

# A economia do carvão mineral \*

EDUARDO M. MODIANO \*\*

OCTAVIO A. F. TOURINHO \*\*\*

*Este artigo apresenta um modelo de otimização que, sendo dinâmico, setorial e regional, foi concebido para ser utilizado como um instrumento de planejamento e análise econômica do setor do carvão mineral no Brasil. Ele descreve com detalhe a complexa inter-relação entre mineração, beneficiamento, transporte e uso final do carvão, permitindo uma avaliação integrada da escolha de processos, localizações e capacidades para estas atividades, ao longo de vários períodos de planejamento. Sua utilização com dados ainda preliminares, também relatada, nos permite tecer algumas considerações sobre a política atual de limitação das importações de carvão metalúrgico, sobre a economicidade da substituição do óleo combustível e sobre a configuração futura do setor.*

## 1 — Introdução

A impossibilidade de que o petróleo continue sendo a base energética do desenvolvimento mundial já está bem caracterizada. Dentre as fontes energéticas que compõem 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

\* As opiniões expressas neste trabalho são pessoais, não devendo 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.

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, 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 competitividade 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 2, descreve com detalhe a complexa inter-relação entre as atividades de mineração, beneficiamento, transporte e utilização, permitindo, desta forma, além da avaliação simultânea da 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 3 permitiu obter os resultados para o caso básico, que são analisados com detalhe na Seção 4. 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 5 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.

## 2 — 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,  $\text{Min} \sum_t \mathbf{FD}(t)$  [*custos operacionais + investimentos*], onde  $\mathbf{FD}(t)$  denota o fator de desconto intertemporal,<sup>1</sup> constitui o objetivo do experimento reportado na Seção 4. 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. Seus 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 a forma de "reservas", do recurso. A classificação setorial da demanda permite incorporar ao modelo restrições específicas quanto

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

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.

## 2.1 — 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 30 m) 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. Embora seja considerado um método mais eficiente para garantir altas taxas de extração a grandes profundidades, o processo "longwall" 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  $ROM_{jnt}$  a quantidade de carvão *run-of-mine* extraída da jazida  $j$  pelo processo  $n$  no período  $t$ , a oferta de carvão minerado em toneladas  $CMN_{jt}$  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, tem-se:

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

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

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

c:

$$KPMjnt \geq KPMjn (t - 1) \quad \forall j, n, t \geq 2$$

## 2.2 — 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  $CNBjt$  — ou às instalações de beneficiamento para a lavagem. Denotando por  $BENlmt$  a tonelagem de carvão beneficiado pelo processo  $m$  na instalação  $l$ , o total de carvão lavado em  $l$  é dado por:

$$\sum_m BENlmt = \sum_{\{j|\text{destino}(j)=l\}} (CMNjt - CNBjt) \quad \forall l, t$$

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

$$CMNjt \geq CNBjt \quad \forall j, t$$

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.

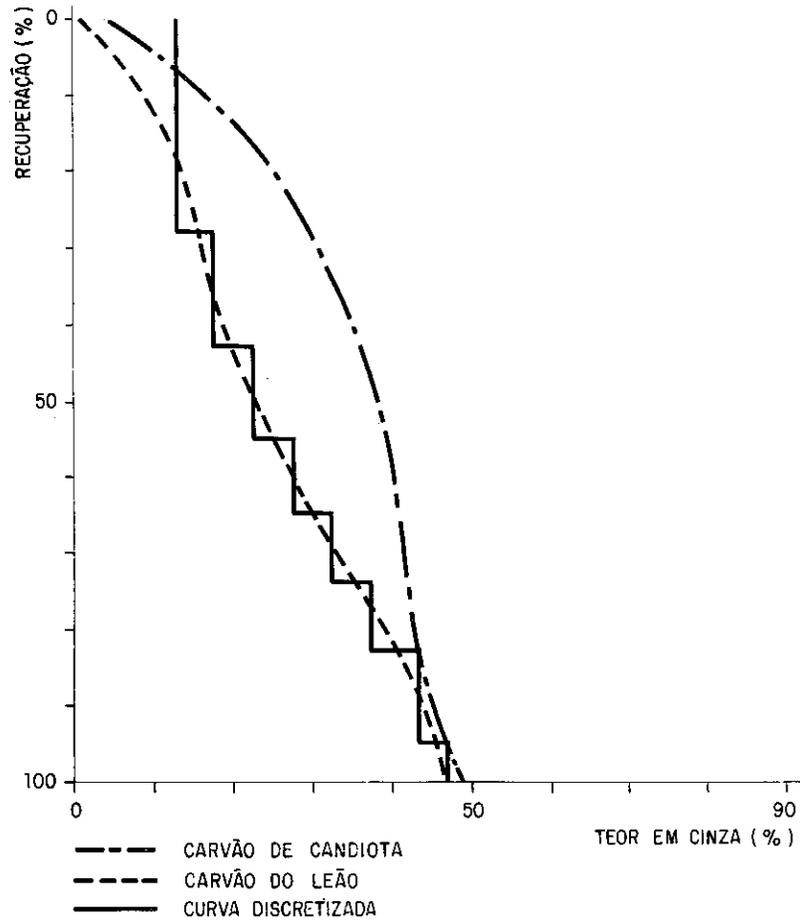
Denotando por  $FBN_{jlimt}$  a tonelagem de carvão oriunda da jazida  $j$  destinada ao lavador  $l$ , para produção de carvão tipo  $i$  pelo processo  $m$ , o volume beneficiado em um lavador por um determinado método é a soma das frações de diferentes jazidas destinadas a produzir cada um dos tipos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

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

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 pro-

Figura 1

CURVAS EM FUNÇÃO DO TEOR EM CINZAS

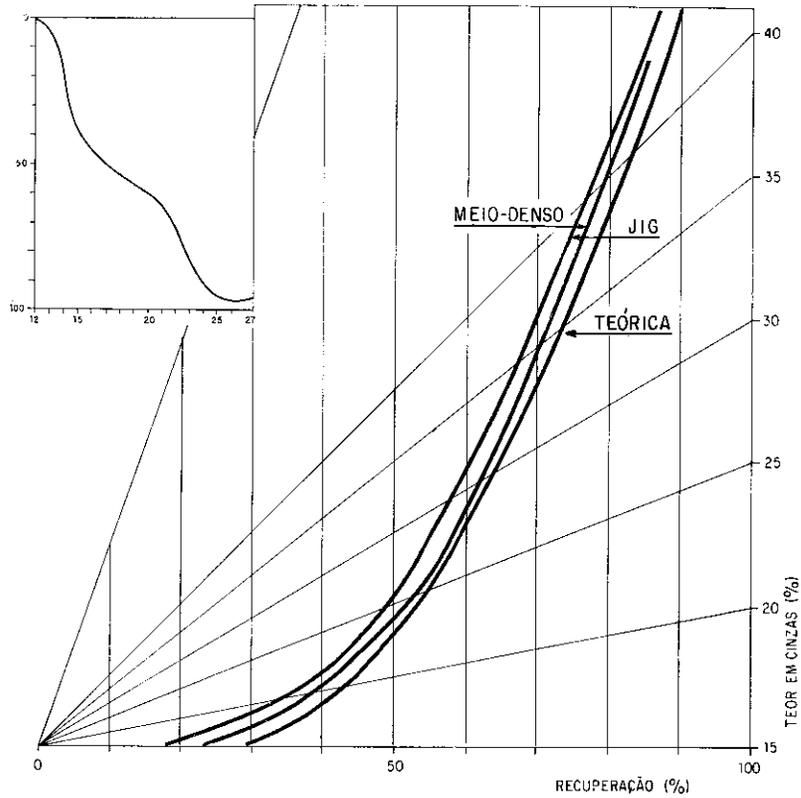


cesso  $m$  (curva de Mayer) por  $RND(j, i, m)$ , a disponibilidade de carvão do tipo  $i$  lavado em  $l$ ,  $LAVlit$ , é dada por:

$$LAVlit = \sum_{j, m} RND(j, i, m) FBNjlimt + \sum_m \sum_{\{r \text{ fundado } (r)=i\}} [1 - RND(j, r, m)] FBNjlrmt \quad \forall l, i, t$$

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 tam-

bém superior ao jig por tonelada de alimentação, devido principalmente à utilização de magnetita. A competitividade econômica dos processos de mcio-denso e jig 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 beneficiada em um lavador por determinado processo está limitada pela capacidade instalada (inicial e posterior) disponível no período:

$$BENlmt \leq KPBlmt + KIB(l, m) \quad \forall l, m, t$$

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

$$KPBlmt \geq KPBlm(t-1) \quad \forall l, m, t \geq 2$$

### 2.3 — 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:

$$\begin{aligned} & \sum_{\{l|região(l)=q\}} LAVlit + \sum_{\{j|tipo(j)=i \ \& \ região(j)=q\}} CNBjt - \\ & - \sum_{\{s|origem(s)=q\}} CTRsit + \sum_{\{s|destino(s)=q\}} CTRsit \geq \\ & \geq \sum_k CPUqkit \quad \forall q, i, t \end{aligned}$$

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  $\mathbf{KIT}(s)$  e  $KPTst$ , respectivamente, a quantidade total de carvão transportada em determinada rota deve satisfazer:

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

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:

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

com a evolução das capacidades satisfazendo:

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

#### 2.4 — 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 termelétrica 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  $q$  de carvão do tipo  $i$ ,  $DTON(q, i, t)$ , é necessário que:

$$\sum_k CPU_{qkit} \geq DTON(q, i, t) \quad \forall q, i, t$$

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:

$$\sum_i CPU_{qkit} PCA(i) EF(k) \geq DENE(q, k, t) \quad \forall q, k, t$$

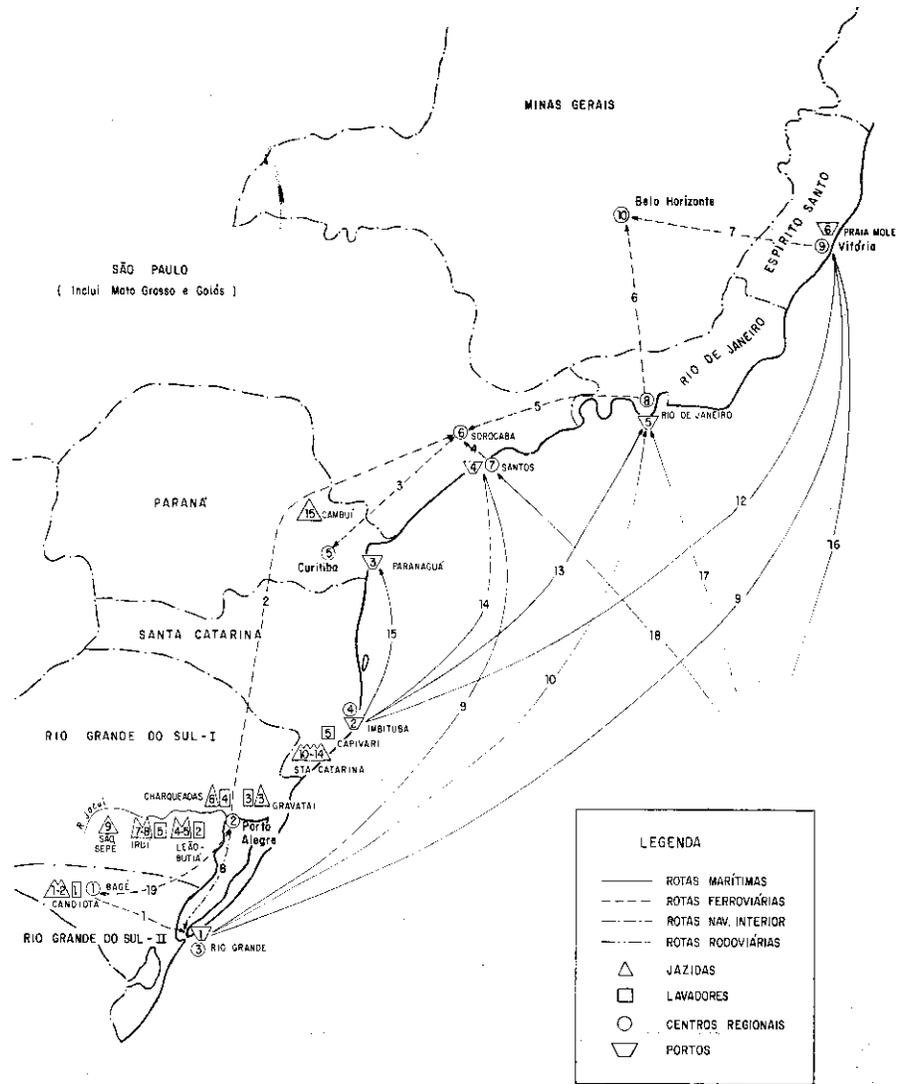
### 3 — Aplicação ao carvão mineral nacional

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, termelétricidade 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 trans-

Figura 3

# FLUXO DO CARVÃO MINERAL NO MODELO



porte 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 utilização do carvão mineral nacional. Uma tipologia mais complexa 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 a seguir.

TABELA 1  
*Classificação dos tipos de carvão nacionais*

Tipos	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 2 resume os principais parâmetros para o módulo de mineração.

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 3. Os projetos de mineração em andamento

TABELA 2

## Caracterização das principais jazidas de carvão mineral

Números	Jazidas	Processos de mineração	Tipos	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-Gravatá	SS/MM	8	80	70	50	90	15,00
4	Leão-Butiá	CA	8	95	82	20	20	6,00
5	Leão-Butiá	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 Sepé	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

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

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

CA: céu aberto.  
 MAN: manual.  
 ME: meio-encosta.  
 MM: mecanizado.  
 SM: semimecanizado.  
 SS: subterrâneo.

à época do 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

TABELA 3

*Acréscimo máximo da capacidade de mineração com relação à inicial*

Números	Jazidas	Processos 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	Morungava-Gravataí	SS/MM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	Leão-Butiá	CA	0,623	0,900	0,900	0,900	2,500	5,000
5	Leão-Butiá	SS/MM	0,500	1,425	3,500	5,650	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 Sepé	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.

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.

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, barcas 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 4 apresenta os dados para os investi-

mentos 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 5. Um custo uniforme de movimentação foi arbitrado em US\$ 1,10 por tonelada movimentada.

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

TABELA 4

*Caracterização das principais rotas de transporte do carvão mineral*

Número da rota	Regiões de origem	Regiões de destino	Tipos de transporte	Investimento (US\$/ton./ano de capacidade de movimentação)*	Custo operacional (US\$/ton. transportada)*
1	Bagé	Rio Grande	Ferrovário	10,0	4,0
2	Porto Alegre	São Paulo	Ferrovário	100,0	15,0
3	Paraná	São Paulo	Ferrovário	10,0	5,2
4	Santos	São Paulo	Ferrovário	40,0	6,4
5	Rio de Janeiro	São Paulo	Ferrovário	15,0	8,0
6	Rio de Janeiro	Minas Gerais	Ferrovário	10,0	7,0
7	Espírito Santo	Minas Gerais	Ferrovário	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	Ferrovário	10,0	7,0

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

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

TABELA 5

*Características dos portos para movimentação do carvão mineral*

Números	Portos	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 de Janeiro	20,2	2,60
6	Praia Mole/Vitória	27,0	4,00

FONTES: FINEP (1981) e Portobrás.

TABELA 6

*Acréscimo máximo da capacidade dos portos, com relação à inicial*

Nú- meros	Portos	Acréscimo máximo da capacidade (10 <sup>6</sup> ton. anuais)					
		1981/82	1983/84	1985/86	1987/88	1989/94	1995/2000
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 de Janeiro	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

As demandas regionais até 1985 de carvão mineral correspondem à "hipótese moderada" elaborada pela SEAP<sup>2</sup> (Tabela 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,

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

TABELA 7

## Projeção da demanda de carvão vapor mineral por Estado

Estados	Setores de consumo	Demanda (10 <sup>3</sup> t)						Tipos de carvão (%CZ)
		1980	1981	1982	1983	1984	1985	
Rio Grande do Sul	Gaseificação	—	—	695	695	1.588	1.588	63%CZ
		—	—	—	130	210	290	20%CZ
		—	—	695	825	1.798	1.878	
	Siderurgia	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
	Cimento	—	140	500	924	1.588	2.108	
		60	60	60	60	60	60	20%CZ
		74	74	74	174	174	174	35%CZ
Termeletricidade	134	134	134	234	234	234		
	599	506	576	786	1.675	1.954	52%CZ	
	649	596	628	644	596	559	40% e 52%CZ	
	1.251	1.230	1.593	1.819	2.660	2.513		
Subtotal	1.511	1.630	3.048	3.944	6.518	6.977		
Santa Catarina	Gaseificação	—	—	525	788	1.050	1.050	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	1.279	990	1.139	1.277	1.212	1.208	40%CZ
	Subtotal	1.381	1.115	1.823	2.259	2.481	2.504	
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
Subtotal	200	200	202	205	208	211		
	392	389	651	700	743	1.579		
São Paulo	Gaseificação	—	—	—	—	—	1.500	35%CZ
		—	—	—	—	50	650	35%CZ
		—	—	—	—	50	2.150	
	Siderurgia	—	—	—	105	105	105	35%CZ
	Papel e Celulose	—	—	180	180	180	180	40%CZ
	Cimento	496	838	1.457	1.693	1.863	1.993	35%CZ
Subtotal	496	838	1.637	1.978	2.198	4.428		

(continua)

(conclusão)

Estados	Setores de consumo	Demanda (10 <sup>3</sup> t)						Tipos de carvão (%CZ)
		1980	1981	1982	1983	1984	1985	
Rio de Janeiro	Gaseificação	—	—	—	—	—	1.350	35%CZ
	Siderurgia	—	—	—	—	315	639	35%CZ
	Cimento	296	731	856	942	1.041	1.114	35%CZ
	Subtotal	296	731	856	942	1.356	3.103	
Minas Gerais	Siderurgia	—	—	—	80	305	333	35%CZ
	Cimento	221	418	651	773	851	911	35%CZ
	Subtotal	221	418	651	853	1.156	1.244	
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	
Total		4.350	5.189	8.969	11.071	14.903	20.345	

FONTE: SEAP (1980).

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

#### 4 — Uma política de oferta para o carvão mineral

Cobrindo um horizonte de planejamento de 20 anos, alternativas de política para o carvão mineral foram avaliadas através do modelo de otimização descrito na Seção 2, 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 8, 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 subseqüentes 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.

A mineração subterrânea no Rio Grande do Sul nos primeiros períodos ocorre apenas em Leão-Butiá. 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 8 também sugere uma modificação significativa: enquanto em 1981/82 são beneficiados apenas 67% do carvão minerado, em 1995/00 são destinados à lavagem 92% do carvão. 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

TABELA 8  
Mineração

Número da jazida	Nome da jazida	Item impresso	10 <sup>6</sup> ton. minerada e para beneficiamento anualmente, por período.					
			1981/82	1983/84	1985/86	1987/88	1989/94	1995/00
1	Candiota CA	ROM Para beneficiamento	1.050	3.250	6.950	9.650	14.050	18.750
3	Mrungava-Gravatá SS MM	ROM Para beneficiamento	0,000	3,350	0,000	0,000	0,000	3,897
4	Leão-Butiá CA	ROM Para beneficiamento	1,423	1,700	1,700	1,700	0,000	1,687
5	Leão-Butiá SS MM	ROM Para beneficiamento	1,000	1,925	4,000	6,180	8,500	8,500
6	Charqueadas-Triunfo SS MM	ROM Para beneficiamento	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500
7	Iruí CA	ROM Para beneficiamento	0,700	1,125	1,454	2,721	3,631	2,682
8	Iruí SS MM	ROM Para beneficiamento	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,000
9	São Sepé CA	ROM Para beneficiamento	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,000
10	Santa Catarina CA	ROM Para beneficiamento	0,750	2,725	3,600	3,600	5,000	5,000
11	Santa Catarina ME SM	ROM Para beneficiamento	2,370	4,770	4,890	4,890	7,500	9,500
12	Santa Catarina ME MM	ROM Para beneficiamento	2,160	3,888	5,220	8,640	10,000	10,000
13	Santa Catarina SS SM	ROM Para beneficiamento	4,725	6,010	6,010	6,010	7,400	10,400
14	Santa Catarina SS MM	ROM Para beneficiamento	3,000	3,000	4,000	11,085	12,385	21,000
15	Cambuí SS MAN	ROM Para beneficiamento	0,173	0,493	0,700	0,700	1,020	1,430
16	Carvão met. impor	ROM	4,900	7,900	10,730	11,610	15,900	22,200
	Total	ROM Para beneficiamento	22,751	36,886	49,253	66,786	85,386	122,286
			11,986	21,605	28,604	36,991	53,217	92,788

destina a atender à demanda de carvão metalúrgico não é beneficiada.

A Tabela 9 fornece um resumo da produção nacional gerada pelo modelo por tipos 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 da mineração na jazida de Santa Catarina quanto do beneficiamento 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 9 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 10. 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 Espírito Santo—Minas Gerais (7), Bagé—Rio Grande (1), Porto Alegre—São Paulo (2) e Rio de Janeiro—Minas Gerais (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) se-

TABELA 9

## Resumo da produção de carvão

Tipo de carvão	Teor (CZ%)	Jazida (quando não-beneficiado) Lavador (quando beneficiado)	10 <sup>6</sup> ton. de carvão produzido anualmente, por período					
			1981/82	1983/84	1985/86	1987/88	1989/94	1995/00
1	18	Lavador: Leão	0,196	0,282	0,389	0,399	0,523	0,741
		Lavador: Capivari	0,655	1,051	1,532	1,532	1,469	2,170
		Lavador: Santa Catarina — energia	0,000	0,000	0,000	0,113	0,719	2,085
		Subtotal beneficiado	0,861	1,333	1,921	2,044	2,711	4,996
2	20	Lavador: Candiota	0,000	0,003	0,028	0,030	0,036	0,013
		Lavador: Iruí	0,013	0,044	0,039	0,085	0,117	0,192
		Lavador: Capivari	0,232	0,230	0,228	0,228	0,228	0,228
		Subtotal beneficiado	0,245	0,277	0,295	0,344	0,381	0,433
3	25	Lavador: Capivari	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,030
4	30	Lavador: Leão	0,123	0,303	2,114	3,303	3,359	3,824
		Lavador: Morungava	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,757
		Lavador: Capivari	0,469	1,655	1,044	1,044	2,895	2,895
		Lavador: Santa Catarina — energia	0,000	0,000	0,000	0,242	0,041	1,049
Subtotal beneficiado	0,591	1,959	3,158	4,589	6,295	9,525		
5	35	Jaz.: Santa Cat. ME SM	0,133	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		Jaz.: Santa Cat. ME MM	0,540	0,972	1,305	2,160	2,500	1,470
		Jaz.: Santa Cat. SS MM	0,750	0,750	1,000	2,211	1,312	0,000
		Subtotal não-beneficiado	1,423	1,722	2,305	4,371	3,812	1,470
		Lavador: Candiota	0,105	0,787	1,751	2,530	3,915	5,242
		Lavador: Leão	0,763	1,139	0,094	0,000	0,000	0,000
		Lavador: Charqueadas	0,212	0,000	0,000	0,000	0,000	0,212
		Lavador: Iruí	0,101	0,078	0,199	0,339	0,490	1,704
Subtotal beneficiado	1,180	2,003	2,043	2,869	4,406	7,158		
Total produzido	2,603	3,725	4,348	7,240	8,218	8,627		
6	42	Lavador: Candiota	0,338	0,298	0,229	0,229	0,000	0,000
		Lavador: Iruí	0,060	0,060	0,060	0,060	0,000	0,000
		Lavador: Santa Catarina — energia	0,000	0,000	0,000	0,160	1,017	2,952
		Subtotal beneficiado	0,398	0,358	0,289	0,449	1,017	2,952
7	47	Lavador: Candiota	0,000	0,032	0,351	0,368	0,447	0,159
		Lavador: Iruí	0,162	0,545	0,481	1,062	1,441	2,372
		Lavador: Capivari	0,970	1,421	1,984	1,984	1,911	2,733
		Subtotal beneficiado	1,132	1,998	2,816	3,414	3,799	5,263
8	54	Jaz.: Leão-Butiá CA	0,105	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		Lavador Candiota	0,398	1,560	3,201	4,563	6,841	9,585
		Lavador: Charqueadas	0,164	0,000	0,000	0,000	0,000	0,164
		Lavador: Iruí	0,224	0,173	0,384	0,630	0,857	2,978
Subtotal beneficiado	0,786	1,733	3,585	5,193	7,698	12,727		
9	60	Lavador: Leão	0,398	0,573	0,790	0,810	1,062	1,504
		Lavador: Capivari	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007
		Lavador: Santa Catarina — energia	0,000	0,000	0,000	0,045	0,008	0,194
		Subtotal beneficiado	0,398	0,573	0,790	0,855	1,069	1,706

TABELA 10

*Transporte de carvão*

Número da rota	Regiões de origem	Regiões de destino	Tipos 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	Ferrovia	0,031	0,717	1,977	2,704	4,126	5,049
2	Porto Alegre	São Paulo	Ferrovia	0,509	1,017	1,017	1,024	2,376	5,255
3	Paraná	São Paulo	Ferrovia	0,000	0,331	0,370	0,375	0,254	0,000
4	Santos	São Paulo	Ferrovia	0,500	0,500	0,901	1,692	3,500	3,500
5	Rio de Janeiro	São Paulo	Ferrovia	0,393	1,000	1,441	1,441	2,364	2,096
6	Rio de Janeiro	Minas Gerais	Ferrovia	0,000	0,498	0,768	0,586	1,040	3,247
7	Espírito Santo	Minas Gerais	Ferrovia	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	Ferrovia	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

guem 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 meta-

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

Na Tabela II, 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 de carvão da pior qualidade permitida naquele uso. Ocorrem, entretanto, variações nesta regra geral, como é o caso da demanda

TABELA II  
*Resumo das utilizações*

Número da utilização	Nome	Tipo de carvão	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 utilização 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	Combustão	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	Termeletricidade	5	1,208	1,375	1,044	0,384	0,000	0,000
		6	0,338	0,178	0,476	0,229	1,525	1,858
		7	0,129	0,055	0,408	1,895	1,405	2,733
		8	0,890	1,733	2,404	3,570	5,257	8,343
5	Gaseificação	4	0,000	0,328	0,577	2,263	4,468	4,888

para cimento, que em 1989/94 é toda atendida pelo carvão tipo 5, enquanto noutros períodos utiliza-se também o tipo 4, o que 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 pode ser analisada através da Tabela 12, 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 de lavadores a meio-denso em Leão e Capivari e à combinação de jigs e meio-denso em Iruí. A participação do investimento em beneficia-

TABELA 12

*Investimento setorial – média anual*

Setores	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
Total anual	127,861	238,000	288,050	407,286	232,434	356,026

mento 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 subseqüentes. 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-São Paulo. 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 o de 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 subseqüentes 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 13 apresentamos a evolução dos preços-sombra regionais do

TABELA 13

*Evolução dos preços-sombra regionais do carvão metalúrgico nacional*

Regiões	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

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 13 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 permitir 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 não requer o conhecimento da demanda de energia proveniente do carvão, mas sim 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 14. 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 acrescentando 50% ao valor do mineral entre 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

TABELA 14

## Preços-sombra da energia

Número da região	Nome da região	Utilização	Custo marginal da gigacaloria, por período (US\$/ton.)					
			1981/82	1983/84	1985/86	1987/88	1989/94	1995/00
1	Bagé	Cimento Termeletricidade	19,648 20,804	9,041	9,046	10,323	8,651	14,475
2	Porto Alegre	Combustão Cimento Siderurgia Termeletricidade Gaseificação	19,736 18,640 19,968 19,736	1,902 1,796 9,101 1,902 8,191	3,949 3,729 9,588 1,249 8,584	4,987 4,710 11,488 2,442 10,069	5,409 9,771 10,208 8,410 9,187	5,722 16,087 16,504 14,853
3	Rio Grande	Combustão	—	5,555	4,202	4,883	4,134	5,456
4	Santa Catarina	Combustão Cimento Termeletricidade Gaseificação	— — — —	— — — 9,249	— — — 9,687	— — — 11,765	— — — 0,857	— — — 0,857
5	Paraná	Combustão Cimento Termeletricidade	5,479 5,175 5,479	6,256 5,908 6,256	14,184 13,396 14,184	16,747 15,816 16,747	13,877 13,106 13,877	35,806 33,817 35,808
6	São Paulo	Combustão Cimento Gaseificação	22,999 22,999	11,605 13,976	10,356 14,092	12,154 16,996	10,274 14,286 12,874	11,715 20,592 18,533
7	Santos	Combustão Siderurgia	22,999	8,878 12,116	7,490 12,511	8,628 15,344	7,552 12,951	8,682 19,116
8	Rio de Janeiro	Cimento Siderurgia Gaseificação	22,999	12,306 12,306	12,677 12,789	15,087 16,017 14,415	12,405 13,102 11,792	19,111 20,199 18,179
9	Espírito Santo	Cimento Siderurgia	22,999	12,923	13,357	15,767	13,085	19,797
10	Minas Gerais	Cimento Siderurgia	22,999	13,746	14,180	16,874	13,992	20,699
				13,746	14,180	17,457	14,542	21,640

oriunda do óleo combustível, em torno de 23 dólares em dezembro de 1980 (US\$ 230/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 14 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 termelétricidade em Bagé e Santa Catarina, assim como na 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 qualidades, 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.

## 5 — Conclusões

Nesse trabalho propôs-se 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 2. 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 3 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 4, verificando-se que este cenário é excessivamente otimista quanto aos níveis de substituição que poderiam ser alcançados a curto prazo. A principal limitação 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 intensidade 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 óleo 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 termoeletricidade 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 relevância 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 acoplamento 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. University 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.

(Originais recebidos em novembro de 1981.)