

TEXTOS PARA DISCUSSÃO

GRUPO DE ENERGIA

Nº XXIII

"Impactos Ambientais  
Decorrentes do Consumo  
de Carvão Mineral".

Sérgio Margulis

Novembro de 1984

IPEA  
10-84

IPEA/INPES  
Serv. de  
Documentação

Impactos ambientais decorrentes do  
consumo de carvão mineral



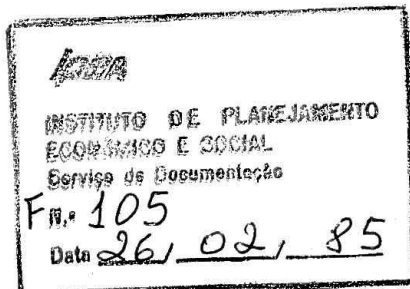
RJF0105/85

IPEA - RJ

Tiragem: 100 exemplares

Trabalho elaborado em: Setembro de 1984

Instituto de Pesquisas do IPEA  
Instituto de Planejamento Econômico e Social  
Avenida Presidente Antonio Carlos, 51 - 13/17º andar  
20020 Rio de Janeiro - RJ  
Tel.: (021) 210-2423



Este trabalho é da inteira e exclusiva responsabilidade de seu autor. As opiniões nele emitidas não exprimem, necessariamente, o ponto de vista da Secretaria de Planejamento da Presidência da República.

## Sumário

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - <u>Objetivos do trabalho</u>	1
1.2 - <u>Alguns aspectos da situação brasileira</u>	2
1.2.1 - Diferenças para o caso brasileiro	5
1.2.2 - Dados disponíveis	6
1.2.3 - Legislação	7
1.3 - <u>Revisão bibliográfica</u>	9
1.4 - <u>Alguns aspectos teóricos e estrutura do trabalho</u>	13
2 - POLUIÇÃO DECORRENTE DA QUEIMA DE CARVÃO MINERAL	14
2.1 - <u>Poluição atmosférica</u>	15
2.1.1 - Caldeiras e termelétricas	17
2.1.2 - Gaseificação	20
2.2 - <u>Poluição hídrica</u>	23
2.3 - <u>Disposição das cinzas e dos sólidos</u>	26
3 - SITUAÇÃO BRASILEIRA - ALGUMAS QUANTIFICAÇÕES	27
4 - CUSTOS DE CONTROLE AMBIENTAL	39
5 - RESUMO E PRINCIPAIS CONCLUSÕES	56
BIBLIOGRAFIA	61

### Lista de Tabelas, Fluxogramas e Gráficos

Tabela 1	- Padrões de Emissão Americanos e Padrões de Qualidade do Ar Nacionais	10
Tabela 2	- Emissões de Poluentes do Ar de Plantas de Gaseificação de Carvão	24
Tabela 3	- Parâmetros de Capacidade e de Operação das Termelétricas a Carvão	32
Tabela 4	- Estimativas das Emissões dos Poluentes pelas Termelétricas sem Controle	33
Tabela 5	- Estimativa das Eficiências de Controle Necessárias para se Atingir os Padrões de Emissão da Tabela 1	34
Tabela 6	- Fatores de Emissão de Pequenas Caldeiras sem Controle	39
Fluxograma 1	- Esquema Simplificado do Processo de Gaseificação	21
Fluxograma 2	- Esquema Simplificado do Sistema de Limpeza do Gás Combustível	22
Gráfico 1	- Custo anualizado de um precipitador instalado numa caldeira de carvão pulverizado de 58,6 MW ou $200 \times 10^6$ BTU/h de calor de <u>input</u> , como função do nível de controle de emissão e do teor de enxofre do carvão	46
Gráfico 2	- Custo anualizado de um precipitador instalado numa caldeira de grelha móvel de 44 MW ou $150 \times 10^6$ BTU/h de calor de <u>input</u> , como função do nível de controle de emissão e do teor de enxofre do carvão	47

- Gráfico 3 - Custo anualizado de um precipitador instalado numa caldeira de grelha de corrente de 22 MW ou  $75 \times 10^6$  BTU/h de calor de input, como função do nível de controle de emissão e do teor de enxofre do carvão 48
- Gráfico 4 - Custo anualizado de um precipitador eletrostático instalado numa caldeira com alimentação inferior de 8,8 MW ou  $30 \times 10^6$  BTU/h de calor de input, como função do nível de controle de emissão e do teor de enxofre do carvão 49
- Gráfico 5 - Custo anualizado de controle de um precipitador eletrostático instalado em diferentes caldeiras como função da escala da planta, do teor de enxofre e do fator de emissão 51
- Gráfico 6 - Custo anualizado de controle por MW ou BTU de calor de input de um precipitador instalado em diferentes caldeiras como função da escala da planta, do teor de enxofre e do fator de emissão 52

# IMPACTOS AMBIENTAIS DECORRENTES DO CONSUMO DE CARVÃO MINERAL

Sérgio Margulis

## 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 - Objetivos do trabalho

Na maior parte dos países industrializados, o carvão mineral representa uma das principais fontes de energia, com particular destaque na geração de energia elétrica (termoeletricidade). Com a elevação do preço internacional do petróleo e, por conseguinte, do óleo combustível, estes países desenvolveram programas visando um aproveitamento ainda maior de suas reservas domésticas de carvão mineral. Além das dificuldades técnicas de conversão de equipamentos que consomem óleo combustível para o uso do carvão, o principal problema decorrente destas medidas foi a questão ambiental. Por um lado, a poluição "total" decorrente do uso do carvão mineral é maior que a do óleo combustível e, por outro, os padrões ambientais vêm-se tornando cada vez mais rigorosos naqueles países. A questão tornou-se bastante séria porquanto os elevados custos de controle diminuíram ou, em alguns casos, eliminaram a economicidade do carvão em relação ao óleo combustível.

Atualmente, a poluição atmosférica decorrente da queima de carvão mineral representa uma das mais sérias questões ambientais nos Estados Unidos e nos países mais desenvolvidos da Europa Ocidental. Mais da metade das emissões de enxofre causadas pelo homem (cerca de metade das emissões totais), 95% das emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) ocasionadas pelo homem (cerca de 10% das emissões totais),  $1/3$  das emissões totais de particulados feitas pelo homem, além de uma contribuição desconhecida de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera, são atribuíveis à queima de carvão mineral no mundo [6].

O objetivo do presente trabalho é o de estudar como estas questões se colocam para o caso brasileiro, ou seja, caso se de-

seje implementar uma política de estímulo ao consumo de carvão mineral como substituto do óleo combustível, quais seriam os impactos ambientais esperados, quais os possíveis controles e quais os custos associados.

Antes de apresentarmos alguns aspectos específicos da situação brasileira, salientamos que existem cinco formas básicas de consumo de carvão mineral: a combustão para geração de vapor (caldeiras), a combustão em fornos (tipo cimento), a combustão para geração de calor de processo (como, por exemplo, cerâmicas), a destilação (coquerias siderúrgicas ou de fundição) e o uso simultâneo como energético e matéria-prima (reductor siderúrgico). Além disso, existem as "transformações" do carvão da forma sólida para as formas gasosa ou líquida. Pelos motivos apresentados posteriormente neste trabalho, só são analisadas qualitativamente as questões ambientais decorrentes da combustão em caldeiras e da gaseificação do carvão mineral. Independente disto, julgamos importante nesta introdução mencionar que o problema do meio ambiente mais relevante é a poluição atmosférica decorrente principalmente das emissões de material particulado e de óxidos de enxofre e de nitrogênio pela chaminé e também do simples manuseio e estocagem do carvão. Se comparadas com as emissões decorrentes da queima do óleo combustível para geração de uma mesma quantidade energética, as de material particulado de carvão mineral são muito mais poluentes, embora com relação aos óxidos de enxofre elas sejam da mesma magnitude para ambos os combustíveis.

## 1.2 - Alguns aspectos da situação brasileira

As áreas tradicionalmente consumidoras de carvão mineral estão localizadas próximas às regiões de produção, notadamente Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Em função da competitividade com o óleo combustível, o carvão mineral começa a ser consumido nas regiões mais afastadas - São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais -, com tendência a se expandir para localidades ainda mais distantes.

As estatísticas de consumo de carvão mineral energético indicam que, até 1982, a participação percentual por indústria situa-

va-se nas faixas de 50% para o setor termelétrico, 30% para o cimenteiro e 20% para os demais. Em 1983, há uma alteração na estrutura de consumo, pois, as termelétricas não foram as maiores consumidoras, ficando com uma participação de 36%, enquanto o setor cimenteiro subiu para 39% e alimentos, petroquímica e papel e celulose consumiram conjuntamente 20% do total, restando 5% para outras indústrias. Estes perfis tendem a se alterar conforme o peso que terão tanto os níveis de substituição de fonte energética como os de crescimento da produção por setor. Dentre os diversos consumidores, as termelétricas têm uso típico e bastante regional, razão pela qual tendem a se manter como os maiores consumidores, juntamente com a indústria cimenteira, que substitui maciçamente o equipamento de queima com vantagens para a própria qualidade do produto. As projeções utilizadas no Modelo MOCAM, do Grupo de Energia do IPEA/INPES - atualmente em fase de atualização -, são de 35 a 50% do consumo total de carvão mineral energético pelo setor termelétrico, de 25 a 40% pelo setor cimenteiro e de 20 a 30% pelos demais setores. Todo o setor termelétrico (a carvão mineral) está situado entre os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo que os demais consumidores localizam-se principalmente no Sul e Sudeste, com forte concentração nas regiões metropolitanas de São Paulo e Porto Alegre.

Devemos ainda observar que, nos níveis atuais de produção e consumo e em função das características dos carvões nacionais, as questões ambientais decorrentes da produção preocupam muito mais que as do consumo, podendo ser consideradas como uma das mais sérias relativas ao meio ambiente no Brasil.<sup>1</sup>

Existe um aspecto extremamente importante para que se possa compreender a situação atual do meio ambiente em relação ao consumo do carvão mineral, principalmente a atenção que deve ser dada por parte dos órgãos responsáveis pelo meio ambiente a este respeito. A brusca diminuição da atividade econômica iniciada em

---

<sup>1</sup>Neste trabalho, no entanto, tratamos unicamente das questões ambientais observadas no consumo. Para uma análise daquelas relacionadas com a produção, ver Margulis [20].



1981 fez com que o consumo dos energéticos se mantivesse constante ou até diminuísse em alguns casos. A perspectiva de continuação da crise econômica levou ainda potenciais consumidores de carvão mineral a não substituírem os equipamentos de queima de óleo combustível, pois isto exigiria investimentos que representam riscos na conjuntura atual. (A não ser os setores de exportação, o produto industrial veio caindo consideravelmente.)

Esta situação traz duas conseqüências sérias para a questão do meio ambiente: a primeira é que, diante da crise econômica, ela passa a um segundo plano de prioridades; e a segunda é que a própria queda da atividade econômica acarreta uma diminuição das emissões de poluentes, de modo que as políticas de controle e a fiscalização dos consumidores ficam "relaxadas". O efeito conjunto da menor prioridade concedida à questão ambiental e da diminuição das emissões de poluentes é o adiamento da implementação das políticas de controle mais rigorosas.

Esta foi exatamente a situação verificada no Brasil. Entre 1979 e 1980, quando não se observava ainda a queda da atividade econômica e estavam sendo previstas substituições das fontes energéticas associadas a projeções de aumento do consumo das novas fontes, foram feitas avaliações preliminares dos potenciais impactos ambientais que decorreriam destas substituições, em particular para o consumo de carvão mineral. As secretarias estaduais de meio ambiente, principalmente as da região Sul mais as do Rio de Janeiro e de São Paulo, chegaram, naturalmente em graus diferentes, a pensar em políticas de controle para regiões metropolitanas. Com a diminuição do nível de atividade econômica e a conseqüente diminuição do consumo de carvão e emissão de poluentes, estes trabalhos não tiveram continuidade. Adicionalmente, também não foram feitas medições das emissões atuais - uma medida fundamental para a implementação de políticas de controle -, nem se chegou à decretação de legislação baseada em taxas de emissão, apesar de a Cetesb ter iniciado estudos neste sentido, conforme informação recebida em contato direto com a empresa. As Secretarias de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul vêm dedicando muito maior atenção aos impactos ambientais decorrentes da mineração e do be-

neficiamento do carvão, que, como salientado, já atingem níveis críticos e preocupam muito mais nestas regiões do que os observados no consumo.

Outro aspecto que julgamos importante ressaltar neste ponto é que a região sul de Santa Catarina, produtora de carvão mineral, concentra também inúmeros consumidores, de grande e pequeno porte, e está com a qualidade das águas completamente comprometida e a do ar seriamente afetada. Entretanto, pelo fato de os consumidores localizarem-se muito próximos às áreas de mineração e de depósitos de rejeitos de beneficiamento, que são um dos principais focos de emissão de poluentes atmosféricos, fica difícil determinar a contribuição de cada uma das fontes poluidoras (quando for analisada mais pormenorizadamente a situação brasileira - na Seção 3 -, apresentaremos os dados disponíveis a este respeito).

De qualquer forma, a região sul de Santa Catarina é, simultaneamente, produtora e consumidora de carvão mineral e a ela já foi dada uma atenção especial com a execução de um estudo exaustivo acerca de sua situação ambiental, contratado pela FATMA, Secretaria Estadual de Meio Ambiente. A não ser este caso particular, pode-se dizer, em resumo, que a conjugação de três fatores - a diminuição da atividade econômica com redução das emissões e de suas projeções no curto prazo, a menor prioridade à questão ambiental numa conjuntura de crise econômica e, atualmente, a maior preocupação com os impactos ambientais que ocorrem na etapa de produção do carvão mineral - levou a um adiamento da atenção a ser dada à questão ambiental decorrente do consumo do carvão mineral. Uma consequência natural desta situação é uma limitação acentuada na disponibilidade de dados, discutida adiante.

#### 1.2.1 - Diferenças para o caso brasileiro

É de evidente percepção o fato de que, entre outros fatores, as emissões de poluentes são função da composição química do carvão utilizado. Isto quer dizer que, sob as mesmas condições de combustão, um carvão com alto teor de enxofre e/ou alto teor de

cinzas emitirá uma quantidade maior de enxofre e/ou cinzas que um carvão com baixos teores destes elementos.

A diferença da composição entre os diversos carvões torna im- perioso que sejam feitas análises distintas para cada tipo de car-vão. Neste sentido é que a experiência internacional tem uma va- lia limitada no estudo das emissões para o caso brasileiro, pois a composição química dos carvões estrangeiros é bastante diferen- te da dos carvões nacionais, principalmente quanto ao teor de cin- zas. Esta diferença é de fato muito grande; no caso de os padrões da legislação ambiental serem medidos em termos da massa de mate- rial emitido por tonelada de carvão queimado ou por unidade de energia (g/BTU, por exemplo, como é o caso), a questão fica extre- mamente desfavorável para o caso brasileiro. Mesmo supondo pode- res caloríferos iguais, a presença de cerca de 30% de cinzas nos carvões nacionais contra cerca de 10% nos americanos, por exem- plo, evidencia a dificuldade muito maior que se deverá ter no Brasil para atingir o mesmo padrão ambiental verificado nos Estados Uni- dos, embora não julguemos este o termo ideal de comparação, con- forme discutido adiante. A questão torna-se ainda mais crítica quando considerados os custos de controle. Devemos adiantar, nes- te ponto, que estes custos são do tipo exponencial como função da percentagem da remoção desejada do poluente. Analisando a situa- ção acima, percebe-se que os custos de controle observados no ca- so americano ou europeu podem não ser compatíveis com os do caso brasileiro.

Em resumo, queremos salientar que são necessárias medições de emissões de poluentes para os diversos carvões brasileiros e sob diversas condições de combustão para se poder avaliar correta- mente a eficiência e os custos das tecnologias de controle. No en- tanto, a extrapolação para o caso brasileiro dos valores observa- dos com os carvões americanos e europeus deve ser feita com bas- tante cautela.

#### 1.2.2 - Dados Disponíveis

Apesar de serem vitais para as análises do impacto ambiental e estimativas de carga as medições dos poluentes para diferentes

carvões e diferentes condições de queima, não é exagero dizer que, a não ser algumas raras exceções, elas são inexistentes. Isto não impede as avaliações quantificadas que tentamos fazer no trabalho (no mínimo, as dificulta sobremaneira, além de diminuir consideravelmente sua precisão).

Apresentamos anteriormente três fatores que julgamos implicar, em última análise, uma limitação da disponibilidade de informações, isto é, a diminuição das emissões como consequência da queda da atividade econômica, a menor prioridade em relação à questão ambiental na atual conjuntura e, também, em relação às questões observadas na produção do carvão mineral. Podemos acrescentar ainda, como consequência desta conjuntura desfavorável, as condições econômicas adversas que enfrentam as secretarias estaduais de meio ambiente, aliadas ao fato de as análises de chaminés, além de terem um custo relativamente elevado, não serem de execução simples.

A deficiência de informações fez com que mudássemos em certa medida a abordagem inicialmente desejada, assunto que ainda será discutido posteriormente no trabalho.

### 1.2.3 - Legislação

Analisaremos como é tratada a poluição atmosférica pela legislação de meio ambiente nacional. Ressaltamos inicialmente que a poluição do ar é função do emissor, mas também do corpo ou ambiente receptor, no sentido de que a emissão de uma mesma quantidade de poluente pode ser admissível sob determinadas condições da atmosfera local, mas não sob outras. Os três primeiros elementos que levam a esta situação são as condições de dispersão dos poluentes no ar (clima, meteorologia, topografia, ventos), a competição com outras fontes emissoras (pólos industriais, automóveis e outros) e, finalmente, a localização da fonte, principalmente com relação à proximidade ou não de áreas povoadas.

Levantamos estes aspectos para salientar que, em princípio, cada caso deve ser analisado separadamente e, também, para ressaltar

tar o que, de fato, é importante, ou seja, o padrão final da qualidade do ar decorrente da interação de todas as emissões e da dispersão natural dos poluentes, cuja concentração final na atmosfera traz efeitos maléficos ao homem, ao ecossistema e às construções. Entretanto, as legislações ambientais não se baseiam exclusivamente nos padrões de qualidade do ar, o que se deve a dois motivos básicos: o primeiro é que a filosofia de um padrão de qualidade certamente não é a "de um ar mais limpo possível", no sentido de que uma indústria que fosse a única instalada numa determinada região teria o direito de, sozinha, elevar de zero até o padrão da legislação a concentração de um poluente no ar, não incorrendo talvez em nenhum custo com controle; e o segundo é que, trabalhando apenas com os padrões de qualidade, torna-se de difícil operacionalidade o controle sobre as indústrias poluidoras. Como atribuir a cada um dos poluidores de uma região a respectiva parcela de "responsabilidade" ou a contribuição individual de cada um?

Em função destas duas principais causas, a maioria dos países vem implementando os padrões de emissão. Este critério, que também não é ótimo dos pontos de vista econômico e ambiental, ao menos ameniza as circunstâncias levantadas acima.<sup>2</sup> De qualquer forma, considera-se mais indicado justamente a conjugação de ambos os critérios: padrões de emissão e de qualidade do ar.

A situação particular do Brasil é a que procuramos descrever a seguir. De fato, só existem ainda os padrões de qualidade do ar decretados em 1976. Achamos importante ressaltar, entretanto, que eles foram essencialmente copiados da legislação americana, que, por sua vez, já tem agregados os padrões de emissão, os quais

---

<sup>2</sup>Observe-se, entretanto, que, novamente no caso de uma indústria que seja a única instalada numa região, o padrão de emissão pode ser desnecessariamente rigoroso. No outro caso considerado, de várias indústrias concorrentes, ainda que todas obedeam aos padrões de emissão, a qualidade do ar pode ficar comprometida. Em função disto, existem também padrões de redução percentual mínima da emissão de alguns poluentes, mas este critério só é utilizado de forma complementar aos padrões de emissão.

já vêm sendo implementados, no caso brasileiro, através da SEMA e de algumas das secretarias estaduais de meio ambiente que trabalham nesse sentido.

Julgamos prático para o contexto deste trabalho, em termos de expectativas da criação dos novos padrões, trabalhar com os padrões de emissão adotados nos Estados Unidos. No caso particular da queima do carvão mineral, são regulados apenas três poluentes: material particulado, dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ).<sup>3</sup> Os padrões de emissão americanos com os quais julgamos mais adequado trabalhar<sup>4</sup> estão apresentados na Tabela 1 a seguir, juntamente com os de qualidade do ar nacionais (que são praticamente iguais aos americanos, como salientado).

### 1.3 - Revisão bibliográfica

Já mencionamos na seção precedente que existe uma grande deficiência de dados e publicações sobre efeitos de queima e quantificações de emissões para o caso específico do carvão mineral nacional, lembrando que, pelas diferenças das características físico-químicas dos carvões de outros países, os mesmos estudos elaborados para os carvões estrangeiros têm valia limitada para nosso caso.

---

<sup>3</sup>Existem padrões de qualidade do ar para dois outros tipos de poluentes: monóxido de carbono (CO) e oxidantes fotoquímicos. As emissões de CO decorrentes da queima direta do carvão dependem exclusivamente do fato de a combustão ocorrer completamente ou não, independente da qualidade do carvão, enquanto que os oxidantes fotoquímicos não são produzidos diretamente pela combustão, mas sim decorrentes das transformações de CO e hidrocarbonetos na atmosfera. Por este motivo, estes poluentes não são regulados por taxas de emissão, bastando as de qualidade do ar.

<sup>4</sup>Sem nos determos na descrição da legislação americana, sumariamente tem-se os padrões federais primários que devem ser alcançados por meio de taxas de emissão decretadas pelos Estados - STATE IMPLEMENTATION PLANS (SIP) -, que são por nós julgados mais adequados para trabalhar aqui. Entretanto, existe uma revisão destas taxas, previstas para as novas plantas a serem instaladas - NEW SOURCE PERFORMANCE STANDARDS (NSPS) - e que são bem mais rigorosas que os padrões SIP.

Tabela 1

Padrões de Emissão Americanos e Padrões de Qualidade do Ar Nacionais

Poluentes	Padrões de Qualidade do Ar Nacional	Padrões de Emissão Americanos <sup>a</sup>
Partículas em suspensão	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - concentração geométrica anual 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - concentração máxima diária a não ser excedida mais de uma vez por ano	0,60 lb/10 <sup>6</sup> BTU = 1,08 g/10 <sup>6</sup> cal
Dióxido de Enxofre	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - concentração média aritmética anual 365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - concentração máxima diária a não ser excedida mais de uma vez por ano	2,50 lb/10 <sup>6</sup> BTU = 4,58 g/10 <sup>6</sup> cal
Dióxido de Nitrogênio	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - concentração média aritmética anual <sup>b</sup>	0,70 lb/10 <sup>6</sup> BTU <sup>c</sup> = 1,26 g/10 <sup>6</sup> cal
Monóxido de Carbono	10 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - concentração máxima de 8h a não ser excedida mais que uma vez por ano 40 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - concentração máxima diária a não ser excedida mais de uma vez por ano	-
Oxidantes Fotoquímicos	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ - concentração máxima horária a não ser excedida mais que uma vez por ano	-

<sup>a</sup>Média dos SIP (STATE IMPLEMENTATION PLANS) americanos.

<sup>b</sup>Padrão americano. Não existe padrão de qualidade nacional para o NO<sub>2</sub>.

<sup>c</sup>Padrão para carvões betuminosos, lignita e antracitos, que julgamos "correspondentes" aos carvões nacionais.

Muitas das informações foram obtidas em contato direto com as secretarias estaduais de meio ambiente - CMA/RS, FATMA/SC, CETESB/SP e FEEMA/RJ - além da SEMA, órgão federal. Como já salientado, maior atenção vem sendo dada às questões ambientais da produção do que do consumo. O trabalho nacional mais completo sobre este problema foi o levantamento da situação ambiental da região sul catarinense (produtora e consumidora de carvão mineral), que dá maior ênfase às questões da produção, uma vez que a carga poluidora é maior. Entretanto, existem avaliações de carga dos diversos consumidores e até uma análise de chaminé, feita para uma coqueria local. Da referência [7], que foi contratada pela própria FATMA, aproveitamos tanto algumas estimativas de carga para comparação quanto a própria descrição de alguns processos de contaminação ambiental e dos focos de emissão de algumas indústrias.

Galvão Filho [14], que se constitui num dos trabalhos mais completos e abrangentes sobre os impactos ambientais decorrentes da queima do carvão mineral, apresenta estimativas de carga e dos efeitos esperados de aumento da concentração de poluentes na região metropolitana de São Paulo, para determinados níveis de consumo de carvão mineral em substituição ao óleo combustível.

Godoy e Seara [15] apresentam algumas estimativas de carga das termelétricas de Santa Catarina. Na referência [19], que é um trabalho contratado pela Associação Nacional dos Produtores de Coque, são feitas estimativas de emissão, baseadas em balanço de massa, de óxidos de enxofre e também dos níveis de concentração da substância nas imediações das coquearias, através de modelos matemáticos de dispersão atmosférica. Apesar de específico e localizado, este parece ser o único trabalho publicado que lança mão destes modelos para fazer previsões dos níveis de poluição do ar.

Braile [1] apresenta os tipos de emissão esperados para diferentes consumidores, com algumas estimativas de carga, apesar de baseadas na referência [14]. Finalmente, dentre as referências nacionais, o relatório do Grupo Interministerial criado em 1981 com vistas a fazer um diagnóstico sobre os impactos ambientais decorrentes da produção e do consumo do carvão mineral [22]



não apresenta estimativas de carga, descrevendo apenas os processos de produção e os focos de emissão para algumas das indústrias consumidoras, também com base em larga escala na ref. [14].

As demais referências aqui consultadas são todas estrangeiras. Na parte da descrição dos processos produtivos, fontes e tipos de emissões e tipos de impactos causados, as melhores referências são o Office of Technology Assessment do Congresso Americano [6], uma publicação da OECD com previsões e projeções sobre consumo e tecnologias de consumo e produção de carvão mineral a nível mundial até o ano 2000 [23] e o WORLD COAL STUDY, um trabalho nos mesmos moldes do anterior [24]. Entretanto, apenas as duas últimas apresentam estimativas de custos de controle, e mesmo assim de forma bastante genérica.

Os trabalhos de que mais lançamos mão, tanto em termos dos custos de controle quanto para a próxima descrição das tecnologias de utilização e controle e análise de impactos ambientais, foram as ref. [10], [11] e [12], todas de uma mesma série da EPA americana, tratando, respectivamente, de processos de beneficiamento de carvões, controle de material particulado e sistemas de dessulfuração de gases (FGD). Na parte de custos de controle são sem dúvida os trabalhos mais completos que conhecemos e que utilizam hipóteses que julgamos extremamente razoáveis.

Além destas, um artigo da revista Power americana [13], um artigo do The Journal of Industrial Economics [16] e um livro genérico sobre carvão com um capítulo específico sobre meio ambiente [21] são referências que apresentam algumas estimativas de custos de controle e descrição dos processos poluidores.

Relativamente à bibliografia disponível, julgamos que as principais contribuições deste trabalho referem-se a uma agregação das informações disponíveis sobre o caso nacional com relação à queima do carvão mineral, à adaptação de informações estrangeiras para chegar a estimativas de carga para a queima de carvões nacionais e, principalmente, a estimativas dos custos de controle ambi

ental que serão necessários para manter dentro dos limites "aceitáveis" - já discutidos no texto - os padrões de qualidade do ar das áreas adjacentes aos potenciais consumidores de carvão mineral.

#### 1.4 - Alguns aspectos teóricos e estrutura do trabalho

Não nos deteremos aqui no estudo dos aspectos teóricos da economia ambiental, nem tampouco particularizada para o consumo do carvão mineral. Observaremos apenas alguns aspectos. Como na maioria dos casos onde se verifica uma séria questão ambiental, sua quantificação econômica tem como objetivo primário uma "correção" dos verdadeiros custos sociais (no caso específico, o de produzir e consumir uma dada quantidade energética proveniente da queima de carvão mineral). Assim, dependendo do termo de comparação a ser feito, várias podem ser as quantificações. O parâmetro básico de comparação seria a diferença entre os custos ambientais - discutidos logo a seguir - necessários para gerar uma unidade de energia entre diferentes combustíveis. Não levando em conta os custos ambientais, a princípio, a geração de energia por carvão mineral apresenta custo menor que a por óleo combustível. No entanto, quando se contabiliza também os custos ambientais, o custo ambiental mais alto da geração por carvão mineral pode torná-la inviável economicamente quando comparada a por óleo combustível. A grande dificuldade que existe é justamente a de quantificar economicamente os efeitos externos. Mais ainda, estas quantificações demandam antes a medição dos efeitos, ou seja, dos níveis de poluição, da saúde da população, da produtividade agrícola, etc., e freqüentemente nem mesmo estes parâmetros estão disponíveis, ficando impossível quantificar economicamente os eventuais custos associados a estes efeitos.

Neste trabalho, especificamente, tentamos medir unicamente a diferença entre os custos de controle ambiental da geração de uma mesma quantidade de energia obtida a partir do carvão mineral para aquela obtida a partir do óleo combustível. Observe-se que estes custos de controle, que estão associados aos padrões de quali

dade da legislação, nem de longe significam um nível de atividade econômica ótima.<sup>5</sup>

Em virtude da evidente falta de experiência nacional e da escassa disponibilidade de dados para o caso brasileiro, este trabalho deve ser entendido como de previsão em relação a uma possível substituição de combustível, conforme se delineava até cerca de 1980. Não há grande interesse em analisar a situação atual, que não é grave. Em relação aos custos de controle ambiental e estimativas de carga, baseamo-nos em cenários de substituição e de crescimento econômico que são perfeitamente questionáveis. Basicamente, procedemos a uma adaptação dos dados e informações disponíveis para o caso americano.

Além desta Introdução (Seção 1), o trabalho se encontra dividido em mais quatro seções: na Seção 2 apresentamos sumariamente as principais questões ambientais decorrentes da queima de carvão mineral, dando destaque aos principais consumidores potenciais; na Seção 3 analisamos alguns aspectos da situação brasileira e apresentamos estimativas de carga dos atuais consumidores, dando alguma atenção especial aos localizados na região sul catarinense, área crítica de poluição ambiental; na Seção 4 tentamos apresentar uma curva de custos de controle ambiental como função de diversas variáveis que os influenciaram - tipo de carvão, escala do consumidor, localização, tipo de queima, padrões de emissão, etc. -, embora algumas destas variáveis, pela dificuldade na obtenção de inúmeros dados, sejam mantidas fixas, enquanto sobre outras são feitas hipóteses de variação, todas então apresentadas mais detalhadamente; e, finalmente, na Seção 5 apresentamos um sumário e as principais conclusões do trabalho.

## 2 - POLUIÇÃO DECORRENTE DA QUEIMA DE CARVÃO MINERAL

É fácil perceber que as questões ambientais decorrentes da combustão do carvão mineral são fundamentalmente de poluição at-

---

<sup>5</sup>Uma discussão mais detalhada deste tema foi apresentada em Margulis [20].

mosférica, podendo-se considerar as poluições hídrica e dos solos desprezíveis tanto em relação à atmosférica quanto aos impactos causados a estes mesmos recursos nas etapas de mineração e de beneficiamento do carvão. Uma parte dos impactos causados aos rios e aos solos decorre dos efeitos secundários dos equipamentos de controle (atmosféricos), que acabam por transformar os poluentes e rejeitos em forma líquida e sólida, que na disposição podem gerar os problemas de poluição hídrica e dos solos. Como estes problemas são "posteriores" ao controle atmosférico, trataremos inicialmente da poluição atmosférica, que, além do mais, como mencionado, encontra-se atualmente em um nível muito mais preocupante.

### 2.1 - Poluição atmosférica

Seria interessante analisar os impactos ambientais decorrentes de cada uma das cinco diferentes formas de consumo de carvão mineral. Entretanto, em função da utilização muito mais acentuada por algumas indústrias e pelo fato de que a carga poluente das emissões destas indústrias é potencialmente muito maior, vamos nos concentrar em apenas duas delas: as termelétricas e caldeiras em geral e as plantas de gaseificação.

A não inclusão das siderúrgicas deve-se essencialmente ao fato de que só existem quatro usinas integradas a coque metalúrgico no País, o que torna a questão por demais específica, apesar de preocuparem bastante, os impactos ambientais destas siderúrgicas, não se referem apenas ao consumo do carvão e nem são apenas de poluição atmosférica.

A não inclusão aqui da indústria cimenteira deve-se principalmente ao fato de que a substituição do combustível nos fornos (óleo combustível por carvão mineral) "não criará novos problemas de poluição; as cinzas constituirão matéria-prima para o cimento e o SO<sub>2</sub> reage também, sendo coletado no forno de cimento. Por outro lado, as fábricas de cimento no Brasil ainda são equipadas,

em sua maioria, com filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos para coleta de poeira".<sup>6</sup>

Finalmente, a não inclusão das coquearias de fundição localizadas em Santa Catarina deve-se ao fato de que elas possuem um tipo extremamente particular de consumo, seus impactos ambientais são muito localizadas, estão instaladas em áreas saturadas de fontes concorrentes e seu percentual em massa do consumo representa uma parcela muito diminuta do total nacional. Pelo fato de localizarem-se em áreas críticas de poluição, entretanto, apresentamos na Seção III, adiante, algumas estimativas de carga da indústria e remetemos o leitor interessado às referências [19] e [7] para maiores detalhes.

Antes de passarmos à apresentação dos problemas ambientais específicos, julgamos importante ressaltar o desconhecimento parcial de dois impactos atribuídos ao consumo de carvão mineral ainda hoje discutidos a nível mundial. O primeiro deles é o aumento da temperatura da terra decorrente da elevação dos níveis de CO<sub>2</sub> ("efeito-estufa"), que é certamente de longo prazo. Além de não se conhecer a extensão dos impactos (inundação de cidades costeiras, mudanças no clima terrestre, na localização de assentamentos humanos, na agricultura, nos níveis de poluição, etc.), a medição dos níveis atuais de CO<sub>2</sub> e suas emissões naturais (fotossíntese, etc.), as emissões causadas pelo homem e o efeito acumulado ao longo do tempo, além da absorção do CO<sub>2</sub> pelos oceanos, são todos mecanismos ainda hoje muito pouco conhecidos e de difícil avaliação.

---

<sup>6</sup>Ver Braille [1]. Muito sumariamente, a fabricação do cimento consiste em três etapas: preparação das matérias-primas (moagem e homogeneização da mistura argila-calcário), clínquerização (calci nação da mistura nos fornos) e, finalmente, a moagem do clínquer com gesso.

Tradicionalmente, o aquecimento dos fornos ocorre através da queima de óleo combustível; a substituição por carvão mineral pro cessa-se pela introdução deste no forno justamente na etapa de clínquerização. Assim, as cinzas que seriam usualmente emitidas pela chaminé aglutinam-se à mistura argila-calcário e passam a ser constituintes do clínquer, sem lhe conferir características inade quadas. Se respeitados os teores máximos de 30% de cinzas e de 2,5% de enxofre no carvão, o clínquer assim produzido parece apre sentar características ainda superiores ao produzido tradicionalmente.

Outro efeito pouco conhecido é o dos elementos traços, principalmente os metais pesados e os compostos aromáticos cancerígenos. Além de serem difíceis as medições destes elementos nas análises de chaminés, também existe grande incerteza acerca de seus possíveis efeitos sobre o homem e o meio ambiente. Particularmente, para os carvões brasileiros, não são conhecidas medições destes elementos.

#### 2.1.1 - Caldeiras e termelétricas

O carvão mineral energético foi consumido do seguinte modo em 1983: 36% pelas usinas termelétricas no Sul do País; 39% pela indústria cimenteira; e os 25% restantes principalmente pelas indústrias petroquímica, alimentícia e de papel e celulose. A indústria cimenteira, como ressaltado, não produz maiores impactos ambientais, de modo que não é analisada. Excluindo o consumo de carvão mineral por essa indústria, temos que cerca de 90% do consumo restante destinou-se à geração de vapor em caldeiras, motivo por que optamos por analisar as questões ambientais apenas nas caldeiras para produção de vapor. Salientamos que 65% do total de carvão destinado à geração de vapor foi consumido pelas usinas termelétricas, razão pela qual destacamos estas utilidades nesta subseção.<sup>7</sup> A não ser as diferenças das taxas de emissão dos poluentes, decorrentes de diversos fatores apontados adiante, os problemas ambientais são os mesmos em todos os tipos de caldeiras, os quais enumeramos a seguir.

Dois tipos de poluição atmosférica bem distintos quanto à geração e à intensidade são observados nas indústrias consumidoras: o primeiro, de menor monta e com controle muito mais simples e de menor custo, é caracterizado pelos problemas gerados através da descarga, do transporte, da moagem e da ensilagem do carvão (estes mesmos problemas relativamente às cinzas serão analisados pos

---

<sup>7</sup> Estas estatísticas apresentam ao menos a peculiaridade de 1983 ter sido o primeiro ano em que o setor termelétrico não foi o maior consumidor de carvão. Em 1982, ele representava 53% do consumo total, enquanto que o setor cimenteiro apenas 30%. Dentre os consumidores para geração de vapor, as termelétricas representavam 82% do total.

teriormente); o segundo é a emissão de uma variedade de poluentes pela chaminé, que, apesar de muito maior e de controle mais difícil e caro, apresenta a vantagem de se dar em apenas um ponto do processo. Como a solução dos primeiros consiste quase que apenas em um conjunto de medidas operacionais e de baixo custo, não nos deteremos em descrevê-las.

Apesar de as caldeiras serem hoje maiores e produzirem vapor a uma maior temperatura e pressão do que há 50 anos, a diminuição do carvão a pequenas granulometrias misturado com o ar na câmara de combustão, onde a nuvem do pó de carvão queima como um gás combustível, ainda é a maneira como se produz atualmente a queima da maioria do carvão. A escolha do equipamento a ser utilizado depende de diversos fatores, dentre os quais, principalmente, a finalidade do vapor, o tipo de carvão a ser empregado e a escala do consumidor (também os custos são função destes elementos). Não achamos pertinente tecer maiores considerações sobre estes equipamentos, embora o tipo de unidade de combustão constitua-se em um dos fatores que influenciam as emissões, o que sem dúvida é um aspecto importante.

Os outros fatores mais importantes que determinam as emissões são a capacidade de queima (que varia de 5 kg até 500 t de carvão por hora), o sistema de alimentação do carvão na caldeira, a composição do carvão e os equipamentos de controle. Saliente-se que os impactos destas emissões dependem ainda de uma série de fatores do próprio consumidor (existência e tipo de chaminé, temperatura e velocidade de saída dos gases, etc.) e de outras condições que são do próprio meio ambiente (climáticas, meteorológicas, topográficas, dentre outras), mas neste ponto queremos ainda nos ater às próprias emissões, e não a seus potenciais impactos.

A capacidade e o tipo de unidade de combustão determinam o modo como o carvão vai ser queimado, se bitolado ou pulverizado. O pulverizado, que implica uma emissão muito maior de cinzas para a chaminé do que para o fundo da fornalha, é usado nas utilizações mais intensas (acima de 100 tph); o bitolado, que implica uma menor emissão de cinzas pela chaminé, é usado em sistemas de até 50 tph, sendo competitivo com o pulverizado na faixa de 50 a 100 tph.

Na Seção 4 do trabalho trataremos da quantificação das emissões. Entretanto, podemos aqui dizer que a quase totalidade das estimativas é feita com base em fatores de emissão apresentados em trabalhos da EPA americana, adaptadas às condições e ao caso brasileiro. Este é o procedimento de Galvão Filho [14], que apresenta as seguintes estimativas de emissão dos principais poluentes:

Material Particulado - A fração que é emitida com o fluxo gasoso varia de 20% (unidades tipo ciclone) a 80% (pulverizado), ficando o restante contido na fornalha. Isto quer dizer que, se o carvão queimado tiver um teor de 40% de cinzas, a emissão será de 80 até 320 kg/t de carvão queimado, sem controle. Observe-se que as termelétricas no Brasil, que chegam a queimar carvão com até 50% de cinzas, emitem, sem controle, 480 kg de material particulado/t de carvão queimado.

Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>) - Durante a combustão, o enxofre reage com o oxigênio: 90% são oxidados a SO<sub>2</sub>, 5% a SO<sub>3</sub> e 5% ficam retidos no material particulado e resíduos. Se o teor de enxofre for de 3%, teremos uma emissão sem controle de cerca de 60 kg SO<sub>2</sub>/t de carvão.<sup>8</sup>

Óxido de Nitrogênio (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) - O NO é formado a altas temperaturas (1.500°C) da reação do nitrogênio com o oxigênio do ar. Depois, a temperaturas inferiores a 600°C, 95% dele é oxidado a NO<sub>2</sub>. As taxas de emissão variam enormemente (de 1,5 até 30 kg de NO<sub>2</sub>/t de carvão) porque dependem de inúmeros parâmetros, como o conteúdo de nitrogênio do carvão, temperatura de chama, taxas de resfriamento dos gases, quantidade de excesso de ar, entre outros.

Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarbonetos (HC) - Como já salientado, as taxas de emissão são bem menores quando comparadas com os outros poluentes e dependem principalmente da taxa de ex-

---

<sup>8</sup> O peso atômico do oxigênio é metade que o do elemento enxofre, de modo que os 27 kg de enxofre (90% x 3% x 1.000 kg) transformam-se em 54 kg, cerca de 60 kg, de SO<sub>2</sub>.



cesso de ar e do fato de se estar fazendo ou não uma queima por estágio, ocorrendo principalmente nas pequenas caldeiras.

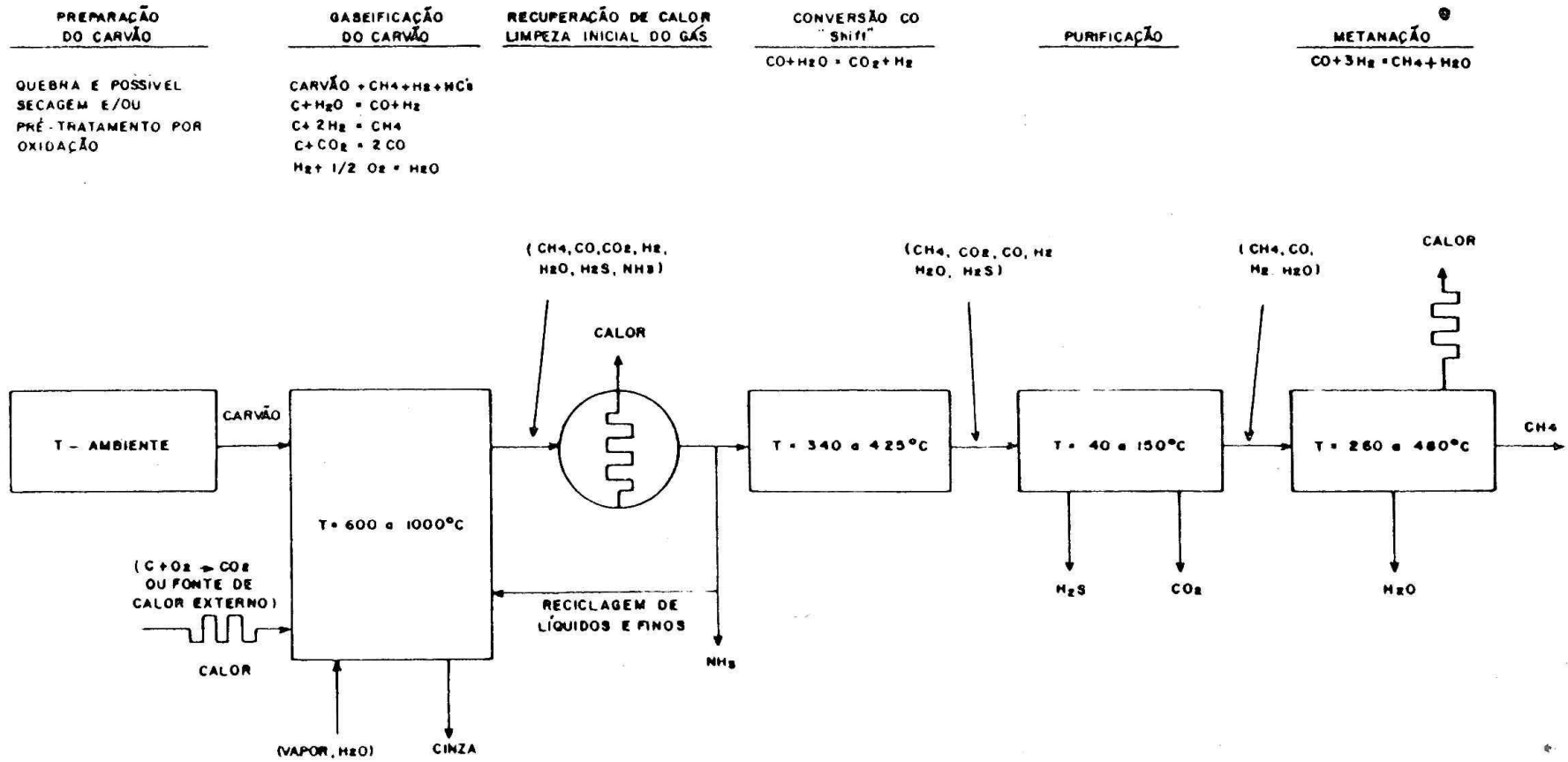
### 2.1.2 - Gaseificação

A gaseificação pode ser encarada como um método de controle de poluição, embora o processo de conversão carvão/gás também não seja isento de problemas ambientais. Em princípio, todo o processo de gaseificação do carvão envolve a sua reação com o vapor a fim de produzir monóxido de carbono e hidrogênio. Como a reação é endotérmica, torna-se necessário o fornecimento de calor para o processo, que é gerado pela queima paralela de uma parte do carvão. Esta queima necessita, evidentemente, de ar (oxigênio) para se desenvolver. O uso de ar na queima produz um gás com alto teor de nitrogênio e, portanto, com baixo poder calorífero. Se ao invés de ar for utilizado oxigênio, o gás produzido é de médio poder calorífero. Um processo de metanação adicional pode transformar o gás de médio poder calorífero em gás de alto poder calorífero.

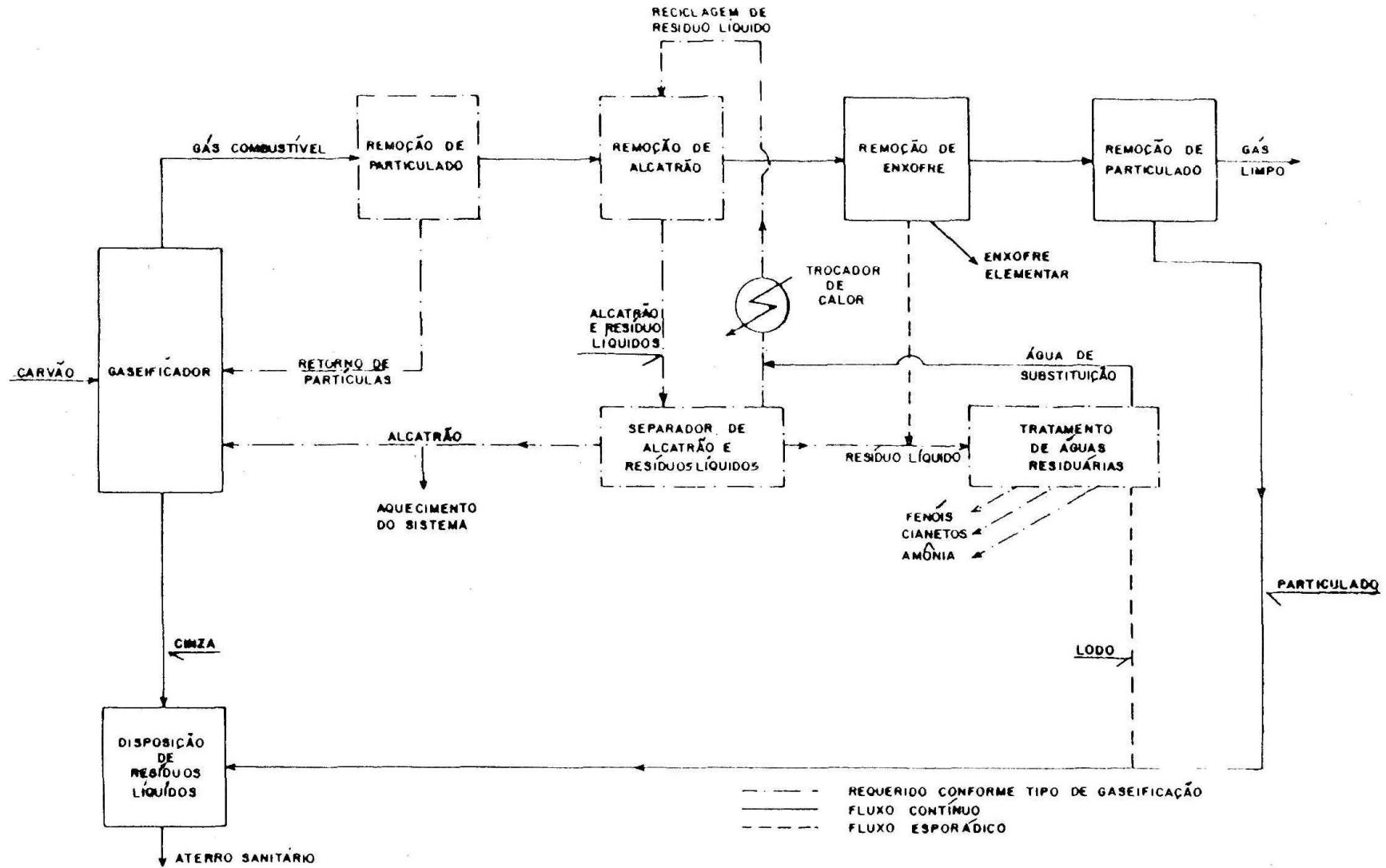
Apresentamos nos Fluxogramas 1 e 2, a seguir, uma esquematização do processo da gaseificação e do sistema de limpeza do gás, que corresponde ao próprio controle de poluição do processo, ambos apresentados na referência [14].

Deixando de lado o tratamento dos resíduos líquidos, que serão analisados na próxima subseção, a partir do Fluxograma 2 percebe-se, que existem basicamente duas etapas de limpeza do gás, que representam em verdade um controle de poluição atmosférica. A primeira ocorre logo após a gaseificação propriamente e consiste, em parte, na remoção de cinzas do gaseificador e, em parte, na passagem do fluxo gasoso por separadores ciclônicos, que removem grande parcela de material particulado. A segunda, mais importante, consiste na remoção do enxofre, que se encontra no gás principalmente sob a forma de  $H_2S$ . Esta remoção, quase tradicional em processos que produzem  $H_2S$ , é feita pela tecnologia Claus, que deixa ainda, entretanto, cerca de 5% do enxofre em forma de óxidos ( $SO_2$ ) no gás de cauda. Uma variada gama de tecnologias existe também para remover o enxofre do gás de cauda, de modo que a eficiência global de limpeza do enxofre pode ser superior a 99,5%.

FLUXOGRAMA 1: Esquema Simplificado do Processo de Gaseificação



FLUXOGRAMA 2: Esquema Simplificado do Sistema de Limpeza do Gás Combustível



A quantidade de óxidos emitida depois que as correntes de gás são tratadas para remoção do  $H_2S$  e/ou do  $SO_2$  varia pouco entre os processos para produção de gás de baixo e médio poder calorífico e aumenta entre os processos de produção de gás de alto poder calorífico. Uma estimativa destas emissões, juntamente com as de óxidos de nitrogênio, particulados, hidrocarbonetos e  $CO$ , está apresentada na Tabela 2, a seguir, tirada da referência [1].

## 2.2 - Poluição hídrica

Com relação à poluição hídrica, as caldeiras das termelétricas, pela sua escala, são as que realmente podem comprometer a qualidade das águas. A combustão do carvão lança efluentes químicos e descarga térmica aos corpos de água. Evidentemente, o calor emanado representa a percentagem da energia originalmente presente no carvão que não é convertida em energia elétrica, sendo em geral transferida para rios, lagos, tanques de resfriamento ou mesmo para a atmosfera. A poluição térmica não é pouco relevante, pois altera propriedades importantes dos corpos de água receptores: a salinidade aumenta, a quantidade de oxigênio dissolvida diminui, os sólidos dissolvidos tornam-se maiores devido ao aumento da solubilidade de vários compostos, decorrente da elevação da temperatura, e ocorrem mudanças nas funções de organismos vivos na água. Este efeito ainda se adiciona a um consumo maior de oxigênio por estes organismos, acelerado pelos efluentes aquecidos.

Um controle completo só pode ser alcançado com a utilização de sistemas que emitem calor para a atmosfera ou para pequenos lagos artificiais (chamados sistemas de resfriamento em circuito fechado), mas que, por sua vez, apresentam o problema de elevado consumo de água e disposição da água recirculada. As implicações do elevado consumo são a diminuição da quantidade de água nos rios para diluir a carga poluidora e a eventual insuficiência de quantidade física nos rios, o que pode ser fatal para os ecossistemas hídricos. O efeito concentrador da evaporação aumenta os níveis de sais minerais na água de circulação do sistema de resfriamento. Esta água é continuamente trocada por água limpa para manter o sistema em operação e, quando descartada, possui uma concentração

Tabela 2

Emissões de Poluentes do Ar de Plantas de Gaseificação de Carvão

Poluentes e Processos	T/10 <sup>11</sup> kcal/dia
<u>Óxidos de Enxofre</u>	
Gás de baixo e médio poder calorífico	7 - 11
Gás de alto poder calorífico	5 - 30
<u>Óxidos de Nitrogênio</u>	
Koppers-Totzek <sup>a</sup> - gás de médio poder calorífico	3
Gás de alto poder calorífico	30
<u>Partículas</u>	
Todos os processos para gases de alto poder calorífico, exceto processo "Syntane"	1 - 3
Processo "Syntane"	3 - 12
<u>Hidrocarbonetos</u>	
Todos os processos para gases de alto poder calorífico	1/2
<u>Monóxido de Carbono</u>	
Todos os processos para gases de alto poder calorífico	2

<sup>a</sup>Os demais processos não apresentam emissão de NO<sub>x</sub>.

extremamente elevada de sais minerais. Apenas os sistemas que utilizam torres de resfriamento a seco não implicam descarga de poluentes para os recursos hídricos.

Além dos impactos ambientais associados ao sistema de resfriamento, as termelétricas geram também poluentes para as águas, além das pilhas de estocagem, como já ressaltado. A poluição das águas ainda dentro do sistema e o tratamento utilizado antes que elas sejam descartadas são tradicionais nas indústrias com efluentes líquidos poluídos. "As principais fontes são os efluentes líquidos da regeneração dos desmineralizados (operação feita duas vezes por dia), água de drenagem do sistema de aquecimento e de outros, água de limpeza da caldeira (infreqüente) e efluentes da limpeza de preaquecidos. Os despejos ácidos do desmineralizador devem ser neutralizados para ajuste do pH, os oleosos (drenagem de águas de limpeza) requerem um pré-tratamento para separação de óleo e graxas, os despejos sem metais (as águas de drenagem pré-tratadas) requerem uma sedimentação para remoção de sólidos em suspensão e os com metais um tratamento físico-químico para remoção dos sólidos em suspensão além do ferro e cobre, geralmente encontrados nestes efluentes" (ref. [7]).

No Fluxograma 2 anterior apresentamos o esquema simplificado do sistema de limpeza do gás combustível numa planta de gaseificação de carvão, podendo também ser observadas as fontes dos poluentes e o esquema básico de tratamento das águas contaminadas. Percebe-se que a maior parte das fontes de poluição hídrica decorre da fase de limpeza do gás combustível gerado. Antes desta fase, apenas a água de run-off das pilhas de pré-tratamento e estocagem do carvão e as águas utilizadas para o resfriamento das cinzas do gaseificador apresentam sólidos em suspensão e compostos orgânicos dissolvidos. Estas águas de resfriamento, bem como as geradas na fase de limpeza do gás, dependem de certas variáveis, principalmente do tipo de carvão e do tipo de gaseificador utilizados. As fases de remoção de particulados, resfriamento do gás e remoção de gases ácidos geram sólidos em suspensão, óleos não emulsificados, compostos orgânicos e inorgânicos dissolvidos e solventes consumidos. O tratamento destes poluentes é convencional,

qual seja: separadores óleo/água; filtração e floculação/flotação para remoção dos sólidos em suspensão; os compostos orgânicos dissolvidos por extração, adsorção, tratamento biológico ou oxidação na torre de resfriamento; e os inorgânicos dissolvidos geralmente por arraste, evaporação ou troca iônica.

### 2.3 - Disposição das cinzas e dos sólidos

Qualquer que seja o tipo de consumidor, existem dois tipos de rejeitos sólidos decorrentes da combustão do carvão: as cinzas da queima e todos os demais sólidos e a borra gerados nos processos, em quantidades e em composição extremamente variadas, dependendo do consumidor e do tipo de controle utilizado. As cinzas são em geral de natureza alcalina e consistem principalmente em material inorgânico insolúvel, enquanto os compostos solúveis apresentam grande potencial de lixiviação e contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

As demais impurezas do carvão são removidas do ar pelos equipamentos de controle e simplesmente reaparecem na forma sólida ou de lama. Dependendo do consumidor, são gerados alguns rejeitos sólidos e a borra, como mencionado na subseção anterior. Todos estes elementos são misturados com as cinzas e dispostos em áreas próximas aos consumidores (em geral em tanques artificiais) ou então utilizados em aterros. As cinzas são eventualmente vendidas para indústrias cimenteiras para produção de cimento pozolânico.

Durante o manuseio das cinzas pode haver emissão de partículas fugitivas. Sua disposição, se não for feita de forma adequada, pode gerar o mesmo tipo de problema (arraste eólico), sendo esta uma das situações preocupantes nas termelétricas no Sul do País.

No caso da disposição conjunta com a borra e a lama de processo, os depósitos ou lagos devem ser revestidos com material impermeável para impedir a contaminação dos lençóis de água subterrâneos, além de serem necessárias medidas de tratamento das águas de chuva drenante destes depósitos ou lagos.

## 3 - SITUAÇÃO BRASILEIRA - ALGUMAS QUANTIFICAÇÕES

Existem duas abordagens para se descrever os problemas ambientais (que no nosso caso são primordialmente atmosféricos e têm o correspondente na legislação de meio ambiente): através da qualidade do ar de uma região e através da fonte emissora. No caso específico da situação brasileira, devemos fazer inicialmente a distinção entre Santa Catarina e os demais Estados produtores e/ou consumidores de carvão mineral. Na região sul do Estado de Santa Catarina, que é simultaneamente produtora e consumidora de carvão mineral, há uma superposição dos problemas decorrentes da produção (mineração, beneficiamento e disposição dos rejeitos do beneficiamento) e do consumo. Assim, a poluição das águas, que nas demais áreas consumidoras não é questão prioritária, encontra-se em uma fase crítica na região sul catarinense, sendo imperioso neste sentido, que se faça um estudo que incorpore as características ambientais locais (concorrência com outras fontes poluidoras) para esta região.

Afora a citada particularidade da situação da região sul catarinense, pode-se dizer que não é crítica hoje a questão ambiental decorrente da queima do carvão mineral no Brasil (o que não quer dizer que não haja problemas pontuais que implicam reclamações das populações vizinhas, principalmente de grandes consumidores e daqueles que não adotam qualquer tipo de controle). Como salientado, acreditamos que esta situação possa não perdurar, dependendo do crescimento econômico e dos níveis de substituição alcançados, o que nos leva ao menos a considerar prioritárias estimativas sobre possíveis desdobramentos do quadro atual. Isto quer dizer que seria fundamental o desenvolvimento de estudos visando analisar as emissões decorrentes da queima de carvão mineral por diferentes consumidores e as medidas de controle que, provavelmente, se farão necessárias.

Dada a não relevância maior da situação atual, julgamos mais interessante apresentar estimativas sobre as taxas de emissão para diferentes carvões e diferentes consumidores, que são fundamentais para a determinação dos custos de controle analisados na pró



xima seção. Adicionalmente, devido ao seu estado crítico, apresentamos algumas estimativas particulares para a região sul de Santa Catarina, envolvendo outros tipos de fontes poluidoras concorrentes com os consumidores de carvão mineral. Antes de apresentarmos os dados conhecidos e as estimativas de carga, julgamos interessante perceber como a carga total, que é função das projeções da evolução de consumo apresentadas na Introdução do trabalho, se distribui pelos consumidores e também pelos Estados.

Com relação à participação atual dos Estados, Santa Catarina e Rio Grande do Sul já consomem cerca de 63% do carvão mineral energético. Entretanto, pensando em termos de poluição e considerando-se a indústria cimenteira não poluente, temos que esta percentagem sobe para 89%, razão pela qual apresentamos as poucas informações disponíveis sobre a situação destes Estados, com destaque para as termelétricas aí instaladas.

Com relação à distribuição da carga pelos consumidores, temos que cerca de 35 a 50% das emissões potenciais totais serão feitas, praticamente, apenas por três termelétricas: Presidente Médici, em Candiota (RS), Jorge Lacerda, em Tubarão (SC), e Jacuí, a ser instalada na região do baixo Jacuí (RS). As termelétricas de Charqueadas, São Jerônimo e Figueira responderão, conjuntamente, em 1990, por uma parcela menor do que 5%<sup>9</sup> do consumo total das termelétricas. Mesmo que se considerem as seis, percebe-se que, a não ser os custos envolvidos, a situação é favorável em termos de tratabilidade devido à enorme concentração.

Os cerca de 30% consumidos pela indústria cimenteira<sup>10</sup> são distribuídos por todo o País, o que torna o problema de controle

---

<sup>9</sup>Projeções utilizadas na nova versão do Modelo de Oferta de Carvão Mineral (MOCAM), do Grupo de Energia do IPEA/INPES, atualmente em fase final de execução, obtidas em contato direto com a Eletrobrás.

<sup>10</sup>Esta parcela pode elevar-se caso as indústrias cimenteiras da região Nordeste passem a consumir carvão mineral (esta possibilidade também é analisada no estudo referido na nota anterior).

aparentemente mais complexo. Entretanto, como salientado na seção precedente, a substituição do óleo combustível pelo carvão mineral na indústria cimenteira não deve acarretar nenhum aumento das emissões de poluentes. A quase totalidade das fábricas são dotadas de precipitadores eletrostáticos ou filtros manga, de modo que o controle consiste essencialmente no ajuste de operação destes equipamentos. A poluição atmosférica é talvez maior como decorrência do manuseio das matérias-primas (incluindo o carvão) e do produto do que das emissões do forno. A única medição aparentemente existente na indústria cimenteira foi feita pela Cetesb na fábrica Santa Rita, que se localiza na região metropolitana de São Paulo em uma área relativamente de baixa densidade populacional. As análises indicaram que o  $SO_2$  foi todo absorvido no carvão e que não houve problemas de chaminé.

Finalmente, os cerca de 25% restantes são consumidos pelas demais indústrias, excluídas as termelétricas e as fábricas de cimento. Como já salientado, os principais dentre estes consumidores são as indústrias petroquímica, alimentícia, de papel e celulose, siderúrgica (com tendência de grande crescimento caso o protocolo de substituição de óleo combustível por carvão mineral seja implementado), cerâmica, têxtil, de transporte e de fumo. O porte de cada um destes consumidores é extremamente variado, bem como, por conseguinte, as emissões e os impactos ambientais. É razoável supor que os pequenos consumidores, apesar de emitirem menor carga, geralmente não possuem equipamentos de controle, gerando problemas para populações vizinhas, mas são extremamente localizados e fogem ao nosso escopo.

Uma vez descrita sumariamente a distribuição do consumo pelos Estados e por tipo de consumidor, passamos a apresentar os dados disponíveis sobre a situação do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina em relação à utilização do carvão mineral energético, lembrando que para Santa Catarina apresentaremos aspectos mais globais da situação do meio ambiente das regiões produtoras, que também são as principais consumidoras. Simultaneamente, apresentamos as estimativas e os dados disponíveis acerca das emissões dos diversos consumidores, que podem ser supostos como iguais aos situados em outras regiões.

As informações sobre o Rio Grande do Sul foram obtidas em contato direto com a Secretaria do Meio Ambiente do Estado (DMA/RS). Até 1981, cerca de 65 indústrias utilizavam carvão mineral para geração de vapor e gases quentes. Entretanto, a situação destas indústrias em maio de 1984 era a seguinte: 27 passaram a utilizar lenha como combustível e 21 não estavam usando carvão mineral, por diferentes motivos. Excluídas as termelétricas, o pólo petroquímico da Copesul consumiu 52% do carvão energético, a Riocell, a Aços Finos Piratini e a CRN, juntas, consumiram 24% e todas as fábricas de cimento reunidas foram responsáveis pelo consumo de 9%, enquanto os 17% restantes foram consumidos em pequenas caldeiras.

As termelétricas do Estado têm uma capacidade de consumo de 420.000 t de carvão por mês, sendo 280.000 só da termelétrica Presidente Médici - Fase B (que ainda não está em fase de operação), representando 59% do consumo total, ou 81% caso se considere a operação desta usina. A termelétrica Presidente Médici situa-se junto à mina de Candiota, no município de Bagé, já estando prevista sua ampliação - termelétrica Candiota III. As termelétricas de São Jerônimo e de Charqueadas situam-se nos municípios do mesmo nome e a de Jacuí deverá ser instalada na região do baixo Jacuí. Apresentamos na Tabela 3, a seguir, parâmetros de capacidade e de operação de todas elas e que são a base para as estimativas de carga apresentadas posteriormente. Observe-se que a termelétrica Jorge Lacerda, situada no município de Tubarão, em Santa Catarina, também está incluída na tabela para permitir comparações.

Com relação às emissões de poluentes destas plantas, temos a dizer que para Santa Catarina não foi feita nenhuma medição de chaminé até o momento, segundo informação recebida em contato direto com a FATMA. No Rio Grande do Sul, parece que existem medições para as termelétricas de charqueadas, embora não tenha sido possível obtê-las, e Presidente Médici, que apenas agora estão sendo feitas e, portanto, não se encontram ainda disponíveis (informações recebidas diretamente do DMA/RS). No citado estudo realizado para a FATMA - referência [7] - existem estimativas de carga lançada pela termelétrica Jorge Lacerda, baseada em fatores de

emissão da EPA - ref. [8]. Em função da salientada falta de dados, utilizaremos estes mesmos fatores de emissão, juntamente com os dados da Tabela 3, para estimar as cargas lançadas por cada uma das termelétricas, e cujas estimativas estão apresentadas na Tabela 4, a seguir.

Como salientado no trabalho, utilizamos os padrões de emissões americanos, que devem ser conjugados com as estimativas de emissão apresentadas acima para se chegar às eficiências dos equipamentos de controle que se farão necessários. A Tabela 5, a seguir, apresenta estas estimativas, seguida de um exemplo sobre os cálculos feitos.

Os valores apresentados na Tabela 5 evidenciam uma maior relevância do controle de material particulado. Os padrões de emissão utilizados são relativamente baixos e já quase desatualizados nos Estados Unidos. Os novos padrões americanos em relação às emissões de material particulado são seis vezes maiores que os aqui adotados. Na Tabela 3 já foi apresentada a situação atual de controle de material particulado pelas termelétricas, salientadas as eficiências dos equipamentos. Estas eficiências são nominais, podendo ser consideradas razoáveis como primeira aproximação. Comparando as eficiências necessárias e as atingidas, percebe-se que as termelétricas de Charqueadas e São Jerônimo estão numa situação precária, o que era eventualmente esperado em função de seu menor porte. Acreditamos que para as demais seja razoável pensar na conjugação do uso de ciclones com precipitadores eletrostáticos, haja vista as altíssimas eficiências que se fazem necessárias.

Com relação aos óxidos de enxofre, percebe-se da Tabela 5 que o baixo teor de enxofre do carvão de Candiota implica uma necessidade de controle bastante baixa, sendo razoável supor que a utilização de chaminés seja suficiente para dispersar o  $SO_x$  na atmosfera, mantendo seus níveis de concentração no ar dentro dos padrões da legislação. Por outro lado, os demais carvões indicam a necessidade de um controle não desprezível. A simples utilização de chaminés pode não ser suficiente para a dispersão que implique

Tabela 3

## Parâmetros de Capacidade e de Operação das Termelétricas a Carvão

	Usinas								
	Presidente Médici - Fase A	Presidente Médici - Fase B	Candiota III <sup>a</sup>	São Jerônimo	Charqueadas	Jacuí I	Jorge Lacerda		
							Unidades I e II	Unidades III e IV	Unidades V e VI
Capacidade de Geração	120 MW	320 MW	2.000 MW	20 MW	72 MW	350 MW	2 x 50 MW	2 x 66 MW	2 x 125 MW
Capacidade Prod. Vapor	250 t/h	576 t/h	6 x 1.094t/h	25 t/h	82 t/h	1.136 t/h	250 t/h	230 t/h	395 t/h
Capacidade Consumo Carvão	140 t/h	384 t/h	6 x 440t/h	23 t/h	92 t/h	266 t/h	120 t/h	150 t/h	284 t/h
Tipo de Queima	pulverizado	pulverizado	pulverizado	greiha rotativa	pulverizado	pulverizado	pulverizado	pulverizado	pulverizado
Tipo de Controle	precipitação eletrostática	precipitação eletrostática	precipitação eletrostática	ciclones <sup>b</sup>	precipitação mecânica (tipo gravid.) e tipo centrífugo	precipitação eletrostática	precipitação eletrostática	precipitação eletrostática	precipitação eletrostática
Eficiência do Controle	99,3%	99,0%	99,4%	ND <sup>c</sup>	30 e 60%	98%	98%	98%	98%
Cinzas Residuais	195 t/dia	975 t/dia	ND	210 t/dia	ND	ND	ND	ND	ND
Cinzas Volantes	780 t/dia	3890 t/dia	ND	14 t/dia	ND	170 t/h	ND	ND	ND
Altura da Chaminé	150 m	150 m	ND	1 de 29m 1 de 32m	62m	ND	100m	200m	ND

FONTES: Informações recebidas diretamente da CMA/RS e referências [3], [4], [7], [15], [18].

<sup>a</sup>Estão previstas seis unidades de 335/350 MW, o que dá um total de 2.010/2.100 MW instalado.

<sup>b</sup>Ciclones apenas para duas das quatro caldeiras.

<sup>c</sup>ND = não disponível.

Tabela 4

Estimativa das Emissões dos Poluentes pelas  
Termelétricas sem Controle

(Em t/h)

Termelétrica	Poluente		
	Material Particulado	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>
Presidente Médici - Fase A	54,3	2,72	1,14
Presidente Médici - Fase B	149,6	7,47	3,13
Candiota III	1.024,4	51,40	21,54
São Jerônimo	9,9	0,95	0,19
Charqueadas	39,8	3,80	0,75
Jacuí I	115,1	11,00	2,18
Jorge Lacerda - Unidades I e II	28,3	6,20	1,63
Jorge Lacerda - Unidades III e IV	35,4	7,75	2,04
Jorge Lacerda - Unidades V e VI	67,0	14,68	3,87

Fatores de emissão: material particulado: (7,26 x A) kg/t de carvão queimado, exceto Jorge Lacerda: (5,9 x A) kg/t de carvão queimado, onde A é o teor de cinzas do carvão multiplicado por 100;

SO<sub>x</sub>: 17,23 x S kg/t de carvão queimado, onde S é o teor de enxofre<sup>x</sup> do carvão queimado multiplicado por 100; e

NO<sub>x</sub>: 8,16 kg/t de carvão queimado, exceto Jorge Lacerda: 13,61<sup>x</sup> kg/t.

Teores de cinzas e enxofre utilizados:

Candiota (Presidente Médici - Fases A e B e Candiota III): A = 53,57; S = 1,13;

Bacia do Jacuí (São Jerônimo, Charqueadas e Jacuí I): A = 59,6; s = 2,4; e

Santa Catarina (Jorge Lacerda): A = 40,0; S = 3,0.

Tabela 5

Estimativa das Eficiências de Controle Necessárias para  
se Atingir os Padrões de Emissão da Tabela 1

(Em %)

Termelétrica	Poluente		
	Material Particulado	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>
Presidente Médici - Fase A	99,08	22,20	48,94
Presidente Médici - Fase B	99,08	22,30	49,94
Candiota III	99,08	22,40	48,94
São Jerônimo	99,17	63,41	49,66
Charqueadas	99,18	63,41	49,66
Jacuí I	99,18	63,45	49,66
Jorge Lacerda - Unidades I e II	97,94	60,10	58,26
Jorge Lacerda - Unidades III e IV	97,94	60,10	58,26
Jorge Lacerda - Unidades V e VI	97,94	60,10	58,26

Fatores de emissão apresentados na Tabela 1:

1,08 g/10<sup>6</sup> cal de input - material particulado

4,58 g/10<sup>6</sup> cal de input - SO<sub>x</sub>

1,26 g/10<sup>6</sup> cal de input - NO<sub>x</sub>

Exemplo: controle de material particulado para a Usina Jorge Lacerda - Unidades I e II.

Hipóteses: operação plena = consumo de 120 t de carvão/hora e poder calorífero de 4.500 kcal/kg.

Tem: 540.000 x 10<sup>6</sup> cal/h. Logo, a plena carga pode-se emitir, em

1 hora,  $540.000 \times 10^6 \frac{\text{cal}}{\text{hora}} \times \frac{1,08}{10^6 \text{cal}} = 0,5832 \text{ t/hora}$ . Como a emissão estimada é de 28,3 t/hora (Tabela 3), tem-se que é necessária

uma redução de  $1 - \frac{0,583}{28,3} = 97,94\%$  das emissões.

uma baixa concentração de  $SO_x$  no ar. A situação atual de controle de  $SO_x$  no Brasil encontra-se num estado extremamente primitivo e só se tem conhecimento da operação de um único FGD, na planta de ácido sulfúrico da ICC, que será descrita adiante.<sup>11</sup> Além disso, não se conhece a situação da qualidade do ar nas áreas vizinhas às termelétricas, seja por modelos de dispersão ou por medições diretas. A exceção a esta regra é a termelétrica Jorge Lacerda - Unidades I e II. De acordo com o estudo elaborado para a FATMA [7], foram feitas medições nas cercanias da termelétrica que evidenciaram que os níveis de  $SO_2$  no ar estão acima dos padrões da legislação (quase o dobro, variando de 92 a 150  $Mg/m^3$ ), o que prova parcialmente que a utilização de chaminés não tem sido suficiente para controlar a poluição pelos óxidos de enxofre para esta planta. Para as novas etapas desta termelétrica (supõe-se que também para as demais a serem instaladas), serão feitos estudos apriorísticos de dispersão que possam indicar o tipo e o grau de controle necessário.

Encerrada a descrição sumária da situação do Rio Grande do Sul e as análises sobre as termelétricas, passamos a descrever a situação da região sul catarinense, apresentando as estimativas de carga. Como salientado anteriormente, a grande maioria dos consumidores de carvão está localizada próximo às regiões produtoras, não raro dentro das áreas de mineração e de disposição de rejeitos. Não nos deteremos em analisar as emissões decorrentes do processo produtivo, que já foi objeto de outro trabalho - ref. [20]. Entretanto, para a comparação, apresentaremos posteriormente estimativas de carga nas etapas de mineração, pré-beneficiamento e disposição dos rejeitos do pré-beneficiamento do carvão mineral.

Além da termelétrica Jorge Lacerda, cuja situação já foi descrita, os principais consumidores de carvão mineral do Estado são as coquerias, as cerâmicas e a ICC. Além destes, têm-se a planta de ácido fosfórico da ICC, as estufas de fumo, curtumes, matadou-

---

<sup>11</sup> Algumas indústrias na região metropolitana de São Paulo que consomem óleo BPF estão se preparando para instalar equipamentos FGO, mas não se tem informação de operação de nenhuma delas.



ros e fecularias, que não são ligados ao consumo de carvão mineral, mas concorrem em termos de poluição com seus consumidores. Adicionalmente, deve-se lembrar das plantas de gaseificação, eventual processo de transformação a ser utilizado e que não é isento de problemas ambientais.

De todos estes agentes poluidores, além das termelétricas, os principais são as coquerias, a fábrica de ácido sulfúrico da ICC, as áreas de rejeitos de mineração e de pré-beneficiamento e as áreas de mineração a céu aberto, relativamente à poluição atmosférica. Além destas, a indústria cerâmica, caso substitua os compatíveis tradicionais - lenha e óleo combustível - por carvão mineral, pode tornar-se poluidora com emissões consideráveis. As áreas de disposição dos rejeitos, a mineração de subsolo e principalmente os pré-lavadores são os maiores responsáveis pela poluição hídrica.<sup>12</sup>

Passamos a apresentar alguns dados e estimativas de carga destas diversas atividades.

Iniciamos pelas coquerias instaladas em áreas adjacentes às de mineração, nos municípios de Criciúma, Urussanga, Lauro Müller e Içara, cuja situação pode ser avaliada através dos dados apresentados em dois trabalhos: o elaborado para a FATMA [7] e o contratado pela Associação Nacional dos Produtores de Coque [7]. Como o processo destas coquerias não pressupõe a recuperação de subprodutos, as emissões gasosas são extremamente elevadas, como já enfatizado na seção anterior. O trabalho elaborado para a FATMA (referência [7]), além de apresentar estimativa de carga baseada em fatores de emissão da EPA [8], fez uma medição de chaminé em

---

<sup>12</sup>Poder-se-ia mencionar o pré-concentrador de pirita, que utiliza como matéria-prima os rejeitos dos pré-lavadores, remetendo para a ICC o concentrado piritoso. A poluição hídrica observada no processo, embora seja grande, não é propriamente criada, podendo ser suposta como uma atividade "neutra" na geração de poluição ou até mesmo como antipoluidora, pois o material mais poluente é o que se aproveita comercialmente, retornando aos banhados rejeitos com menor carga poluidora.

uma das coqueiras da região. A referência [19] só trata das emissões de  $SO_x$  baseada em balanço de massa, apresentando inclusive modelos de dispersão que indicam as concentrações de poluentes no ar esperadas caso sejam instaladas chaminés em todas as coqueiras (de diferentes diâmetros e alturas, evidentemente, feitas individualmente para cada coqueira). Devemos reconhecer, entretanto, que há uma grande discrepância entre todos os valores apresentados. Sem a intenção de nos determos por demais na questão, adotamos os valores da referência [19] acerca das emissões de  $SO_x$  - 9,65 kg de  $SO_2$ /t de carvão (moinha) de alimentação - e os padrões de emissão da EPA para material particulado - 90,7 kg/t de moinha. Estes parâmetros, multiplicados pela produção máxima total da região, implicariam uma emissão de 187,5 t de  $SO_2$ /mês e de 1.036 t de material particulado/mês.

Todas as informações acerca da operação da planta de ácido sulfúrico da ICC foram tiradas da referência [7], cabendo ressaltar que a fábrica não utiliza propriamente o carvão, mas sim o concentrado piritoso (44% de enxofre), obtido dos rejeitos de pré-beneficiamento (que contém até cerca de 20% de enxofre). As emissões estimadas de  $SO_2$ , que provêm de fatores de emissão e não de medições, foram de 6.395 t/ano para uma operação plena (24 horas por dia e 365 dias por ano), produzindo cerca de 9.720.000 t/ano de ácido sulfúrico. Informações recebidas informalmente junto à Petrobrás indicam que foi comprado um sistema FDG (o único de que se tem notícia de estar em operação no Brasil), havendo ainda dados informais a indicarem que uma emissão de 214 kg de  $SO_2$ /h seria reduzida a 30 kg de  $SO_x$ /hora com o FGD, que usa soda cáustica como reagente. Se estes são os valores de fato observados, a carga potencial anual é de 1.874 t de  $SO_2$ /ano, enquanto a efetivamente lançada (com controle) situa-se em 262 t de  $SO_2$ /ano.

Resta apresentar estimativas das emissões das atividades relacionadas com a produção, assim como das cerâmicas, que tendem a se tornar poluidoras com a utilização do carvão mineral (lembramos que as emissões esperadas pelas plantas de gaseificação a serem eventualmente instaladas estão apresentadas na Tabela 2). As emissões atmosféricas durante a etapa de produção são essencial-

mente de material particulado, concentrando-se principalmente na remoção da cobertura da mineração a céu aberto, no transporte de carvão e de rejeitos em vias não pavimentadas e na disposição dos rejeitos. A referência [7] estima em 0,12 kg/t de ROM as emissões de desmonte de cobertura e em 0,15 kg/km percorrido pelos caminhões. As emissões decorrentes dos depósitos de rejeitos são essencialmente de  $\text{SO}_2$  e o fator de emissão adotado foi de  $7,4 \times 10^{-5}$  kg/t x h. Estas estimativas foram feitas com base em um único trabalho realizado nos Estados Unidos, mas nos pareceu temeroso adotar aqui os mesmos parâmetros lá apresentados. Quanto à estimativa total de carga apresentada no trabalho elaborado para a FATMA [7], não nos foi possível recuperar os valores finais, considerando os próprios fatores de emissão da referência, além de serem apresentadas as emissões por município e por indústria cujos valores finais não nos pareceram compatíveis com os apresentados na conclusão. Apenas para ilustrar este ponto, tem-se que a distribuição percentual de carga de material particulado foi de 42,6% para os pré-lavadores, 8,5% para a mineração a céu aberto, 34% para as termelétricas, 13% para o lavador de Capivari, 1,9% para as coquerias e apenas 0,1% para as áreas de rejeito, o que parece ser uma superestimativa do primeiro e uma subestimativa dos últimos.

Finalmente, embora a quase totalidade das cerâmicas esteja localizada nos municípios das regiões produtoras de carvão mineral, elas ainda não substituíram a lenha e o óleo combustível tradicionalmente empregados pelo carvão. Como esta é uma situação esperada, fizemos o exercício de estimar as emissões decorrentes apenas dos fornos sem controle caso todas as empresas utilizassem carvão mineral como energético. Cabe salientar que há emissões ainda maiores nas etapas de moagem e manuseio das matérias-primas que nos fornos, mas não as consideramos aqui. As estimativas baseiam-se nos fatores de emissão da referência [8], e utilizamos os dados de produção conforme apresentados na referência [7]. Para uma produção de 33.150 t de cerâmica por mês, teríamos uma emissão de material particulado mensal de 1.060 t e de 597 t de  $\text{SO}_2$ /mês. Observe-se que estas emissões seriam ainda maiores que as observadas hoje nas coquerias.

Para encerrar esta seção, apresentamos ilustrativamente os fatores de emissão adotados pela EPA [8] para pequenas caldeiras. Observe-se que consideramos também os fatores para a linhita (americana), cujas características são em alguns aspectos mais semelhantes às dos carvões nacionais.

Tabela 6

Fatores de Emissão de Pequenas Caldeiras sem Controle

(Em kg de poluente/t de carvão de alimentação)

	Carvão Betuminoso		Linhita
	2,5 a 25 x 10 <sup>6</sup> kcal/h	<2,5 x 10 <sup>6</sup> kcal/h	
Material particulado	5,9 x A	1 x A	1,36A a 2,72 x A
SO <sub>x</sub>	17,23 x S	17,23 x S	13,6 x S
NO <sub>x</sub>	6,8	3,0	2,7 a 7,7

FONTE: ref. [8].

NOTA: A e S são os teores de cinza e enxofre, respectivamente, multiplicados por 100.

## 4 - CUSTOS DE CONTROLE AMBIENTAL

Dois aspectos relacionados aos custos de controle extremamente importantes para nosso trabalho são aqui ressaltados. O primeiro é o fato de só considerarmos os custos de controle ambiental de pós-combustão, e não os de pré-combustão (beneficiamento) ou de combustão (leito fluidizado). A não consideração dos custos das tecnologias de controle de combustão deve-se essencialmente à pequena experiência que se tem mundialmente e também à disponibilidade de dados, ainda mais aplicados aos carvões nacionais. Os custos de controle em que se incorreria através de um beneficiamento mais apurado do carvão dependem dos impactos esperados que o consumo destes carvões travados causaria. Como determinar as características dos carvões que tiveram uma redução do teor de cin

za de 50 para 5%, nos exemplos, e como se avaliar as emissões que estes carvões tratados implicariam, tanto em termos de material particulado como de óxidos de enxofre e nitrogênio? A própria experiência americana evidencia que, mesmo com um teor de cinzas de 6%, são necessários controles de material particulado, embora evidentemente, com eficiências bem mais baixas. Além disso, coloca-se a questão da viabilidade técnica em se beneficiar os carvões brasileiros a ponto de apresentarem características tão "nobres" que os controles de pós-combustão possam ter uma eficiência e um custo tão mais baixos. De qualquer forma, julgamos este um ponto que deveria ser estudado numa segunda etapa deste trabalho.

A outra questão refere-se à consideração da importação dos carvões estrangeiros, com características bem superiores às dos nacionais, e a uma análise econômica e ambiental dos possíveis benefícios desta medida.

Ambas as estratégias - beneficiamento mais apurado e/ou importação de carvões nobres - poderiam, em princípio, ser analisadas pelo Modelo MOCAM do Grupo de Energia do IPEA/INPES, já referido anteriormente. Entretanto, os custos de controle ambiental são extremamente dependentes das condições locais, do tipo de queima, enfim, das características de cada consumidor, e o Modelo trabalha com regiões consumidoras extremamente agregadas: por exemplo, a região São Paulo do modelo engendra todo o Estado de São Paulo mais a região sul matogrossense e o triângulo mineiro. Como fazer exigências sobre o tipo de carvão a ser queimado numa determinada região (metropolitana, por exemplo)? Entretanto, acreditamos que este é um exercício interessante a ser tentado com o Modelo MOCAM: fazer restrições ao tipo de carvão a ser queimado em determinadas regiões, ainda que agregadas, considerar tanto as estratégias de um beneficiamento ainda mais apurado que o feito atualmente como também a importação de carvões estrangeiros mais nobres. Eventualmente, alguma ou algumas destas opções seriam mais interessantes dos pontos de vista ambiental e econômico do que o controle de pós-combustão, o qual tentamos estimar a seguir.

As principais variáveis que influenciam estes custos são os tipos de consumidor e de carvão queimado, o método e a tecnologia utilizados (sistema de queima), a escala de produção (capacidade das caldeiras), a localização da planta (concorrência com outras fontes, áreas densamente povoadas), o controle utilizado e as condições ambientais da localidade da planta. Caso se pudesse construir uma função que relacionasse os níveis de poluição (de emissão ou ambiental) por estes diversos elementos, poder-se-ia talvez chegar também a uma função de relação das mesmas variáveis com os custos de controle ambiental (esta é a abordagem da questão que tentamos utilizar). Entretanto, como se tentará evidenciar adiante, a limitada disponibilidade de dados fez com que esta função fosse parametrizada em algumas das variáveis mencionadas, sobre as quais são feitas as hipóteses apresentadas posteriormente.

A menos que tenha sido feito um pedido diretamente a um fabricante de equipamento, todos os dados aqui apresentados são tirados de referências estrangeiras. Por outro lado, entretanto, não acreditamos que haja uma diferença acentuada de custos, uma vez que as tecnologias empregadas são basicamente as mesmas no Brasil e no exterior.

Adiciona-se à falta de dados a modesta experiência nacional de controle de poluição atmosférica, além de, como salientado, praticamente se desconhecem tecnologias de controle dos óxidos de enxofre ( $SO_x$ ) e de nitrogênio ( $NO_x$ ).

Em virtude da já apontada pequena experiência nacional e do fato de que a situação não é prioritária - tanto pelo quadro econômico do País como pela maior importância dos problemas ambientais ocorrentes na produção -, bem como em virtude da falta de dados disponíveis, achamos razoável adotar alguns critérios para a análise econômica que se segue.

O ponto básico é que julgamos pertinente não nos atermos rigorosamente aos padrões previstos na legislação para estimar os necessários custos de controle. Dada a completa falta de experiência de controle dos óxidos de enxofre e nitrogênio, não julga-

mos cabível, mesmo numa análise preliminar, fazer exigências demasiado rigorosas, uma vez que se requer muito tempo, até mesmo de conscientização, para se realizar este tipo de controle, como, por exemplo, o dos  $\text{NO}_x$ , que se baseia em grande parte em um conjunto de medidas operacionais. Não há qualquer informação sobre estes custos, sendo quase inexistente a nível mundial a tecnologia de controle de  $\text{NO}_x$  de pós-combustão. Quanto aos óxidos de enxofre, há dois aspectos a considerar. O primeiro refere-se ao fato de que existe o beneficiamento mais apurado do carvão, que é uma técnica de controle ambiental, pois reduz o teor de enxofre do carvão. No Brasil, boa parte do carvão é beneficiado "fisicamente", o que permite uma remoção parcial da pirita e, portanto, do enxofre sob a forma inorgânica. Entretanto, apenas o beneficiamento químico é capaz de retirar o enxofre sob a forma orgânica. Para se atingir padrões de emissão de óxidos de enxofre "aceitáveis", sem a necessidade de equipamentos de controle de pós-combustão, seria preciso também um beneficiamento mais apurado. Entretanto, como os custos deste beneficiamento são apenas indicativos, pois não há experiência mundial com esta tecnologia, só consideramos a técnica de controle de pós-combustão, através dos FGD. O segundo aspecto refere-se exatamente aos custos destes sistemas, que são extremamente elevados. Como salientado no trabalho, o máximo que se tem utilizado até hoje no Brasil são chaminés para dispersar mais os gases na atmosfera, o que, no entanto, não é propriamente uma medida de controle, mas apenas de minimização de impacto. Pela conjugação da falta de experiência nacional, da situação econômica adversa e dos custos extremamente elevados, apresentaremos apenas de forma sumária os custos de controle dos  $\text{SO}_x$ . Através da experiência internacional pode-se prever que apenas para as termelétricas e para as grandes caldeiras seria viável a instalação destes equipamentos, razão pela qual as estimativas feitas, assim como os dados disponíveis na literatura internacional, só se referem a estas grandes plantas.

Ainda quanto aos óxidos de enxofre e de nitrogênio, ressaltamos o seguinte aspecto: deve-se comparar as emissões destes poluentes - e também de material particulado -, quando da queima do carvão mineral, com a do energético tradicional, ou seja, o óleo combustível. Fora as emissões de material particulado, que são

cerca de duas a três ordens de grandeza maiores na queima do carvão mineral, as de  $SO_x$  e  $NO_x$  têm a mesma magnitude, medidas em kg de poluente por kcal gerada. Comparando-se o carvão de Candiota com o óleo BPF com um teor de 5,5% de enxofre, percebe-se que as emissões de  $SO_x$  decorrentes da queima do óleo são 50% maiores (10,19 contra  $6,79 \times 10^{-6}$  kg/kcal), mas 11% menores se comparadas à queima de carvão catarinense (com base nos fatores de emissão da referência [8]). Assim, na implementação de um programa de incentivo ao consumo de carvão mineral, não é razoável fazer de imediato exigências de controle de  $SO_x$  maiores do que aquelas que já vinham sendo mantidas com relação ao óleo combustível. Como visto, entretanto, o mesmo não pode ser suposto no que se refere ao controle de material particulado.

As emissões de material particulado são cerca de 200 vezes maiores no caso do carvão mineral em relação ao óleo combustível, e esta é uma situação particular dos carvões brasileiros, cujo teor de cinza - de 30 a 55% - é quase incomparável com o dos carvões americanos ou europeus, que variam tipicamente de 8 a 15%. O aspecto que julgamos mais delicado sobre as estimativas que se seguem é a extrapolação dos valores apresentados na literatura estrangeira (que se baseia nos resultados verificados com os carvões de diferentes países) para aqueles observados com os carvões nacionais. Os números aqui apresentados são no máximo indicativos dos custos em que se incorre, embora este seja efetivamente nosso objetivo.

Antes de apresentarmos os dados propriamente ditos, cabe uma discussão sumária sobre quais os custos que são relevantes para o nosso contexto. Como salientado, não vamos nos ater rigorosamente a um controle da legislação (mesmo porque ela ainda não existe, o que nos obrigaria a tomar como base a americana), acreditando que no estágio atual a instalação dos equipamentos de controle, ainda que com eficiência aquém do que seria exigido pela legislação, já apresenta uma situação satisfatória e que numa segunda etapa poder-se-ia chegar a um controle mais rigoroso. Dentro deste quadro, existem dois parâmetros econômicos que julgamos interessantes: o primeiro é o estudo da economicidade de geração de



uma unidade energética fornecida pelo óleo combustível em relação à fornecida pelo carvão mineral numa planta genérica, ambas sujeitas ao controle de emissões; o segundo seria uma idéia do investimento global esperado em controle ambiental que um programa de substituição para o carvão mineral poderia implicar. Supomos que a diferença entre os custos de controle da queima de carvão mineral em relação à do óleo combustível está estritamente no controle de material particulado (analisado a seguir), tendo em vista que as emissões de enxofre de ambos os combustíveis são bastante semelhantes, medidas por unidade energética gerada.

### Material Particulado

Apresentamos os custos indicativos de controle sem nos atermos às emissões rigorosamente dentro dos padrões da legislação. Como mencionado na Introdução, o melhor trabalho conhecido sobre estes custos é, fora de dúvida, o da EPA [10], embora diversas outras referências apresentem dados a este respeito, como, por exemplo, [5], [6], [9], [16], [17], [21], [23] e [24]. No entanto, pela maior confiabilidade e, principalmente, pelo maior detalhamento, uniformização da metodologia e adoção de hipóteses bastante razoáveis, só nos basearemos nos valores apresentados na referência [10].

Os fatores que influenciam os custos de controle são, principalmente: a) tipo de caldeira; b) características do carvão; c) nível de controle desejado; d) tipo de equipamento de controle; e e) tamanho da caldeira (escala).

O tipo de caldeira influencia bastante os custos de controle principalmente quanto ao fato de a queima ser de carvão pulverizado ou não. Entretanto, como a queima do pulverizado só é utilizada pelas plantas maiores, consideramos o limite mínimo da caldeira de  $200 \times 10^6$  BTU/h para o uso de carvão pulverizado, ou seja, supomos uma relação entre o primeiro e o quinto fatores acima apontados: o tipo e o tamanho da caldeira.

As características do carvão que influenciam os custos de controle analisados são o teor de cinza e de enxofre, salientando-se

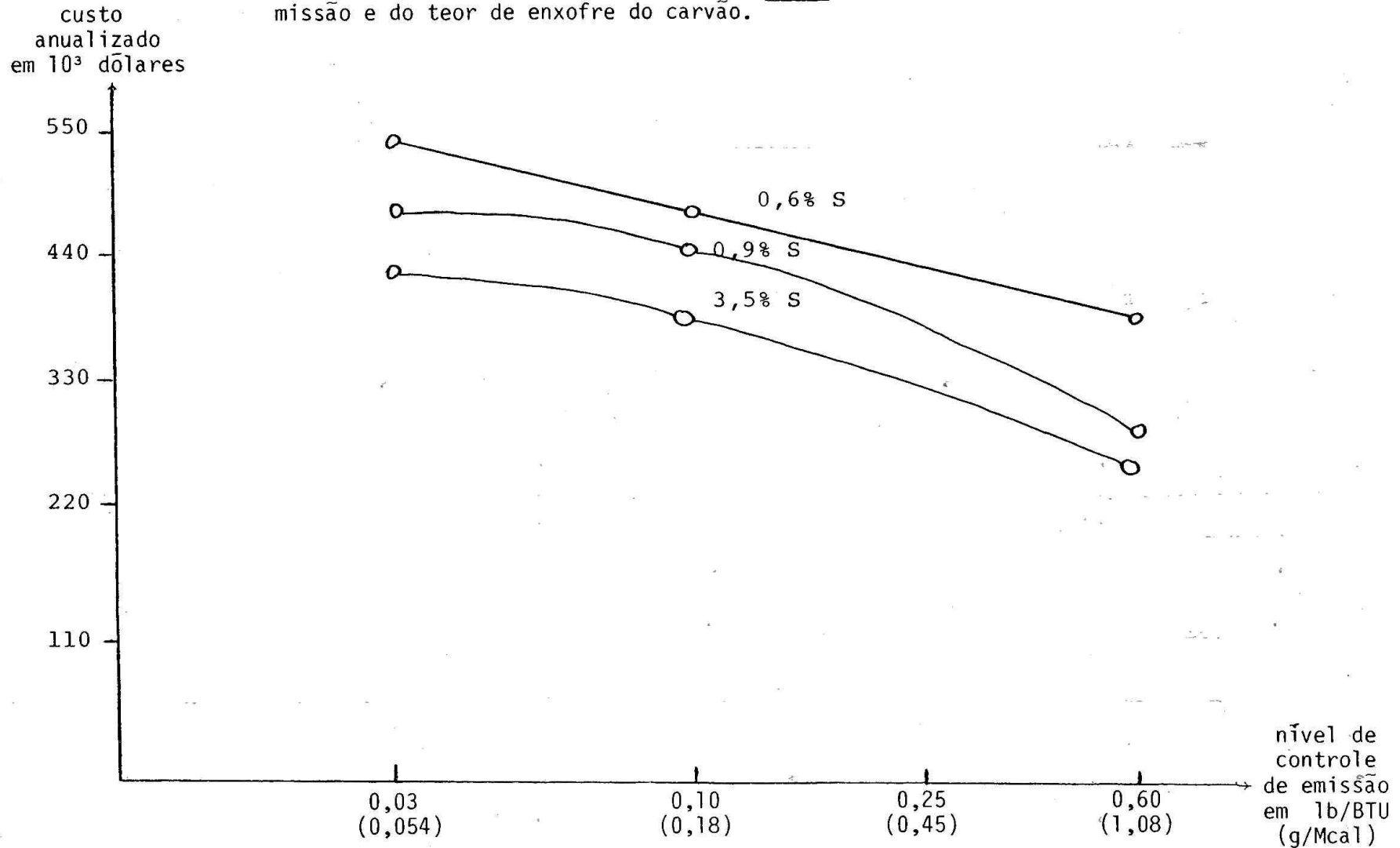
que este influi nos custos de controle de material particulado, como se verá adiante. Há uma grande dificuldade em se inferir, a partir da bibliografia estrangeira, como os custos variam, principalmente em função do teor de cinza, e esta característica pode ser conjugada com o nível de controle desejado para se alcançar a eficiência desejada. Julgamos o seguinte procedimento mais adequado para ajustar os dados internacionais ao caso brasileiro: adotar os custos de controle aplicados no caso americano baseados no nível de controle mais exigente da legislação americana (NSPS), o que implica a necessidade de instalação de equipamentos com eficiências extremamente semelhantes às já apresentadas neste trabalho para os carvões nacionais.

Finalmente, o tipo de equipamento que mais destacamos foram os precipitadores eletrostáticos, por serem já razoavelmente difundidos no Brasil como técnica de controle e também por apresentarem alta eficiência, uma das exigências importantes no controle de particulados para os nossos carvões.

Nas Figuras 1 a 4, a seguir, são mostrados os custos anualizados (incluindo os de investimento e o operacional) de precipitadores eletrostáticos instalados em caldeiras de diferentes tipos e capacidades como função do nível de controle de emissão e do teor de enxofre do carvão. Os valores apresentados foram os da referência [10] multiplicados por 1,68, deflator de junho de 1978 para junho de 1984 do IPA americano.

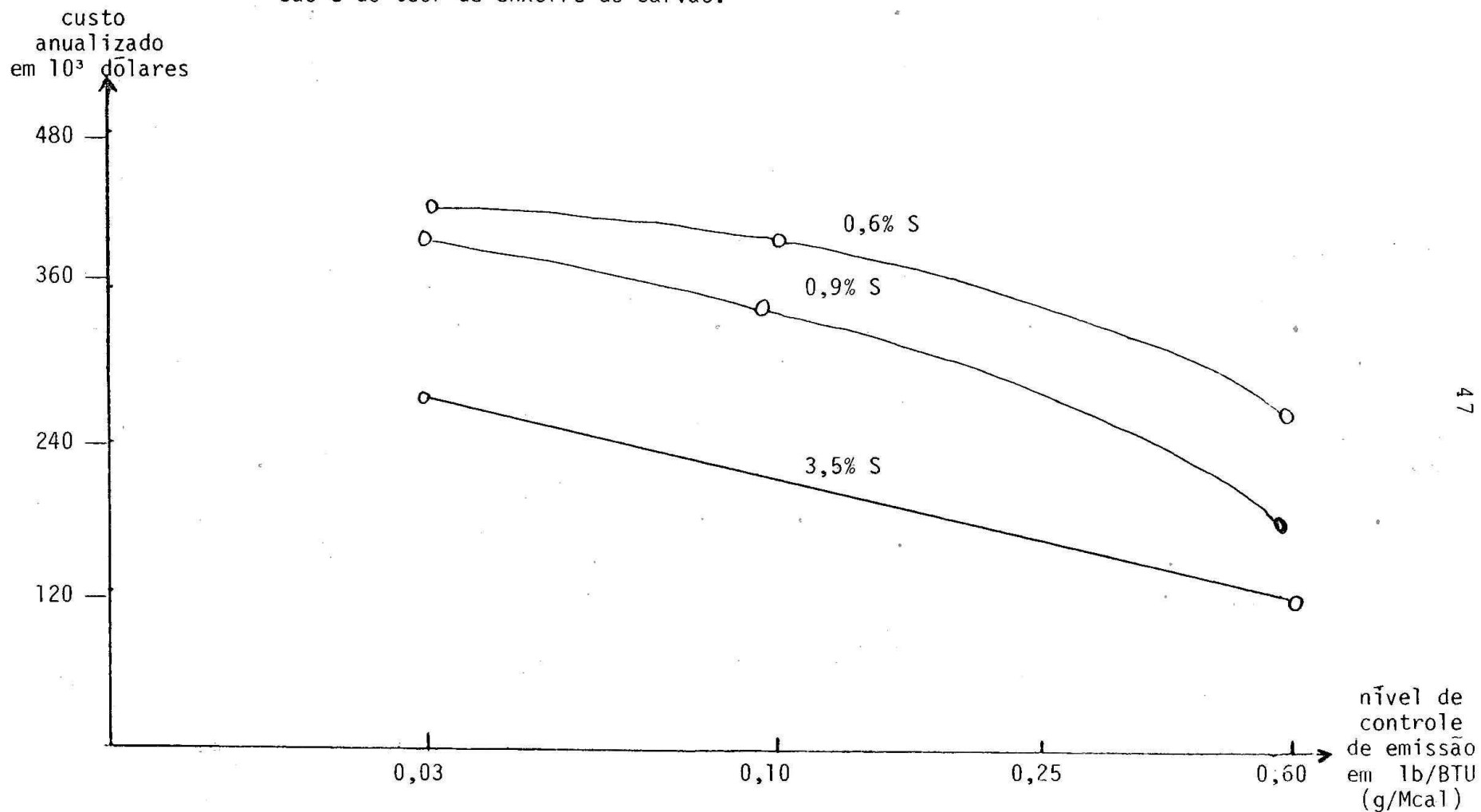
Nas quatro figuras percebe-se que, independentemente do tamanho da caldeira, persiste uma relação aproximadamente linear entre o custo e o nível desejado de controle. Como esperado, o maior teor de enxofre implica um menor custo de controle, e esta é uma situação particular aos precipitadores eletrostáticos, uma vez que não deve praticamente influir na eficiência ou facilidade de coleta, caso se utilize outros equipamentos de controle. Pelo critério aqui adotado, no Brasil teríamos um custo aproximado de até 450 mil dólares anuais para controlar a queima do carvão de Candiota (1% de enxofre), queimando uma caldeira de 58,6 MW de capacidade.

GRÁFICO 1 - Custo anualizado de um precipitador instalado numa caldeira de carvão pulverizado de 58,6 MW ou  $200 \times 10^6$  BTU/h de calor de input, como função do nível de controle de emissão e do teor de enxofre do carvão.



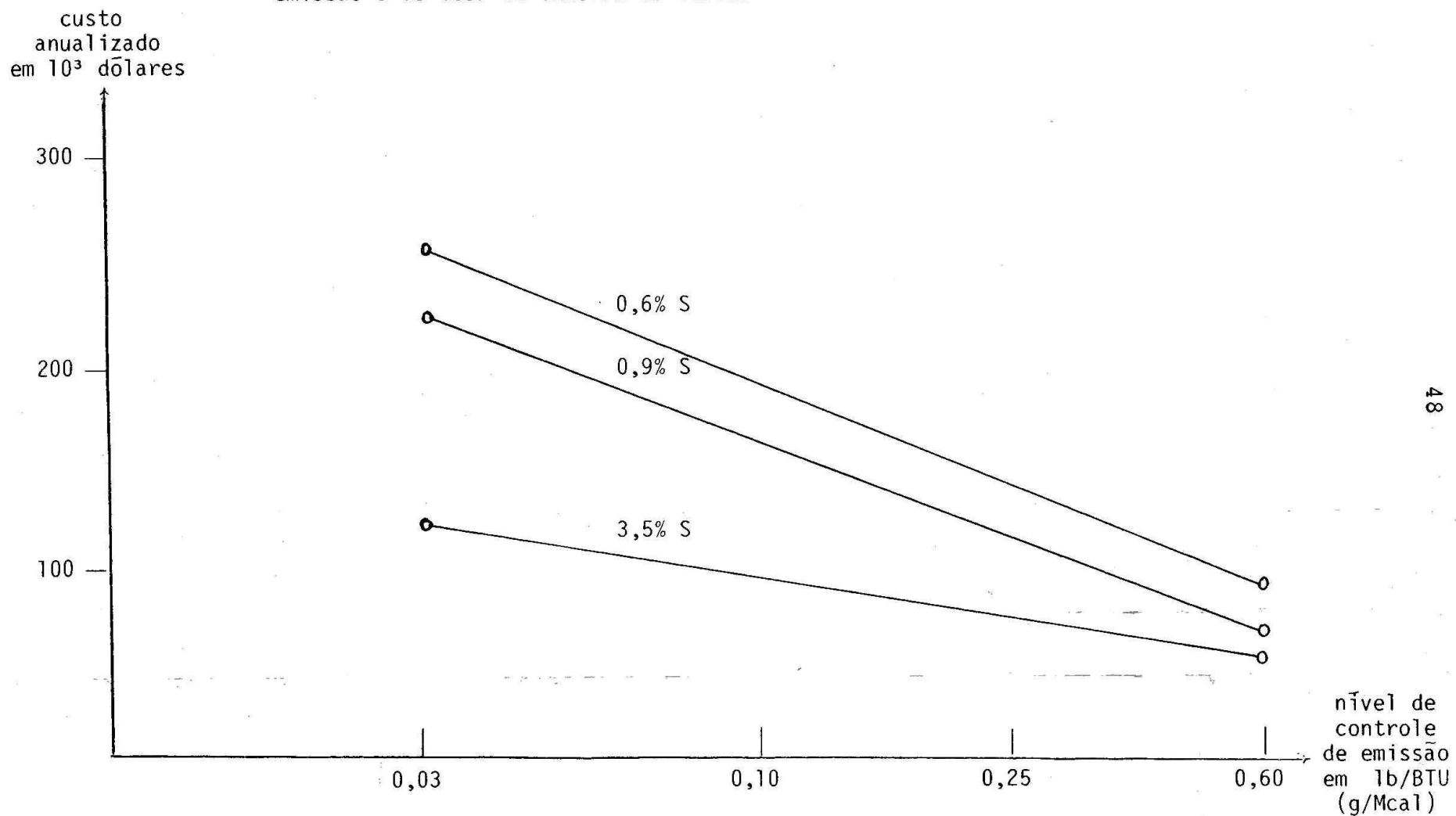
FONTE: Referência [10].

GRÁFICO 2 - Custo anualizado de um precipitador instalado numa caldeira de grelha móvel de 44 MW ou  $150 \times 10^6$  BTU/h de calor de input, como função do nível de controle de emissão e do teor de enxofre do carvão.



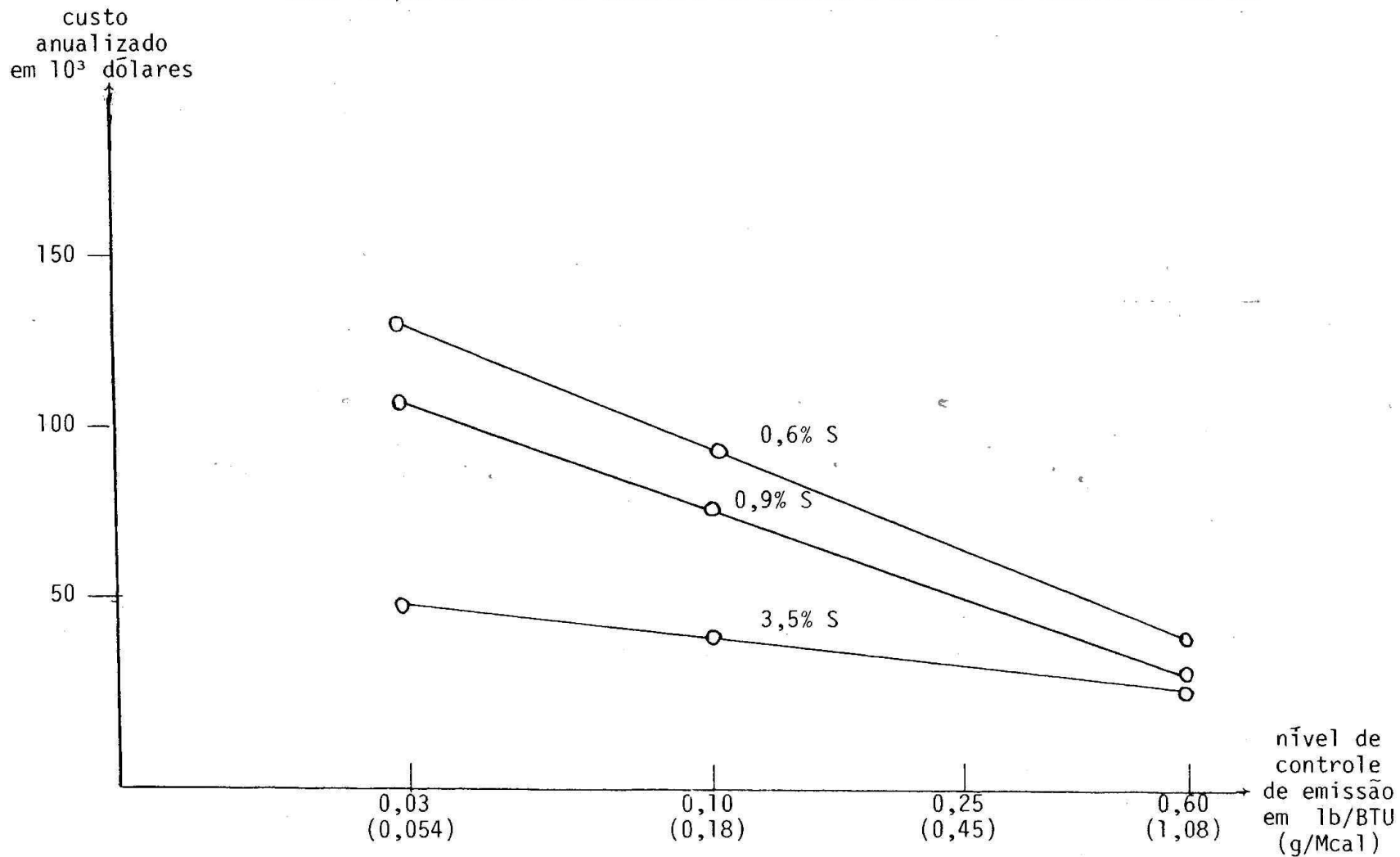
FONTE: Referência [10].

GRÁFICO 3 - Custo anualizado de um precipitador instalado numa caldeira de grelha de corrente de 22 MW ou  $75 \times 10^6$  BTU/h de calor de input, como função do nível de controle de emissão e do teor de enxofre do carvão



FONTE: Referência [10].

GRÁFICO 4 - Custo anualizado de um precipitador eletrostático instalado numa caldeira com alimentação inferior de 8,8 MW ou  $30 \times 10^6$  BTU/h de calor de input, como função do nível de controle de emissão e do teor de enxofre do carvão



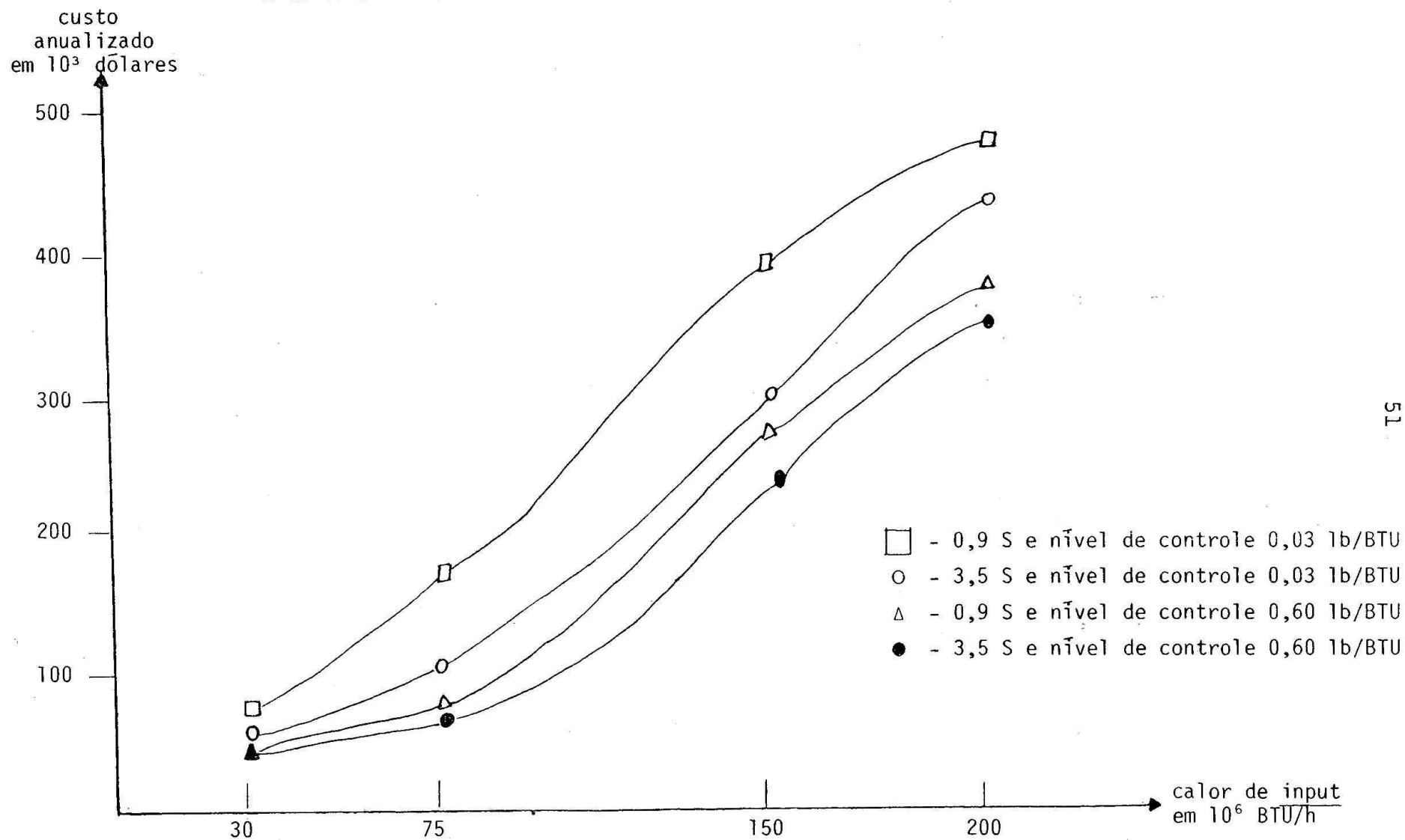
FONTE: Referência [10].

Observe-se que seria interessante ver como estes custos variam em função da escala da planta. Salientamos, entretanto, que para apresentar estas curvas a partir daquelas mostradas nos Gráficos 1 a 4 devemos ressaltar um aspecto importante, ou seja, o fato de que cada uma delas supõe um tipo diferente de caldeira. Apresentamos no Gráfico 5, a seguir, os custos anualizados de controle como função da escala da planta.

Finalmente, seria esperado um efeito de economia de escala se calculássemos os custos de controle divididos por MW gerado ou por quantidade de calor de input, o que pode ser feito simplesmente dividindo os custos do Gráfico 5 pela respectiva capacidade. A curva assim obtida está apresentada no Gráfico 6, a seguir, onde se percebe não haver uma economia de escala, exceto para o carvão com 0,9% de enxofre no nível de controle máximo ( $0,03 \text{ lb}/10^6 \text{ BTU}$  de input). Isto é explicável porque há uma conjugação de dois fatores. O primeiro é a destacada diferença entre o tipo de caldeira. A referência [10] adota também os fatores de emissão da referência [8], e estes são diretamente proporcionais à escala, que por sua vez "determina" o tipo de caldeira, ou seja, os fatores de emissão divididos pela capacidade da planta são crescentes com a capacidade, e não decrescentes, atuando no sentido inverso da economia de escala. O segundo é a esperada economia de escala dos custos de controle com a capacidade da planta. Cabe ressaltar que, separando as duas menores caldeiras, há um decréscimo do custo com a capacidade da planta, já que as emissões decorrentes das caldeiras menores não diferem muito entre si, o mesmo ocorrendo entre as duas maiores.

Neste ponto julgamos oportuno apresentar o parâmetro econômico de maior interesse (que se refere à soma dos custos da quilocaloria consumida pela queima "típica" de um carvão nacional com os custos de controle necessários) e compará-lo com o custo da quilocaloria fornecida pelo óleo combustível. Como salientado, a diferença entre os custos de controle da queima do carvão mineral e do óleo combustível refere-se apenas ao controle de material particulado, já que as emissões de enxofre são essencialmente da mesma dimensão no caso brasileiro.

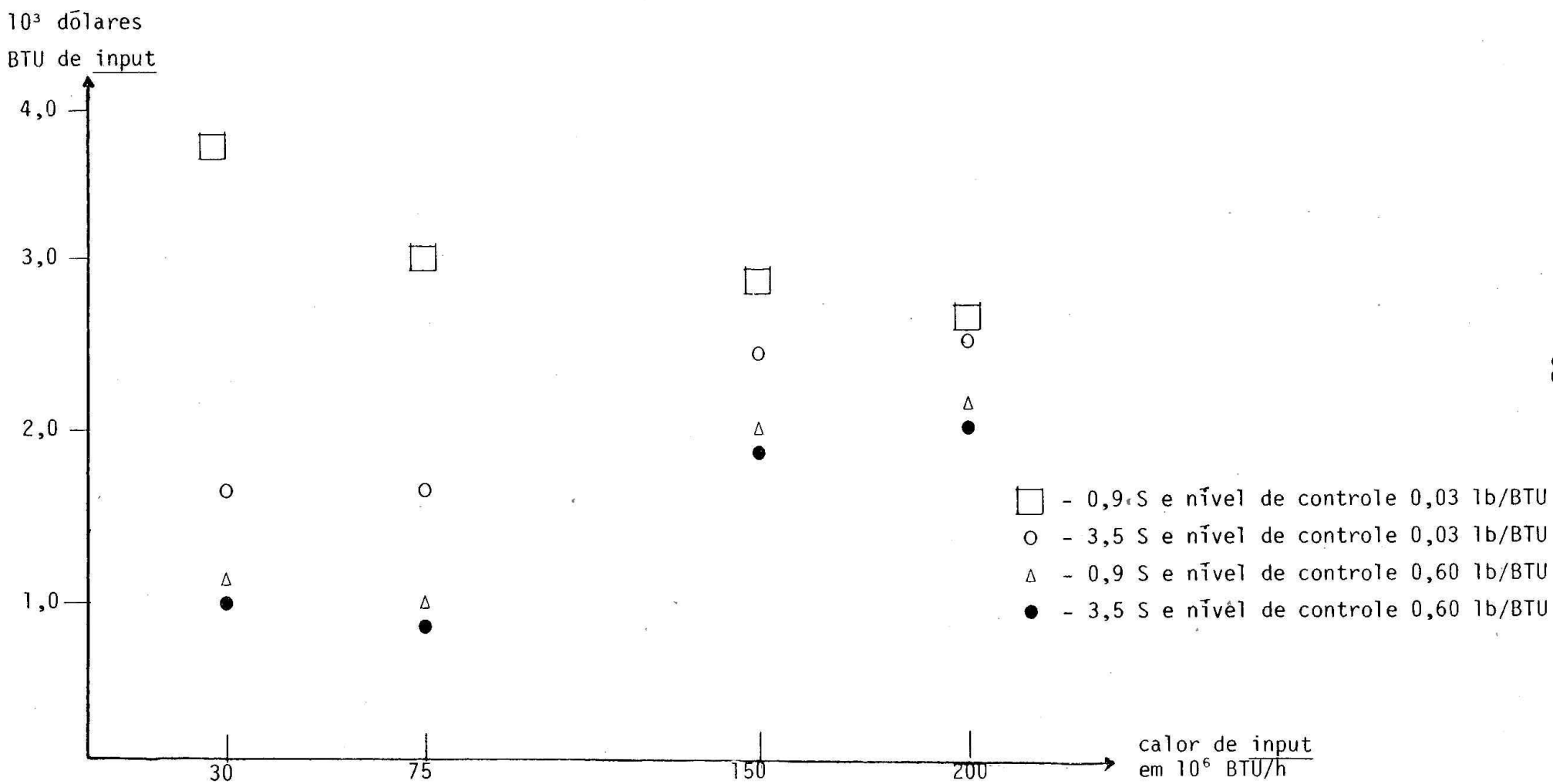
GRÁFICO 5 - Custo anualizado de controle de um precipitador eletrostático instalado em diferentes caldeiras como função da escala da planta, do teor de enxofre e do fator de emissão



NOTA: Elaborada a partir dos Gráficos 1 a 4.



GRÁFICO 6 - Custo anualizado de controle por MW ou BTU de calor de input de um precipitador instalado em diferentes caldeiras como função da escala da planta, do teor de enxofre e do fator de emissão



NOTA: Elaborada a partir do Gráfico 5.

A partir dos Gráficos 1 a 4, observamos que o custo de controle anualizado mais alto é de US\$ 550.000 anuais para uma planta de  $200 \times 10^6$  BTU/h queimando um carvão com teor de enxofre de 0,6%, emitindo até 0,03 lb/BTU de material particulado, sendo a queima pulverizada. Os custos de controle que julgamos melhor adaptados aos carvões nacionais correspondem a este nível de emissão. Para medir o custo de controle por quilocaloria gerada, consideramos o custo anual e dividimos pela quantidade de energia gerada num ano, supondo, desfavoravelmente, um fator de operação de 0,5, ou seja, a caldeira operando 24 horas por dia e 180 dias por ano, chegando, assim, a um custo "máximo" de controle de US\$ 2,50/  $10^6$  kcal.<sup>13</sup> Utilizando os resultados obtidos pelo modelo MOCAM - do Grupo de Energia do IPEA/INPES -, temos que o preço-sombra da gigacaloria ( $10^6$  kcal) consumida varia tipicamente de 2 a 7 dólares na região Sul (Rio Grande do Sul e Santa Catarina) para todos os tipos de utilização e em todos os períodos (ou seja, até o ano 2000), enquanto nas demais regiões (ou seja, o Estado do Paraná, o Sudeste e o Nordeste) ele varia tipicamente de 7 a 12 dólares por gigacaloria. Quanto ao óleo combustível, considerando o preço de US\$ 200/t, temos um custo de gigacaloria de cerca de 20 dólares. A este nível de preço, percebe-se que em nenhuma das formas de consumo, em nenhuma região e em nenhum período até o ano 2000 o carvão mineral queimado adotando-se os dispositivos de controle julgados satisfatórios deixa de ser competitivo. Apenas se o preço do óleo combustível baixar até um nível inferior a cerca de US\$ 150/t, é que teríamos, em determinadas regiões e indústrias, uma competitividade entre o óleo combustível e o carvão mineral (com controle).

Neste ponto, podemos fazer a estimativa do segundo parâmetro econômico que julgamos interessante analisar, relacionado com os

$$\begin{aligned} & \frac{13 \text{ US\$ } 550.000}{\text{ano}} \div (200 \times 10^6 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \times 24 \times 180 \frac{\text{h}}{\text{ano}}) = \frac{\text{US\$ } 6,36 \times 10^{-7}}{\text{BTU}} = \\ & = \frac{\text{US\$ } 2,52 \times 10^{-6}}{\text{kcal}} = \frac{\text{US\$ } 2,52}{10^6 \text{ kcal}} \end{aligned}$$

investimentos globais em que se incorreria com a instalação dos equipamentos de controle para a queima do carvão mineral. Nossas estimativas também baseiam-se na referência [10] (estes mesmos custos estão incorporados nos custos anualizados apresentados nas Figuras 1 a 4). O custo do investimento depende novamente dos mesmos parâmetros já apontados sobre os custos de controle em geral. Considerando apenas o nível máximo de controle, temos que o custo típico de investimento varia na faixa de US\$ 4.000 a US\$ 10.000 por  $10^6$  BTU de input por hora, ou seja, de US\$ 16.000 a US\$ 40.000 dólares por  $10^6$  kcal. Utilizando as projeções de demanda energética do modelo MOCAM, temos que o total de gigacalorias a ser consumido em 1984 será da ordem de  $23,3 \times 10^{12}$  kcal  $\times 10^{12}$  kcal, o que dá um investimento da ordem de US\$ 42.500.000 a US\$ 170.000.000 supondo um fator de operação igual a 1, ao passo que, se usarmos um fator mais realista de 0,6, teremos um investimento da ordem de US\$ 70.800.000 a US\$ 283.700.000. As projeções de consumo para o ano 2000 são da ordem de  $94.580 \times 10^{12}$  kcal, o que dá um investimento de cerca de US\$ 172.500.000 a US\$ 690.068.000 com um fator de operação igual a 1, ou US\$ 287.500.000 a US\$ 1.150.000.000 se o fator de operação for 0,6. Note-se que em ambos os casos o valor apresentado é o total dos custos de investimento que deverão ter sido feitos em controle ambiental para se consumir, com as emissões controladas, os valores apresentados em gigacalorias, e não o investimento a ser feito naquele ano. Julgamos interessante comparar estes valores com os investimentos acumulados a serem feitos em mineração no mesmo período. De acordo com os resultados do modelo, os investimentos em mineração a serem feitos entre o primeiro e o último períodos (1983 a 2000) é de US\$ 1,5 bilhão, o que corresponde aproximadamente à metade da variação observada, no mesmo período, dos investimentos em controle ambiental da combustão (US\$ 71 a 283 milhões, que deverão crescer até US\$ 287 a 1.150 milhões, ou seja, uma variação de cerca de US\$ 200 a 900 milhões).

#### Óxidos de Enxofre

Apesar da pequena experiência internacional com os equipamentos de controle de emissão dos óxidos de enxofre (FGD) e também

da disponibilidade de dados, apresentaremos, quase que a título de ilustração, os dados disponíveis acerca dos custos de controle dos  $SO_x$ . Acreditamos que seu controle só é importante no médio prazo em termos da queima de carvão mineral, uma vez que o controle de material particulado é prioritário.

A referência [24] apresenta os custos de controle por tonelada de carvão queimado: o de material particulado é de US\$ 1,5 a 2,0/t, enquanto o de  $SO_x$  é de US\$ 14 a 17/t<sup>14</sup> (dólares de 1978).

A referência [23] estima em US\$ 15/kw o investimento e em US\$ 2,65/kw o custo anual de controle de material particulado ou em US\$ 1,05/t de carvão queimado. Relativamente aos óxidos de enxofre, o investimento é estimado entre US\$ 50 a 90/kw, com custo anual de US\$ 19 a 32/kw ou US\$ 7 a 12/t de carvão queimado (dólares de 1978).

A referência [6] estima que os custos de investimento de uma termelétrica de 500 MW seja de US\$ 50 a 75 milhões, para um custo total da planta de cerca de US\$ 400 milhões, e um adicional de 0,4 a 0,8 centavos de dólar por kwh gerado, para os custos de controle de  $SO_x$  (dólares de 1978).

A referência [16] (inglesa) estima em US\$ 55 milhões e um adicional de 0,33 centavos de dólar por kwh gerado para as mesmas condições da referência [6].

Os valores apresentados na referência [21] são relativamente antigos. Sumariamente, os custos de controle de óxidos de enxofre situam-se numa faixa de 2 a 10 vezes os de material particulado.

A referência [9], da EPA americana, estima os custos de capital entre US\$ 23 a 100 (média de US\$ 60,9) por kw de capacidade e os operacionais entre US\$ 0,003 a 0,022 (média US\$ 0,012) por kwh gerado (dólares de 1978).

---

<sup>14</sup> Carvão com 4% de enxofre, 16% de cinza, caldeira de 10.000 BTU/kwh.

De todos estes dados, percebe-se que os custos de investimento situam-se numa faixa de US\$ 35 a 150/kw instalado (dólares de 1984) e os operacionais entre US\$ 0,006 a 0,035/kwh gerado (dólares de 1984), valores que correspondem aproximadamente a 2 a 7 vezes os custos de controle de material particulado.

## 5 - RESUMO E PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Apresentaremos nos tópicos a seguir os aspectos que julgamos mais importantes dentre os abordados no trabalho:

1) A questão ambiental decorrente da queima do carvão mineral não é hoje em dia ainda relevante. Os problemas gerados na etapa de produção são muito mais preocupantes, colocando-se entre os mais sérios de meio ambiente no Brasil. Entretanto, diante da perspectiva de elevação do consumo de carvão mineral, maior atenção deve ser dada às questões da combustão, uma vez que a experiência internacional tem mostrado que elas tendem a se tornar mais sérias que aquelas observadas na produção.

2) Três fatores principais parecem envolver o fato de não se conceder prioridade às questões ambientais decorrentes da combustão. O primeiro refere-se à situação econômica do período 1979/83. Entre 1979 e 1981, quando o quadro de crise era fundamentalmente creditado ao segundo choque do petróleo, foram feitos enormes esforços no sentido de incentivar a substituição de combustível, ao mesmo tempo em que se procurava aumentar a produção de carvão mineral. Neste período, foram feitos os poucos trabalhos nacionais sobre as questões ambientais decorrentes da queima de carvão. Entretanto, a partir de 1981, com o agravamento da crise econômica, algumas conseqüências neste âmbito se fizeram sentir: a questão de meio ambiente passa a um segundo plano de prioridade, a diminuição da atividade econômica acarreta uma diminuição das emissões de poluentes e a conjugação de ambos os problemas levou a um adiamento da implementação das políticas de controle mais rigorosas. Simultaneamente, os estudos técnicos e as medições que se haviam iniciado não tiveram continuidade.

3) A situação descrita acima leva a uma disponibilidade de dados extremamente limitada sobre o caso específico do Brasil, o que é particularmente grave em virtude do fato de que as características dos carvões estrangeiros são bastante distintas das apresentadas pelos carvões nacionais, além de serem fundamentais na questão ambiental, limitando a utilidade da experiência internacional. Na falta de outras informações, baseamo-nos largamente em fatores de emissão estimados pelos órgãos de meio ambiente nacionais e pela EPA americana.

4) Em termos de legislação, a situação brasileira reflete o quadro descrito anteriormente; não existem padrões de emissão específicos para o carvão mineral, sendo que somente agora se começa a estudar a questão. Ademais, uma comparação escrita com os padrões americanos, por exemplo, não nos parece a mais indicada, uma vez que os níveis economicamente ótimos de controle (ou poluição) ambiental são certamente distintos no Brasil e no exterior. Apenas como termo de comparação, utilizamos a média americana dos SIP (State Implementation Plans), que já começam a ficar ultrapassados e são, no caso da emissão de material particulado, 20 vezes maiores que os novos NSPS (New Source Performance Standards). Pela falta de dados e, também, por fugir talvez ao nosso objetivo primário, não discutimos muito o nível ótimo de emissão, embora este seja um assunto que num futuro próximo deva merecer maior atenção.

5) O carvão mineral no Brasil é consumido basicamente por termelétricas, fábricas de cimento e demais indústrias conjuntamente, em parcelas que variam de 30 a 50%, 25 a 40% e 20 a 30%, respectivamente. A indústria cimenteira basicamente não apresenta problemas de emissão, uma vez que as cinzas do carvão se aglutinam à matéria-prima. As termelétricas (grandes consumidoras) concentram-se exclusivamente nos Estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul e apresentam emissões pontuais extremamente localizadas, apesar de as quantidades serem muito elevadas, assim como os custos de controle. As demais indústrias consumidoras estão espalhadas ao longo das regiões Sul e Sudeste, disseminando as questões ambientais, que se tornam particularmente graves no caso

das regiões metropolitanas, onde existem diversas fontes poluidoras concorrentes, já são críticos os níveis de poluição e é sempre elevado o número de pessoas a ser atingido.

6) As recomendações das secretarias estaduais de meio ambiente são de que: i) os pequenos consumidores não devem consumir carvão mineral, por não terem condições de arcar com os elevados custos de controle; ii) nas regiões metropolitanas não se deve consumir carvão mineral, mesmo que se implementem os controles de queima necessários, uma vez que o transporte, a estocagem e a movimentação do carvão são fontes emissoras de grande quantidade de material particulado (em São Paulo já vigora lei nesse sentido); iii) a solução ambiental para o consumo do carvão mineral nas regiões metropolitanas é a gaseificação, conjugada eventualmente com a utilização apenas de carvões nobres, com baixos teores de cinza e enxofre.

7) Estas recomendações das secretarias de meio ambiente refletem uma posição do ponto de vista quase que estritamente ambiental. Julgamos uma limitação deste trabalho não ter avaliado mais cuidadosamente pelo menos duas opções de utilização do carvão mineral, que parecem adequadas mesmo em termos do meio ambiente: a primeira refere-se à possibilidade de um maior beneficiamento do carvão mineral, que levasse a uma melhora da sua qualidade e que implicasse a necessidade de equipamentos de controle menos eficientes e, portanto, de menor custo; e a segunda seria considerar a importação de carvões estrangeiros mais nobres, com as características apontadas acima. Ambas as opções poderiam ser analisadas através do Modelo MOCAM, e temos a certeza de que este deva ser um próximo passo tentado no estudo da questão, ainda que se defronte com algumas limitações da fase atual do modelo, que tem, por exemplo, as regiões consumidoras muito agregadas, o que não é indicado na abordagem das questões de meio ambiente.

8) Baseando-nos em fatores de emissão e nas características típicas do óleo BPF e dos carvões brasileiros, podemos dizer que as emissões de óxido de enxofre decorrentes da queima de ambos os combustíveis estão bastante próximas, chegando a ser maiores no ca

so do óleo combustível se for feita comparação com o carvão de Can diota, que possui baixo teor de enxofre. Isto quer dizer, grosso modo, que não deve ser exigido o controle das emissões dos óxidos de enxofre como consequência da utilização do carvão mineral, mas sim aquele que se vinha efetivando quando da queima de óleo combustível. Salientamos, entretanto, que as emissões dos  $SO_x$  são extremamente elevadas e que é prioritário começar a fazer exigências mais rigorosas de controle. As últimas informações recebidas em contato direto com a Cetesb dão conta de que em São Paulo algumas das grandes indústrias já deram início à implementação do controle dos  $SO_x$ . Com relação às emissões de material particulado, entretanto, a situação é extremamente desfavorável ao carvão mineral.

9) O controle das emissões de material particulado é tradicional na indústria, apesar de os custos serem elevados. Em função principalmente do altíssimo teor de cinza do carvão nacional, as eficiências de controle tendem a ser muito elevadas (acima de 98%), o que implica a utilização de precipitadores eletrostáticos ou filtros manga, ambos de alta eficiência mas também de alto custo. Outras técnicas de controle são disponíveis, e a conjugação de algumas delas (notadamente lavadores e ciclones com precipitadores eletrostáticos) parece uma boa opção de controle.

10) Apesar da dificuldade para se adaptar os dados internacionais ao caso brasileiro, apresentamos algumas estimativas dos custos de controle. Um dos principais parâmetros econômicos estudados foi o efeito do custo de controle sobre o custo da caloría gerada pela queima de carvão mineral e a comparação com o custo de geração da mesma gigacaloría a partir do óleo combustível. Considerou-se como custos de controle apenas os de material particulado, haja vista que os de óxidos de enxofre são semelhantes para os dois combustíveis. Com hipóteses de utilização de 50% (fator de operação), o custo de controle para as condições mais desfavoráveis (queima pulverizada e carvão com baixo teor de enxofre) situa-se na faixa de US\$ 2,50/10<sup>6</sup> kcal. O custo da gigacaloría fornecida pelo carvão mineral utilizado foi o obtido pelo modelo MOCAM - do Grupo de Energia do IPEA/INPES - e varia conside



ravelmente entre regiões e entre períodos. Nas regiões próximas às de produção, varia de 2 a 7 dólares, subindo até 12 dólares por gigacaloria nas regiões mais afastadas. A gigacaloria fornecida pelo óleo combustível ao preço de US\$ 200/t custa cerca de 20 dólares, de modo que o controle ambiental não tira a economicidade do carvão mineral frente ao óleo combustível, nos níveis de preços atuais. Percentualmente, percebe-se que o controle ambiental pode representar de 10 a 50% dos custos de geração energética.

O segundo parâmetro estudado foi o montante de investimentos que será necessário ao controle ambiental como decorrência da substituição do óleo combustível pelo carvão mineral. Os valores a que chegamos parecem discretamente superestimados, situando-se na faixa de US\$ 4.000 a US\$ 10.000 por  $10^6$  kcal de capacidade de geração. Utilizando as projeções de demanda energética do modelo MOCAM para o período de 1983/84, temos que os investimentos em controle que deveriam ter sido feitos em controle ambiental situam-se na faixa de US\$ 400 a US\$ 950 milhões. Para o ano 2000, o total acumulado dos investimentos que deverão ter sido feitos em controle chega à faixa de US\$ 1,5 a US\$ 3,8 bilhões.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - BRAILE, Victoria Valli. Efeitos ecológicos decorrentes da queima do carvão no Brasil. Rio de Janeiro, FEEMA, maio 1980. 48 p.
- [2] - BRAILE, Victoria Valli. Poluição do ar no Brasil: participação da indústria. Rio de Janeiro, FEEMA, 1979. 62 p. (Cadernos FEEMA. Série Técnica, 7/79).
- [3] - COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Usina termelétrica de Candiota III. Porto Alegre, s.d.
- [4] - COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Usina termelétrica Presidente Médici, Fase A e B. Porto Alegre, s.d.
- [5] - CONTROLING combustion and pollution in industrial plants. Power, s.n.t.
- [6] - THE DIRECT use of coal; prospects and problems of production and combustion. Washington, D. C., Office of Technology Assessment, s.d. 411 p.
- [7] - ENGENHEIROS CONSULTORES E PROJETISTAS S.A. Programa de conservação e recuperação ambiental da região sul de Santa Catarina. Florianópolis, 1982. Vários vols. (Trabalho elaborado para a FATMA/SC e financiado pela FINEP).
- [8] - ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Compilation of our pollutant emission factors. 3rd. ed. Washington, D. C., Aug. 1977. Parts A, B (PB-275 525).
- [9] - ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Energy environment III. Washington, D. C., 1978. 386 p. (EPA-600/9-78-022). (National Conference on the Interagency R&D Program, 3. Washington, 1978).

- [10] - ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Technology assessment report for industrial boiler applications: coal cleaning and low sulphur coal. Washington, D.C., Dec. 1979. 59 p. (EPA-600/7-79-178c).
- [11] - ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Technology assessment report for industrial boiler applications: particulate collection. Washington, D.C., Dec. 1979. 284 p. (EPA-600/7-79-178h).
- [12] - ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. Technology assessment report for industrial boiler applications: flue gas desulfurization. Washington, D.C., 1979. (EPA-600/7-79-178i).
- [13] - FOUR key equipment designs curb stack dust emissions. Power, 1973. pp. 57-64.
- [14] - GALVÃO FILHO, João Baptista. O carvão e a poluição ambiental. São Paulo, CETESB, 1979. 41 p. + anexo. (Trabalho apresentado no Seminário sobre Carvão como Alternativa Energética, Rio de Janeiro, IBG, 1979.)
- [15] - GODOY, Manuel Pereira de, e SEARA, Carlos Alberto Reis. Termoelétricas e meio ambiente. s.l., Centrais Elétricas do Sul do Brasil S.A., s.d. (Trabalho apresentado no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, 1979.)
- [16] - HIGHTON, Nicolas H., e WEBB, Michael. Pollution abatement costs in the electricity supply industry in England and Wales. York, York University, 1982 (York Univ. Institute of Social and Research. Department of Economics. Reprint series: economics, 339). Separata de The Journal of Industrial Economics, Oxford, 30(1):49-65, Sept. 1981.

- [17] - INDUSTRIAL sector technology use model (ISTUM): industrial energy use in the United States, 1974-2000. Arlington, Vi, Energy and Environmental Analysis, Inc., June 1978. v. 4 (Prepared for Department of Energy).
- [18] - INFORMATIVO ANUAL DA INDÚSTRIA CARBONÍFERA. BRASÍLIA, 1983.
- [19] - INTERNACIONAL DE ENGENHARIA S.A. Projeto controle de poluição do ar; relatório conceitual. Rio de Janeiro, abr. 1983. v. 1, v. 2 e v. 3 (trabalho realizado para a Associação Nacional dos Produtores de Coque, Santa Catarina).
- [20] - MARGULIS, Sérgio. Impactos ambientais decorrentes da produção do carvão mineral: uma abordagem quantificada. Rio de Janeiro, IPEA/INPES, dez. 1983 (IPEA/INPES. Texto para discussão. Grupo de Energia, 18).
- [21] - THE PAST societal costs of coal use in electricity generation. In: PENNER, S.S., e ICERMAN, L., eds. Energy: demands, resources, impact technology and policy. Reading, Mass., Addison, Wesley Publ. Co., 1974, v. 1, Chapter 7, p. 313-333.
- [22] - RELATÓRIO do Grupo de Trabalho Interministerial criado pela Portaria nº 330 de 16.03.1981. Brasília, junho 1981. v. 1 e relatório final.
- [23] - STEAM coal, prospects to 2000. Paris, OECD, 1978. 157 p.
- [24] - WORLD COAL STUDY (WOCOL). Coal; bridge to the future. Cambridge, Mass. Ballinger Publ. Co., 1980. v. 1, v. 2.

## TEXTOS PARA DISCUSSÃO DO GRUPO DE ENERGIA (TDE)

- Nº I - "Uma Avaliação dos Impactos Ambientais e Socio-Econômicos Locais Decorrentes da Industrialização do Xisto", Sérgio Margulis e Ricardo Paes de Barros, Dezembro 1981, 30p.
- Nº II - "Recursos Nacionais de Xistos Oleíferos: Um Levantamento com Vistas ao Planejamento Estratégico do Setor", Lauro Ramos e Ricardo Paes de Barros, Dezembro 1981, 76 p.
- Nº III- "Agricultura e Produção de Energia: Avaliação do Custo da Matéria-Prima para Produção de Alcool", Equipe IPEA/IPT, Janeiro 1982, 64 p.
- Nº IV - "Um Modelo de Crescimento para a Indústria do Xisto", Ricardo Paes de Barros e Lauro R.A. Ramos, Fev. 1982, 57 p.
- Nº V - "Um Modelo de Planejamento de Oferta de Energia Elétrica", Octávio A.F. Tourinho, Março 1982, 12 p.
- Nº VI - "A Economia do Carvão Mineral", Eduardo M. Modiano e Octávio A.F. Tourinho, Março 1982, 12 p.
- Nº VII- "Um Modelo Econométrico para a Demanda de Gasolina pelos Automóveis de Passeio", Ricardo Paes de Barros e Silvério Soares Ferreira, Maio 1982, 135 p.
- NºVIII- "A Critical Look at the Theories of Household Demand for Energy", Ali Shamsavari, Junho 1982, 32 p.
- Nº IX - "Análise do Consumo Energético no Setor Industrial da Região Central do País", Flávio Freitas Faria e Luiz Carlos Guimarães Costa, Junho 1982, 30 p.
- Nº X - "Vinhoto: Poluição Hídrica, Perspectivas de Aproveitamento e Interação com o Modelo Matemático de Biomassa", Sérgio Margulis, Julho 1982, 108 p.
- Nº XI - "Um Modelo de Análise da Produção de Energia pela Agricultura", Fernando Curi Peres, José R. Mendonça de Barros, Léo da Rocha Ferreira e Luiz Moricochi, Agosto 1982, 24p.
- Nº XII- "Xistos Oleíferos: Natureza, Formas de Aproveitamento e Principais Produtos", Lauro R.A Ramos e Ricardo Paes de Barros, Fevereiro 1983, 55p.
- NºXIII- "Consumo de Energia para Cocção: Análise das Informações Disponíveis", Ricardo Paes de Barros e Luis Carlos P. J. Boluda, Março 1983, 113 p.

- Nº XIV- "Consumo de Energia no Meio Rural", Milton da Mata, Março 1983, 41p.
- Nº XV - "Usina Industrial de Xisto", Lauro R.A. Ramos e Ricardo Paes de Barros, Abril 1983, 87 p.
- Nº XVI- "Cenários de Demanda de Derivados de Petróleo", Lauro R.A. Ramos, Dezembro 1983, 88p.
- NºXVII- "Sobre a Dieselização da Frota Brasileira de Caminhões ", Armando M. Castelar Pinheiro, Dezembro 1983, 87p.
- NºXVIII- "Impactos Ambientais Decorrentes da Produção do Carvão Mineral: Uma Abordagem Quantificada", Sérgio Margulis, Dezembro 1983, 114 p.
- Nº XIX- "Uma Análise dos Processos de Conservação de Energia e Substituição do Óleo Combustível na Indústria do Cimento", Armando M. Castelar Pinheiro, Março 1984, 102p.
- Nº XX - "Energia na Indústria de Vidro", José Cesário Cecchi, Março 1984, 92 p.
- Nº XXI- "Análise da Demanda por Insumos das Empresas Profissionais de Transporte Rodoviário de Cargas", Antonio Edmundo de Rezende, Setembro 1984, 119p.
- NºXXII- "Tecnologia, Custos, Capacidade de Carga e Consumo Energético de Veículos no Transporte Rodoviário de Bens", Newton de Castro, Novembro 1984, 40 p.

O INPES edita ainda as seguintes publicações: Pesquisa e Planejamento Econômico (quadrimestral), desde 1971; Literatura Econômica (bimestral), desde 1977; Brazilian Economic Studies (semestral), desde 1975; Coleção Relatório de Pesquisa; Série de Textos para Discussão Interna (TDI); Série Monográfica; e Série PNPE.