil das usinas, em p.u.

Os resultados são apresentados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Potencial de geração de energia elétrica com o carvão nacional, em MW

Cenário	Carvão	Rendimento		
		35%	40%	45%
Conservador	ROM	32.000	36.500	41.000
	Beneficiado	46.000	52.500	59.000
Progresso	ROM	30.000	34.500	38.500
	Beneficiado	43.000	49.000	55.500

Os resultados revelam que é muito grande o potencial de geração termelétrica com carvão nacional. Considerando a potência unitária de referência de 500 MW, pode-se dizer que, no estágio tecnológico atual e considerando apenas as reservas ditas lavráveis pelo DNPM, há disponibilidade de carvão nacional para instalação de pelo menos 64 usinas, que operariam com um fator de capacidade médio de 60% por cerca de 35 anos.

### 6.2. Carvão importado

Conforme já exposto, a questão de maior interesse que se coloca na discussão do potencial de geração de energia elétrica no Brasil a partir do carvão importado é a quantidade do mineral que seria demandada para suprir tal parque de usinas.

Para efeito desse cálculo, foram usadas as mesmas hipóteses do caso do carvão nacional, com exceção, naturalmente, do poder calorífico. Para estimar esse parâmetro, tomou-se como referência os carvões da África do Sul, Colômbia e Austrália, cujos poderes caloríficos variam entre 5.000 e 7.500 kcal/kg (WCI, 2005). O cálculo foi feito para as potências de 1.000, 5.000 e 10.000 MW. A quantidade anual Q de carvão demandada, em milhares de toneladas, nessas condições é calculada pela expressão:

$$Q = \frac{1}{PC_{en.elet.}} * \frac{PC_{carvão}}{P} * 8766 * FC$$

A Tabela 4 resume os resultados obtidos.

Tabela 4 – Potencial de geração de energia elétrica com o carvão importado  
Quantidade anual de carvão demandada, em milhões de toneladas

Potência (MW)	Poder calorífico (kcal/kg)	Rendimento		
		35%	40%	45%
1.000	5.000	2,59	2,26	2,01
	6.000	2,15	1,86	1,68
	7.500	1,72	1,51	1,34
5.000	5.000	12,92	11,31	10,05
	6.000	10,77	9,42	8,38
	7.500	8,62	7,54	6,70
10.000	5.000	25,85	22,62	20,01
	6.000	21,54	18,85	16,76
	7.500	17,23	15,08	13,40



Para se ter uma idéia da significância desses valores, considere que:

- para uma potência de 10.000 MW, o volume médio de importação demandado é comparável às importações atuais de carvão pelo país;
- tomando como referência, para o preço internacional do mineral, o carvão da África do Sul e considerando um frete até o porto do Rio de Janeiro (70 US\$/t), o valor das importações de carvão seria de, no máximo, US\$ 1,8 bilhões por ano, para a potência de 10.000 MW. Isso corresponde a cerca de 1,5% das exportações brasileiras registradas em 2005, que foram de US\$ 118 bilhões, e a menos de 1% da corrente de comércio exterior nesse mesmo ano, que foi de US\$ 191,9 bilhões.

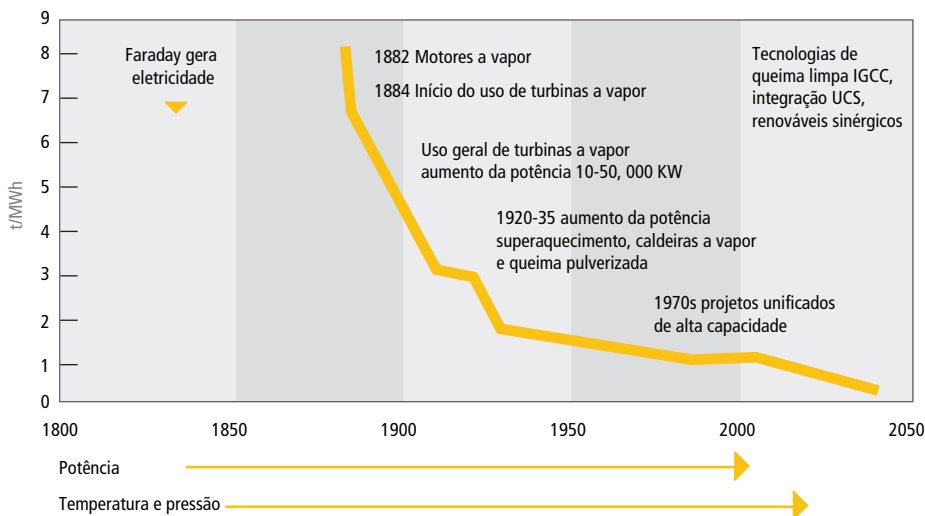
## 7. Emissões

### ■ 7.1. Emissões de CO<sub>2</sub>

Em tempos de crescente preocupação com o aquecimento global e com as mudanças do clima, a questão da emissão de gases torna-se relevante quando se admite o carvão mineral como alternativa para a geração de energia elétrica.

Combustíveis fósseis são os principais contribuintes para o volume de emissões de gases no planeta. Além disso, conquanto tenha havido progresso importante na redução das emissões por sua combustão (ver Figura 5), o carvão permanece sendo, dentre esses combustíveis, o que apresenta o maior coeficiente de emissões (ver Tabela 5), quase o dobro do gás natural.

Figura 5 – Evolução da emissão de gases pela combustão do carvão



Assim, se por um lado a disponibilidade de carvão mostra uma dimensão representativa para qualificar esse combustível como alternativa para a composição da estratégia de expansão da oferta de energia no Brasil até 2030, por outro se deve ter em mente o incremento no volume de emissões de gases, que ocorrerá caso essa alternativa seja acolhida.

Tabela 5 – Coeficientes de emissão de gases na queima de combustíveis fósseis

Combustível fóssil	Poder calorífico (MJ/kg ou Nm <sup>3</sup> )	Coefficiente de emissões (g CO <sub>2</sub> -eq/MJ)
Carvão vapor	22,9 – 29,3	106,4
Antracito	21,0 – 34,0	94,6
Óleo combustível pesado	40,0 – 41,0	78,0
Óleo combustível leve	41,0 – 42,8	74,2
Gás natural	36,6 – 37,8	56,8

Fonte: World Energy Council, 2006

As térmicas a carvão em operação no Brasil apresentam um coeficiente de emissão elevado, superior a 1.400 kg CO<sub>2</sub>-equivalente por cada MWh gerado. Esse índice está fundamentalmente relacionado à tecnologia que utilizam. São térmicas com vários anos de funcionamento, que refletem um estágio tecnológico já ultrapassado. Quando se considera o carvão na perspectiva da expansão da oferta de energia a longo prazo, é lícito supor que o volume de emissões das novas termelétricas seja, em termos unitários, kg CO<sub>2</sub>/MWh, significativamente inferior.

Documento técnico disponibilizado pelo *World Energy Council* (DERMAUT *et al.*, 2005) indica que termelétricas a carvão produzem emissões entre 760 e 780 kg CO<sub>2</sub>-equivalente/MWh, dependendo da tecnologia utilizada. No entanto, esse padrão de emissões deve ser alcançado somente com as novas tecnologias. É o que se infere desse mesmo documento, que, mais adiante, registra:

*“The following orders of magnitude of GHG-emissions can be associated from cradle to grave with actual electricity generation technologies on the basis of different energy vectors: nuclear 4 g/kWhe, wind generator: 20 g/kWhe, fotovoltaics (PV): 200 g/kWhe, Steam And Gas plant (STAG): 400 g/kWhe, coal plant: 800 to 900 g/kWhe.” [As seguintes ordens de magnitude de emissões de CO<sub>2</sub>-eq podem estar associados ao logo de toda a cadeia energética às tecnologias atuais de geração de eletricidade com base em diversos vetores energéticos: nuclear (4g/kWhe), gerador eólico (20g/kWhe), células fotovoltaicas - PV (200g/kWhe), usinas de gás e vapor - STAG (400g/kWhe), usina carvão (800 a 900g/kWhe).]*

Nessas condições, o índice de 850 kg CO<sub>2</sub>-equivalente/MWh parece ser adequado para a avaliação do volume de emissões de um futuro parque termelétrico no Brasil. A Tabela 6 apresenta a magnitude das emissões em função da potência instalada, considerando um fator de capacidade médio operativo de 60%.

Tabela 6 – Emissões de gases pelas futuras termelétricas a carvão

Potência instalada (MW)	Geração anual (*) (10 <sup>6</sup> MWh)	Emissões (10 <sup>6</sup> t CO <sub>2</sub> -eq)
1.000	5,3	4,5
5.000	26,3	22,3
10.000	52,6	44,7

(\*) Fator de capacidade médio de 60%

Para se fazer uma idéia do que esses valores significam, vale a comparação com o volume total de emissões no Sistema Interligado Brasileiro - SIN em 2005, que não atingiu 20 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-equivalente. A instalação de apenas 5.000 MW em novas termelétricas a carvão no SIN mais que dobra o atual volume total de emissões de gases nesse sistema. Deve-se considerar ainda que essa potência corresponde a menos de 6% da potência instalada do SIN ao final de 2005, de 84.177 MW segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico- ONS.

## ■ 7.2. Outras emissões

Outro aspecto importante a ser considerado, no caso da geração termelétrica a carvão mineral, são as emissões de outros gases poluentes, como os particulados SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC e CO. Esses elementos afetam a qualidade do ar e, quando ultrapassam determinados limites de concentração, podem afetar também a saúde da população, além de causar danos à fauna e à flora.

Na Tabela 7 são apresentados os fatores de emissão de particulados na queima de carvão mineral, em função de seu uso.

Tabela 7 – Emissão de gases e material particulado na combustão do carvão mineral

Atividade	Material particulado (kg/t)	SO <sub>2</sub> (kg/t)	NO <sub>x</sub> (kg/t)	HC (kg/t)	CO (kg/t)
Centrais de geração elétrica	20,00	3,8	9,0	0,15	0,5
Geração elétrica autoprodutora	16,25	3,8	7,5	0,5	1,0
Industrial	16,25	3,8	7,5	0,5	1,0
Comercial	16,25	3,8	7,5	0,5	1,0

Fonte: Santos et al., 2002

No caso do Brasil, a legislação que regula a matéria é, principalmente, a Resolução nº 003, de 28 de junho de 1990, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Essa norma institui limites de concentração de gases poluentes de forma, definindo, assim, padrões de qualidade do ar, ou seja, padrões que asseguram que o nível de concentração de poluentes não prejudica a saúde da população e nem causa danos ao meio biótico (Tabela 8).

Tabela 8 – Limites de concentração de poluentes no ar

Elemento poluente	Concentração média (mg/m <sup>3</sup> de ar)	Observação
Partículas totais em suspensão	80	média geométrica
Fumaça	60	média aritmética
Partículas inaláveis	50	média aritmética
SO <sub>2</sub>	80	média aritmética
CO	10.000	concentração média de 8 horas (9 ppm), que não deve ser excedida mais de uma vez por ano
O <sub>3</sub>	160	concentração média de uma hora, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano
NO <sub>2</sub>	100	média aritmética

Fonte: Resolução CONAMA nº 003/90

Contudo, o controle dessa natureza de emissões é bastante desenvolvido, refletindo-se, hoje, basicamente apenas no custo de instalação da usina, pela necessidade de equipamentos adicionais. A tecnologia hoje disponível permite que o nível de emissões se limite ao admitido na legislação.

Assim, para uma maior precisão de potencial de geração elétrica a carvão, devem-se analisar, jazida por

jazida, as características do mineral, assim como as tecnologias de geração, a menos poluentes, para que a expansão do sistema tenha o mínimo de impacto sócio-ambiental.

## 8. Conclusões

---

Neste trabalho, quantificou-se o potencial de geração termelétrica a carvão mineral no Brasil dentro de uma perspectiva de longo prazo, com o objetivo de avaliar as condições de este energético integrar as alternativas a serem consideradas na formulação da estratégia para a expansão da oferta de energia primária no Brasil até 2030. No trabalho, foram ainda examinados aspectos tecnológicos, da competitividade do carvão nacional e outros, relacionados à infra-estrutura e ao volume de emissões de gases.

A disponibilidade de carvão, nacional ou importado, revelou-se em uma dimensão que é representativa para qualificar o combustível como alternativa na composição da referida estratégia.

Quanto ao carvão nacional, ficou demonstrado que, mesmo que se considere apenas as reservas lavráveis, há mineral em quantidade suficiente para abastecer, por cerca de 35 anos, pelo menos 64 usinas termelétricas operando com um fator de capacidade médio de 60%.

Quanto ao carvão importado, opção natural para o uso do mineral em termelétricas no Nordeste e no Sudeste do país, verificou-se que a instalação de 10.000 MW não representa esforço ou pressão macroeconômica que não possa ser absorvida pela economia nacional em um horizonte de 25 anos. De fato, para essa potência, o volume médio de importação demandado é comparável às importações atuais de carvão pelo país. Além disso, tomando como referência o preço do carvão da África do Sul posto no porto do Rio de Janeiro (70 US\$/t), o valor das importações de carvão seria de, no máximo, US\$ 1,8 bilhões por ano, valor correspondente a apenas 1,5% das exportações brasileiras registradas em 2005 e a menos de 1% da corrente de comércio exterior do país nesse mesmo ano.

Contudo, uma expansão expressiva da geração termelétrica a carvão no país produzirá aumentos importantes nas emissões de gases. A instalação de apenas 5.000 MW deverá produzir emissões adicionais de gases de efeito estufa de pelo menos  $22,3 \times 10^6$  t CO<sub>2</sub>-eq/ano, para um fator de capacidade médio operativo de 60%. Esse volume de emissões é maior que o total de emissões no SIN em 2005. Vale dizer, uma potência que corresponde a menos de 6% da potência total instalada nesse sistema em 2005 mais que dobra o volume total de emissões de gases por ele produzido.

Não obstante, não se pode descartar o carvão como alternativa. Em primeiro lugar, o carvão é a mais abundante fonte de energia primária disponível no planeta. Em segundo lugar, o preço do carvão, não obstante refletir algum impacto das tendências do custo da energia, influenciadas pela flutuação nos preços internacionais, apresenta um grau de volatilidade relativamente baixo. Por fim, tem havido grandes avanços tecnológicos, e há vultosos investimentos em andamento, de modo a possibilitar um uso mais intenso do carvão, com o menor impacto ambiental possível. Nesse sentido, destacam-se a importante evolução na eficiência da geração termelétrica a carvão e, especialmente, as tecnologias de queima limpa do mineral (*clean coal technologies*).

Todo esse esforço em pesquisa e desenvolvimento parece indicar que o mundo não descarta, absolutamente, o uso do carvão como fonte primária para a geração de energia elétrica. A Agência Internacional de

Energia (IEA, 2004) considera, em seu cenário de referência, que o carvão deverá virtualmente manter sua participação no balanço energético global, respondendo por mais de 38% da produção mundial de eletricidade. Nesse cenário, a expansão da capacidade instalada evolui de 1.135 GW, em 2002 para 2.156 GW, em 2030, perfazendo uma média de instalação de novos 36.500 MW a cada ano.

A abundância das reservas de carvão, os avanços tecnológicos já consolidados e em desenvolvimento, o aumento esperado da demanda de energia, em especial da demanda por energia elétrica, são, portanto, os elementos básicos que sustentam a visão de que a expansão da geração termelétrica a carvão faz parte da estratégia da expansão da oferta de energia.

## 9. Referências Bibliográficas

### 9.1. Reuniões temáticas na EPE: carvão mineral

CARVALHO, C.H.B., **Oportunidades de negócios no setor elétrico com o uso do carvão mineral nacional**. Apresentação em powerpoint. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2006.

RESENDE, I. **Carvão Mineral no Brasil**. Apresentação em powerpoint. 2006

TRACTEBEL ENERGIA, **Carvão, usinas termelétricas e meio ambiente. Considerações**. Apresentação em powerpoint. 2006.

TRACTEBEL ENERGIA, **Carvão Mineral. Visão Estratégica Mundial**. Apresentação em powerpoint. 2006.

ZANCAN, F.L., **Carvão Mineral no Brasil**. Apresentação powerpoint. 2006.

### 9.2. Bibliografia

BORBA, R. F. **Balanco Mineral Brasileiro**. DNPM: Brasília, 2001.

BORGES, Ítalo Lopes. **Processo de Adequação Ambiental na Indústria Carbonífera: Estudo de Caso sobre a Implantação de um Sistema de Gestão Ambiental**. Tese de Mestrado. PPE/COPPE/UFRJ, 2004.

BP – British Petroleum. **BP Statistical Review of World Energy**. BP: London, 2005.

DERMAUT, J., GEERAERT, B. E. A. **A Better Understanding of Greenhouse gas Emissions for Different Energy Vectors and Applications**. World Energy Council: Brussels, 2005

DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral. **Anuário Mineral Brasileiro 2005**. Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasília: 2005.

EIA – Energy Information Administration. United States Department of Energy. **Annual Energy Outlook 2006**. EIA: Washington, 2006.

MME/EPE. **Balanco Energético Nacional 2005 – Ano Base 2004**. EPE: Rio de Janeiro, 2005.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2006 – Ano Base 2005 – Resultados Preliminares**. EPE: Rio de Janeiro, 2006b.

IEA - International Energy Agency. **Energy technologies for the 21st Century**. IEA: Paris, 1997.

IEA – International Energy Agency. **World Energy Outlook 2004**. IEA: Paris, 2004.

IEA – International Energy Agency. **Key World Energy Statistics 2005**. IEA: Paris, 2005.

WORLD COAL INSTITUTE. **The Coal Resource: A Comprehensive Overview of Coal**. Relatório disponível em <<http://www.worldcoal.org/pages/contents>>. Acesso em junho de 2006.



## **Participantes da Empresa de Pesquisa Energética – EPE**

### **Coordenação Geral**

Maurício Tiomno Tolmasquim  
José Carlos de Miranda Farias  
Amílcar Gonçalves Guerreiro

### **Coordenação Executiva**

Juarez Castrillon Lopes  
Ricardo Cavalcanti Furtado

### **Equipe Técnica**

Flavia Pompeu Serran  
Mirian Regini Nuti  
Amaro Olímpio Pereira Júnior



# GERAÇÃO TERMOELÉTRICA A PARTIR DO CARVÃO MINERAL: AVALIAÇÕES DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	117
2. Impactos potenciais da tecnologia de geração termoelétrica a partir do carvão mineral .....	120
3. Impactos causados pela cadeia produtiva do carvão mineral .....	126
3.1. A necessidade da consideração dos impactos da cadeia energética .....	126
3.2. Impactos da cadeia energética .....	126
4. Sustentabilidade da produção de energia a partir do carvão mineral .....	130
4.1. Indicadores de sustentabilidade .....	131
4.1.1. Tipos de Indicadores.....	131
4.1.2. Indicadores ambientais .....	131
4.1.3. Indicadores socioeconômicos .....	133
5. Benefícios socioambientais.....	134
6. Custos socioambientais .....	134
6.1. Considerações iniciais.....	134
6.2. Custos socioambientais e externalidades.....	135



## GERAÇÃO TERMOELÉTRICA A PARTIR DO CARVÃO MINERAL: AVALIAÇÕES DOS IMPACTOS AMBIENTAIS

### SUMÁRIO

Continuação

<b>7. Desenvolvimento tecnológico em médio prazo .....</b>	<b>137</b>
<b>7.1. Preparação do carvão.....</b>	<b>137</b>
<b>7.2. Redução das emissões.....</b>	<b>138</b>
7.2.1. Precipitadores eletrostáticos .....	138
7.2.2. Filtros de manga .....	138
7.2.3. Dessulfurização dos gases.....	139
7.2.4. Sistemas de limpeza com gás quente.....	139
7.2.5. <i>Selective Catalytic Reduction</i> e <i>Selective Non-catalytic Reduction</i> ....	139
7.2.6. Lavadores úmidos.....	139
<b>7.3. Tecnologias de combustão eficiente .....</b>	<b>139</b>
7.3.1. Combustão Pulverizada do Carvão (PCC).....	139
7.3.2. Combustão em leito fluidizado (FBC).....	140
7.3.3. Combustão em leito fluidizado pressurizado (PFBC) .....	140
7.3.4. Gaseificação integrada com ciclo combinado (IGCC).....	140
7.3.5. Combustão de carvão pulverizado pressurizado .....	140
7.3.6. Supercritical e ultrasupercritical .....	141
<b>7.4. Captura e armazenamento do CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>142</b>
7.4.1. Projeto Futuregen .....	142
7.4.2. Estocagem geológica de CO <sub>2</sub> .....	142
<b>8. Considerações finais .....</b>	<b>143</b>
<b>9. Referências bibliográficas .....</b>	<b>144</b>



## 1. Introdução

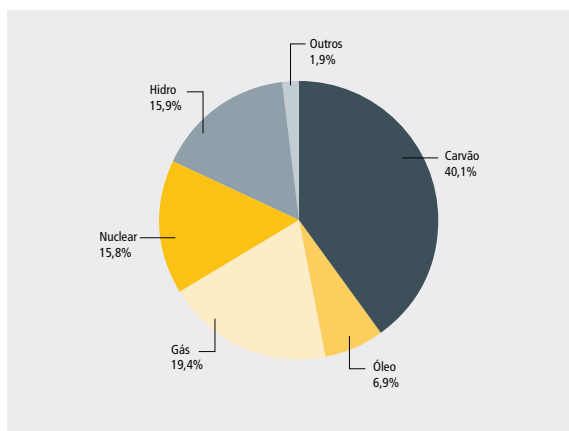
Este trabalho objetiva apresentar os efeitos socioambientais decorrentes da utilização de carvão mineral para a produção de energia elétrica, dentro do contexto que esta fonte de energia constitui-se em um dos vários tipos de fontes que podem ser empregados pelo setor elétrico, devendo, portanto, ser analisada dentro de um ponto de vista sistêmico.

De acordo com o World Coal Institute – WCI (2003), o carvão mineral é a principal fonte primária de geração de energia elétrica, responsável por cerca de 40% de toda a eletricidade gerada no planeta em 2003 (Figura 1), sendo considerada, atualmente, como a fonte orientadora da política energética mundial, principalmente devido à abundância, à segurança de abastecimento e preço (WCI, 2005). Países como a Alemanha, que tem 52,2 % de sua energia gerada a carvão e países como os USA, Polônia, Austrália e África do Sul têm no carvão a sua base de geração de energia elétrica devido à segurança de suprimento e menor custo.

O carvão mineral é o mais abundante dos combustíveis fósseis, com reservas provadas da ordem de 1 trilhão de toneladas, distribuídas por 75 países, o suficiente para atender à demanda atual por mais de duzentos anos.

Espera-se, ainda, um crescimento da ordem de 2% ao ano até 2030, segundo dados do International Energy Agency - IEA. Novas tecnologias de utilização de carvão desenvolvidas e aplicadas ao longo das últimas décadas têm aumentado a eficiência das plantas e diminuído substancialmente as emissões atmosféricas.

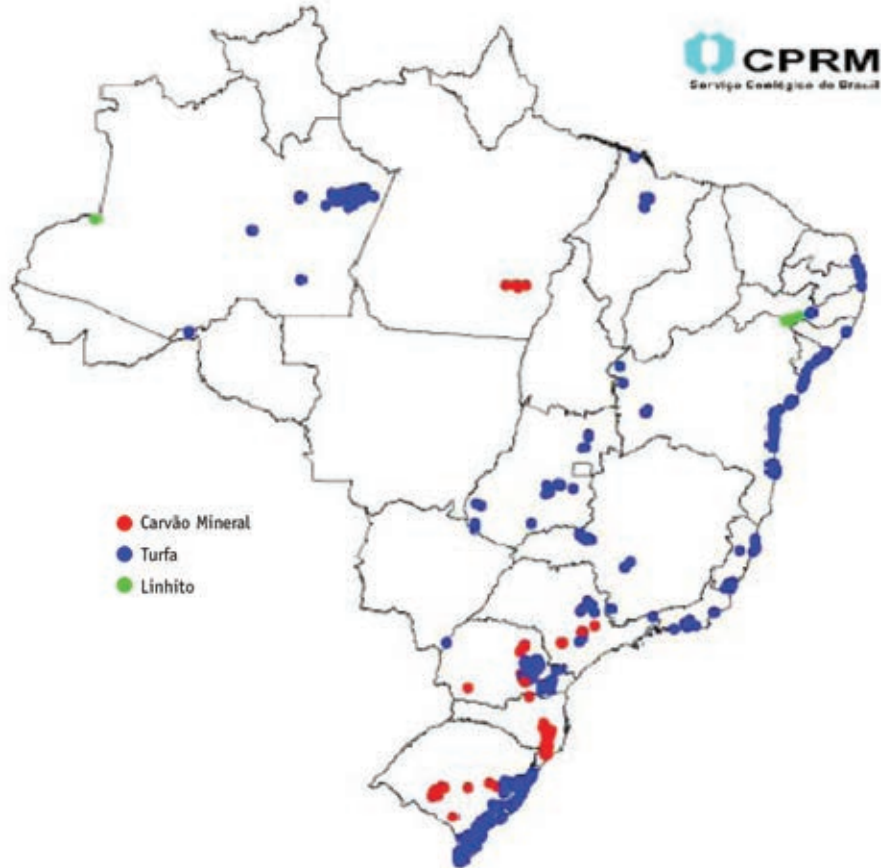
Figura 1 – Participação de fontes primárias na geração de energia elétrica no mundo



Fonte: WCI, 2005.

O Brasil possui importantes reservas de carvão mineral, localizadas em sua maior parte (90%) no Rio Grande do Sul, nas regiões de Candiota, Baixo Jacuí e litoral (MME/EPE, 2006), conforme indicado na Figura 2.

Figura 2 – Principais ocorrências de carvão mineral, linhito e turfa do Brasil



Fonte: Mapa de Recursos Minerais Industriais e Energéticos do Brasil, CPRM, 2001  
Escala 1:2.500.000.

O carvão brasileiro é classificado como um carvão de baixa qualidade por apresentar como características básicas o elevado teor de inertes (cinzas), enxofre e voláteis. Segundo os levantamentos disponíveis, atualmente, as reservas brasileiras de carvão estão localizadas principalmente na região Sul, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Em termos energéticos, o carvão nacional pode ser caracterizado conforme os indicadores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos carvões das jazidas nacionais

Jazida	Poder Calorífico (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Cambuí (PR)	4.850	30	45	6,0
Sapopema (PR)	4.900	30,5	43,5	7,8
Barro Branco (SC)	2.700	21,4	62,1	4,3
Bonito (SC)	2.800	26,5	58,3	4,7
Candiota (RS)	3.200	23,3	52,5	1,6
Santa Teresinha (RS)	3.800-4.300	28,0-30,0	41,0-49,5	0,5-1,9
Morungava/Chico Lomã (RS)	3.700-4.500	27,5-30,5	40,0-49,0	0,6-2,0
Charqueadas (RS)	2.950	24,3	54,0	1,3
Leão (RS)	2.950	24,1	55,6	1,3
Iruí (RS)	3.200	23,1	52,0	2,5
Capané (RS)	3.100	29,5	52,0	0,8

Fonte: Informativo Anual da Indústria Carbonífera, Dep. Nacional de Produção Mineral – DNPM, 2000.

O baixo poder calorífico tem como consequência um maior consumo do energético para a produção de energia elétrica. Em relação ao padrão norte-americano para especificação de caldeiras a vapor (6.210 kcal/kg), pode-se dizer que se gasta praticamente o dobro da quantidade de carvão de Candiota para produzir a mesma quantidade de energia elétrica.

Adicionalmente, o elevado conteúdo de inertes do carvão nacional inviabiliza seu transporte, em termos econômicos. Desse modo, todas as iniciativas para desenvolver o uso do carvão nacional na termelétricidade sempre acolheram o paradigma de que as usinas deveriam situar-se nas proximidades das minas, com utilização, preferencialmente, do carvão “in natura”. De fato, todas as termelétricas a carvão em operação no Brasil, e mesmo as em construção ou projeto, localizam-se “na boca da mina”. Nessas condições, a hipótese de térmicas a carvão fora da região Sul tem sido associada à importação do energético.

A potência total instalada e em operação em termelétricas a carvão mineral no Brasil é de 1.415 MW. Todas as usinas estão localizadas nos estados da região Sul, próximas às minas de carvão (Tabela 2). Assim, como parcela significativa das usinas termelétricas existentes no mundo, as usinas brasileiras estão no final de sua vida útil, embora deva ser considerado que o nível de utilização (fator de capacidade médio) é bem menor no Brasil que em outros países.

Tabela 2 – Usinas termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil

Usina	Empresa	Município	UF	Potência (MW)
São Jerônimo	CGTEE	São Jerônimo	RS	20
Presidente Médici A/B	CGTEE	Candiota	RS	446
Figueira I	Copel	Figueira	PR	20
Jorge Lacerda A	Tractebel	Capivari de Baixo	SC	232
Jorge Lacerda B	Tractebel	Capivari de Baixo	SC	262
Jorge Lacerda IV	Tractebel	Capivari de Baixo	SC	363
Charqueadas	Tractebel	Capivari de Baixo	SC	72
<b>Total</b>				<b>1.415</b>

Fonte: MME/EPE, 2006

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica – PDEE 2006-2015, encontram-se em construção, com início de operação prevista para 2009 e 2010, mais dois empreendimentos na região Sul, totalizando 700 MW. A energia dessas usinas (Tabela 3) já foi totalmente contratada no leilão de energia nova realizado em dezembro de 2005 (MME/EPE, 2006).

Tabela 3 – Novas usinas termelétricas a carvão mineral no Brasil (entrada prevista até 2010)

Usina	Empresa	Município	UF	Potência (MW)
Jacuí	ELEJA	Charqueadas	RS	350
Candiota III	CGTEE	Candiota	RS	350
<b>Total</b>				<b>700</b>

Fonte: MME/EPE, 2006

Em fase de estudos de viabilização técnico-econômica e socioambiental, existem cinco outros projetos (Tabela 4) que totalizam uma potência instalada de 3.148 MW (MME/EPE, 2006). Desses, apenas o projeto de Sepetiba, no Estado do Rio de Janeiro, prevê a utilização de carvão importado.

Tabela 4 – Projetos de usinas termelétricas a carvão mineral em estudos

Usina	Empresa	Município	UF	Potência (MW)
Seival	COPELMI	Candiota	RS	562
CTSul	CTSul	Cachoeira do Sul	RS	650
Figueira II	Copel	Figueira	PR	126
Usitesc	Usitesc	Treviso	SC	440
Sepetiba	Itaguaí Energia	Itaguaí	RJ	1.370
<b>Total</b>				<b>3.148</b>

Fonte: MME/EPE, 2006

## 2. Impactos potenciais da tecnologia de geração termelétrica a partir do carvão mineral

Nesta seção são discutidos os impactos negativos causados durante a produção de energia elétrica a partir do carvão mineral. Os demais impactos causados ao longo da cadeia energética completa, desde a mineração do carvão até o tratamento e disposição dos resíduos e descomissionamento da usina são apresentados na Seção 3.

Para a indicação inicial dos impactos da produção de energia elétrica por usinas a carvão mineral foi utilizada a proposta adotada pelo Comitê Coordenador das Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico - COMASE, quando estabeleceu o “Referencial para Orçamentação dos Programas Socioambientais”, abordando usinas hidroelétricas, usinas térmicas convencionais e sistemas de transmissão, trabalhos estes publicados em 1994 (COMASE, 1994).

Os impactos socioambientais discutidos nesta seção referem-se a qualquer alteração nas características físicas, químicas ou biológicas do ambiente, causada por qualquer forma de material ou energia resultante de uma atividade humana, que direta ou indiretamente afete a saúde humana, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições sanitárias e estéticas do ambiente, e a



qualidade dos recursos naturais.

A Tabela 5 apresenta os impactos socioambientais causados durante a construção e operação normal de usinas termelétricas a carvão mineral. A tabela apresenta os impactos de uma forma geral, uma vez que os impactos específicos causados por uma usina em particular dependem do tipo de usina, da tecnologia do combustível empregado, das condições do sítio e das práticas de gerenciamento empregadas pelo pessoal da empresa operadora.

A tabela segue a seguinte estrutura:

**Coluna 1:** Identificação das possíveis causas (aspectos) dos impactos socioambientais. Nesta fase, a severidade de cada impacto não foi considerada por ser ela dependente das condições específicas de cada projeto;

**Coluna 2:** Tipos de impactos socioambientais que possam ocorrer devido às causas indicadas na coluna 1. Os impactos potenciais estão listados de forma genérica, sem considerar as características específicas da usina e a efetividade das medidas que objetivam evitar ou mitigar os impactos indicados.

**Coluna 3:** Tempo de ocorrência (TO) do impacto (construção, operação ou pós-operação).

**Coluna 4:** Identificação dos programas e medidas que possam ser utilizadas para mitigar os impactos ou compensar a população direta ou indiretamente envolvida pelo projeto pelos danos causados. Tais medidas podem ser adaptadas para cada tipo de usina, tanto durante o projeto da usina ou por ocasião de uma possível parada para introduzir melhorias em uma usina em operação, processo estes (“retrofit”) que são utilizados freqüentemente. Muitas das medidas indicadas podem ser implantadas simultaneamente.

Tabela 5 – Impactos socioambientais decorrentes da construção e operação de usinas termelétricas a carvão mineral

Causas	Impactos	TO	Medidas /Ações / Projetos /Programas
Ocupação do solo (preparação, terraplenagem, desmatamento, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- interferência com população local</li> <li>- interferência com flora e fauna</li> <li>- produção de ruído e poeira</li> <li>- erosão do solo</li> <li>- alteração do uso do solo</li> <li>- emissão de gases de efeito estufa e causadores de deposição ácida pelas máquinas e caminhões utilizando derivados de petróleo</li> </ul>	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- compensação monetária ou permuta de áreas</li> <li>- recuperação das áreas degradadas</li> <li>- arborização - criação de cinturões verdes</li> <li>- utilização de sistemas anti-poeiras</li> <li>- regulação das máquinas utilizadas evitando produção de ruídos e emissões desnecessárias</li> </ul>
Transporte de equipamento pesado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- poluição sonora</li> <li>- perturbação do trânsito local</li> </ul>	C	<ul style="list-style-type: none"> <li>- planejamento do sistema de tráfico de modo a se evitar os horários de pico</li> </ul>
Movimentos migratórios causados pela construção da usina	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aumento da demanda por serviços públicos, habitação e infra-estrutura de transporte</li> <li>- alteração da organização sócio-cultural e política da região</li> <li>- aumento das atividades econômicas da região com possível posterior retração após o término do empreendimento.</li> </ul>	C/O	<ul style="list-style-type: none"> <li>- apoio na construção do Plano Diretor do Município</li> <li>- adequação das infra-estruturas de habitação, educação e transporte</li> <li>- gestão institucional</li> <li>- reorganização das atividades econômicas</li> <li>- organização das condições sanitárias e de saúde</li> </ul>
Distorção estética	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poluição visual</li> </ul>	C/O	<ul style="list-style-type: none"> <li>Projetos paisagísticos e arquitetônicos para redução do impacto visual</li> </ul>

Tabela 5 – Impactos socioambientais decorrentes da construção e operação de usinas termelétricas a carvão mineral

Causas	Impactos	TO	Medidas /Ações / Projetos /Programas
Produção de efluentes sanitários	<ul style="list-style-type: none"> <li>- disseminação de doenças</li> <li>- diminuição de oxigênio dissolvido nos corpos receptores</li> <li>- interferência com fauna e flora aquáticas</li> </ul>	C/O	<ul style="list-style-type: none"> <li>- utilização de sistemas compactos para tratamento de esgotos (separado do tratamento de outros efluentes líquidos)</li> </ul>
Percolação da água da chuva nas áreas de estocagem de combustível fóssil	<ul style="list-style-type: none"> <li>- contaminação dos cursos de água com metais lixiviados, sólidos suspensos e dissolvidos e alteração do pH</li> <li>- contaminação do lençol freático</li> </ul>	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- instalação de bacias de sedimentação ou decantação</li> <li>- neutralização ou co-neutralização dos efluentes</li> <li>- precipitação química de metais dissolvidos</li> <li>- impermeabilização de áreas de estocagem e instalação de contenções</li> <li>- monitoramento do lençol freático</li> </ul>
Produção de ruído	<ul style="list-style-type: none"> <li>- poluição sonora no interior e fora da usina</li> </ul>	C/O	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Projetos e programas específicos para redução de ruído</li> <li>- monitoramento de ruídos</li> </ul>
Produção de emissões aéreas de material particulado	<p>Dependendo da concentração:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- problemas respiratórios nos trabalhadores e populações próximas</li> <li>- interferência na flora e na fauna</li> <li>- efeito estético indesejável</li> </ul>	C/O	<ul style="list-style-type: none"> <li>- utilização de combustível com menores teores inertes</li> <li>- remoção dos inertes antes da combustão (beneficiamento)</li> <li>- remoção dos inertes após a combustão (filtros)</li> <li>- dispersão em chaminés adequadas</li> <li>- utilização de tecnologias modernas de combustão com maior eficiência (leito fluidizado, ciclo combinado e cogeração)</li> <li>- monitoramento das emissões, da qualidade do ar, das chuvas, das águas e das condições meteorológicas</li> </ul>
Produção de emissões aéreas de óxidos de enxofre (SO <sub>x</sub> )	<p>Dependendo da concentração:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- cheiro irritante</li> <li>- problemas respiratórios e cardiopulmonares nos trabalhadores e populações próximas</li> <li>- interferência na flora e fauna</li> <li>- agressão a materiais diversos</li> <li>- participação na acidificação das chuvas</li> </ul>	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- utilização de combustível com menor teor de enxofre</li> <li>- remoção do enxofre antes da combustão (beneficiamento)</li> <li>- remoção do enxofre durante a combustão (com adição de neutralizantes)</li> <li>- remoção do enxofre após a combustão (dessulfurizadores)</li> <li>- dispersão em chaminés adequadas</li> <li>- utilização de tecnologias modernas de combustão com maior eficiência (leito fluidizado, ciclo combinado e cogeração)</li> <li>- monitoramento das emissões, da qualidade do ar, das chuvas, das águas e das condições meteorológicas</li> </ul>
Produção de emissões aéreas de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- contribuições para o efeito estufa</li> </ul>	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>- implantação e manejo de florestas na região para fixação do carbono</li> <li>- utilização de tecnologias modernas de combustão com maior eficiência (leito fluidizado, ciclo combinado e cogeração)</li> </ul>

Tabela 5 – Impactos socioambientais decorrentes da construção e operação de usinas termelétricas a carvão mineral

Causas	Impactos	TO	Medidas /Ações / Projetos /Programas
Produção de emissões aéreas de óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ), hidrocarbonetos e monóxido de carbono (CO)	Dependendo da concentração: - produção de oxidantes fotoquímicos - diminuição da visibilidade (smog) - irritação nos olhos e garganta - interferência na flora e fauna - participação na acidificação das chuvas	0	- controle da combustão - utilização de sistema de queima tangencial - adoção de queimadores de baixa emissão de NOX - dispersão em chaminés adequadas - utilização de tecnologias modernas de combustão com maior eficiência (leito fluidizado, ciclo combinado e cogeração) - monitoramento das emissões, da qualidade do ar, das chuvas, das águas e das condições meteorológicas
Vazamentos involuntários do sistema de manuseio e estocagem de combustíveis líquidos	- contaminação dos cursos de água - interferência na flora e fauna aquáticas - contaminação do lençol freático	0	- implantação de sistemas de retenção de óleo (caixas separadoras, diques de contenção e bacias de emergência) - impermeabilização das áreas de estocagem
Produção de efluentes líquidos da drenagem pluvial, lavagens, tratamento de água e purgas de processo	- elevação do teor de sólidos suspensos e dissolvidos nos cursos de água - interferência na flora e fauna aquáticas	0	- sistemas enclausurados de manuseio de combustível sólido e cinzas - cuidados operacionais evitando o espalhamento de partículas combustíveis e cinzas no pátio da usina - bacias de sedimentação e neutralização - monitoramento dos efluentes líquidos
Produção de efluentes líquidos do sistema de remoção de cinzas pesadas	- contaminação dos cursos de água com sólidos suspensos e dissolvidos, metais lixiviados e alteração do pH	0	- circuito fechado com recirculação - decantadores e bacias de sedimentação - correção de pH e precipitação de metais - uso de sistemas de remoção de cinzas a seco - monitoramento da qualidade da água
	Dependendo da tecnologia empregada:  <u>Sistema aberto:</u> - elevação da temperatura da água no corpo receptor - redução de oxigênio dissolvido - interferência com fauna e flora aquáticas		- estudos de dispersão térmica no corpo receptor de água - avaliação dos impactos no ecossistema aquático - monitoração do ecossistema
Produção de efluente proveniente do Sistema de água de resfriamento	<u>Sistema fechado/torre úmida:</u> - névoa quimicamente ativa (biocidas e agentes anti-corrosivos) - redução da visibilidade - interação da névoa úmida com a pluma da chaminé (causando acidificação da atmosfera)  <u>Sistema fechado/torre seca de refrigeração:</u> - alguns (pequenos) impactos na atmosfera e recursos hídricos	0	- utilização de torres com sistemas de diminuição de névoa (“demisters”) - localização das torres levando em conta os ventos predominantes na região - medidas para evitar a superposição da névoa com a pluma  - verificação da interferência aerodinâmica da torre de refrigeração com as condições de dispersão da pluma da chaminé

Tabela 5 – Impactos socioambientais decorrentes da construção e operação de usinas termelétricas a carvão mineral

Causas	Impactos	TO	Medidas /Ações / Projetos /Programas
Produção de resíduos sólidos oriundos do processo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- efeito estético indesejável</li> <li>- ocupação de áreas extensas de depósito</li> <li>- possibilidade de contaminação de recursos hídricos devido a percolação das chuvas</li> <li>- poeiras / partículas fugitivas</li> </ul>	O/PO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- utilização dos resíduos sólidos (reaproveitamento) como matéria prima para outros processos industriais</li> <li>- retorno às cavas da mina para reconstituição topográfica da área minerada de carvão</li> <li>- seleção de áreas adequadas para disposição temporária dos resíduos</li> <li>- implantação de aterro de resíduos conforme especificação do órgão ambiental</li> <li>- monitoramento da drenagem pluvial e lixiviados</li> <li>- cortinas vegetais de proteção contra ventos</li> </ul>

Fonte: MME/ELETRORBRÁS/COMASE. Referencial para Orçamento dos Programas Socioambientais. Vol.II – Usinas Termelétricas. Rio de Janeiro, 1994..

Legenda: TO - Tempo de Ocorrência; C - Construção; O - Operação; PO - Pós-operação

Um dos impactos socioambientais mais importantes decorrentes da operação de usinas termelétricas a carvão mineral é a geração de CO<sub>2</sub>, um gás de efeito estufa (GEE).

Os gases de efeito estufa, emitidos em razão das atividades antrópicas, decorrem principalmente da queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) em usinas termelétricas, indústrias, veículos em circulação e sistemas domésticos de aquecimento, além de atividades agro-pastoris, lixões e aterros sanitários.

Gases como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozônio troposférico (O<sub>3</sub>) e clorofluorcarbonos (CFCs) absorvem a radiação infravermelha criada quando a luz visível do sol incide sobre a terra. Essa absorção impede que parte do calor seja devolvida ao espaço, causando o aumento da temperatura na superfície da Terra.

A Convenção sobre Mudanças Climáticas é um acordo das Nações Unidas para estabilizar os GEE na atmosfera a um nível que impeça a ocorrência de mudanças climáticas danosas. Foi convocada na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) realizada no Rio de Janeiro, em 1992. Até hoje, 186 países ratificaram a Convenção.

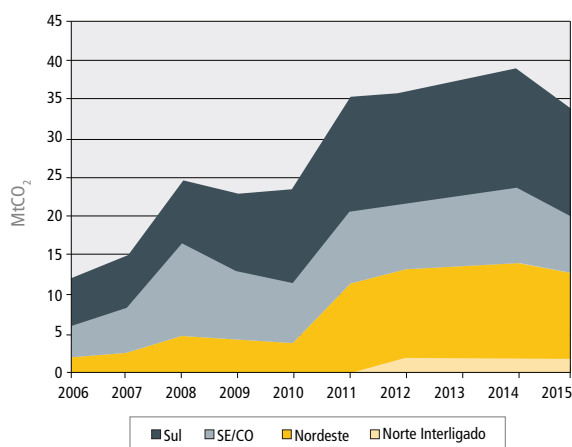
Para implantá-la, foi criado um protocolo na cidade de Quioto, em 1997. O aspecto mais importante do Protocolo de Quioto consiste no compromisso legal assumido por 39 países desenvolvidos no sentido de reduzir suas emissões de GEE em 5,2%, em média, abaixo dos níveis de 1990. Esse nível de emissão deve ser alcançado no período 2008–2012, denominado o “primeiro período de compromisso”. Os países desenvolvidos que possuem metas de redução de emissão são chamados de países do Anexo 1, ao passo que os que não têm metas (países em desenvolvimento, incluindo o Brasil) são os países Não-Anexo 1. O Protocolo de Quioto permite que os países desenvolvidos alcancem suas metas de diferentes formas através dos “Mecanismos de Flexibilidade”. Dentre esses mecanismos, destacam-se o Comércio de Emissões (comércio de cotas de emissão entre as nações desenvolvidas), a Implementação Conjunta (transferência de cotas de emissão entre as nações desenvolvidas vinculadas a projetos específicos de redução de emissão) e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL.

As principais medidas que podem ser tomadas para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> são (HOSKYN et al apud LORA, 2002):

- eficiência e conservação da energia;
- substituição de combustíveis;
- utilização de fontes renováveis de energia;
- captura e deposição do CO<sub>2</sub>.

O Plano Decenal de Expansão da Energia Elétrica 2006 - 2015 menciona a expansão da geração termelétrica, ressaltando que dos 7.600 MW previsto para entrar em operação no horizonte do Plano, somente 54% são provenientes de combustíveis fósseis (gás natural, carvão, óleo combustível e óleo diesel). Nesse caso as emissões de GEEs foram estimadas em, aproximadamente, 30 Mt CO<sub>2</sub> para 2014, ou seja um aumento de cerca de 3 vezes o valor das emissões estimadas para 2006 (12,2 Mt CO<sub>2</sub>), conforme apresenta a Figura 3.

Figura 3 - Estimativas das emissões de CO<sub>2</sub> (2006 – 2015)



Fonte: MME/EPE, PDEE 2006-2015, 2006.

Pode ser observado um significativo aumento das emissões provenientes do subsistema Sul, a partir de 2010, função da entrada em operação das térmicas de Jacui e Candiota 3. No Nordeste, registra-se o aumento da geração por meio do gás natural a partir de 2011.

A queima de carvão, sem controle ambiental adequado, além de contribuir com o aumento do efeito estufa, produz alguns gases que são responsáveis pela formação da chuva ácida, principalmente o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). O SO<sub>2</sub> reage com o oxigênio e com a água presentes na atmosfera transformando-se em ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e se precipita na forma de chuva ácida. Um agravante para esta questão é quando ocorre sinergia entre material particulado e o SO<sub>2</sub>. O material particulado age como um catalisador para a reação que origina o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, tornando mais fácil e rápida a formação da chuva ácida. Os óxidos de nitrogênio (NOX) também contribuem para a chuva ácida com formação do ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) quando associados à água existente na atmosfera. O SO<sub>2</sub> e o NOX podem causar danos tanto pela precipitação seca, que se depõe sobre a vegetação e as estruturas (monumentos, prédios, etc.), como pela precipitação úmida, dissolvidos na chuva ou em vapores d'água atmosféricos.

A chuva ácida pode provocar a acidificação do solo e da água e, conseqüentemente, alterações na biodi-

versidade, entre outros impactos negativos, como a corrosão de estruturas metálicas.

Outra questão relevante no que diz respeito às termelétricas a carvão mineral é a geração de resíduos sólidos. Dentre as termelétricas, as usinas a carvão são as que produzem maior quantidade de resíduos sólidos. Incluem cinzas leves ou secas, pesadas ou úmidas e lama do sistema de dessulfuração de gases, quando esse é utilizado. Sedimentos do sistema de tratamento de efluentes líquidos e eventuais resíduos na preparação dos combustíveis compõem os resíduos sólidos em menor escala (MEDEIROS, 2003).

As cinzas secas, devido suas propriedades químicas, físicas e pozolâmicas têm grande aceitação na indústria de cimento, além de ser utilizada também na fabricação de cerâmicas, vidros e tintas (SANTOS, 2002). A quantidade de cinza seca não comercializada é convertida em cinza úmida e transportada para áreas de deposição de cinza (MEDEIROS, 2003). No Brasil, essas áreas consistem em aterros (bacias) ou nas próprias cavas de mineração.

### **3. Impactos causados pelas instalações e atividades da cadeia de produção energética**

---

Nesta seção são abordados os impactos associados com a cadeia completa de produção energética, a partir do carvão mineral. O objetivo primordial desta abordagem é de ilustrar a ampla gama de rejeitos e emissões que devem ser considerados em qualquer comparação entre as diversas fontes de energia. São indicados, sempre que possível, as características básicas e valores aproximados das grandezas envolvidas, devendo-se sempre tomar em consideração que as quantidades de rejeitos e emissões por unidade de energia elétrica produzida podem ser reduzidas significativamente com a evolução da tecnologia e com melhoria de práticas operacionais, mesmo para usinas já existentes (WMO, 2000; IAEA-TECDOC, 1995).

#### **■ 3.1. A necessidade da consideração dos impactos da cadeia energética**

Embora somente uma etapa dentro da cadeia energética de cada combustível, a da geração de energia por usinas elétricas, seja de responsabilidade direta do setor elétrico, é fundamental que, na comparação de todas as opções disponíveis, sejam considerados os impactos da cadeia energética completa, uma vez que sua própria existência decorre da etapa de geração.

Por isto, o setor elétrico também é indiretamente responsável pelos eventuais impactos de toda a cadeia energética. Assim, não só o gerenciamento e deposição de rejeitos, que são de responsabilidade direta do setor elétrico, devem ser considerados, mas também os impactos da cadeia energética completa que podem afetar a sociedade como um todo.

#### **■ 3.2. Impactos da cadeia energética**

As cadeias energéticas - fóssil, nuclear e energias renováveis - apresentam várias opções tecnológicas, cada uma delas produzindo uma gama de rejeitos e efeitos socioeconômicos. A cadeia de produção energética a partir do carvão mineral inclui várias etapas que variam de acordo com a tecnologia empregada, podendo, no entanto, ser generalizada como se segue:

- exploração e mineração do carvão;
- beneficiamento do carvão;

- transporte do carvão;
- armazenamento do carvão;
- queima do carvão para produção de energia;
- disposição e gerenciamento dos resíduos.

A produção e uso do carvão mineral implicam em impactos socioambientais importantes como acontecem com todas as explorações de recursos minerais e produção de energia. Além da atividade de mineração, que impacta os recursos ambientais e sociais dos sítios onde localizam-se as jazidas, têm-se ainda, a composição do minério que é fator desencadeante de diversos impactos.

O carvão é constituído por matéria orgânica sólida, principalmente de origem vegetal, fossilizada ao longo de milhões de anos. Sua qualidade é determinada pelo conteúdo de carbono e varia de acordo com o tipo e o estágio dos componentes orgânicos.

A atividade de extração do carvão mineral é realizada por dois tipos de lavras: a mineração de subsolo e a mineração a céu aberto. A mineração de carvão no Brasil teve a sua imagem muito ligada às cenas degradantes de algumas regiões carboníferas no país. Durante anos, praticou-se a mineração com alto grau poluidor que comprometeu os recursos naturais de algumas regiões. No entanto, a partir dos anos oitenta, a mineração de carvão mineral no Brasil iniciou um processo de desenvolvimento e implementações de projetos de controle ambiental nas minas e de recuperação das áreas mineradas. Na atualidade, os projetos de minas têm como concepção básica a implementação do controle ambiental no sentido de prevenir e mitigar os impactos socioambientais.

Os projetos modernos de mineração utilizam a etapa do planejamento como uma das principais medidas preventivas em termos ambientais, sendo que a partir dessa prevenção, a degradação de um sítio de mina é muito minimizada e os projetos de recuperação das áreas apresentam resultados com taxas mais efetivas de sucesso.

Em termos de impactos potenciais, a mineração de subsolo ou subterrânea apresenta vantagens em termos ambientais no que se refere à baixa degradação de áreas. No entanto, apresenta como principais impactos negativos a necessidade de dispor em aterros construídos os rejeitos do beneficiamento do carvão. Estes rejeitos apresentam elementos e características, que se dispostos sem controle, provocam a degradação de áreas e contaminação hídrica. No caso da mineração de céu aberto, estes rejeitos são dispostos nas cavas das minas sendo cobertos após a reconstituição do terreno.

A mina a céu aberto apresenta como principal impacto potencial as alterações nos solos e na superfície da área onde localiza-se a jazida explorada. Ao alterar a superfície do terreno, a mineração desencadeia os impactos na paisagem, na biota (flora e fauna) e na morfologia do solo. A drenagem da mina pode provocar impacto nos corpos hídricos naturais se não houver direcionamento e tratamento adequado dos efluentes (águas sulfurosas). A Tabela 6 apresenta os principais impactos potenciais que podem ocorrer nas atividades de mineração.

Tabela 6 - Principais impactos socioambientais potenciais decorrentes das atividades de mineração do carvão mineral

<b>Ar</b>	Poeira
	Gases nos túneis das minas de subsolo
	Ruídos, vibrações pelas detonações
	Fontes pontuais de contaminação
<b>Solo</b>	Geração de resíduos
	Alteração na vegetação e fauna
	Variação na morfologia do terreno
	Cavidades subterrâneas
<b>Água Superficial</b>	Alteração nas características do solo
	Alteração no uso do solo
	Alterações físico-químicas dos mananciais hídricos
	Sólidos em suspensão
	Alteração dos cursos d'água
<b>Água Subterrânea</b>	Criação de novos corpos hídricos
	Captação de Água para o beneficiamento
	Contaminação química
	Alteração na profundidade do nível d'água
<b>Sociais</b>	Variação nas propriedades dos aquíferos
	Deslocamento de populações
	Alteração de atividades econômicas
	Oferta de empregos

Fonte: CETEM/MCT, 2001

As práticas atuais de mineração, no mundo e no Brasil, apresentam um cenário muito positivo em termos de controle ambiental. As ações enfocam principalmente a prevenção de impactos e um nível muito bom de ações corretivas. Entre as principais ações que são adotadas, são listadas as principais a seguir:

- planejamento de lavra;
- projetos de drenagens;
- tratamentos de efluentes de beneficiamento e das cavas de mineração;
- recuperação das áreas mineradas;
- disposição dos resíduos sólidos em aterros;
- controle de detonações;
- recuperação das Áreas mineradas;
- planejamento e negociações com as comunidades;
- novos usos das áreas recuperadas.

Os exemplos atuais de mineração de carvão no Brasil permitem equiparar as nossas minas com os melhores exemplos de mineração executados nos países com tradição de mineração. Abaixo são apresentadas algumas figuras cedidas pela Copelmi Mineração Ltda. A Figura 4 apresenta a mina do Recreio no município de Butiá, RS, sendo possível visualizar a cava com as atividades de terraplenagem e, ao fundo, a superfície sendo reconstituída com argilas e solo vegetal e a área já revegetada e reflorestada. A Figura 5 apresenta uma área recuperada na mina Butiá Leste no mesmo município.



Figura 4 - Mina do Recreio no município de Butiá, RS



Figura 3-2 - Área recuperada na mina Butiá Leste (Butiá, RS)



O beneficiamento do carvão gera rejeitos sólidos, que também são depositados no local das atividades. A posterior separação de carvão coqueificável de outras frações de menor qualidade forma novos depósitos, que cobrem muitos hectares de solos cultiváveis.

No Brasil, a região Sul é a que apresenta maiores transtornos relacionados ao impacto da extração de carvão, sendo as cidades de Siderópolis e Criciúma as mais afetadas e que apresentam maiores reflexos socioambientais.

Cabe destacar, no entanto, que os impactos das atividades relacionadas a produção de energia a partir do carvão mineral, dependem da composição do combustível a ser queimado, do processo de queima ou remoção pós-combustão e, ainda, das condições de dispersão dos poluentes (altura da chaminé, relevo e meteorologia).

#### 4. Sustentabilidade da produção de energia a partir do carvão mineral

---

A disponibilidade de energia é indispensável para o bem-estar das gerações atuais e futuras, inclusive para a eliminação de desigualdades e aumento dos padrões de vida.

Embora essencial para o desenvolvimento, a energia se constitui em um meio para atingir um fim e este fim é um padrão de vida adequado, uma economia sustentável e um meio ambiente limpo. Nenhuma forma de energia (carvão, óleo, gás, solar, nuclear, hidroelétrica e eólica), é boa ou ruim em si. Elas só podem ser consideradas de valor se puderem satisfazer este fim.

Atualmente, a maior parte do suprimento de energia no mundo, baseada nos recursos limitados de energia fóssil, pode ser considerada não sustentável ambientalmente. Por outro lado, não há nenhuma tecnologia de produção ou conversão de energia que não apresente riscos ou não acarrete impactos socioambientais. Ao longo da cadeia energética, desde a extração do recurso até a deposição de rejeitos/cinzas, são produzidos e emitidos poluentes, muitos podendo causar sérios danos à saúde e impactos ambientais. Mesmo se alguma tecnologia não emitir substâncias perigosas durante a produção de energia, podem ocorrer emissões de poluentes durante a construção e fabricação dos componentes principais das usinas produtoras ou ao longo de outras fases da sua cadeia energética.

Ao se escolher as fontes de energia e respectivas tecnologias para produção, suprimento e uso da energia, é importante que se tome em consideração as conseqüências econômicas, sociais e ambientais desta escolha. Assim, os planejadores necessitam de métodos para avaliar e mensurar, se possível, os efeitos presentes e futuros da utilização da energia sobre a saúde humana, sociedade, ar, solo e água. É necessário avaliar se a presente utilização energética é sustentável e caso não seja, como alterar o rumo do desenvolvimento. Este, no fundo, é o objetivo de estabelecimento de indicadores de sustentabilidade que tratem de aspectos importantes no que tange às três dimensões do desenvolvimento sustentável, o econômico, o social e o ambiental.

Dentro deste contexto, o próximo item discute os indicadores apropriados para se determinar as condições de sustentabilidade da energia gerada a partir do carvão mineral.

#### ■ 4.1. Indicadores de sustentabilidade

##### ■ 4.1.1. Tipos de Indicadores

Durante os últimos anos, tem-se discutido intensamente o tema da sustentabilidade das diversas fontes de energia e procurado estabelecer parâmetros de avaliação através do estabelecimento de indicadores apropriados. Várias publicações técnicas disponíveis na literatura mundial sobre o assunto têm estabelecido indicadores de natureza mais ampla, mais ligados aos aspectos macro e socioeconômicos, bem como alguns mais específicos que podem ser aplicados às diversas fontes energéticas (IEA/OECD, 2005).

Entre os primeiros, pode-se citar a utilização de energia per capita, o número de lares atendidos por energia elétrica, a importação líquida de energia. Entre os segundos pode-se citar o custo da produção de energia, a disponibilidade no país do combustível considerado, a emissão de poluentes e gases de efeito estufa de cada cadeia energética, a produção de resíduos e rejeitos por unidade de energia gerada, o uso da terra por unidade de energia produzida, etc. Embora o primeiro tipo de indicadores seja importante para se avaliar o desempenho de um sistema energético como um todo, os resultados são consequência do “mix” atingido pelo sistema dentro de certo horizonte, e não se enquadram no escopo deste trabalho.

Por outro lado, os indicadores do segundo tipo são pertinentes para a análise “a priori” de todas as fontes energéticas, e são aplicados especificamente para a produção de energia a partir do carvão mineral. Optou-se por, na medida do possível, utilizar os mesmos indicadores para a análise das diferentes fontes consideradas no Plano, de forma a permitir, em um momento posterior, a comparação entre as diversas fontes.

##### ■ 4.1.2. Indicadores ambientais

Os indicadores ambientais podem ser divididos em três temas principais: Atmosfera, Água e Solo (IEA/OECD, 2005). Cada um destes três temas principais pode ser subdividido em subtemas, como se segue.

**Atmosfera:** mudanças climáticas e qualidade do ar. Para estes subtemas as questões principais estão relacionadas à acidificação, impactos na camada de ozônio e outras emissões que afetam a qualidade do ar de áreas urbanas e emissão de gases de efeito estufa.

**Água:** a qualidade da água é, em geral, afetada pela descarga de contaminantes, em especial nas atividades de mineração.

**Solo:** a qualidade dos solos deve ser considerada além da sua importância como espaço físico e relevo. O solo deve ser considerado como um importante recurso, junto com os recursos hídricos, essencial para a agricultura e como habitat para as diversas espécies de plantas e animais. As atividades de produção de energia podem resultar na degradação e acidificação dos solos.

Para os indicadores ambientais, utilizou-se, para esta primeira análise, os mesmos indicadores sugeridos para a análise da fonte nuclear, de forma a permitir, em um momento posterior, a comparação entre as diversas fontes.

#### **Emissões de gases de efeito estufa**

O gás de efeito estufa que causa maior preocupação é o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Considerando toda a cadeia energética a partir do carvão mineral, as emissões situam-se na faixa de 450 a 1.200g CO<sub>2</sub>/kWh, número atualmente significativamente maior do que as emissões da cadeia nuclear (10 a 50g de CO<sub>2</sub>/kWh).

#### **Poluição do ar**

As emissões de poluentes do ar geradas pelo setor energético incluem particulados, dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e óxidos

de nitrogênio (NOx). A produção de energia elétrica por carvão mineral gera a emissão destes poluentes, e, conseqüentemente, acarreta efeitos adversos sobre a flora e fauna, edificações e sobre a saúde humana. A Tabela 7 apresenta os fatores médios de emissão de poluentes para a geração termelétrica a partir de carvão mineral (nacional e importado), gás natural e óleo combustível (padrão e pesado). Em geral, os menores fatores de emissão são encontrados para o gás natural e os maiores para o carvão nacional.

Tabela 7 – Fatores médios de emissão para SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub>

Combustível	Categoria de empreeendimento	Tecnologia	Fator de emissão do poluente (g/kwh)		
			SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>
Carvão Nacional	1	Ciclo a vapor convencional <sup>1</sup>	36,85	919	254,5
	2	Leito Fluidizado <sup>2</sup>	31,32	NA	NA
Carvão Internacional	3	Ciclo a vapor convencional com caldeira a carvão pulverizado	5,95	865	28,15
	4	Leito fluidizado / ciclo combinado	0,91	NA	NA
Gás Natural	5	Convencional	0,13	493	0,65
	6	Ciclo Combinado	0	438	0
Óleo Combustível Padrão	7	Turbina a gás	2,2	900	0
Óleo Combustível Pesado	8	Convencional	16,9	675	0,09

Notas:

NA: a informação não está indisponível. Sugere-se a busca da referida informação pelo Setor para efeito de valoração do custo de degradação ambiental.

1 – as referidas emissões variam entre 5,7 e 68 g/kWh para SO<sub>2</sub>, entre 590 e 1248 ppm/kWh para CO<sub>2</sub> e entre 119 e 390 g/kWh para PM<sub>10</sub>, de acordo com o tipo de carvão a ser usado.

2 – Segundo Rosa & Schechtman (1996), a tecnologia de geração leito fluidizado captura entre 80% e 90% das emissões de SO<sub>x</sub> em relação a tecnologia convencional.

Fonte: ELETROBRÁS/MME, 2000.

No entanto, a utilização de tecnologias de queima mais limpas (clean coal technologies - CCT) estão reduzindo significativamente a emissão destes poluentes. No Brasil estão sendo estimados para a usina termelétrica de Seival, localizada no estado do Rio Grande do Sul, com entrada em operação prevista para 2007, as seguintes emissões:

Tabela 8 – Emissões de poluentes previstas para a UTE Seival

mg/Nm <sup>3</sup>	Seival sem CCT	Seival com CCT	Normas Brasileiras (Res CONAMA 08/1990)	Normas Banco Mundial	Seival, quantidade removida no processo de limpeza
Particulados	100.000	< 50	600	50	200 t/h
SO <sub>2</sub>	10.000	< 400	2.000	2.000	19 t/h
NOx	900	< 500		750	800 kg/h

### Uso da terra

O uso de terra requerido pela cadeia energética do carvão mineral é da mesma ordem de grandeza do uso de cadeia energética nuclear, e inferior ao uso requerido pelas energias renováveis. Por exemplo, as necessidades de terra para cada GW de capacidade instalada, incluindo as necessidades de mineração e de todo o ciclo do combustível, para algumas fontes de energia são as seguintes:

- Carvão e nuclear 1-10 km<sup>2</sup>
- Solar 20-50 km<sup>2</sup>
- Eólica 50-150 km<sup>2</sup>
- Biomassa 4.000-6.000 km<sup>2</sup>

### Uso de material e produção de rejeitos

O principal resíduo gerado pela produção de energia a partir de carvão mineral são as cinzas. Destaca-se que já existem tecnologias para o aproveitamento das cinzas leves para uso industrial, uso na agricultura e em projetos de recuperação ambiental. Desta forma, espera-se que, no horizonte do longo prazo, o descarte dos resíduos apresente uma tendência decrescente. Apenas para as cinzas pesadas não existe, ainda, qualquer possibilidade de reaproveitamento.

### Formação de Chuvas Ácidas

A acidificação das águas é proveniente da presença de ácidos como o sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e o nítrico (HN<sub>3</sub>) formados na atmosfera, em função da queima de combustíveis fósseis e conseqüentemente, liberação de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) (GOLDEMBERG, 2003). Esses podem ser levados pelo vento a distâncias de até mil quilômetros de sua fonte, e causar chuvas ácidas em locais bem distantes, sendo considerado então um problema regional.

A luz solar, a fuligem e os resíduos de metais podem acelerar, sob certas circunstâncias, o processo de formação de chuva ácida (GOLDEMBERG, 2003).

O efeito acumulativo da chuva ácida impacta ambientes, colheitas, materiais florestais e aquáticos. Lagos ácidos possuem dificuldade para manter a pesca; a acidez no solo pode retardar o crescimento da flora; áreas úteis de campos rurais podem ser reduzidas; além do que o ácido ataca materiais utilizados na construção de edifícios (OTTINGER, 1991).

#### ■ 4.1.3. Indicadores socioeconômicos

### Esgotamento das reservas de combustível

As reservas de carvão mundiais são grandes e a sua utilização pode ser muito melhorada pela eficiência energética e evolução tecnológica. Os conhecimentos atuais sobre reservas e recursos permitem estimar uma garantia de suprimento a longo prazo para a atual capacidade de geração com base no carvão mineral.

### Garantia de suprimento

Com relação à garantia de suprimento, o carvão apresenta vantagens comparativas em relação às demais fontes, visto que apresenta menor risco de variações de preço e interrupção de suprimento do que o petróleo e o gás (65% do petróleo estão no Oriente Médio e 70% do gás entre Oriente Médio e a antiga União Soviética).

De uma forma geral, pode-se considerar que os preços permanecerão estáveis no futuro devido a ganhos de produtividade na mineração (10 - 15 % a.a.).

## 5. Benefícios socioambientais

---

Os benefícios econômicos e sociais decorrentes das atividades oriundas do carvão, bem como da geração e transmissão de energia, estão associados ao dinamismo econômico em função da geração de empregos diretos e indiretos, do aumento da demanda por bens e serviços em uma dada região e, em consequência, o aumento da arrecadação tributária.

A implantação de linhas de transmissão e usinas termelétricas demanda um número bastante expressivo de mão-de-obra de diferentes níveis de qualificação gerando empregos. Os benefícios econômicos e sociais advindos da contratação de mão-de-obra poderão ser maximizados se forem priorizadas contratações locais ou regionais.

## 6. Custos socioambientais

---

### ■ 6.1. Considerações iniciais

Os custos e benefícios totais das atividades econômicas freqüentemente não são calculados. Os processos de tomada de decisão consideram os custos e benefícios privados, mas, na maioria das vezes, ignoram uma série de custos e benefícios adicionais, conhecidos como externalidades, com os quais a sociedade arca. Um exemplo gritante de externalidade está nos danos causados pela poluição. A contabilização dos custos totais das atividades econômicas é um possível passo na busca de estratégias para se chegar a um desenvolvimento sustentável (ROSILLO-CALLE et al., 2005).

Em geral, o valor econômico de impactos ambientais de fontes de energia elétrica não é internalizado no custo total de usinas. Existem dois métodos de internalizar externalidades ambientais: (i) estimando os valores dos custos de controle e (ii) estimando valores monetários de custos de degradação (FURTADO, 1996).

Custos de controle representam o valor monetário da proteção ambiental, isto é, eles representam quanto a sociedade tem de pagar para evitar os impactos ambientais. Como afirmado por Woolf (1992, p. 4):

*Quando os custos de controle são usados para representar externalidades ambientais, existe uma suposição explícita que os reguladores estabeleceram padrões ambientais de modo que os custos da regulação igualem aproximadamente os benefícios. Em outras palavras, supõe-se que os reguladores estabelecem padrões ambientais no ponto onde os custos de degradação são aproximadamente iguais aos custos de controle. Isto pressupõe que os reguladores são bem informados e livres de restrições, inclusive políticas, ao estabelecerem padrões ambientais.*

Neste método, os custos internalizados usualmente referem-se às medidas de mitigação dos efeitos ou medidas de prevenção da ocorrência dos efeitos. Estes custos são também conhecidos como custos de controle e de mitigação. Custo de controle é o custo de evitar os efeitos ambientais, enquanto o custo de mitigação é o custo de gerir ou aliviar os efeitos ambientais (COMASE, 1994). O termo custo de mitigação é usado quando não existe uma ação na causa do impacto, tentando reduzi-lo. As medidas objetivam apenas conviver com ou mitigar os impactos. Por outro lado, quando as medidas visam reduzir os efeitos ambientais, agindo diretamente nas fontes poluidoras, seus custos são chamados custos de controle.

A segunda abordagem, custos de degradação, - utilizado para a internalização dos custos ambientais de usinas, baseia-se na avaliação econômica da degradação causada (FURTADO, 1996). Esta medida avalia o efeito ambiental como uma perda econômica devido aos impactos causados pelo projeto. Os custos de degradação representam o benefício à sociedade em se evitar estas externalidades, ou seja, representam o benefício monetário da proteção ambiental.

Exceto quando o nível de controle é considerado “ótimo”, o uso dos custos de controle para quantificar o dano ambiental, em geral, apresenta erros de sobre ou sub estimativa. Teoricamente, não existem dúvidas de que os custos de degradação geram melhores estimativas das externalidades ambientais do que os custos de controle. No entanto, a sua determinação apresenta um elevado grau de incerteza.

## ■ 6.2. Custos socioambientais e externalidades

As tecnologias modernas empregadas na maior parte das opções energéticas foram desenvolvidas de modo a minimizar os danos ambientais. Contudo, os riscos de danos à saúde e meio ambiente não podem nunca serem reduzidos a zero para qualquer opção energética.

Devido à relevância das emissões aéreas para a análise de fontes de geração termelétrica, muitos estudos foram realizados sobre a valoração de impactos ambientais na produção de energia elétrica, especialmente nos Estados Unidos da América, voltados para os custos das externalidades das emissões aéreas. Os resultados são apresentados em US\$ por tonelada de poluente, em US\$ por tipo de poluente e em US\$ por kWh para cada tipo de geração elétrica. A Tabela 9 apresenta os custos das emissões aéreas na produção de eletricidade por tipo de poluente.

Tabela 9 – Custos das emissões aéreas na produção de eletricidade por tipo de poluente (US\$ centavos/kWh – Preços de 1990)

Poluente	Carvão Nova c/FGD	Carvão Existente	Gás Natural Nova c/Ciclo Combinado	Óleo Existente
Custo Convencional	8.6	6.9	5.7	6.9
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	2.8	2.8	1.3	2.3
Óxidos de Nitrogênio (NOx)	0.0	2.4	1.5	1.2
Óxidos de Enxofre (SOx)	1.1	1.6	0.0	1.0
Outros: Particulados (TSP), Comp. Org. Voláteis (COV), Monóxido de Carbono (CO), Metano (CH <sub>4</sub> )	0.1	0.4	0.0	0.3
<b>Total</b>	<b>4.0</b>	<b>7.1</b>	<b>2.8</b>	<b>4.8</b>
Total (% do Convencional)	47	103	49	70
<b>Total mais Convencional</b>	<b>12.6</b>	<b>14.0</b>	<b>8.5</b>	<b>11.7</b>

Fonte: Woolf, 1992.

Nota: Os custos convencionais de usinas existentes são médias de preços de eletricidade nos Estados Unidos; os custos de usinas novas incluem os custos fixos e variáveis da construção e operação das usinas (KOOMEY, 1990).

Como mostrado na tabela acima, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) representa cerca de 50% do custo total de todos os poluentes. Para as usinas novas de gás natural com ciclo combinado, os custos de emissão dos óxidos de nitrogênio são os mais altos.

FURTADO (1996) estimou os custos de degradação por MWh para três projetos de geração de energia elétrica, a partir de três diferentes fontes. Para o carvão mineral foi utilizado o projeto Candiota III. Os custos de geração de Candiota III, assim como os custos de degradação e controle, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 8 – Custos de geração e de degradação (US\$ por MWh – Preços de 1994)

Suposição	Candiota III
Custo de geração convencional (a)	52,0
Custos de degradação, considerando:	
(i) média das DAP;	27,3
(ii) medianas das DAP.	13,0
Custos de controle	6,2 – 13,6
Relação entre os custos de degradação / custos de controle	2,1-4.,/1,0-2,0
Custos de geração totais, considerando custos de degradação:	
(i) média das DAP;	79,3
(ii) mediana das DAP	65,0
Custos de geração totais, considerando custos de controle:	58,2 – 65,6

Fonte: Furtado, 1996.

Nota: (a) Custos de Belo Monte e Angra II do Plano 2015 (1993), atualizados para 1994; custos de Candiota III da CEEE (1995).

Além desta abordagem, o projeto ExternE, em desenvolvimento há cerca de uma década, estabeleceu metodologias para estimar os impactos do setor elétrico em termos de custos externos ou custos de externalidades, ou seja, aqueles custos não incluídos diretamente nas tarifas, mas que a sociedade arca de alguma maneira. Um resumo destes custos é mostrado na Tabela 11 (EUROPEAN COMMISSION, 2003). Ressalta-se que os maiores custos são os das externalidades das fontes de geração a carvão/linhito e óleo.

Tabela 11 – Custos das externalidades

Tipo de geração elétrica	Externalidades (Euro/MWh) (as faixas cobrem diferentes tecnologias e países)	Externalidades (US\$/MWh) (as faixas cobrem diferentes tecnologias e países)
Carvão e linhito	20 a 150	26,2 a 196,4
Óleo	30 a 110	39,3 a 144,0
Gás	10 a 40	13,1 a 52,4
Nuclear	2 a 7	2,6 a 9,2
Biomassa	10 a 30	13,1 a 26,2
Eólica	0,5 a 2,5	0,7 a 3,3
Hidroelétrica	1 a 10	1,3 a 13,1

Fonte: European Commission, 2003

Nota: conversão utilizando a taxa Euro x Dólar = 1,3094 (24.11.06).

A Tabela 12 apresenta a variação dos valores das externalidades obtidos em alguns estudos para o carvão mineral (os valores das externalidades associadas aos impactos das mudanças climáticas são apresentados entre parênteses).



Tabela 12 – Exame das externalidades da energia (centavos de dólar/kWh) oriunda do carvão mineral

Estudo	Valor (centavo de dólar/kWh)
Hohmeyer (1988)	4,1 – 9,3
Friedrich e Voss (1993)	0,4 – 2,0
Ottinger et al. (1990)	2,9 – 6,7 (1,7)
RCG-Tellus (1995)	0,3
Ornl-RFFb (1994)	0,06 – 0,13
Pearce (1995 a, b)	1,5 – 8,1 (0,7 – 0,8)
CEC (1998a)	0,8 – 31,4 (0,5 – 18,0)

<sup>a</sup> Os valores entre parênteses indicam a contribuição da externalidade da mudança climática ao valor da externalidade fornecido.

<sup>b</sup> dados apresentados por Lee (1996).

Fonte: ROSILLO-CALLE et al., 2005.

## 7. Desenvolvimento tecnológico em médio prazo

Visando assegurar a utilização do carvão mineral na matriz energética mundial, levando em consideração, principalmente, as exigências ambientais, têm-se utilizado e desenvolvido tecnologias de remoção de impurezas, redução de emissões e combustão eficiente do carvão, as chamadas Tecnologias Limpas (Clean Coal Technologies - CCT). Além disso, têm-se aprimorado as tecnologias já existentes, conforme suas atribuições e vantagens. A tecnologia de seqüestro de carbono deverá estar madura em 15 a 20 anos, graças aos resultados de programas como o ZECA (Zero Emission Coal to Hydrogen Alliance) e CSLF (Carbon Sequestration Leadership Fórum) em que, além da Comunidade Econômica Européia, participam outros treze países, dentre os quais o Brasil. O programa USDOE Vision 21 é uma iniciativa norte-americana.

Os custos são a maior barreira para a adoção das CCTs. Ações governamentais, incluindo investimentos em pesquisas e desenvolvimento, podem reduzir os custos e se isso for feito, o carvão pode se tornar uma fonte de geração de energia de baixo custo (IEA, 2006).

As tecnologias limpas de carvão podem ser aplicadas nas diferentes fases de transformação do carvão em energia. Segundo estudo realizado pelo World Energy, Technology and Climate Policy Outlook – WETO, estima-se que, em 2030, 72% das usinas a carvão usarão tecnologias limpas avançadas com eficiência de 50% (WETO, 2003).

### ■ 7.1. Preparação do carvão

Trata-se de um conjunto de técnicas destinadas à remoção de grandes proporções de enxofre e de outras impurezas, antes da combustão do carvão, visando reduzir a produção de SOX e cinzas durante a combustão. Para tanto, utilizam-se processos físicos e químicos de remoção de impurezas. Ultimamente, tem sido desenvolvida uma nova técnica de remoção biológica, por meios enzimáticos e microbiológicos. Os processos físicos e químicos disponíveis removem cerca de 30% a 50% do enxofre orgânico (10% a 30% do total) e cerca de 60% dos compostos minerais que formam as cinzas, durante a combustão. Dentre esses processos está a flutuação de espumas, a ciclonização de líquidos pesados, a aglomeração seletiva e a separação magnética ou eletrostática (IEA, 1997).

## ■ 7.2. Redução das emissões

### ■ 7.2.1. Precipitadores eletrostáticos

Removem material particulado de uma corrente gasosa através da criação de alto diferencial de voltagem entre eletrodos. Quando o gás com partículas passa entre os eletrodos, as moléculas ficam ionizadas, resultando em cargas nas partículas. Estas, carregadas, são atraídas para o eletrodo de carga oposta e removida enquanto o gás prossegue. Durante a operação os eletrodos são limpos, periodicamente, para retirar a camada de pó que fica sobreposta. O resíduo é coletado e disposto adequadamente de acordo com suas características. Essa técnica é amplamente aplicada em usinas termelétricas e é capaz de alcançar eficiência maior que 99,5%.

As vantagens são alta eficiência de coleta de material particulado e consumo de energia relativamente baixo; coleta e disposição dos resíduos a seco; baixa perda de carga (menos que 13 mmca – mm de coluna d'água); capacidade de operação contínua com mínima necessidade de manutenção; custo de operação relativamente baixo; habilidade para trabalhar tanto em altas pressões (10 atm) quanto em condições de vácuo; possibilidade de ser operado em ampla faixa de temperatura inclusive em altas temperaturas (até 700°C) e capacidade de tratar altas vazões de maneira eficaz.

Como desvantagens podem ser citadas: custo alto; alta sensibilidade às oscilações das condições da corrente de gás; pouca flexibilidade das faixas de operação; dificuldade de remoção de algumas partículas devido a propriedades resistivas extremas; necessidade de espaço relativamente grande para instalação; risco de explosão quando trata gases ou partículas combustíveis; necessidade de precauções especiais para proteger pessoal dos riscos de alta voltagem e da produção de ozônio pelo eletrodo negativo durante a ionização do gás; manutenção relativamente sofisticada e personalizada, além de incapacidade de controle das emissões de poluentes gasosos.

### ■ 7.2.2. Filtros de manga

Removem o pó da corrente de gás pela passagem da mesma, carregada de material particulado, por tecido poroso. As partículas de pó formam uma torta de porosidade maior, menor ou igual à da manga (tecido poroso). Em geral, é esta torta responsável pela filtração.

As partículas carregadas em uma corrente de gás a altas temperaturas são retidas quando esta passa através de múltiplos filtros de fibras sintéticas. Usualmente, as temperaturas estão acima de 300°C. Filtros de manga têm sido aplicados tanto na indústria pesada, em geral, como na mineração (OECD/IEA, 2003).

As vantagens são altas taxas de remoção de material particulado; operação relativamente simples; capacidade de operar com grande diversidade de pós; relativa insensibilidade à flutuação da vazão de gás; coleta e disposição de resíduos a seco; não há risco de alta voltagem; alta eficiência de coleta de fuligem com dimensões de micrômetros e também de gases contaminantes; filtros coletores possuem diversas configurações possíveis, resultando em dimensões variadas e atendendo às necessidades de processo da instalação.

Como desvantagens podem ser citadas: temperaturas acima de 300°C exigem a instalação de material refratário em determinados locais dos filtros; alguns pós podem requerer tratamento especial das mangas para reduzir a infiltração de pó, ou, em outros casos, ajuda na remoção do pó coletado; altas concentrações de pó no coletor podem representar risco de fogo ou explosão se uma faísca ou chama é introduzida por acidente; custo de manutenção relativamente alto; o tempo de vida das mangas pode ser encurtado em altas tempera-

turas e na presença de ácidos e bases ou alguns constituintes de gases em particular; não pode trabalhar com gases úmidos; materiais hidrocópicos, condensação de mistura e componentes de alcatrão podem causar torta incrustante ou tampão na manga; troca de mangas pode necessitar de proteção respiratória adequada; as mangas podem ser destruídas a altas temperaturas ou em presença de produtos químicos corrosivos; o tempo de limpeza do filtro pede um sistema paralelo para manter regime permanente em operação.

#### ■ 7.2.3. Dessulfurização dos gases

A tecnologia de dessulfurização dos gases (Flue Gás Desulphurisation – FGD) emprega um reagente (sorbent), usualmente cal ou calcário, para remover  $\text{SO}_2$  a partir do conduto de gás. O sistema FGD está atualmente instalado em 27 países e tem contribuído com enormes reduções nas emissões podendo alcançar eficiência de remoção acima de 99%. Os custos das unidades FGD tem diminuído significativamente, sendo que o custo atual é cerca de um terço do custo da década de 70 (WCI, 2004).

#### ■ 7.2.4. Sistemas de limpeza com gás quente

Essa tecnologia é considerada com significativo potencial para aplicação em algumas formas de geração de energia avançada. Partículas em vapor de gás são apanhadas quando o gás passa através de uma série de filtros porosos (tubos, velas e outras configurações) operando a 250-400°C. Muitas usinas de queima de carvão IGCC (Gaseificação Integrada de Ciclo Combinado) têm utilizado, para tratamento de seus gases, cerâmica porosa ou unidades de filtros metálicos com gás quente (OECD/IEA, 2003).

#### ■ 7.2.5. SCR (Selective Catalytic Reduction) E SNCR (Selective Non-catalytic Reduction)

Técnicas como SCR e SNCR reduzem a emissão de  $\text{NO}_x$  através de tratamento pós combustão no conduto do gás. As tecnologias SCR alcançam 80-90% de redução de  $\text{NO}_x$  e tem sido usadas comercialmente no Japão desde 1980 e na Alemanha desde 1986. Emissões de  $\text{NO}_x$  a partir da queima de carvão em usinas dos Estados Unidos caíram cerca de 56% entre 1980 e 2000, apesar do significativo crescimento no uso do carvão, com os queimadores a baixas temperaturas de  $\text{NO}_x$  desempenhando um importante papel nessa realização (WCI, 2004).

#### ■ 7.2.6. Lavadores úmidos

Um grande número de variantes (espuma, filmes, colunas de spray, etc.) estão disponíveis, a maioria baseada no uso de um líquido para coletar as partículas do gás. Elas são amplamente utilizadas para aplicações na indústria de queima do carvão, mas também têm sido utilizadas em aplicações de alta temperatura e pressão, como no IGCC e combustão em leito fluidizado (PFBC). Em alguns casos, o controle de partículas pode ser combinado com a remoção de outras substâncias como  $\text{SO}_2$ , HF e HCl (OECD/IEA, 2003).

### ■ 7.3. Tecnologias de combustão eficiente

As tecnologias de queima mais eficiente do carvão são mais uma ferramenta na redução das emissões, uma vez que permitem melhor aproveitamento da fonte, conforme descrição abaixo:

#### ■ 7.3.1. Combustão Pulverizada do Carvão (PCC)

O carvão é pulverizado e queimado em fornalhas a altas temperaturas, aquecendo a água e produzindo

vapor para acionar as turbinas da usina. A maioria das tecnologias modernas de carvão pulverizado (CP) atinge 99% de eficiência na combustão. A eficiência de conversão da energia térmica em energia elétrica pode chegar a 43%, no caso de plantas com ciclo a vapor supercrítico (temperatura entre 700°C e 720°C). Ganhos adicionais de eficiência podem ser alcançados, mas atualmente o encarecimento do sistema não os justificam. Espera-se, porém, melhoramentos futuros, elevando a eficiência para 50%, sem aumento de custo.

#### ■ 7.3.2. Combustão em leito fluidizado (FBC)

Permite a redução de enxofre (em até 90%) e de NOX (entre 70 - 80%), pelo emprego de partículas calcárias e de temperaturas inferiores ao processo convencional de pulverização. No sistema FBC, o carvão é queimado em um leito de partículas aquecidas suspensas num fluido de ar. Em velocidades do ar suficientemente altas, o leito age como um fluido, resultando na rápida mistura das partículas. Essa ação fluidizante completa a combustão do carvão a temperaturas relativamente baixas. O sistema FBC é particularmente adequado para combustíveis de baixa qualidade. Tem custo relativamente baixo, é uma tecnologia limpa e eficiente, embora complexa em sua operação. Pode ser amplamente utilizado em países em desenvolvimento (OECD/IEA, 2005).

#### ■ 7.3.3. Combustão em leito fluidizado pressurizado (PFBC)

É baseada na combustão do carvão sob pressão em um profundo leito fluidizado a 850°C. Dependendo da velocidade do ar através do leito fluidizado, duas variações do PFBC existem: leito espumante PFBC - baixa velocidade e leito circular - alta velocidade (WCI, 2004).

#### ■ 7.3.4. Gaseificação integrada com ciclo combinado (IGCC)

No ciclo de gaseificação integrada combinada, o carvão reage com vapor a altas temperaturas e com um oxidante (processo de gaseificação), originando um gás combustível sintético de menor poder calorífico, principalmente composto por hidrogênio e monóxido de carbono. Esse gás é então limpo de impurezas e queimado em uma turbina de gás conectada a um gerador elétrico. O gás de combustão que sai da turbina, ainda a alta temperatura, é usado em um gerador de vapor ligado a um turbo-gerador convencional.

A eficiência da conversão energética é maior que a convencional, atualmente cerca de 45% (WCI, 2004). O sistema IGCC está entre os mais limpos e eficientes dentre as tecnologias de queima limpa emergentes: retira mais de 99% do enxofre; compostos nitrogenados e particulados são removidos antes do gás ser queimado na turbina e a eficiência termal tende a ser superior a 50% no futuro. Além disso, a gaseificação pode também ser operada in situ com a gaseificação subterrânea do carvão (UGC). Nesse processo, água/vapor e ar ou oxigênio são injetados em uma fenda do carvão. A injeção de gases reage com o carvão para formar um gás combustível que é trazido à superfície e limpo antes de sua utilização. Essa tecnologia relativamente nova está sendo usada para explorar fendas de carvão que de outra forma são impossíveis de serem mineradas (OECD/IEA, 2005).

#### ■ 7.3.5. Combustão de carvão pulverizado pressurizado

É uma tecnologia atualmente em desenvolvimento, principalmente na Alemanha. Semelhante à combustão de carvão pulverizado, o calor liberado a partir da combustão gera alta pressão, vapor de elevada temperatura, que é utilizada em turbina-gerador a vapor (WCI, 2004).

### ■ 7.3.6. Supercritical e ultrasupercritical

Supercritical é uma expressão termodinâmica que descreve o estado de uma substância onde não há distinção clara entre a fase líquida e gasosa. O ciclo médio é uma fase simples fluida com propriedades homogêneas onde não é necessário separar o gás da água. Uma vez através da caldeira, são posteriormente usados em ciclos supercríticos. A usina supercrítica oferece maiores eficiências que a convencional, usina sub-crítica. Usinas ultrasupercríticas operam a temperaturas e pressões muito altas e tem o potencial de oferecer eficiências acima de 50% (WCI, 2004).

A Tabela 13 apresenta uma síntese das tecnologias de combustão eficientes do carvão.

Tabela 13 - Tecnologias de combustão eficientes do carvão

Tecnologia	Situação	Eficiência de Conversão (%)	Custo de Capital (US\$/kWe)	Redução nas emissões (%)	
				SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>
Combustão Pulverizada	Comercial	38-47	1300-1500	--	--
Combustão em Leito Fluid. I (1)	Comercial Demonstrado	34-37	1450-1700	90-95	60
Combustão em Leito Fluid. II (2)	Comercial Demonstrado	37-39	1540-1700	90-95	60
Combustão em Leito Fluid. III (3)	Demonstrado	42-45	1450-1700	98-99	70
Gaseificação Integrada (GI)	Demonstrado	45-48	1450-1700	92-99	98-99

Fonte: IEA, 1997

Notas: (1) Pressão atmosférica

(2) Circulação (vapores sub e supercríticos)

(3) Pressurização (vapores sub e supercríticos)

Em termos ambientais, destaca-se a tecnologia de gaseificação integrada (GI), tanto pela eficiência da conversão, como pela redução nas emissões de SOX e NOX.

As necessidades de desenvolvimentos tecnológicos de limpeza e combustão eficiente do carvão estão resumidas na Tabela 14.

Tabela 14 – Necessidade de P&amp;D em tecnologias de limpeza e combustão eficiente de carvão

Tecnologia	Necessidade de P&D
Combustão Pulverizada	Parâmetros de combustão otimizada. Pesquisas teóricas e experimentais de redução de NOx. Técnicas avançadas de construção e aplicação de materiais de alta temperatura.
Limpeza de Gás de Exaustão	Catalisadores eficientes de baixo custo e longa vida útil Redução não-catalítica de NOx. Absorvente seco para a remoção de SO <sub>2</sub> Utilização de produtos sólidos
Combustão em Leito Fluidizado	Componentes eficientes de longa durabilidade. Disposição das cinzas. Demonstração dos processos de combustão pressurizada
Turbina a Gás	Temperatura mais elevada de entrada. Novas tecnologias de resfriamento e materiais cerâmicos. Queimadores de alta temperatura com baixo fluxo de gás calorífico e NOx.
Ciclo combinado	Limpeza de gás quente. Integração da combustão em LF e da gaseificação em termelétricas. Flexibilização e modulação componentes. Combustão pulverizada e pressurizada. Componentes de metal líquido para ciclo binário de Rankine.
Gaseificação	Demonstração de operações confiáveis
Hidrogenação	Melhoramentos nos processos de hidrogenação, incluindo refino

Fonte: AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA – AIE. Energy technologies for the 21st Century. Paris, 1997. Disponível em: [www.iea.org/techno/index.htm](http://www.iea.org/techno/index.htm).

## ■ 7.4. Captura e armazenamento do CO<sub>2</sub>

### ■ 7.4.1. Projeto Futuregen

O projeto FutureGen é uma iniciativa do governo americano para projetar, construir e operar a primeira usina a carvão do mundo sem emissão de poluentes. Trabalhando com a iniciativa privada, esse projeto de US\$ 1 bilhão empregará as mais novas tecnologias para gerar eletricidade, produzir hidrogênio e seqüestrar emissões de carbono do carvão. Ao mesmo tempo, o FutureGen apóia várias metas do governo voltadas para o meio ambiente e a energia, e com essa pesquisa o carvão pode continuar a fazer parte de uma matriz energética variada no futuro.

O protótipo da planta deverá identificar a viabilidade técnica e econômica da produção de eletricidade e hidrogênio a partir do carvão mineral, ao mesmo tempo em que captura e seqüestra o CO<sub>2</sub> gerado durante o processo.

O projeto irá utilizar tecnologia de gaseificação do carvão, integrada com ciclo combinado de geração e com o seqüestro de emissões de CO<sub>2</sub>, devendo levar cerca de 10 anos para sua conclusão.

### ■ 7.4.2. Estocagem geológica de CO<sub>2</sub>

A estocagem geológica de CO<sub>2</sub> pode ser realizada em camadas de carvão não mineráveis, campos de óleo e gás e aquíferos salinos profundos. A quantidade de CO<sub>2</sub> que pode ser estocado nestes locais é estimada, atualmente, a um custo de 20 US\$ por tonelada de CO<sub>2</sub>, em:

Camadas de carvão não minerável	30 Gt CO <sub>2</sub>	Estoca cerca de 2 anos das emissões de 2030
Campos de Óleo & Gás	930 Gt CO <sub>2</sub>	Estoca 50 anos das emissões de 2030
Aquíferos salinos profundos	400-10.000 Gt CO <sub>2</sub>	Estoca de 20 a 530 anos das emissões de 2030

Existem, atualmente, três projetos principais de estocagem de CO<sub>2</sub> em andamento em nível mundial: projetos-piloto no Canadá, projetos de injeção de gás nos EUA e projetos de estocagem de CO<sub>2</sub>, também nos EUA.

## 8. Considerações finais

Apesar de haver algumas controvérsias no que tange aos efeitos sobre o meio ambiente, devido ao uso de tecnologias de geração a partir do carvão mineral, vários pontos podem ser considerados como aceitos. Dentre eles podem se citar:

- todos os meios de produção de energia elétrica causam algum efeito sobre o meio ambiente, alguns causam danos consideráveis, outros poucos, mas nenhum meio pode ser considerado completamente benigno ou limpo;
- o carvão mineral é um recurso energético abundante e bem distribuído mundialmente (disponível em 75 países), além de ser economicamente atrativo para a geração de energia elétrica. No entanto, seu aproveitamento pode acarretar uma série de impactos socioambientais que requerem atenção, visando o seu adequado equacionamento;
- o desenvolvimento tecnológico na eficiência, controle de emissões e captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> é fundamental para possibilitar a viabilização desta fonte na matriz energética mundial e brasileira;
- devem ser feitos investimentos, ainda, na minimização e controle dos impactos socioambientais da extração, mineração e beneficiamento do carvão, visando controlar os impactos à saúde dos trabalhadores e a degradação do meio ambiente;
- visto que as reservas de carvão de alta qualidade são mais escassas, o país pode ter uma vantagem competitiva, em longo prazo, se realizar desenvolvimentos tecnológicos no uso de carvão mineral de baixa qualidade;
- a geração de energia elétrica por usinas a carvão mineral ocupa pouca área comparada com os requisitos de energia renováveis; e,
- a geração de energia elétrica por usinas a carvão mineral pode ser indutora de movimentação para a indústria de fertilizantes, cimento, e, no caso do carvão importado, aumento de movimentação de carga em portos.

## 9. Referências bibliográficas

- ANEEL, 2005. Atlas de energia elétrica do Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. ed. – Brasília. Disponível em [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).pdf)
- CETEM/MCT, 2001. Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense, vol I, RT 33/2000 – Relatório Técnico elaborado para o SIECESC; Centro de Tecnologia Mineral.
- COMASE, Comitê Coordenador das Atividades de meio Ambiente do Setor Elétrico, Referencial para Ornamentação dos Programas Socioambientais, MME, Rio de Janeiro, 1994.
- ELETOBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A; Ministério de Minas e Energia – MME; Metodologia de Valoração das Externalidades Ambientais da Geração Hidrelétrica e Termelétrica com Vistas à sua Incorporação no Planejamento de Longo Prazo do Setor Elétrico, Rio de Janeiro, 2000.
- External Costs. Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport. EUROPEAN COMMISSION. EUR 20198 .2003
- External Costs of Energy: Application of the ExternE Methodology in France. Final Report for Contract J0S3-CT95-0010. January 1998.
- External costs of energy and their internalization in Europe. Dialogue with industry, NGO, and policy-makers. Friday, 9 December 2005. European Commission. Brussels. Belgium.
- ExternE - Externalities of Energy. Methodology 2005 Update. Edited by Peter Bickel and Rainer Friedrich. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung . IER Universität Stuttgart, Germany. 2005.
- FURTADO, R.C. The Incorporation of Environmental Costs into Power System Planning in Brazil. Tese de Doutorado – Imperial College – Universidade de Londres – Londres – UK, 1996.
- GOLDEMBERG, J; VILLANUEVA, L. D. Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento. Edusp. São Paulo, 2003.
- IEA, Energy technologies for the 21st Century. Paris, 1997.
- IEA, World Energy Outlook 2004. Paris, 2006.
- IEA, Coal Information. OECD/IEA, Paris, 2005.
- LORA, E. E. S., Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte. 2ª edição, Editora Interciência, 2002.
- MEDEIROS, A.M. Bases metodológicas para a incorporação da variável ambiental no planejamento da expansão termelétrica no Brasil. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2003.
- MME, Balanço Energético Nacional 2001: Ano base 2000: Brasília, 2001.
- MME/EPE, Balanço Energético Nacional 2006: Ano base 2005: Resultados Preliminares. Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2006.
- MME/EPE, Plano Decenal de Expansão Energia Elétrica 2006-2015. Março, 2006.
- OECD/IEA, Coal & Sustainable Development – Attitudes & Activity. Coal Industry Advisory Board/International Energy Agency France. OUT, 2003.
- OECD/IEA, Control and minimisation of coal-fired power plant emissions – zero emissions technologies for fossil fuels. International Energy Agency. França, 2003.



OECD/IEA, Reducing Greenhouse Gas Emissions – The potential of coal. Coal Industry Advisory Board/ International Energy Agency. Paris, 2005.

OTTINGER, R.L.; Environmental costs of electricity / prepared by Pace University center for environmental legal studies. New York: Oceana Publications, 1991.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira. Editora Unicamp, 2005.

WCI, The Role of Coal as an Energy Source, World Coal Institute, London, 2003.

WCI, Clean Coal – Building a Future Through Technology. World Coal Institute, London, 2004. Disponível em [http://www.worldcoal.org/assets\\_cm/files/PDF/clean\\_coal\\_building\\_a\\_future\\_thro\\_tech.pdf](http://www.worldcoal.org/assets_cm/files/PDF/clean_coal_building_a_future_thro_tech.pdf)

WCI, Coal: meeting global challenges. World Coal Institute, London, 2006.

