



IPEA/INPES  
Serv. de  
Documentação

DOCUMENTO PRELIMINAR  
GRUPO DE ENERGIA  
Nº 6

"A Economia do Carvão Mineral"

Eduardo M. Modiano  
Octávio A. F. Tourinho

Março de 1982

A economia do carvão mineral



RJF0476/85

IPEA - RJ

IPEA  
07-82

*ISEA*  
INSTITUTO DE PLANEJAMENTO  
ECONOMICO E SOCIAL  
Serviço de Documentação  
N.º 476  
Data 05/06/85

IPEA / INPES / Grupo de Energia

A ECONOMIA DO CARVÃO MINERAL\*

Eduardo M. Modiano\*\*

Octávio A. F. Tourinho\*\*\*

ipea/inpes  
Serv de  
Documentação

- 
- \* As opiniões expressas neste trabalho são pessoais, não devem ser encaradas como a posição oficial da FINEP ou do IPEA.
- \*\* Da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).
- \*\*\* Do Instituto de Pesquisas do IPEA
- 

Rio de Janeiro

Março de 1982

## SUMÁRIO

	pag.
I - Introdução .....	1
II - Um Modelo de Otimização para o Carvão Mineral ..	3
II.1 - Mineração .....	4
II.2 - Beneficiamento .....	8
II.3 - Transporte .....	14
II.4 - Utilização .....	16
III - Aplicação ao Carvão Mineral Nacional .....	18
IV - Uma Política de Oferta para o Carvão Mineral ...	31
V - Conclusões .....	45

---

Trabalho elaborado em Novembro de 1981

PEA/INPES  
Serv. de  
Documentação

I - Introdução

A impossibilidade de que o petróleo continue sendo a base energética do desenvolvimento mundial já está bem caracterizada. Dentre as fontes energéticas que comporão o elenco de alternativas a médio e longo prazos, o carvão mineral aparece com destaque, podendo vir a ser o principal combustível substituto em muitas aplicações. As maiores razões para esta proeminência são as imensas reservas mundiais de cerca de 660 bilhões de toneladas e a existência de tecnologias conhecidas para sua produção, transporte, conversão e uso final. As dificuldades para esta utilização intensiva relacionam-se ao seu impacto no meio ambiente e aos problemas logísticos de incrementar a produção e o comércio mundial a taxas muito elevadas.

As reservas brasileiras de 20 bilhões de toneladas fazem do carvão mineral, a despeito de sua baixa qualidade, uma fonte doméstica da maior importância para reduzir a nossa dependência do petróleo importado. Seu uso intensivo, entretanto, não se concretizará sem problemas, pois existe a necessidade de abrir novas minas, construir beneficiadores, expandir os sistemas de transporte, e converter os equipamentos de uso final e, em alguns casos, gaseificar ou liquefazer o carvão, para tornar sua manipulação mais conveniente. Existe também a dificuldade adicional de que todas estas atividades deverão estar sujeitas a severos controles de proteção ambiental.

O ritmo de expansão da produção de carvão mineral, sua crescente participação na oferta de energia primária e sua competi

tividade como combustível dependerão de seu preço relativo às outras fontes de energia. Para uma avaliação correta do potencial de substituição e o estabelecimento de uma política de preços realista é primordial o conhecimento prévio do custo de produção do carvão e das fontes alternativas. No estágio atual, existe ainda ampla margem de seleção para configurações futuras do setor, às quais correspondem diferentes níveis de investimento e custos de produção diversos. Urge, portanto, dispor de instrumentos que permitam identificar e quantificar de modo sistemático estas alternativas e os custos associados.

Os modelos de otimização são particularmente adequados para a avaliação econômica de decisões de investimento e escolha de processos e, no caso do carvão mineral, foram usados por Ferrel (1977) e aplicados com sucesso em uma série de estudos resenhados por Gordon (1976).

O modelo de otimização para o carvão mineral, exposto na Seção II, descreve com detalhe a complexa inter-relação entre as atividades de mineração, beneficiamento, transporte e utilização, permitindo desta forma, além de avaliar simultaneamente a escolha de processos para estas atividades, a identificação dos pontos de estrangulamento no fluxo físico do mineral.

A alimentação do modelo com os dados descritos de modo sumário na Seção III permitiu obter os resultados para o caso básico, que são analisados com detalhe na Seção IV. Eles indicam a escala de produção das diversas atividades e a alocação ótima do investimento setorial, em função da evolução do perfil da demanda e das características do carvão.

Finalmente, a Seção V apresenta algumas das conclusões relativas à estratégia ótima para expansão da mineração, à interação entre o beneficiamento e o transporte e aos custos de oportunidade dos vários tipos de carvão nas várias regiões.

## II - Um Modelo de Otimização para o Carvão Mineral

O caráter normativo dos modelos de otimização requer a especificação de um critério de avaliação. Seguindo a literatura citada, a determinação da configuração futura de custo mínimo para o setor, ou seja,  $\text{Min } \sum_t FD(t)$  [custos operacionais + investimentos], onde  $FD(t)$  denota o fator de desconto intertemporal<sup>1</sup>, constitui o objetivo do experimento reportado na Seção IV. No entanto, critérios alternativos, tais como as importações de carvão, as emissões atmosféricas ou a economia de derivados de petróleo, podem ser facilmente incorporados.

O modelo de otimização desenvolvido é dinâmico, setorial e regional. Os aspectos dinâmicos incluem, além da expansão das capacidades produtivas e da introdução de novas tecnologias, a exaustão das jazidas. A alocação intertemporal de um recurso esgotável tem como base o confronto entre o consumo presente e as necessidades de consumo futuro: quanto maior a quantidade de carvão minerado no presente, menor será a disponibilidade futura, sob

---

<sup>1</sup> Na descrição do modelo, as variáveis em itálico denotam parâmetros exógenos.

a forma de "reservas", do recurso. A classificação setorial da demanda permite incorporar ao modelo restrições específicas quanto às características do carvão requerido pelos diferentes setores de consumo final. Uma vez que o carvão mineral não é um produto homogêneo, a entrada de novos consumidores tende a alterar o perfil da demanda final ao qual a estrutura de produção do setor deve se adaptar. O beneficiamento permite compatibilizar a qualidade do carvão minerado com a especificidade de sua utilização. A regionalização do modelo permite simultaneamente uma análise das disparidades entre a oferta e a demanda regional de carvão mineral. Através de mudanças na estrutura de transportes, torna-se factível o equilíbrio espacial da oferta e da demanda.

As restrições que compõem o modelo de otimização, ordenadas segundo o fluxo físico do carvão mineral, ou seja, mineração, beneficiamento, transporte e utilização, são descritas a seguir.

## II.1 - Mineração

A escolha de um processo de mineração depende de fatores geológicos, tecnológicos e econômicos. Além da profundidade da camada, são considerados determinantes geológicos da eficiência dos processos de mineração: a espessura da camada, a configuração geométrica e a inclinação da jazida. O principal fator tecnológico refere-se à flexibilidade de operação do processo com relação a variações na configuração da camada, na medida em que estas afetam a extração efetiva do mineral. A proximidade quanto

aos serviços de água, energia elétrica, transportes e centros consumidores e a relação entre o valor do mercado e o custo de extração constituem os fatores econômicos.

Os processos de mineração de carvão podem ser classificados em duas categorias: a céu aberto (superfície) e subterrâneo (subsolo). O primeiro método é em geral mais flexível com relação a variações na configuração geométrica da camada e recupera uma maior proporção do carvão que os métodos de mineração subterrânea: até 95% das reservas in situ podem ser recuperadas a céu aberto. A profundidade (acima de 30m) é, no entanto, considerada elemento prejudicial de sua eficiência.

Os métodos de mineração subterrânea permitem a extração do carvão a grandes profundidades, e sua tecnologia compreende principalmente dois processos: "câmaras e pilares" e "longwall". No processo de "câmaras e pilares" o carvão é minerado através de "salões" abertos na camada, deixando-se "pilares" de carvão para o sustento do teto. Em geral, o abandono dos pilares resulta em baixa recuperação (não superando 50-60%) das reservas in situ. Se as condições geológicas permitirem a recuperação dos pilares sem colapso da superfície, a remoção destes constituirá o último estágio de exploração do depósito, caso em que há um aumento da recuperação do mineral. No entanto, a taxa de recuperação decresce em geral rapidamente com a profundidade, devido ao abandono de maior volume de carvão em pilares.

O processo de "longwall" utiliza um sistema de suporte hidráulico para sustento do teto da mina e, por este motivo, permite uma recuperação maior do carvão na jazida, atingindo 80% das

reservas in situ. Após a extração do carvão os suportes são removidos, provocando um desabamento uniforme do teto da mina, que minimiza o impacto na topografia da superfície. É considerado o processo subterrâneo mais eficiente para garantir altas taxas de extração a grandes profundidades, mas é menos flexível que o de "câmaras e pilares", requerendo uma camada regular em espessura e limpa. O afinamento da camada e a presença de pedras prejudicam o equipamento de corte, enquanto a expansão da camada gera maiores perdas de carvão.

Denotando por ROM<sub>jnt</sub> a quantidade de carvão run-of-mine extraída da jazida j pelo processo n no período t, a oferta de carvão minerado em toneladas CMN<sub>jt</sub> é o somatório das quantidades obtidas pelos diversos métodos, ou seja:

$$CMN_{jt} = \sum_n ROM_{jnt} \quad \forall j, t$$

Dado que a produção de jazida acumulada no decorrer do horizonte de planejamento não pode exceder o volume de reservas recuperáveis:

$$\sum_{t,n} \frac{ROM_{jnt}}{IRE(j,n)} \leq RES(j) \quad \forall j$$

onde  $IRE(j,n)$  é o índice de recuperação do processo de mineração n quando aplicado à jazida j e  $RES(j)$  denota a reserva da jazida.

Em geral atribue-se à mineração a céu aberto uma maior produtividade do trabalho e a necessidade de mão-de-obra especializada. Com relação ao investimento em minas a céu aberto, é notório que os produtores de equipamentos têm procurado se benefi-

ciar de economias de escala, aumentando significativamente a capacidade do equipamento disponível, o que torna o processo mais dispendioso se as reservas não forem suficientemente grandes para assegurar uma produção anual que permita alta taxa de utilização do equipamento. Ainda assim, o custo da mineração a céu aberto é em geral inferior ao da mineração subterrânea por tonelada de carvão extraído.

Embora o investimento unitário em minas subterrâneas possa ser comparável ao realizado em minas a céu aberto, a mineração de subsolo é geralmente mais intensiva em mão-de-obra, o que onera seu custo operacional. Quanto aos distintos processos de mineração subterrânea, o investimento em uma mina "longwall" é em geral superior ao efetuado em uma mina "câmaras e pilares" de mesma capacidade.

A substância minerada em uma jazida, por qualquer processo, é constituída de carvão e inertes (material estéril). Em geral, as frações de inertes maiores podem ser separadas do carvão mineral por escolha prévia, enquanto as menores são separadas, após britagem, nas etapas de pré-beneficiamento e beneficiamento. A proporção em massa de carvão sobre a substância minerada para um dado processo e uma determinada jazida  $IIN(j,n)$  depende da geologia da camada, dos aspectos tecnológicos do método de mineração e do grau de mecanização. Os inertes contribuem para que a quantidade de carvão minerado seja inferior à capacidade de mineração instalada na jazida. Distinguindo a capacidade de mineração instalada em cada período em "posterior" (adicionada ao longo do horizonte de planejamento) e "inicial" (anterior ao período

do planejamento), denotadas respectivamente por  $KPM_{jnt}$  e  $KIM(j,n)$ , a quantidade de carvão minerado é limitada por:

$$\frac{ROM_{jnt}}{IIN(j,n)} \leq KPM_{jnt} + KIM(j,n) \quad \forall j,n,t$$

e:

$$KPM_{jnt} \geq KPM_{jn(t-1)} \quad \forall j,n,t \geq 2$$

## II.2 - Beneficiamento

O carvão mineral, dependendo de sua qualidade e utilização, poderá requerer alguma forma de preparação ou beneficiamento, cujo objetivo é, normalmente, a redução dos teores de cinza e enxofre. A redução do teor de enxofre visa a minimizar, em utilizações industriais, a geração de gases nocivos resultantes da oxidação do enxofre, enquanto a redução do teor de cinzas aumenta o teor de matéria carbonosa e, portanto, o poder calorífico.

O carvão minerado em uma jazida pode, portanto, ser destinado à utilização direta — o que denominamos de carvão não-beneficiado ou  $CNB_{jt}$  — ou às instalações de beneficiamento para a lavagem. Denotando por  $BEN_{lmt}$  a tonelagem de carvão beneficiado pelo processo  $m$  na instalação  $l$ , o total de carvão lavado em  $l$  é dado por:

$$\sum_m BEN_{lmt} = \sum_{\{j/\text{destino}(j)=1\}} (CMN_{jt} - CNB_{jt}). \quad \forall l,t$$

Uma vez que o carvão não-beneficiado não pode exceder a quantidade de carvão minerado na jazida, temos ainda que:

$$CMN_{jt} \geq CNB_{jt} \quad \forall j,t$$

Ensaio de lavabilidade em laboratório baseados na separação, em líquidos com densidade controlada, dos carvões em frações, permitem a construção das chamadas curvas de "lavabilidade", através das quais pode ser previsto o comportamento teórico do carvão quando submetido ao beneficiamento. Em geral, o beneficiamento do carvão mineral gera duas frações: a nobre, ou flutuado, com teor de cinzas inferior ao do carvão de alimentação e, portanto, maior concentração de carbono; e a não-nobre, ou afundado, com teor de cinzas superior ao da alimentação e, portanto, menor poder calorífico. As curvas de lavabilidade indicam o rendimento teórico (em massa) da fração nobre do carvão de alimentação em função do teor de cinzas. Carvões de diferentes origens, devido à sua composição, têm comportamento distinto quanto à lavabilidade, conforme exemplifica a Figura 1.

A eficiência dos diferentes processos de beneficiamento (os mais utilizados são jigs e meio-denso) pode ser então caracterizada pelo grau de aproximação às curvas de lavabilidade teóricas. A jigagem é um processo gravimétrico que efetua a separação aproveitando a diferença de densidade entre as frações de carvão resultantes, onde a massa de carvão é submetida à ação periódica de um fluido pulsante sobre o leito de carvão. O beneficiamento em meio denso emprega um líquido de densidade intermediária entre

as frações de carvão a serem separadas, de modo que uma fração flutue e a outra afunde. Para a mesma massa, o processo em meio-denso produz uma fração nobre do carvão com características superiores às obtidas em jigs. A Figura 2 apresenta as curvas de Mayer, para o carvão de Leão, que indicam os rendimentos do beneficiamento em fração nobre em função do teor de cinzas do flutuado para jigs e meio-denso.

Denotando por  $FBN_{jlimt}$  a tonelagem de carvão oriunda da jazida  $j$  destinada ao lavador  $l$ , para produção de carvão tipo  $i$  pelo processo  $m$ , o volume beneficiado em um lavador por um determinado método é a soma das frações de diferentes jazidas destinadas a produzir cada um dos tipos nobres:

$$BEN_{lmt} = \sum_{j,i} FBN_{jlimt} \quad \forall l,m,t$$

Como o equilíbrio em massa entre as cinzas do carvão de alimentação e das frações nobre e não-nobre do beneficiamento permite a determinação do teor de cinzas do afundado correspondente a cada ponto da curva de Mayer, um carvão de determinado tipo pode resultar tanto do flutuado quanto do afundado para diferentes carvões de alimentação. Representando o rendimento do beneficiamento do carvão da jazida  $j$  em fração-nobre do tipo  $i$  pelo processo  $m$  (curva de Mayer) por  $RND(j,i,m)$ , a disponibilidade do carvão do tipo  $i$  lavado em  $l$ ,  $LAV_{lit}$ , é dado por:

$$LAV_{lit} = \sum_{j,m} RND(j,i,m) FBN_{jl'imt} + \\ + \sum_{j,m} \sum_{\{r/afundado(r)=i\}} [1-RND(j,r,m)] FBN_{jlrmt} \quad \forall l,i,t$$

Figura 1

### CURVAS EM FUNÇÃO DO TEOR EM CINZAS

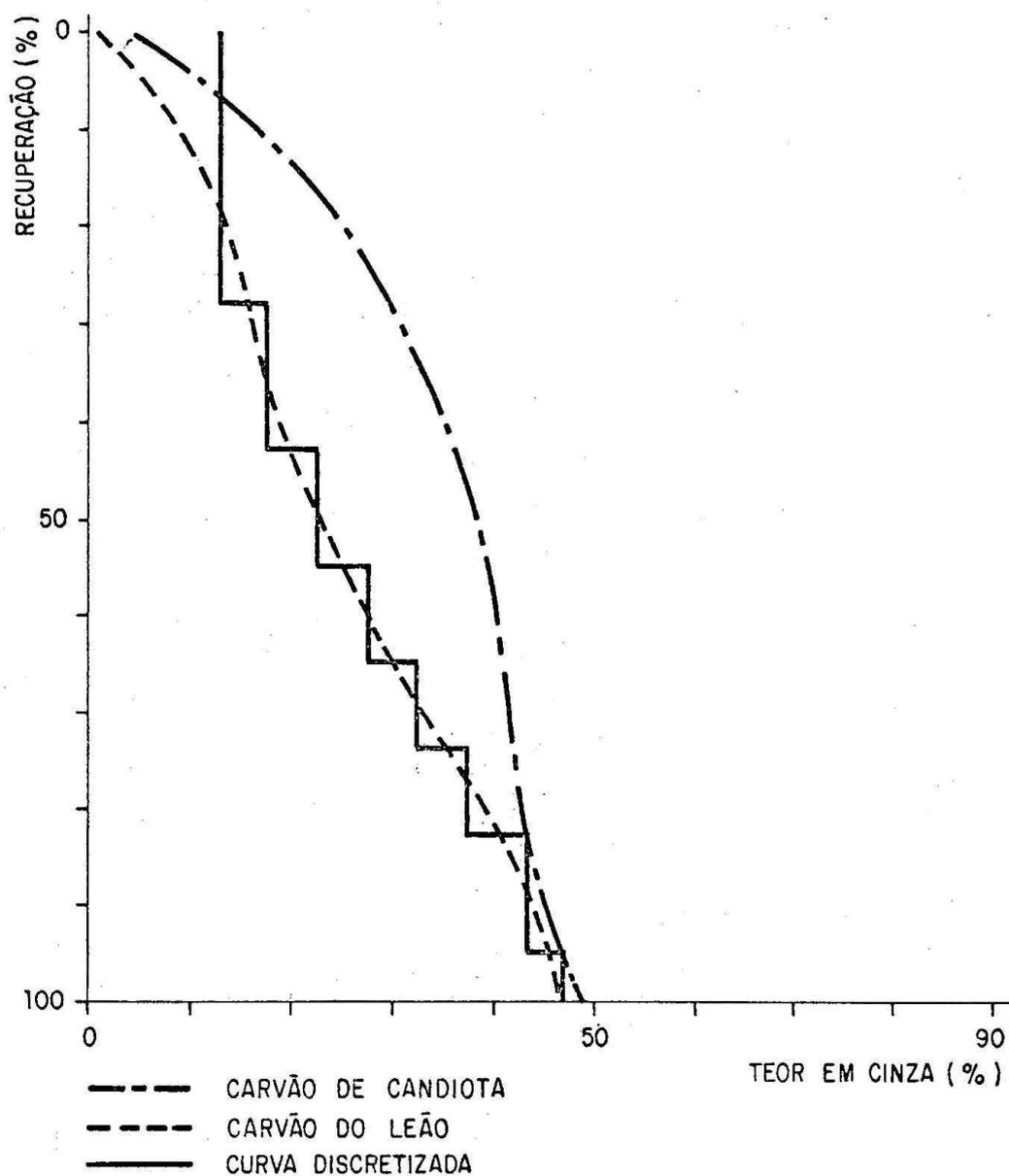
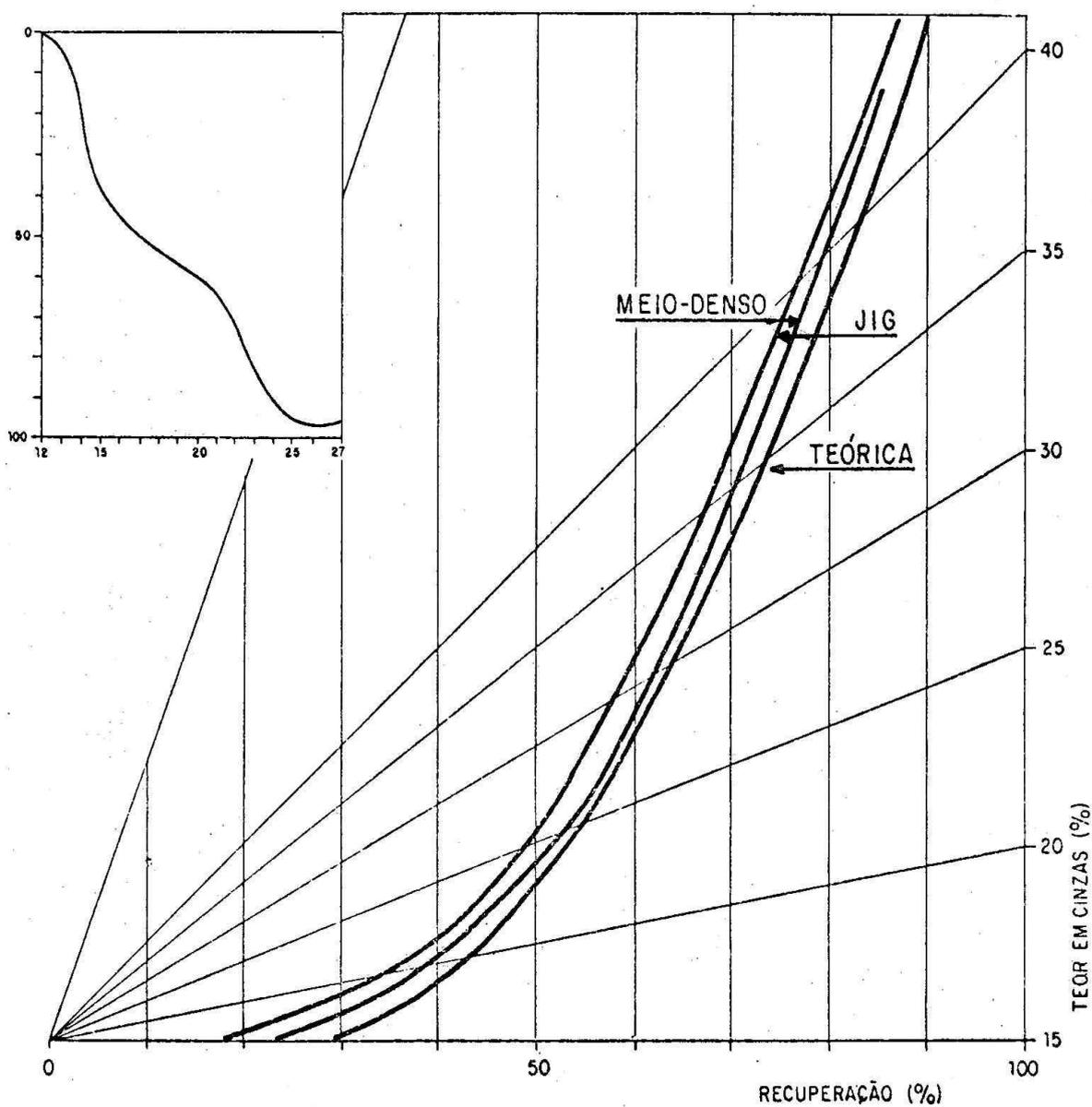


Figura 2

BENEFICIAMENTO DO CARVÃO DA JAZIDA DO LEÃO



A seleção de um processo de beneficiamento depende, além das peculiaridades do carvão minerado, das características exigidas para a utilização final do carvão e de aspectos tecnológicos e econômicos. O processo de jigagem é responsável por 50% do carvão beneficiado no mundo, o que se deve à sua simplicidade de operação e baixos custos, pois o investimento em uma instalação de beneficiamento em meio-denso é superior àquele necessário em um jig de igual capacidade. Em termos operacionais, o custo do meio-denso é também superior ao jig por tonelada de alimentação, devido principalmente à utilização de magnetita. A competitividade econômica dos processos de meio-denso e jigs depende, portanto, de como o preço do carvão está relacionado com seu poder calorífico, ou seja, o valor atribuído ao ganho na qualidade versus o adicional de custo operacional e de capital.

De forma análoga à mineração, a quantidade de carvão beneficiado em um lavador por determinado processo está limitada pela capacidade instalada (inicial e posterior) disponível no período:

$$BEN_{lmt} \leq KPBl_{mt} + KIB(l, m). \quad \forall l, m, t$$

A não-negatividade das adições de capacidade é garantida pela restrição:

$$KPBl_{mt} \geq KPBl_{m(t-1)}. \quad \forall l, m, t \geq 2$$

II. 3 - Transporte

O carvão mineral após o beneficiamento, em geral próximo às minas, é transportado para os mercados de consumo final por correias transportadoras, rodovias, ferrovias e/ou hidrovias. O transporte terrestre a pequenas distâncias é realizado primordialmente por correias transportadoras e por rodovias, predominando à longa distância o transporte ferroviário, enquanto o transporte marítimo do carvão se faz em geral por navios graneleiros.

Indexando por q as posições geográficas dos mercados consumidores e por k as diversas utilizações nas regiões, a disponibilidade em q para a utilização k de carvão do tipo i no período t, CPUqkit, é constituída pela produção da própria região (lavado e não beneficiado) adicionada do carvão transportado para a região em termos líquidos. Admitindo a possibilidade de rotas alternativas de transporte inter-regional, indexadas por s, denota-se o transporte em toneladas de carvão do tipo i pela rota s no período t por CTRsit, garantindo, desta forma, o equilíbrio na rede de transportes através da restrição:

$$\sum_{\{l/\text{região}(l)=q\}} LAVlit + \sum_{\{j/\text{tipo}(j)=i \ \& \ \text{região}(j)=q\}} CNBjt$$

$$- \sum_{\{s/\text{origem}(s)=q\}} CTRsit + \sum_{\{s/\text{destino}(s)=q\}} CTRsit$$

$$\geq \sum_k CPUqkit \quad \forall q, i, t$$

O custo de transporte de carvão, tanto terrestre como marítimo, é fator determinante da extensão geográfica do mercado futuro de carvão mineral e de sua competitividade como combustível alternativo. Como, por exemplo, o custo de transporte do carvão por unidade de energia transportada é em geral superior ao custo de transporte dos derivados de petróleo, a vantagem comparativa petróleo/carvão, portanto, deve depender da distância do mercado consumidor.

A expansão do mercado de carvão mineral deverá requerer uma correspondente ampliação das capacidades do sistema de transportes, tanto ferroviário como hidroviário, cuja evolução intertemporal depende dos programas de expansão já contratados e de novos investimentos. Os novos investimentos, devido ao longo prazo de maturação, devem ser iniciados com considerável antecedência, de forma a evitar um estrangulamento do fluxo de carvão mineral, gerando desequilíbrios regionais entre a oferta e a demanda.

Denotando a capacidade de transporte inicial e adicionada no decorrer do período de planejamento na rota  $s$  por  $KIT(s)$  e  $KPTst$ , respectivamente, a quantidade total de carvão transportada em determinada rota deve satisfazer:

$$\sum_i CTRsit \leq KPTst + KIT(s) \quad \forall s, t$$

com:

$$KPTst \geq KPTs(t-1) \quad \forall s, t \geq 2$$

Para as rotas que envolvem tráfego por portos, o carvão transportado está ainda sujeito a uma limitação dada pela capacidade operacional do porto. Indexando os portos por  $p$  e denotando por  $KPP_{pt}$  e  $KIP(p)$  a capacidade adicional e inicial dos portos, é necessário que:

$$\sum_{\substack{\{s/\text{destino}(s)=p \\ \text{ou origem}(s)=p\}}} CTR_{sit} \leq KPP_{pt} + KIP(p) \quad \forall p, t$$

com a evolução das capacidades satisfazendo:

$$KPP_{pt} \geq KPP_{p(t-1)} \quad \forall p, t \geq 2$$

#### II. 4 - Utilização

A utilização final do carvão impõe, em geral, restrições à composição do mineral, tais como limites aos teores de cinzas e enxofre. Por exemplo, o rendimento de um alto-forno varia inversamente com o teor de cinzas do coque, que é função direta do teor de cinzas do carvão metalúrgico. Dada uma especificação para o coque, pode ser determinado o teor máximo de cinzas da demanda de carvão coqueificável do setor siderúrgico. Para a indústria de cimento, segundo indicações técnicas do setor, o carvão deve ter no máximo 35% de cinzas, enquanto alguns processos de gaseificação impõem um limite de 20-25% de cinzas de alimentação.

O carvão para caldeiras na geração termoelétrica e nas indústrias petroquímica, de papel e celulose, e outras é um produto com cerca de 40% de cinzas, ao passo que para cerâmicas e olarias, admite-se para o carvão destinado à queima direta teores de cinza superiores a 40%.

Pelos motivos acima expostos, a demanda de carvão em uma região pode assumir duas formas. No caso da demanda de um tipo específico de carvão, esta deverá ser satisfeita pela quantidade deste tipo de carvão disponível para utilização na região, portanto, dada a demanda em toneladas na região  $q$  por carvão do tipo  $i$   $DTON(q, i, t)$ , é necessário que:

$$\sum_k CPUqkit \geq DTON(q, i, t) \quad \forall q, i, t$$

No caso de aplicações que não especifiquem a qualidade do mineral, o carvão utilizado dependerá da relação entre os custos de beneficiamento e transporte, porque quanto menor o teor de cinzas do carvão maior será seu poder calorífico e, portanto, maior será a quantidade de energia transportada por tonelada. Representando a demanda não específica na região  $q$  para a utilização  $k$  em unidades de energia por  $DENE(q, k, t)$ , o poder calorífico do carvão do tipo  $i$  por  $PCA(i)$  e a eficiência da utilização  $k$  por  $EF(k)$ , a restrição de demanda tem a forma:

$$\sum_i CPUqkit PCA(i) EF(k) \geq DENE(q, k, t) \quad \forall q, k, t$$

### III - Aplicação ao Carvão Mineral Nacional

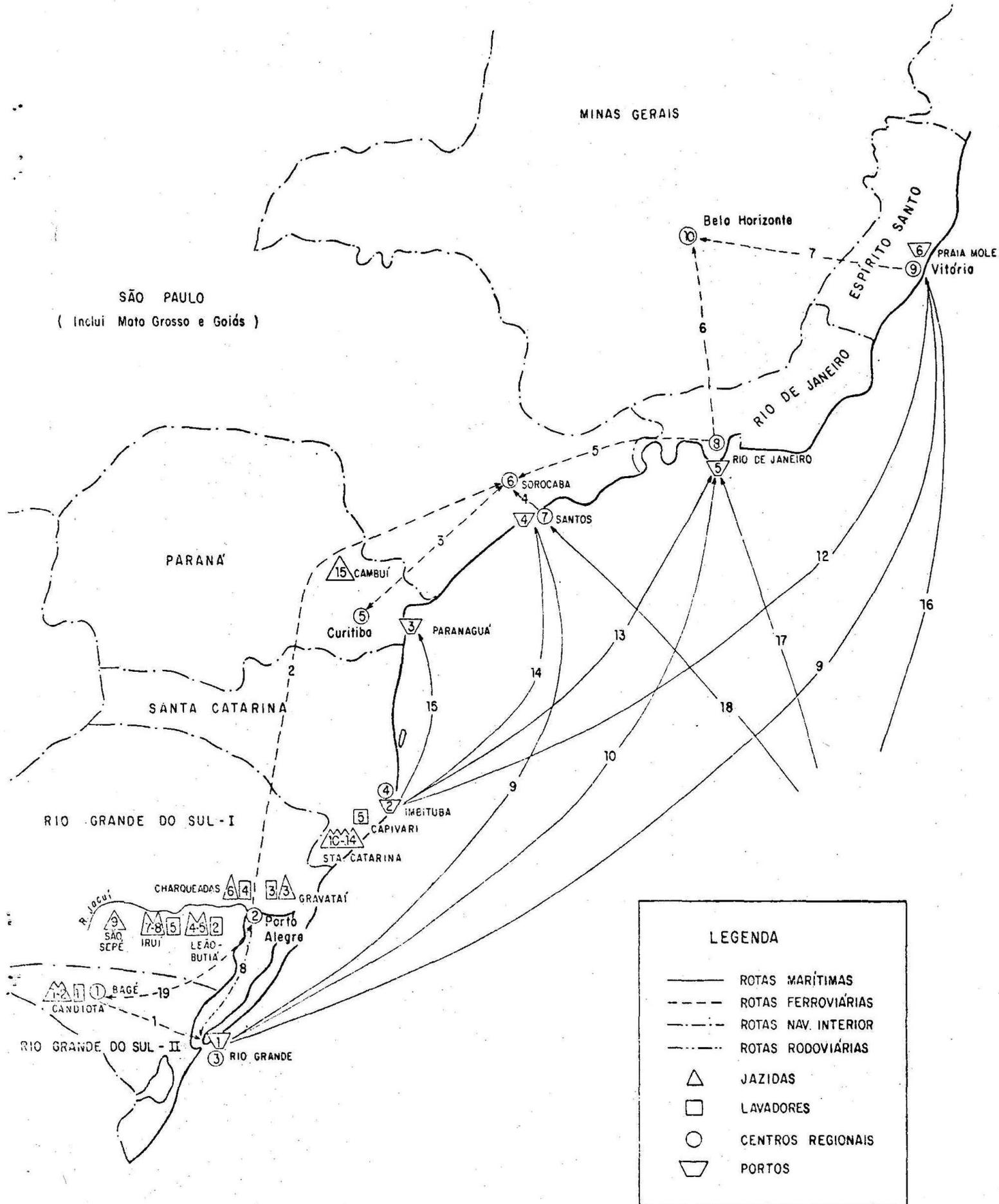
Nesta seção descrevem-se os aspectos específicos da aplicação do modelo de otimização, apresentado na seção anterior, ao carvão mineral nacional. As 11 regiões que compõem o modelo estão identificadas na Figura 3, onde se pode observar que, dentre as 10 localizadas em território nacional, quatro constituem simultaneamente regiões de produção e consumo: Bagé, Porto Alegre, Santa Catarina e Paraná. A região do Rio Grande justifica-se em virtude de sua importância futura no transporte inter-regional através do Porto de Rio Grande, enquanto as outras cinco (São Paulo, Santos, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais) delimitam espacialmente os principais centros de consumo futuro do carvão mineral. De forma a permitir transações de carvão com o resto do mundo, principalmente através de importações de carvão metalúrgico, foi criada uma região adicional, fora do território nacional, a que denominamos de Exterior.

São cinco as utilizações previstas para o carvão mineral incorporadas ao modelo: combustão, indústria de cimento, siderurgia, termelétrica e gaseificação, com eficiências de conversão relativas ao rendimento do óleo combustível na mesma utilização de 85, 90, 90, 85 e 100%, respectivamente. Um custo intra-regional de transporte por utilização foi arbitrado com base na distância média ao centro regional.

A título de simplificação, a qualidade dos diversos tipos de carvão foi caracterizada exclusivamente pelo seu teor de cinzas, por constituírem elas o principal elemento de restrição à

Figura 3

# FLUXO DO CARVÃO MINERAL NO MODELO



utilização do carvão mineral nacional. Uma tipologia mais completa envolvendo outras qualidades do mineral, tais como os teores de enxofre e matérias voláteis, pode ser incorporada ao modelo sem maiores dificuldades. Com base nos teores de cinza dos carvões minerados e utilizados, foram definidos nove tipos de carvão discriminados na tabela abaixo.

Tabela III.1

Classificação dos tipos de Carvão Nacionais

Tipo	Teor de Cinzas Típico (%)	Faixa de Teores de Cinzas (%)	Poder Calorífico (Gcal/ton)
1	18	18	>6.700
2	20	18-22	6.300
3	25	23-27	5.900
4	30	28-32	5.400
5	35	33-37	4.900
6	40	38-43	4.500
7	47	44-49	3.900
8	54	50-59	3.500
9	64	60-69	2.500
0	-	>70	-

O carvão de melhor qualidade — tipo 1 — atualmente é produto (flutuado) do beneficiamento do carvão coqueificável de Santa Catarina, não tendo utilização energética. Tampouco para

os carvões com teores de cinza superiores a 60%, subproduto (afundado) do beneficiamento de alguns carvões nacionais, é prevista a utilização energética. Os carvões aproveitáveis, cujo teor de cinzas varia de 19 a 59, são identificados por tipos caracterizados pelo teor médio em cada faixa. O poder calorífico de cada tipo de carvão é estimado por uma média dos poderes caloríficos para os carvões deste tipo produzidos no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina.

Nove fontes de carvão mineral para utilização doméstica compõem o modelo: além do exterior, que supre atualmente aproximadamente 80% das necessidades de carvão metalúrgico, oito jazidas domésticas complementam o quadro da oferta de carvão mineral, cuja localização geográfica está indicada na Figura 3. São considerados apenas três processos de mineração: céu aberto, câmaras e pilares e longwall, com variantes quanto ao grau de mecanização. Dado o pequeno número de opções e a necessidade de reduzir a dimensão do modelo, a escolha de processos de mineração baseou-se em aspectos puramente geológicos da jazida, optando-se pelo longwall mecanizado para as jazidas subterrâneas do Rio Grande do Sul e por câmaras e pilares para as subterrâneas e de meia-encosta em Santa Catarina e no Paraná. O grau de mecanização foi arbitrado com base no tamanho das reservas, na espessura da camada e na experiência histórica de mineração na jazida, pois quanto maior o grau de mecanização maior é a produtividade da jazida. Porém, a perda da seletividade manual dos mineradores resulta numa maior percentagem de inertes, o que onera o custo de extração por tonelada de carvão. A Tabela III.2 resume os principais parâmetros para o módulo de mineração.

Tabela III.2

## Caracterização das principais jazidas de carvão mineral

Nº	Jazida	Processo de Mineração	Tipo	Recuperação (%)	Carvão (%)	Reservas (10 <sup>9</sup> ton)	Custo de Capital (US\$/ton.ano)*	Custo Operacional (US\$/ton)*
1	Candiota	CA	8	95	80	365	26	4,50
2	Candiota	SS/MM	8	80	70	41	55	14,00
3	Morungava-Gravataí	SS/MM	8	80	70	50	90	15,00
4	Leão-Butiã	CA	8	95	82	20	20	6,00
5	Leão-Butiã	SS/MM	8	85	80	337	48	15,00
6	Charqueadas-Triunfo	SS/MM	7	80	75	665	70	25,00
7	Iruí	CA	8	95	80	42	15	9,50
8	Iruí	SS/MM	8	80	75	80	55	15,00
9	São Sepê	CA	8	90	80	4	23	16,00
10	Santa Catarina	CA	5	90	40	45	20	5,00
11	Santa Catarina	ME/SM	5	65	33	107	10	11,00
12	Santa Catarina	ME/MM	5	75	25	84	18	9,00
13	Santa Catarina	SS/SM	5	65	30	214	11	11,00
14	Santa Catarina	SS/MM	5	75	25	251	20	9,00
15	Cambuí	SS/MAN	6	65	73	27	20	15,00
16	Exterior	-	1	-	-	-	-	63,00

CA: céu aberto      MAN: manual

SS: subterrâneo      SM: semimecanizado

ME: meia-encosta      MM: mecanizado

\* Os valores em dolar referem-se a dezembro de 1980

FONTE: FINEP (1981) . Elaboração: IPEA/INPES nas duas últimas colunas.

A expansão da capacidade de mineração é condicionada pela existência de projetos de novas minas, os quais dependem do conhecimento detalhado da geologia da jazida. Estes levantamentos geológicos e a confecção do projeto são atividades demoradas e custosas e, além disto, o tempo requerido para abertura das minas (dois a quatro anos para minas a céu aberto e quatro a oito anos para minas subterrâneas) também contribui para limitar a velocidade com que a capacidade de mineração nas várias jazidas pode ser aumentada. Para quantificar estas restrições, fez-se uma compilação de todos os projetos de minas (inclusive conceituais) que se pode localizar e, considerando a data mais próxima em que elas poderiam operar, obteve-se os limites máximos de expansão de mineração encontrados na Tabela III.3. Os projetos de mineração em andamento à época de estudo em Leão, Candiota e Iruí impõem limites mínimos de expansão nas jazidas respectivas, que também foram incorporados ao modelo.

Dois processos de beneficiamento são avaliados pelo modelo: jigs e meio-denso. O custo de capital para os jigs é de US\$3 por tonelada/ano de capacidade de processamento, enquanto para os lavadores a meio-denso é de aproximadamente o dobro, ou seja, US\$6 por tonelada/ano. Por tonelada de carvão de alimentação processado os custos operacionais dos jigs e do meio-denso são, respectivamente, US\$0,70 e US\$1,50. O rendimento da lavabilidade em jigs e meio-denso para cada tipo de carvão foi estimado a partir das curvas de Mayer pela média aritmética dos rendimentos dentro de cada faixa de teores de cinza. Este procedimento, ilustrado na Figura 1 para a curva teórica, corresponde a uma aproximação em degraus das funções de rendimento não-lineares.

Tabela III.3

Acréscimo máximo da capacidade de mineração com relação à inicial

Nº	Jazidas	Processo de Mineração	Acréscimo máximo de capacidade (10 <sup>6</sup> ton anuais)					
			1981-82	1983-84	1985-86	1987-88	1989-94	1995-00
1	Candiota	CA	0,300	2,600	6,200	8,900	13,300	18,000
2	Candiota	SS/MM	0,0	0,0	0,0	0,0	3,000	6,000
3	Morongava-Gravataí	SS/MM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	Leão-Butiã	CA	0,623	0,900	0,900	0,900	2,500	5,000
5	Leão-Butiã	SS/MM	0,500	1,425	3,500	5,680	8,000	8,000
6	Charqueadas-Triunfo	SS/MM	0,0	0,0	0,0	0,0	3,000	6,000
7	Iruí	CA	0,0	1,137	1,560	2,500	4,500	9,000
8	Iruí	SS/MM	0,0	0,0	0,0	0,0	3,000	6,000
9	São Sepê	CA	0,0	0,537	1,712	3,0	3,000	3,000
10	Santa Catarina	CA	0,250	2,225	3,100	3,100	4,500	4,500
11	Santa Catarina	ME/SM	0,870	3,270	3,390	3,390	6,000	8,000
12	Santa Catarina	ME/MM	0,160	2,560	6,640	6,640	8,000	8,000
13	Santa Catarina	SS/SM	0,325	1,615	1,615	1,610	3,000	6,000
14	Santa Catarina	SS/MM	0,0	2,360	7,320	10,200	14,000	18,000
15	Cambuí	SS/MAN	0,080	0,140	0,280	0,280	0,600	1,000
16	Exterior*	-	4,900	7,900	10,730	11,610	15,900	22,000

FONTE: dados do Ministério das Minas e Energia, Elaboração: IPEA/INPES

\* Estas restrições referem-se às limitações de importação de carvão metalúrgico.

O modelo permite a construção e expansão das sete instalações de beneficiamento representadas na Figura 3. No Rio Grande do Sul cinco lavadores serviriam às seis jazidas do Estado, enquanto em Santa Catarina, além do atual Lavador Central de Capivari, é considerada a alternativa de um lavador adicional. Os custos operacionais e os investimentos nos segmentos de transporte jazida/lavador e lavador/centro regional foram estimados com base em distâncias médias e tipo de transporte (correia transportadora, rodovias, barcaças e ferrovias).

As possibilidades de transporte inter-regional totalizam 19 rotas, conforme ilustra a Figura 3. A dificuldade principal na avaliação dos custos de transporte advém da intensa participação estatal na propriedade e regulamentação dos sistemas de transporte, principalmente o ferroviário, pois as tarifas cobradas em geral não refletem os seus custos reais. A Tabela III. 4 apresenta os dados para os investimentos e os custos operacionais, estimados a partir das distâncias médias de percurso ferroviário e dos fretes marítimos para as diversas rotas de transporte.

O transporte marítimo do carvão em território nacional poderá ser realizado através de seis portos (indicados na Figura 3), cujos investimentos em construção e expansão, assim como sua atual capacidade de movimentação anual, encontram-se na Tabela III.5. Um custo uniforme de movimentação foi arbitrado em US\$1,10 por tonelada movimentada.

Tabela III.4

Caracterização das principais rotas de transporte do carvão mineral

Nº da Rota	Região de Origem	Região de Origem	Tipo de Transporte	Investimento (US\$/ton. ano de capacidade de movimentação) *	Custo Operacional (US\$/ton transportada) *
1	Bage	Rio Grande	Ferrováriario	10,0	4,0
2	Porto Alegre	São Paulo	Ferrováriario	100,0	15,0
3	Paraná	São Paulo	Ferrováriario	10,0	5,2
4	Santos	São Paulo	Ferrováriario	40,0	6,4
5	Rio de Janeiro	São Paulo	Ferrováriario	15,0	8,0
6	Rio de Janeiro	Minas Gerais	Ferrováriario	10,0	7,0
7	Espírito Santo	Minas Gerais	Ferrováriario	10,0	4,0
8	Porto Alegre	Rio Grande	Fluvial	20,0	2,0
9	Rio Grande	Espírito Santo	Marítimo	16,1	8,7
10	Rio Grande	Rio de Janeiro	Marítimo	13,7	7,6
11	Rio Grande	Santos	Marítimo	12,3	6,6
12	Santa Catarina	Espírito Santo	Marítimo	13,7	7,3
13	Santa Catarina	Rio de Janeiro	Marítimo	11,1	6,2
14	Santa Catarina	Santos	Marítimo	12,0	5,3
15	Santa Catarina	Paraná	Marítimo	12,0	3,8
16	Exterior	Santos	Marítimo	-	20,0
17	Exterior	Rio de Janeiro	Marítimo	-	20,0
18	Exterior	Espírito Santo	Marítimo	-	20,0
19.	Porto Alegre	Bagé	Ferrováriario	10,0	7,0

FONTE: FINEP (1981). Elaboração: IPEA/INPES

\* os valores em dolar se referem a dezembro de 1980

Tabela III.5

Características dos portos para movimentação do carvão mineral

Nº	Porto	Investimento (US\$/ton./ano de capacidade de movimentação)	Capacidade Inicial (10 <sup>6</sup> ton./ano)
1	Rio Grande	17,0	0,24
2	Imbituba	20,2	2,20
3	Antonina	20,2	0,40
4	Santos/Cosipa	23,1	6,00
5	Sepetiba/Rio	20,2	2,60
6	Praia Mole/Vitória	27,0	4,00

FONTES: FINEP (1981) e Portobrás

A expansão da capacidade dos portos é limitada pela velocidade com que as obras podem ser executadas, o que gera os limites da Tabela III.6, onde foi também incluída uma expansão mínima correspondente ao projeto em execução em Sepetiba.

As demandas regionais até 1985 de carvão mineral correspondem à "hipótese moderada" elaborada pela SEAP<sup>2</sup> (Tabela III.7), que considera uma acentuada redução na demanda das indústrias diversas e na gaseificação em relação aos programas estaduais (principalmente do Rio Grande do Sul) e outros projetos ainda em estudo, que compõem a "hipótese otimista". Este cenário foi extrapolado até o ano 2000, com base no confronto entre as taxas de crescimento histórico e previstas. Demandas energéticas ou não-específicas foram

<sup>2</sup> Foram inseridas no modelo demandas por tipos específicos de carvão suficientes para atender aos usuários já instalados.

Tabela III.6

Acréscimo máximo da capacidade dos portos, com relação à inicial

Nº	Porto	Acréscimo máximo de capacidade (10 <sup>6</sup> ton anuais)					
		1981-82	1983-84	1985-86	1987-88	1989-94	1995-00
1	Rio Grande	0,540	1,200	3,000	6,000	9,000	12,000
2	Imbituba	1,000	2,000	3,000	6,000	6,000	12,000
3	Antonina	0,000	0,300	0,500	1,000	1,000	1,000
4	Santos/Cosipa	1,000	4,000	4,000	4,000	6,000	6,000
5	Sepetiba/Rio	3,500	7,000	7,000	9,500	9,000	13,000
6	Praia Mole/Vitória	0,000	1,000	4,000	4,000	6,000	9,000

PROJEÇÃO DA DEMANDA DE CARVÃO VAPOR MINERAL  
POR ESTADO

ESTADO	SETOR DE CONSUMO	DEMANDA 10 <sup>3</sup> t						TIPO DE CARVÃO %CZ
		80	81	82	83	84	85	
RIO GRANDE DO SUL	GASEIFICAÇÃO	-	-	695	695	1588	1588	63%CZ 20%CZ
		-	-	-	130	210	290	
		-	-	695	825	1798	1878	
	SIDERURUGIA	126	126	126	142	238	244	35%CZ
	COMBUSTÃO	-	40	240	540	720	840	47%CZ
		-	-	60	84	168	468	40%CZ
		-	100	200	300	700	700	40% e 52%CZ
			140	500	924	1588	2108	
	CIMENTO	60	60	60	60	60	60	20%CZ
		74	74	74	174	174	174	35%CZ
134		134	134	234	234	234		
TERMELETRICIDADE	599	506	576	786	1675	1954	52%CZ	
	649	596	628	644	596	559	40% e 52%CZ	
	1251	1230	1593	1819	2660	2513		
SUBTOTAL		1511	1630	3048	3944	6518	6977	
SANTA CATARINA	GASEIFICAÇÃO	-	-	525	788	1050	1050	35%CZ
	COMBUSTÃO	50	70	90	110	130	150	40%CZ
	TRANSPORTE	42	45	57	72	77	84	35%CZ
	CIMENTO	10	10	12	12	12	12	35%CZ
	TERMELETRICIDADE	1279	990	1139	1277	1212	1208	40%CZ
SUBTOTAL		1381	1115	1823	2259	2481	2504	
PARANÁ	GASEIFICAÇÃO	-	-	-	-	-	800	35%CZ
	CIMENTO	136	139	397	441	485	520	35%CZ
	TERMELETRICIDADE	56	50	52	54	50	48	20%CZ
	COMBUSTÃO	180	180	180	180	180	180	20%CZ
		20	20	22	25	28	31	40%CZ
	200	200	202	205	208	211		
SUBTOTAL		392	389	651	700	743	1579	

## PROJEÇÃO DA DEMANDA DE CARVÃO VAPOR MINERAL

POR ESTADO

(Continuação)

ESTADO	SETOR DE CONSUMO	DEMANDA 10 <sup>3</sup> t						TIPO DE CARVÃO %CZ
		80	81	82	83	84	85	
SÃO PAULO	GASEIFICAÇÃO	-	-	-	-	-	1500	35%CZ
		-	-	-	-	50	650	35%CZ
						50	2150	
	SIDERURGIA	-	-	-	105	105	105	35%CZ
	PAPEL E CELULOSE	-	-	180	180	180	180	40%CZ
	CIMENTO	496	838	1457	1693	1863	1993	35%CZ
SUBTÓTAL		496	838	1637	1978	2198	4428	
RIO DE JANEIRO	GASEIFICAÇÃO	-	-	-	-	-	1350	35%CZ
	SIDERURGIA	-	-	-	-	315	639	35%CZ
	CIMENTO	296	731	856	942	1041	1114	35%CZ
SUBTOTAL		296	731	856	942	1356	3103	
MINAS GERAIS	SIDERURGIA	-	-	-	80	305	333	35%CZ
	CIMENTO	221	418	651	773	851	911	35%CZ
SUBTOTAL		221	418	651	853	1156	1244	
ESPÍRITO SANTO	SIDERURGIA	-	-	20	53	75	108	35%CZ
	CIMENTO	53	68	283	342	376	402	35%CZ
SUBTOTAL		53	68	303	395	451	510	
T O T A L		4350	5189	8969	11071	14903	20345	

Fonte: SEAP (1980)

determinadas a partir da Tabela III.7 utilizando o poder calorífico médio por tipo de carvão da Tabela III.1.

Concluindo, devemos mencionar que a taxa de juros adotada no caso-base foi de 10% e que foi feita uma análise de sensibilidade da solução a este parâmetro.

#### IV - Uma Política de Oferta para o Carvão Mineral

Cobrando um horizonte de planejamento de 20 anos, alternativas de política para o carvão mineral foram avaliadas através do modelo de otimização descrito na Seção II, cuja solução sugerida é exposta e analisada nesta seção. Para fácil compreensão, os resultados foram agrupados segundo quatro períodos bienais de curto prazo (1981/82, 1983/84, 1985/86 e 1987/88) e dois períodos de longo prazo com duração de seis anos (1989/94 e 1995/00).

As decisões referentes à atividade de mineração estão indicadas na Tabela IV.1, onde se observa no primeiro período (1981/82) uma expansão máxima de todas as jazidas, na tentativa de atender às metas otimistas de substituição de óleo combustível no curto prazo. Nos períodos subsequentes o modelo revela uma preferência intertemporal pelas jazidas a céu aberto, com exceção de São Sepé, expandindo-as na velocidade máxima em ambos os Estados produtores, o que se deve aos baixos custos operacionais e de capital da extração a céu aberto. As reservas são um fator limitativo desta expansão em todas as jazidas, exceto Candiota, onde elas são de grande monta.

MINERACAO

Tabela IV.1

Nº da JAZIDA	NOME JAZIDA	ITEM IMPRESSO	10 <sup>6</sup> TON. MINERADA E PARA BENEFICIAMENTO ANUALMENTE, POR PERIODO					
			1981/82	1983/84	1985/86	1987/88	1989/94	1995/00
1	CANDIOTA CA	ROM P/BENEF	1.050 1.050	3.350 3.350	6.950 6.950	9.650 9.650	14.050 14.050	18.750 18.750
3	MURUN.-GRAY SS MM	ROM P/BENEF	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	3.897 3.897
4	LEAO-BUTIA CA	ROM P/BENEF	1.423 1.295	1.700 1.700	1.700 1.700	1.700 1.700	0.000 0.000	1.587 1.587
5	LEAO-BUTIA SS MM	ROM P/BENEF	1.000 1.000	1.925 1.925	4.000 4.000	6.180 6.180	8.500 8.500	8.500 8.500
6	CHARQ.-TRI. SS MM	ROM P/BENEF	0.500 0.500	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.500 0.500
7	IRUI CA	ROM P/BENEF	0.700 0.700	1.125 1.125	1.454 1.454	2.721 2.721	3.631 3.631	2.682 2.682
8	IRUI SS MM	ROM P/BENEF	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	6.000 6.000
9	SAC SEPE CA	ROM P/BENEF	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.000 0.000	0.750 0.750
10	SANTA CAT. CA	ROM P/BENEF	0.750 0.750	2.725 2.725	3.600 3.600	3.600 3.600	5.000 5.000	5.000 5.000
11	SANTA CAT. ME SM	ROM P/BENEF	2.370 1.965	4.770 4.770	4.890 4.890	4.890 4.890	7.500 7.500	9.500 9.500
12	SANTA CAT. ME MM	ROM P/BENEF	2.180 0.000	3.888 0.000	5.220 0.000	3.640 0.000	10.000 0.000	10.000 4.122
13	SANTA CAT. SS SM	ROM P/BENEF	4.725 4.725	6.010 6.010	6.010 6.010	6.010 6.010	7.400 7.400	10.400 10.400
14	SANTA CAT. SS MM	ROM P/BENEF	3.000 0.000	3.000 0.000	4.000 0.000	11.085 2.240	12.385 7.136	21.000 21.000
15	CAMBUI SS MAN	ROM	0.173	0.493	0.700	0.700	1.020	1.420
16	CARVAO MET IMPOR	ROM	4.900	7.900	10.730	11.610	15.900	22.200
TOTAL		ROM P/BENEF.	22.751 11.980	36.886 21.605	49.253 28.604	66.785 35.991	85.386 53.217	122.286 92.758

A mineração subterrânea no Rio Grande do Sul nos primeiros períodos ocorre apenas em Leão-Butiã. As jazidas Morungava-Gravataí, Iruí SS e Charqueadas-Triunfo são utilizadas apenas no último período, enquanto que Candiota SS não é minerada no horizonte de planejamento, pois a combinação de baixa qualidade do carvão e altos custos de mineração induzem o adiamento na utilização destas jazidas. Quanto à mineração subterrânea e à meia-encosta em Santa Catarina, verificamos nos dois primeiros períodos uma expansão maior das minas semimecanizadas, pois elas têm um tempo de maturação mais curto. Nos outros períodos, o aproveitamento da camada Bonito aumenta a participação da mineração mecanizada no Estado de 26% em 1981/82 para 61% no último período.

Com relação ao tratamento do carvão minerado, a Tabela IV.1 também sugere uma modificação significativa: enquanto em 1981/82 apenas 67% do carvão minerado é beneficiado, em 1995/00 92% do carvão é destinado à lavagem. No decorrer do horizonte de planejamento, praticamente todo o carvão produzido no Rio Grande do Sul é beneficiado, inclusive o proveniente de Candiota, cuja lavabilidade é dificultada pela sua qualidade e pela disponibilidade da água. Em Santa Catarina a fração do carvão minerado que não se destina a atender à demanda de carvão metalúrgico não é beneficiada.

A Tabela IV.2 fornece um resumo da produção nacional gerada pelo modelo por tipo de carvão, mostrando que apenas um deles resulta de uma combinação de run-of-mine com produtos da lavagem. A oferta de carvão tipo 5, com 35% de cinzas, resulta tanto de mineração na jazida de Santa Catarina quanto do beneficiamento

Tabela IV.2

RESUMO PRODUÇÃO CARVÃO

TIP CAR	TEOR CZ %	JAZIDA (QDO. NAO BEN.) LAVADOR (QDO. BENEF.)	10 <sup>6</sup> Ton DE CARVÃO PRODUZIDO ANUALMENTE, POR PERIODO					
			1981-82	1983-84	1985-86	1987-88	1989-94	1995-00
1	18	LAV: LEAD LAV: CAPIVARI LAV: SANTA CATAR. - ENERG	0,196 0,665 0,000	0,282 1,051 0,000	0,389 1,532 0,000	0,399 1,532 0,113	0,523 1,469 0,719	0,741 2,170 2,085
SUBTOTAL BENEF			0,861	1,333	1,921	2,044	2,711	4,996
2	20	LAV: CANDIOTA LAV: IRUI LAV: CAPIVARI	0,000 0,013 0,232	0,003 0,044 0,230	0,028 0,039 0,228	0,030 0,085 0,228	0,036 0,117 0,228	0,013 0,192 0,228
SUBTOTAL BENEF			0,245	0,277	0,295	0,344	0,381	0,433
3	25	LAV: CAPIVARI	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,030
4	30	LAV: LEAD LAV: MORUNGAVA LAV: CAPIVARI LAV: SANTA CATAR. - ENERG	0,123 0,000 0,469 0,000	0,303 0,000 1,655 0,000	2,114 0,000 1,044 0,000	3,303 0,000 1,044 0,242	3,359 0,000 2,895 0,041	3,824 1,757 2,895 1,049
SUBTOTAL BENEF			0,591	1,959	3,158	4,589	6,295	9,525
5	35	JAZ: SANTA CAT. ME SM JAZ: SANTA CAT. ME MM JAZ: SANTA CAT. SS MM	0,133 0,540 0,750	0,000 0,972 0,750	0,000 1,305 1,000	0,000 2,100 2,211	0,000 2,500 1,312	0,000 1,470 0,000
SUBTOTAL NAO BENEF			1,423	1,722	2,305	4,371	3,812	1,470
LAV: CANDIOTA LAV: LEAD LAV: CHARQUEADAS LAV: IRUI			0,105 0,763 0,212 0,101	0,787 1,139 0,000 0,078	1,751 0,094 0,000 0,199	2,530 0,000 0,000 0,339	3,915 0,000 0,000 0,490	5,242 0,000 0,212 1,704
SUBTOTAL BENEF			1,130	2,003	2,043	2,869	4,406	7,158
TOTAL PRODUZIDO			2,603	3,725	4,348	7,240	8,218	3,627
6	42	LAV: CANDIOTA LAV: IRUI LAV: SANTA CATAR. - ENERG	0,338 0,060 0,000	0,298 0,060 0,000	0,229 0,060 0,000	0,229 0,060 0,160	0,000 0,000 1,017	0,000 0,000 2,952
SUBTOTAL BENEF			0,398	0,358	0,289	0,449	1,017	2,952
7	47	LAV: CANDIOTA LAV: IRUI LAV: CAPIVARI	0,000 0,162 0,970	0,032 0,545 1,421	0,351 0,481 1,984	0,368 1,062 1,984	0,447 1,441 1,911	0,159 2,372 2,733
SUBTOTAL BENEF			1,132	1,998	2,815	3,414	3,799	5,263
8	54	JAZ: LEAO-BUTIA CA LAV: CANDIOTA LAV: CHARQUEADAS LAV: IRUI	0,105 0,398 0,154 0,224	0,000 1,560 0,000 0,173	0,000 3,201 0,000 0,384	0,000 4,563 0,000 0,630	0,000 6,841 0,000 0,857	0,000 9,586 0,164 2,978
SUBTOTAL BENEF			0,785	1,733	3,585	5,193	7,698	12,727
9	60	LAV: LEAD LAV: CAPIVARI LAV: SANTA CATAR. - ENERG	0,398 0,000 0,000	0,573 0,000 0,000	0,790 0,000 0,000	0,810 0,000 0,045	1,002 0,000 0,008	1,504 0,007 0,194
SUBTOTAL BENEF			0,398	0,573	0,790	0,855	1,069	1,706

de carvões do Rio Grande do Sul, enquanto os outros tipos produzidos são todos produtos da lavagem, indicando os ganhos que poderiam advir de uma política ampla de beneficiamento de carvões.

O carvão tipo 1 até 1986 é produzido somente por Capivari, para atender às necessidades da metalurgia, e pelo lavador de Leão, mas a partir daquela data o lavador adicional considerado em Santa Catarina para processar o carvão ligeiramente inferior das novas minas passa a responder por uma parcela crescente da produção.

A Tabela IV.2 mostra também o grande aumento na produção de carvão com 30% de cinzas destinado principalmente à gaseificação e à siderurgia, uma vez que sua produção no primeiro período é de 25% da tonelagem de carvão tipo 5, enquanto no período 1995/00 passa a 110%. A produção de carvão tipo 8 é a resultante não-nobre do beneficiamento nos lavadores de Candiota e Iruí para a produção de carvões de 25 e 40% de cinzas, ao passo que o carvão de tipo 7 é o refugo da produção de carvão com 20% de cinzas em Iruí e Capivari.

O fluxo físico do carvão mineral através das 19 rotas de transporte que compõem o modelo está detalhado na Tabela IV.3. Já no período 1983/84 percebe-se uma considerável expansão do transporte ferroviário inter-regional do carvão mineral, sendo sua participação de aproximadamente 58% do total transportado anualmente naquele período, o que reflete um crescimento de 42% ao ano entre 1982 e 1984 desta modalidade de transporte. As maiores expansões no transporte ferroviário no decorrer do horizonte de planejamento ocorrem nas rotas ES-MG(7), Bagé-Rio Grande(1), Por-

Tabela IV.3

## Transporte de Carvão

NO.DA ROTA	REGIÃO DE ORIGEM	REGIÃO DE DESTINO	TIPO DE TRANSPORTE	10 <sup>6</sup> TON TRANSPORTADAS ANUALMENTE, POR PERÍODO					
				1981-82	1983-84	1985-86	1987-88	1989-94	1995-00
1	BAGÉ	RIO GRANDE	FERROV.	0,031	0,717	1,977	2,704	4,126	5,049
2	PORTO ALEGRE	SÃO PAULO	FERROV.	0,509	1,017	1,017	1,024	2,376	5,255
3	PARANÁ	SÃO PAULO	FERROV.	0,000	0,331	0,370	0,375	0,254	0,000
4	SANTOS	SÃO PAULO	FERROV.	0,500	0,500	0,901	1,692	3,500	3,500
5	RIO DE JANEIRO	SÃO PAULO	FERROV.	0,393	1,000	1,441	1,441	2,364	2,096
6	RIO DE JANEIRO	MINAS GERAIS	FERROV.	0,000	0,498	0,768	0,586	1,040	3,247
7	ESPÍRITO SANTO	MINAS GERAIS	FERROV.	2,495	3,620	4,776	5,880	7,281	9,203
8	PORTO ALEGRE	RIO GRANDE	BARCA	0,453	0,487	0,960	2,083	0,887	1,932
9	RIO GRANDE	ESPÍRITO SANTO	NAVIO	0,188	0,188	0,188	1,019	0,019	1,019
10	RIO GRANDE	RIO DE JANEIRO	NAVIO	0,296	0,747	1,989	2,438	2,656	4,605
11	RIO GRANDE	SANTOS	NAVIO	0,000	0,239	0,724	1,285	1,285	1,285
12	SANTA CATARINA	ESPÍRITO SANTO	NAVIO	0,086	0,228	0,420	0,616	0,639	0,000
13	SANTA CATARINA	RIO DE JANEIRO	NAVIO	0,469	1,050	0,496	1,649	2,371	2,911
14	SANTA CATARINA	SANTOS	NAVIO	0,665	1,125	1,532	1,740	3,738	4,255
15	SANTA CATARINA	PARANÁ	NAVIO	0,371	0,700	0,900	1,400	1,400	1,400
16	EXTERIOR	SANTOS	NAVIO	0,817	0,745	0,744	0,933	1,431	2,153
17	EXTERIOR	RIO DE JANEIRO	NAVIO	1,732	2,997	4,096	4,312	6,127	8,084
18	EXTERIOR	ESPÍRITO SANTO	NAVIO	2,351	4,158	5,890	6,365	8,342	11,981
19	PORTO ALEGRE	BAGÉ	FERROV.	0,492	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL				11,848	20,347	29,187	37,542	50,835	67,957

to Alegre-SP(2) e RJ-MG(6). Enquanto o crescimento do transporte através da rota 7 acompanha a expansão do mercado consumidor, os transportes Bagé-Rio Grande(1) e Porto Alegre-Rio Grande(barcaça) seguem o desenvolvimento do porto de Rio Grande, cuja capacidade de movimentação atinge cerca de 5 milhões de toneladas em 1988. Também por este motivo o transporte através do Tronco Sul de Porto Alegre para São Paulo fica aproximadamente constante em torno de 1 milhão de toneladas até 1988, experimentando considerável expansão nos períodos posteriores.

O transporte marítimo mantém-se responsável, em todos os períodos, por cerca de 35% do volume transportado no País. As rotas partindo do Rio Grande expandem-se mais rapidamente do que as que partem de Santa Catarina, passando a sua participação no transporte marítimo doméstico de 24% no período 1981/82 para 45% no último período, expansão esta que acompanha e viabiliza o desenvolvimento vigoroso da mineração no Rio Grande do Sul. O fato de Santa Catarina produzir principalmente carvão metalúrgico, cujos requisitos de transportes são menores do que os do energético, também explica em parte a expansão mais lenta das rotas partindo desse Estado.

Os portos de Vitória/Praia Mole e RJ/Sepetiba expandem-se na velocidade máxima para permitir a movimentação de cabotagem e a importação de carvão metalúrgico. A capacidade do porto Santos/Cosipa é ditada pelo seu plano de expansão ora em fase de conclusão, não sendo ela integralmente exigida pelas demandas fornecidas ao modelo.

Tabela IV.4

RESUMO DAS UTILIZACOES

NO. UTI	NOME	TIP CAR	10 <sup>6</sup> TON DE CARVÃO UTILIZADO ANUALMENTE, POR PERÍODO					
			1981-82	1983-84	1985-86	1987-88	1989-94	1995-00
0	REFUGO	6	0,000	0,000	0,000	0,160	0,000	1,186
		7	0,799	1,191	1,576	0,089	0,000	0,000
		8	0,000	0,000	1,091	1,623	2,440	4,384
		9	0,398	0,573	0,790	0,855	1,069	1,706
0	SEM UTILIZ. ENERG.	1	5,761	9,233	12,651	13,654	18,611	27,196
		5	0,060	0,047	0,000	0,957	0,000	0,000
		6	0,000	0,122	0,000	0,000	0,000	0,000
1	COMBUSTAO	2	0,104	0,030	0,023	0,060	0,000	0,000
		4	0,000	0,000	0,163	0,000	0,000	0,511
		5	0,103	0,048	0,290	0,375	0,447	0,000
		6	0,186	0,420	0,324	0,571	0,237	0,943
		7	0,204	0,751	0,832	1,429	2,394	2,530
2	CIMENTO	2	0,141	0,247	0,272	0,168	0,228	0,228
		3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,030
		4	0,469	0,898	1,333	0,811	0,000	1,678
		5	1,232	2,255	3,015	5,525	7,770	8,627
3	SIDERURGIA	2	0,000	0,000	0,000	0,116	0,153	0,205
		4	0,123	0,733	1,084	1,514	1,826	2,448
4	TERMOELETRICIDADE	5	1,208	1,375	1,044	0,384	0,000	0,000
		6	0,338	0,176	0,476	0,229	1,525	1,858
		7	0,129	0,055	0,406	1,895	1,405	2,733
		8	0,890	1,733	2,494	3,270	5,257	6,343
5	GASEIFICACAO	4	0,000	0,328	0,577	2,263	4,468	4,888

Na Tabela IV.4, que resume a utilização dos diversos tipos de carvão em suas diferentes aplicações, pode-se verificar que, na maioria delas é mais econômico atender à maior parte da demanda com o carvão da pior qualidade permitida naquele uso. Ocorrem, entretanto, variações nesta regra geral, como é o caso da demanda para cimento que em 1989/94 é toda atendida pelo carvão tipo 5, enquanto noutros períodos utiliza-se também o tipo 4, o qual chega a suprir 30% da demanda nacional de carvão na indústria cimenteira em 1985/86. O carvão utilizado em combustão sofre considerável redução de qualidade no final do período, pois no último período 63% do carvão para este fim é o de tipo 7, enquanto esta proporção era de apenas 34% no primeiro. Na termelétrica verifica-se uma expansão gradual do uso do carvão de pior qualidade, o de tipo 8 com 54% de cinzas, ocorrendo apenas nos dois últimos períodos uma ligeira melhoria na qualidade média, com a utilização mais intensiva dos tipos 7 e 6. No caso da gaseificação e da siderurgia a demanda é quase sempre atendida por carvão de 30% de cinzas (tipo 4).

A alocação do investimento setorial poder ser analisada através da Tabela IV.5, onde ele é lançado integralmente no período em que o ativo respectivo entra em operação.

No período 1981/82 o investimento em instalações de beneficiamento corresponde a 56% do investimento setorial, o que sugere, dados os custos de capital relativos, que o modelo opta por uma expansão da capacidade de aprimoramento da qualidade dos carvões nacionais em antecipação à expansão das capacidades de mineração, transportes e portos. As maiores parcelas do investimento em beneficiamento no período correspondem à instalação e expansão

Tabela IV.5

Investimento setorial - média anual

Setor	Investimento anual (10 <sup>6</sup> US\$)					
	1981/82	1983/84	1985/86	1987/88	1989/94	1995/00
Mineração	33,812	120,462	139,208	206,159	90,853	181,698
Beneficiamento	72,292	44,821	62,848	72,418	29,062	76,214
Transportes	8,081	27,253	28,743	51,787	67,713	58,018
Portos	13,686	45,464	57,251	76,925	44,806	40,096
<b>Total Anual</b>	<b>127,861</b>	<b>238,000</b>	<b>288,050</b>	<b>407,286</b>	<b>232,434</b>	<b>356,026</b>

de lavadores a meio-denso em Leão e Capivari e à combinação de jigs e meio-denso em Iruí. A participação do investimento em beneficiamento reduz-se até 1994, quando ocorre considerável expansão do lavador de meio-denso adicional instalado em Santa Catarina em 1988 e do lavador de Iruí. Ao investimento em mineração, que é quase quatro vezes superior no período 1983/84 com a expansão das várias minas mencionadas acima, corresponde a maior parcela do investimento setorial após 1982, com uma participação aproximada de 50%.

O investimento em transportes no primeiro período é cerca de 6% do montante investido no setor, evoluindo para 10% nos três períodos subsequentes. Em 1989/94 encontramos um pique da participação dos transportes no investimento total (30%), o que reflete a expansão acelerada da rota ferroviária Porto Alegre - SP. No último período o investimento volta aos níveis absolutos anteriores, mas continua sendo destinado principalmente à rota 2.

A expansão da capacidade de movimentação de todos os portos, exceto Santos/Cosipa, triplica o investimento portuário entre 1981/82 e 1983/84. Ao porto de Sepetiba corresponde cerca de 40% do investimento no segundo período, enquanto nos períodos subsequentes ele é repartido em partes aproximadamente iguais entre os portos de Imbituba, Rio Grande, Praia Mole e Sepetiba.

A solução do modelo de otimização fornece, além dos valores ótimos das variáveis de decisão, os preços-sombra dos diversos tipos de carvão, que medem os custos de oportunidade dos carvões nacionais para confronto com os preços vigentes no mercado. Na Tabela IV.6 apresentamos a evolução dos preços-sombras regionais do carvão metalúrgico nacional. Adicionando ao preço internacional do carvão metalúrgico importado em dezembro de 1980 - 63 dólares por tonelada - despesas com transporte de 20 dólares por tonelada, o custo CIF do metalúrgico importado é aproximadamente 83 dólares por tonelada. Os dados da Tabela IV.6 indicam então que o custo de oportunidade do carvão metalúrgico doméstico, é em todo o território nacional, pelo menos 36% superior ao custo da importação. Este resultado sugere que a limitação das importações de carvão metalúrgico em 80% do consumo, imposta por motivos de segurança nacional, tem um custo econômico significativo que deve ser pelo menos objeto de um estudo mais detalhado. A liberação das importações de carvão metalúrgico geraria ainda outros benefícios que não foram avaliados pelo modelo. Dado que o carvão metalúrgico nacional tem 18,5% de cinzas, a produção de um coque com 12% de cinzas requer a importação de um carvão de excelente qualidade proveniente principalmente dos Estados Unidos. Uma eventual redução da participação do metalúrgico nacional deverá per-

Tabela IV.6

Região	Preços-Sombra do Carvão Metalúrgico Nacional (US\$/ton.)					
	1981/82	1983/84	1985/86	1987/88	1989/94	1995/00
São Paulo	229,1	122,6	129,6	154,4	187,5	194,4
Santos	221,1	113,6	120,1	142,7	174,0	182,6
Rio de Janeiro	221,1	113,6	120,1	144,8	173,8	186,4
Espírito Santo	221,1	115,5	121,9	146,4	175,9	188,9
Minas Gerais	221,1	119,5	125,9	150,4	181,9	193,4

mitir a importação de um carvão de qualidade inferior e menos dispendioso, produzido na Europa Oriental. O aumento da disponibilidade interna do carvão para uso energético, por outro lado, poderá acelerar o processo de substituição do óleo combustível, contribuindo para a redução das importações de petróleo. A análise deste aspecto através do modelo requer o conhecimento não da demanda de energia proveniente do carvão, mas da demanda energética global dos setores consumidores e de uma medida de flexibilidade de substituição.

Finalmente, os preços-sombra do carvão para uso energético são apresentados na Tabela IV.7. A dispersão espacial do custo de oportunidade do carvão mineral pode ser exemplificada pelo carvão para cimento: no período 1983/84, o custo marginal da gigacaloria varia de 9,04 dólares na região produtora de Porto Alegre a 13,97 dólares em São Paulo, com o custo do transporte a-

Tabela IV.7

## PREÇOS - SOMBRA DA ENERGIA

NO. REG	NUM. REGIAO	UTILIZACAO	CUSTO MARGINAL DA GIGACALORIA, POR PERIODO (\$/TON)					
			1981-82	1983-84	1985-86	1987-88	1989-94	1995-00
1	BAGE	CIMENTO	19,648	9,041	9,046	10,323	8,651	14,475
		TERMoeLETRICIDADE	20,804	-	-	-	-	-
2	PORTO ALEGRE	COMBUSTAO	19,736	1,902	3,949	4,987	5,409	5,722
		CIMENTO	18,640	1,796	3,729	4,710	9,771	16,087
		SIDERURGIA	19,968	9,101	9,538	11,188	10,208	16,504
		TERMoeLETRICIDADE	19,736	1,902	1,249	2,442	3,410	-
		GASEIFICACAO	-	8,191	8,584	10,069	9,187	14,853
3	RIO GRANDE	COMBUSTAO	-	5,555	4,202	4,883	4,134	5,456
4	SANTA CATARINA	COMBUSTAO	-	-	-	-	,857	-
		CIMENTO	-	-	-	-	9,985	15,808
		TERMoeLETRICIDADE	-	-	-	-	,857	-
		GASEIFICACAO	-	9,249	9,657	11,765	9,815	15,481
5	PARANA	COMBUSTAO	5,479	6,256	14,184	16,747	13,877	35,806
		CIMENTO	5,175	5,908	13,396	15,816	13,106	33,817
		TERMoeLETRICIDADE	5,479	6,256	14,184	16,747	13,877	35,806
6	SAO PAULO	COMBUSTAO	22,999	11,605	10,356	12,154	10,274	11,715
		CIMENTO	22,999	13,976	14,092	16,996	14,286	20,592
		GASEIFICACAO	-	-	-	-	12,874	18,533
7	SANTOS	COMBUSTAO	22,999	8,878	7,490	8,628	7,552	8,682
		SIDERURGIA	-	12,116	12,511	15,344	12,951	19,116
8	RIO DE JANEIRO	CIMENTO	22,999	12,306	12,677	15,087	12,405	19,111
		SIDERURGIA	-	12,306	12,739	16,017	13,102	20,199
		GASEIFICACAO	-	-	-	14,415	11,792	18,179
9	ESPIRITO SANTO	CIMENTO	22,999	12,923	13,357	15,767	13,085	19,797
		SIDERURGIA	-	12,923	13,357	16,634	13,719	20,821
10	MINAS GERAIS	CIMENTO	22,999	13,746	14,180	16,674	13,992	20,699
		SIDERURGIA	-	13,746	14,180	17,457	14,542	21,640

crescentando 50% ao valor do mineral entre o Rio Grande do Sul e São Paulo. A relevância do transporte pode ser também ilustrada pela uniformidade dos custos de oportunidade em todos os períodos nas diversas utilizações ao norte da região do Rio de Janeiro. O confronto dos preços-sombra da energia derivada do carvão com o custo da gigacaloria oriunda do óleo combustível, em torno de 23 dólares em dezembro de 1980 (US230/ton. e 10.000 kcal/ton.), sugere que a substituição do óleo por carvão é econômica em todo o território nacional, cuja vantagem comparativa prevalece até o último período do horizonte de planejamento. No primeiro período a oferta é insuficiente para satisfazer a demanda de carvão, o que gera um consumo não previsto de óleo combustível. O preço-sombra do carvão coincide, então, em algumas utilizações distantes dos centros produtores, com o custo do óleo combustível de aproximadamente 23 dólares por gigacaloria.

A Tabela IV.7 também mostra o efeito dos novos mercados consumidores de carvão de boa qualidade sobre os preços-sombra. Na medida em que é satisfeita a demanda de carvão para cimento e siderurgia, uma fração de carvão de qualidade inferior é obtida como subproduto do beneficiamento. A expansão da oferta de carvões de baixa qualidade prevista pelo modelo é suficientemente grande a ponto de anular seu custo de oportunidade em utilizações que não impõem restrições severas à composição do mineral, o que parece ser o caso do carvão para termelétrica em Bagé e Santa Catarina, assim como a região de Porto Alegre, onde o preço-sombra sofre também acentuada redução após o período vigente. O carvão para a combustão, que também permite uma faixa mais ampla de qua-

lidades, tem comportamento análogo à termelétricidade. O preço-sombra da combustão, na proximidade das regiões de mineração, corresponde a menos da metade do preço em utilizações mais nobres, tais como siderurgia e gaseificação.

## V - Conclusões

Nesse trabalho foi proposto um modelo de otimização para a avaliação de um programa integrado para o carvão mineral nacional. As inter-relações entre as atividades de mineração, beneficiamento, transporte e utilização são representadas através das restrições que compõem o modelo, descritas na Seção II. Esta integração permite uma análise simultânea de decisões nestas áreas, em alguns casos sob a responsabilidade de diferentes órgãos. O modelo proposto determina então uma solução consistente para o suprimento das necessidades futuras de carvão mineral, compatibilizando a evolução das capacidades ao longo de seu fluxo físico.

Na Seção III discutiram-se os aspectos específicos da aplicação do modelo ao carvão mineral nacional, cujo objetivo principal foi a apresentação dos dados utilizados e das simplificações requeridas pela restrita disponibilidade de informações.

Os resultados da implementação do modelo para a "hipótese moderada" de evolução da demanda de carvão mineral prevista pela SEAP foram apresentados na Seção IV, verificando-se que este cenário é excessivamente otimista quanto aos níveis de substituição que poderiam ser alcançados a curto prazo. A principal limi-

tação refere-se à impossibilidade de expandir a mineração à velocidade necessária, pois a médio prazo o modelo já tem alguma opção e privilegia as minas a céu aberto e as mecanizadas. A intenção de mineração em Santa Catarina é bastante influenciada pela necessidade de produzir carvão metalúrgico nacional. Os resultados "obtidos" enfatizam os ganhos que deverão advir, no curto prazo, do beneficiamento intensivo dos carvões nacionais. O investimento em beneficiamento representa uma parcela significativa do investimento setorial nos períodos iniciais do horizonte de planejamento. Com relação à competitividade econômica entre o beneficiamento e o transporte, o modelo favorece em alguns casos uma gradual melhoria na qualidade dos carvões utilizados nas indústrias de cimento, siderurgia e gaseificação, em detrimento da combustão e termelétrica, reduzindo a necessidade futura da capacidade de transporte.

Quanto ao carvão metalúrgico nacional, nossos resultados questionam o limite mínimo imposto à sua utilização. O custo de oportunidade do carvão metalúrgico — 36% superior ao metalúrgico atualmente importado — sugere o relaxamento do limite máximo às importações. A importação, embora em maior quantidade, de um carvão de qualidade inferior e o aumento da oferta interna de carvão para a substituição do óleo combustível poderiam gerar benefícios além da redução de custos, inclusive sob a forma de economia de divisas.

A substituição do óleo combustível por carvão mineral nas indústrias de cimento, siderurgia e combustão é econômica em

todo o território nacional quando são comparados os custos das gigacalorias geradas pelas duas fontes. A energia proveniente do oleo combustível é pelo menos duas vezes mais cara que a gigacaloria produzida a partir do carvão mineral. O custo de oportunidade do carvão mineral em termelétricidade e em combustão é aproximadamente duas vezes mais barato que em outras utilizações, devido à crescente oferta destes carvões e tendo em vista o cumprimento dos programas de substituição. Este fato é de significativa relvância para o planejamento consistente da oferta futura de energia elétrica nas regiões Sul e Sudeste.

Apenas resultados preliminares referentes a um único cenário oficial foram discutidos neste trabalho. A avaliação de um conjunto de alternativas e a análise da sensibilidade dos resultados do modelo aos valores de alguns parâmetros, assim como o acoplamente a um modelo de oferta global de energia elétrica, são alguns dos tópicos que deverão ser objeto de pesquisa no futuro.

BIBLIOGRAFIA

Ferrel, G. Coal Energy and the Environment. Dissertação de Ph.D. não publicada, U. of California, 1977.

FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos. Informações Técnicas e Econômicas Preliminares para a Elaboração de um Modelo de Otimização para o Carvão Mineral no Brasil, 1981.

Gordon, R. L. Economic Analysis of Coal Supply: An Assessment of Existing Studies. E. P. R. I. Report 335-1, 1976.

SEAP - Secretaria Especial de Abastecimento e Preços. Análise do Setor Carvão Mineral, 1980.