

# Um modelo de crescimento para a indústria do xisto

RICARDO P. BARROS \*  
LAURO R. A. RAMOS \*

*Este trabalho tem por objetivo a análise do aproveitamento dos recursos nacionais de xisto, com vistas à produção de óleo, tendo por base os atuais níveis de conhecimento geológico e tecnológico e as expectativas quanto ao futuro quadro energético nacional e mundial.*

*Neste sentido, as primeiras seções (1 a 5), de caráter essencialmente descritivo, são dedicadas a uma rápida apresentação dos principais aspectos pertinentes à sua utilização para a produção de óleo, com o intuito de propiciar um melhor entendimento do contexto do problema. Na Seção 6 é desenvolvido um modelo de crescimento para a indústria do xisto, cuja finalidade é a determinação da estratégia ótima de instalação das usinas. Finalmente, na Seção 7 são apresentados os resultados de algumas simulações realizadas através daquele modelo.*

## 1 — Introdução

A indústria do xisto não é uma atividade recente, sendo seu surgimento anterior ao da indústria do petróleo. No entanto, devido às amplas vantagens comparativas do petróleo, tanto no plano econômico-tecnológico quanto nos aspectos ecológicos associados ao seu aproveitamento, a indústria do xisto tem sido historicamente relegada a um plano secundário, só sendo efetivamente desenvolvida em situações de exceção, como em casos de guerra ou em locais onde os recursos apresentam características bem mais propícias para exploração que os recursos de xisto típicos.

\* Do Instituto de Pesquisas do IPEA.

No entanto, em face das profundas alterações ocorridas no mercado internacional do petróleo na última década, este quadro tende a se modificar. Em particular no caso do Brasil, que depende fortemente das importações do produto, a ambição de diminuir esta dependência faz com que se possa prever um grande empenho no desenvolvimento da indústria do xisto caso esta conjuntura continue prevalecendo, o que é de se esperar.

Naturalmente, para que esse desenvolvimento se verifique é necessário que a sociedade assuma riscos ecológicos e econômicos, tendo em vista que seus impactos ambientais e sua *performance* econômica não podem ainda ser perfeitamente avaliados. Além disso, apesar de haver um consenso quanto ao seu potencial como fonte energética alternativa, o debate acerca de sua utilização é ainda limitado, o que em parte deve-se à pequena difusão de conhecimentos acerca de suas peculiaridades e restrições.

## 2 — Formas de utilização dos xistos oleígenos

Em virtude da presença de pequenos teores de matéria orgânica e diversos minerais em sua composição, os xistos oleígenos possuem uma vasta gama de formas de utilização, energéticas e não energéticas. No Brasil, vem sendo dada ênfase especial para a utilização dos xistos oleígenos como fonte energética, em que pese a existência de vários grupos engajados na pesquisa de utilizações alternativas [cf. Costa Neto (1978 e 1979)].

Dentre as aplicações energéticas, destacam-se a queima direta, a gaseificação e a produção de óleo com características semelhantes às do petróleo de poço. No entanto, uma vez que, em função de suas características, os recursos de xistos oleígenos não se mostram muito eficientes para a queima direta e a gaseificação e, por outro lado, existe uma grande pressão por parte da demanda de combustíveis líquidos, vem sendo objetivado o seu aproveitamento para a produção de óleo.

Dentro desse panorama, todos os esforços de conhecimento e caracterização dos recursos nacionais estão extremamente vinculados a esta forma de utilização, como de resto é a tendência mundial.

### 3 — Recursos brasileiros de xisto

Existem estimativas a nível mundial, baseadas em parâmetros bastante gerais e por isso mesmo com um razoável grau de imprecisão, segundo as quais os recursos brasileiros de xistos oleígenos seriam de magnitude tal que poderiam suprir totalmente as necessidades nacionais de combustíveis líquidos. Naturalmente, para que isso fosse possível seria necessário um conhecimento detalhado de todas as ocorrências e, principalmente, um estado da arte tal que permitisse a extração do óleo de todas as jazidas em condições economicamente viáveis, situação esta que não se observa no momento.

Os recursos nacionais de xistos oleígenos, embora encontrem-se espalhados ao longo do território (ver mapa a seguir), havendo ocorrências em quase todos os Estados brasileiros, são, de maneira geral, mal conhecidos. Dentre eles, merecem destaque pelo seu potencial a Formação Curuá (Amazonas, Pará e Amapá) e a Formação Irati (Centro-Sul do País).

Quanto à Formação Curuá, o conhecimento acerca de suas características é praticamente nulo, sabendo-se apenas que sua área de ocorrência é muito grande e que os ensaios de laboratório efetuados a partir de algumas amostras esparsas revelaram que seus xistos possuem pequenos teores de matéria orgânica, não tendo a PETROBRÁS, pelo menos até o momento, alocado maiores recursos para estudá-la mais detalhadamente.

No que concerne à Formação Irati, pode-se dizer que esta é uma das poucas ocorrências de xisto no Brasil sobre a qual existe um razoável nível de conhecimento. Ela ocorre desde o Estado de Mato Grosso até a fronteira Brasil-Uruguai com algumas interrupções, sendo que o número e a espessura de camadas de seus xistos variam ao longo da faixa de ocorrência.

Em São Paulo e sul de Santa Catarina, o xisto ocorre em camadas finas, não perfeitamente definidas e intercaladas ritmicamente com material estéril, dificultando seu aproveitamento. No sul do Paraná, norte de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, a Formação Irati apresenta duas camadas de xisto bem definidas, separadas por uma camada de material estéril. No entanto, baixos teores médios de óleo (Rio Grande do Sul) e intrusões de rochas ígneas (Paraná e Santa Catarina) muitas vezes tornam inviável o aproveitamento da primeira camada.

Ao longo dos anos, a PETROBRÁS vem desenvolvendo um trabalho de seleção das áreas mais promissoras para a exploração industrial na Formação Irati. As áreas até aqui selecionadas foram São Mateus do Sul (Paraná), Dom Pedrito/São Gabriel (Rio Grande

### OCORRÊNCIAS DE XISTO NO BRASIL



TABELA 1

*Recursos e reservas de óleo de xisto por países*

Países	Recursos conhecidos (10 <sup>9</sup> bbl)	Participação (%)	Reservas (10 <sup>9</sup> bbl)	Participação (%)
Estados Unidos	2.000	64	80	41
Brasil	800	25	50	26
União Soviética	113	4	32	17
Zaire	100	3	14	7
China	28	1	10	5
Itália	35	1	7	4
Outros	74	2	—	—
Total	3.150	100	192	100

FONTES: Donnel (1976) e Duncan (1965).

do Sul), Papanduva/Três Barras (Santa Catarina) e Rio Negro/Rio Iguaçú (Paraná), o que permitiu a medição de reservas da ordem de 2 bilhões de barris de óleo de xisto.

É necessário ressaltar que este número não corresponde efetivamente ao total das reservas contidas na Formação Irati, uma vez que na seleção destas áreas foram adotados alguns critérios um tanto rigorosos, que se fossem relaxados permitiriam a inclusão de muitas outras. Se, por exemplo, fossem admitidas a mineração subterrânea e/ou áreas de menor possança, certamente este número seria substancialmente elevado. A razão principal de não haver maior empenho por parte da PETROBRÁS no detalhamento e caracterização de novas jazidas certamente reside no fato de que o total de reservas já medidas, dados o atual estado da arte e a capacidade de investimento da empresa no setor, é suficiente para o desenvolvimento de suas atividades por um período de tempo bastante longo.

TABELA 2  
Reservas medidas da Formação Irati

Regiões	Capeamento médio (m)	Relação xisto/estéril	Teor médio de óleo (%)	Potencial de produtos			Observações	
				Óleo (10 <sup>6</sup> bbl)	GLP (10 <sup>6</sup> t)	Gás combustível (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )		
São Mateus do Sul	17,5	1:2,7	7,3	560	3,9	19,0	8,7	—
Rio Negro/Rio Iguaçu	30,0	1:4,6	7,2	173	1,2	5,9	2,7	Intrusão na 1. <sup>a</sup> camada
Papanduva/Três Barras	25,0	—	6,8	580	4,0	19,7	9,0	Intrusão em uma parte da 1. <sup>a</sup> camada
Dom Pedrito/São Gabriel	17,5	1:6,1	6,9	705	5,0	24,3	11,0	Baixo teor de óleo na 1. <sup>a</sup> camada e elevada percentagem de finos
Total das Reservas				2.018	14,1	68,9	31,4	—

FONTE: Padula (1979).

#### 4 — Processo PETROSIX

Além de suas atividades de avaliação dos recursos nacionais, a PETROBRÁS tem investido continuamente nos últimos 25 anos no desenvolvimento de uma tecnologia para a produção de óleo (re-tortagem) a partir destes recursos. Dada a enorme quantidade de patentes existentes no mundo, inicialmente a PETROBRÁS procurou contactar os seus responsáveis, no sentido de adaptá-las aos xistos brasileiros, mas, devido às peculiaridades desses xistos, tal iniciativa não teve êxito. Foi feita então a opção pelo desenvolvimento de uma tecnologia própria, culminando com a concepção do processo PETROSIX, hoje um dos poucos no mundo já testados em escala protótipo [cf. Ribeiro *et alii* (1964) e Varisco (1971)].

Apesar de sua adaptação às características dos xistos nacionais e de sua simplicidade quando comparado a outras tecnologias, além de proporcionar uma alta recuperação de óleo, o processo PETROSIX tem um aproveitamento energético ainda distante do máximo possível, uma vez que não permite o aproveitamento dos finos produzidos na britagem, assim como do carbono residual contido no resíduo sólido (xisto retortado), que poderia ser aproveitado para atender à demanda térmica do processo (a energia líquida produzida no processo corresponde a 43% da energia contida no xisto). No entanto, embora existam vários pontos passíveis de aperfeiçoamento com conseqüentes economias, é inquestionável o fato de que a PETROBRÁS já possui hoje uma tecnologia de operabilidade comprovada quando aplicada aos recursos nacionais.

Esta comprovação foi feita através da operação da Usina Protótipo de São Mateus do Sul (Paraná), com capacidade de produção de 1.000 barris por dia a partir de meados de 1972. Atualmente, a PETROBRÁS encontra-se às voltas com a instalação da primeira Usina Industrial de Xisto, também em São Mateus do Sul.

Quanto aos dados econômicos da Usina Industrial, estes ainda apresentam um considerável grau de incerteza. Entretanto, ao encerrar o projeto básico para a construção da usina, com capacidade de produção líquida anual, em uma primeira etapa, de  $1.180 \times 10^3$  m<sup>3</sup> de óleo combustível,  $120 \times 10^3$  m<sup>3</sup> de nafta e

$165 \times 10^3$  t de enxofre, a PETROBRÁS estimou em aproximadamente US\$ 1,1 bilhão os investimentos necessários durante o período de construção, sendo 86% deste valor em moeda nacional, enquanto os custos de produção seriam de US\$ 28,7/bbl em termos sociais e US\$ 39,7/bbl em termos empresariais, considerando uma taxa de remuneração do capital de 10% [cf. PETROBRÁS (1980)].

## 5 — Impactos ambientais

Paralelamente a este gênero de considerações, um dos aspectos associados à industrialização dos xistos oleígenos que desperta preocupação diz respeito aos impactos ambientais advindos do seu aproveitamento. Os efeitos causados ao meio ambiente têm na diversidade dos problemas envolvidos, aliada às incertezas relativas à sua dimensão e à falta de experiência anterior em contorná-los para o caso específico da industrialização do xisto, a principal fonte de preocupação e atenção. A dificuldade no acúmulo de experiência para a indústria do xisto é agravada ainda pela grande diferença dos problemas que se verificam nas diversas regiões de ocorrência de xisto. Assim, o esforço que vem sendo feito para conhecer e controlar os efeitos da indústria do xisto mundialmente e, em particular, para o caso americano [cf. EUA, Department of the Interior (1973)] tem utilidade bastante limitada na busca de soluções para os problemas específicos dos xistos brasileiros.

Um dos principais impactos ambientais acarretados diz respeito ao incremento da poluição atmosférica nas áreas de implantação das usinas, notadamente em termos de  $\text{SO}_2$  e material particulado. No projeto da Usina Industrial estão previstos vários dispositivos controladores da emissão de efluentes gasosos, de modo a manter suas concentrações na região da usina dentro dos padrões da legislação. Há de se ressaltar que o centro das discussões acerca deste problema diz respeito ao compromisso entre o custo desses dispositivos e os benefícios advindos de sua utilização, uma vez que, de modo geral, este tipo de impactos tem técnicas de controle bem conhecidas.

Por outro lado, existe a possibilidade de contaminação dos recursos hídricos da região, devido à lixiviação das águas pluviais ao percolarem por entre as camadas de material rejeitado (xisto retortado, água de retortagem, finos, etc.). Além disso, existem problemas ligados à própria deposição dos rejeitos sólidos (combustão espontânea, alteração do relevo) e à recuperação do solo minero com vistas à revegetação. Quanto à lixiviação e combustão espontânea, estes são dois problemas que ainda não estão completamente dominados, sendo que até agora apenas foram feitas simulações parciais, cujos resultados, se dão margem a supor que eles podem ser devidamente contornados a custos razoáveis, não tornam isto ainda um fato comprovado.

Quanto aos impactos causados às localidades onde serão implantadas as usinas, deve-se salientar que os problemas decorrem do fato de estas localidades serem rurais, pouco desenvolvidas e sem infra-estrutura para atender às necessidades de implantação e operação das usinas, sendo, em função disso, necessária uma especial atenção para com o brusco crescimento populacional esperado. Entretanto, deve-se frisar que estes problemas, ao contrário daqueles relativos ao meio ambiente, não apresentam maiores incertezas ou aspectos peculiares, uma vez que o mesmo tipo de situação ocorre em várias atividades correlatas.

## 6 — Modelo

Tendo em mente os aspectos discutidos até aqui, procurou-se desenvolver um modelo de longo prazo para o aproveitamento dos recursos brasileiros de xisto, de implementação e manipulação bastante simples e que levasse em conta as economias advindas do aprimoramento tecnológico associado ao desenvolvimento da indústria do xisto no Brasil.

Basicamente, o objetivo do modelo é a determinação da estratégia ótima de instalação de usinas com vistas à maximização das economias auferidas pela utilização do óleo de xisto como substituto do

petróleo importado. Desta maneira, o modelo pode fornecer a oferta de óleo de xisto em cada período para cada possível cenário de preços do petróleo importado:

$$O(t) = f(t, \pi(t), \pi(I), \dots)$$

onde  $O(t)$  é a oferta de óleo de xisto no período  $t$  e  $\pi(t)$  o preço do petróleo importado no período  $t$ .

## 6.1 — Idéia básica

No presente trabalho considerou-se que os recursos de xisto de uma determinada região podem ser representados por  $M$  áreas de características homogêneas,<sup>1</sup> sendo que para o seu aproveitamento é necessária a instalação de uma ou mais usinas em cada área, perfazendo um total de  $N$  usinas.

Foi considerado também que são conhecidos a tecnologia empregada, a escala de produção, os requisitos de capital e os custos operacionais de cada usina a ser instalada, não havendo vínculo entre usinas da mesma área ou de áreas diferentes.<sup>2</sup>

Quanto aos aspectos ambientais envolvidos no problema, admitiu-se que os requisitos de capital e o custo operacional já levam em consideração os custos com equipamentos e instalações necessárias

<sup>1</sup> No caso específico a ser apresentado, a região analisada foi a da Formação Irati, sendo a sua divisão em área realizada segundo os critérios de caracterização de reservas adotados pela PETROBRÁS, já apresentada na Seção 3 [cf. Morcira (1978) e Padula (1979)].

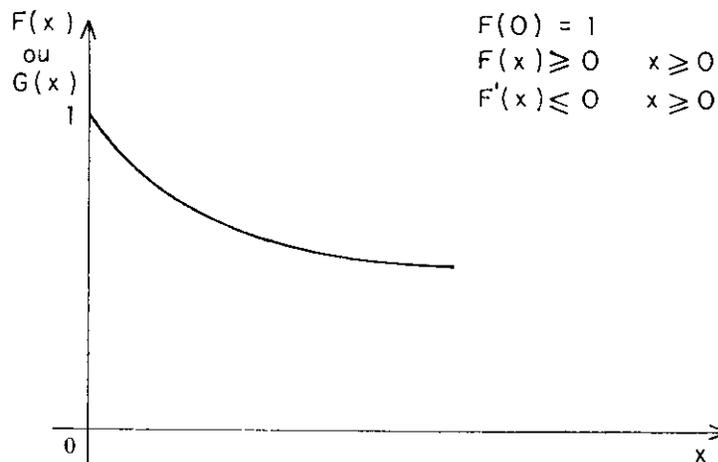
<sup>2</sup> Esta hipótese é razoável no caso da Formação Irati, onde as reservas encontram-se relativamente pouco concentradas. Cabe salientar, no entanto, que é perfeitamente plausível a existência de vínculos entre usinas instaladas na mesma região, tanto no sentido de aumento dos custos, devido aos problemas ambientais, quanto no sentido de sua redução, devido ao uso simultâneo de algumas unidades. Este inconveniente pode ser parcialmente resolvido através da imputação das variações de custo à segunda usina a ser instalada.

à manutenção da qualidade do meio ambiente dentro dos padrões considerados aceitáveis pela legislação pertinente ao setor. Por outro lado, assumiu-se que as usinas produzem apenas óleo de xisto, sendo os créditos com subprodutos descontados dos custos operacionais e os preços do óleo considerados como dados exógenos e independentes da produção total de óleo de xisto.

Além disso, foi incorporada ao modelo a existência de economias, tanto nos custos operacionais quanto no capital necessário para a instalação das usinas de processamento de xisto, devido ao acúmulo de experiência na medida em que o número de usinas instaladas vai aumentando. Desta maneira, são consideradas conhecidas duas funções,  $F(\cdot)$  e  $G(\cdot)$ , com os seguintes significados:  $F(x)$  é o índice de atenuação do capital quando o número de usinas já instaladas é  $x$  e  $G(x)$  o índice de atenuação nos custos operacionais quando o número de usinas já instaladas é  $x$ .

As características e a forma dessas funções de aprendizado são mostradas no Gráfico 1:

Gráfico 1  
FUNÇÕES DE APRENDIZADO



Sob as hipóteses apresentadas até aqui, pode-se dizer que a obtenção do esquema ótimo<sup>3</sup> de aproveitamento dos recursos de xisto de uma determinada região resume-se na determinação dos instantes ótimos de instalação de cada uma das possíveis usinas de processamento de xisto, ou, de maneira mais formal, na determinação de  $\{h_i, i = 1, \dots, N\}$ , de modo a:

MOD1

$$\text{Max} \sum_{t=0}^{\infty} (1+r)^{-t} \sum_{i/h_i=t} \left[ \sum_{t'=1}^{TE_i} (1+r)^{-t'} (\pi(t+t') PX_i - C_i G(n_i)) - K_i F(n_i) \right]$$

Sujeito a:

$$\sum_{i/h_i=t} K_i F(n_i) \leq KM^t \quad t = 0, 1, \dots$$

$$h_i \in \{0, 1, \dots\} \quad \forall i = 1, \dots, N$$

$$n_i = |\{j/h_j < h_i\}|$$

onde:

- $h_i$ : período de instalação da usina  $i$ ;
- $TE_i$ : número de períodos até a exaustão dos recursos de xisto alocados à usina  $i$ ; <sup>4</sup>
- $r$ : taxa de desconto (considerada positiva);
- $PX_i$ : capacidade de produção de óleo por período da usina  $i$ ;
- $\pi(t)$ : preço médio do petróleo no mercado internacional no período  $t$ ;

<sup>3</sup> Ótimo sendo entendido aqui como a maximização dos lucros sujeita a restrições de capital.

<sup>4</sup> Naturalmente, deve haver uma concordância entre o tempo de exaustão das reservas e a vida útil dos equipamentos.

- $C_i$ : custo operacional por período da usina  $i$  (sem considerar os efeitos do aprendizado e descontado o crédito com subprodutos);
- $K_i$ : capital necessário para a instalação da usina  $i$  (sem considerar os efeitos do aprendizado);
- $n_i$ : número de usinas instaladas antes da usina  $i$ ; e
- $KM^t$ : disponibilidade máxima de capital para investimentos em xisto no período  $t$ .

Por uma questão de praticidade, o tamanho do período considerado coincide com o tempo necessário para a instalação de uma usina, de modo que é razoável supor que todo o investimento é realizado no mesmo período.<sup>5</sup> Outra consequência desta consideração é que uma usina instalada no período  $t$  ( $h_i = t$ ) começa a produzir a partir do período  $t + 1$ .

Finalmente, em função da natureza dinâmica do problema, das não-linearidades nele contidas e do seu pequeno porte, a programação dinâmica foi escolhida como a técnica mais recomendável para sua resolução.

## 6.2 — Limitações do modelo

Uma grande limitação do modelo apresentado na subseção anterior (MOD1) diz respeito, sem dúvida, à não consideração dos custos de transporte do óleo de xisto entre as áreas produtoras e consumidoras. Seria simples a inclusão dos custos de transporte até uma determinada região escolhida *a priori* como a mais provável consumidora, mas o problema decorre justamente da impossibilidade de determinação pelo próprio modelo das regiões que realmente devem consumir o óleo ou parte dele segundo aquela formulação.

<sup>5</sup> Em verdade, a diferença da vida útil dos diversos equipamentos da usina acarreta a necessidade de reinvestimentos ao longo de seu período de operação, implicando a obrigatoriedade de hipóteses adicionais para a validade desta formulação, conforme será visto mais adiante (Subseção 6.6).

Para que fosse possível a determinação dos fluxos de óleo de xisto entre regiões produtoras e consumidoras, seria necessária a formulação de um modelo onde a demanda estivesse desagregada por regiões consumidoras, que considerasse as estruturas das refinarias e da demanda de cada uma dessas regiões, os aspectos da oferta de petróleo nacional e, além disso, os principais parâmetros que identificam as propriedades do óleo de xisto, do petróleo nacional e dos mais representativos tipos de petróleo em disponibilidade no mercado internacional.

As tentativas de inclusão de considerações desta natureza no modelo acarretaram o surgimento de problemas computacionais incomparavelmente maiores.<sup>6</sup> Em que pese o fato de estes problemas serem passíveis de solução pelas atuais facilidades computacionais em tempos razoáveis, este não parece ser um esforço compensador, em função das elevadas incertezas quanto à produção de petróleo nacional, quanto à estrutura da demanda futura e quanto às especificações do óleo de xisto a ser produzido.

De modo geral, pode-se dizer que as incertezas nestes dados, aliadas à praticidade de sua formulação, foram os principais motivos responsáveis pela adoção do MOD1.

### 6.3 — A questão da ordenação

Apesar da simplicidade da formulação do MOD1, nas várias tentativas efetuadas só foram obtidos vetores de estado com  $N$  dimensões, o que acarretaria um tempo computacional grande em demasia, uma vez que este é extremamente sensível à dimensão do vetor de estado.

Por outro lado, notou-se que, caso fosse conhecida *a priori* a ordem em que as usinas entrariam em operação, o vetor de estado

<sup>6</sup> Isto mantendo-se as características principais do MOD1, ou seja, a consideração dos efeitos do aprendizado, os aumentos discretos na oferta de óleo de xisto e a sua natureza dinâmica.

poderia ter apenas uma componente, que seria o número de usinas já instaladas.

Um critério de ordenação que parece bastante plausível é aquele segundo os custos de produção de cada usina, de modo que sempre seria escolhida para ser instalada a usina que possuísse os menores custos de produção entre aquelas ainda não instaladas. Entretanto, de acordo com a atual formulação do problema, isto não ocorre necessariamente.

A inexistência de garantias de que, na solução ótima, as usinas com menores custos de produção unitários entrarão em funcionamento primeiro, deve-se às seguintes peculiaridades do modelo:

— A existência de economias retratadas pelas funções de aprendizado. Esta peculiaridade do modelo pode acarretar uma seqüência de instalação das usinas distinta daquela determinada pela ordenação segundo os custos de produção iniciais de duas maneiras: primeiro, pode tornar mais interessante a entrada em operação de uma usina de maior capacidade, apesar de esta possuir um custo de produção maior;<sup>7</sup> segundo, uma vez que as funções de aprendizado possuem, a princípio, efeitos diferenciados sobre o capital e o custo operacional, é possível que ocorram alterações na ordenação das usinas ao longo do processo.

— Como existe um limite máximo para investimento em xisto a cada período, pode ocorrer uma situação em que uma usina com custos de produção menores que as demais, mas com capacidade maior, não possa ser instalada por requerer um investimento acima deste limite.

Para que seja possível afirmar que a solução do MOD1 apresentará as usinas de menor custo de produção entrando em operação antes das demais, conforme será demonstrado a seguir, é suficiente<sup>8</sup> que determinadas condições sejam satisfeitas.

<sup>7</sup> Isto depende, naturalmente, do cenário para os preços do petróleo no mercado internacional e da taxa de desconto considerados.

<sup>8</sup> É importante frisar que tais condições são suficientes, mas não necessárias.

A primeira condição a ser obedecida é que as  $N$  usinas a serem instaladas tenham a mesma capacidade de produção ( $PX_i$ ) e a mesma vida útil ( $TE_i$ ), de modo que a instalação de qualquer uma delas em um dado estágio do processo gere a mesma receita:

$$\left( \sum_{t=h_i+1}^{h_i+TE_i} (1+r)^{-t} PX_i \pi(t) \right)$$

Desta maneira:

$$\begin{cases} PX_i = PX & \forall i \in (1, \dots, N) \\ TE_i = TE & \forall i \in (1, \dots, N) \end{cases}$$

A segunda condição a ser obedecida tem por finalidade assegurar que o efeito diferenciado das funções de aprendizado sobre as parcelas do custo de produção não provocará, no decorrer do processo, alterações na ordenação inicial.

Para um melhor entendimento desta segunda condição é necessário antes que sejam definidas explicitamente as parcelas do custo de produção de óleo de xisto em uma usina de processamento qualquer entre as  $N$  consideradas ( $CP_i, i \in \{1, \dots, N\}$ ). Como está sendo admitido que as usinas terão capacidades iguais (primeira condição), pode-se então trabalhar com o custo de produção em termos globais, que pode ser expresso por:

$$CP_i = K_i F(n_i) + \sum_{t=1}^{TE} (1+r)^{-t} C_i G(n_i)$$

$$CP_i = K_i F(n_i) + \bar{C}_i G(n_i)$$

Sendo que:

$$\bar{C}_i = C_i \frac{1 - (1+r)^{-TE}}{r}$$

representa o custo operacional durante toda a vida útil da usina, considerado no instante de decisão de sua instalação e não levando em conta os efeitos de aprendizado.

A segunda condição estabelece que, se no início do processo a usina  $p$  apresenta custos de produção mais elevados que a usina  $q$ , isto é,  $K_p + \bar{C}_p \geq K_q + \bar{C}_q$ , então a seguinte relação deve ser observada:

$$K_p F(n) + \bar{C}_p G(n) \geq K_q F(n) + \bar{C}_q G(n) \\ \forall n \in \{0, 1, \dots, N\}$$

A terceira condição visa à garantia de que os efeitos do aprendizado serão sempre maiores nas usinas de maiores custos de produção iniciais. Isto é verdade se, sempre que duas usinas forem tais que  $K_p + \bar{C}_p \geq K_q + \bar{C}_q$  for válida a seguinte relação:

$$K_p (F(n) - F(m)) + \bar{C}_p (G(n) - G(m)) \geq K_q (F(n) - \\ - F(m)) + \bar{C}_q (G(n) - G(m))$$

$$\forall (n, m) \in \{0, 1, \dots, N\} \times \{0, 1, \dots, N\} / 0 \leq n < m \leq N$$

O Gráfico 2 permite uma melhor visualização do comportamento dos custos de produção das diversas usinas, caso estas condições sejam obedecidas.

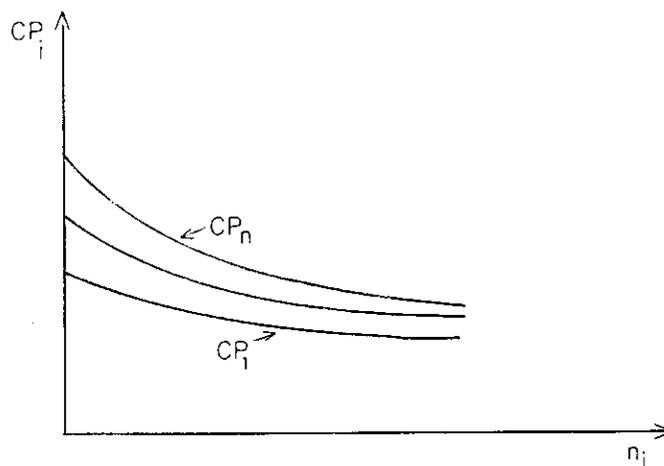
Assim, se uma usina é mais barata no início do processo, continuará sendo até o final (isto é, as curvas não se cruzam) e, em qualquer estágio, a redução observada nos custos de produção será maior na mais "cara" (isto é, as curvas são sempre convergentes).

*Teorema 1* – Para que o MOD1 sem restrição de capital apresente uma solução ótima na qual os períodos de instalação das usinas –  $(h_i)_N$  – estejam ordenados segundo os custos de produção, ou seja,  $CP_p > CP_q \Rightarrow h_p \geq h_q$ , é suficiente que:<sup>9</sup>

$$(I) \quad \left. \begin{array}{l} PX_i = PX \\ TE_i = TE \end{array} \right\} \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

<sup>9</sup> Se as funções de aprendizado forem tais que  $F(n) = G(n)$ ,  $\forall n \in \{0, 1, \dots, N\}$ , as condições (II) e (III) a seguir são automaticamente satisfeitas.

Gráfico 2  
 EFEITO DO APRENDIZADO NOS  
 CUSTOS DE PRODUÇÃO



$$(II) \quad K_p F(n) + \bar{C}_p G(n) \geq K_q F(n) + \bar{C}_q G(n)$$

$$V(p, q) \in \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, N\} / CP_p > CP_q$$

$$\forall n \in \{0, 1, \dots, N\}$$

$$(III) \quad K_p (F(n) - F(m)) + \bar{C}_p (G(n) - G(m)) \geq K_q (F(n) -$$

$$- F(m)) + \bar{C}_q (G(n) - G(m))$$

$$V(p, q) \in \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, N\} / CP_p > CP_q$$

$$V(n, m) \in \{0, 1, \dots, N\} \times \{0, 1, \dots, N\} / n < m$$

*Prova* – Ver apêndice.\*

\* O apêndice, que não foi incorporado à edição deste artigo, encontra-se à disposição dos interessados com os autores no Instituto de Pesquisas do IPEA. (N. do E.)

*Corolário 1* – Seja o MOD1 com uma restrição de capital total,<sup>10</sup> isto é:

$$\sum_{i=1}^N (1+r)^{-hi} K_i F(n_i) \leqslant KTM$$

onde  $KTM$  é o limite máximo para os investimentos em xisto durante todo o processo de instalação de usinas de processamento de xisto (valor presente).

Para que a solução ótima, caso exista, seja tal que  $CP_p > CP_q \Rightarrow h_p \geqslant h_q$  é suficiente que:

- a) as condições (I), (II) e (III) sejam satisfeitas; e
- b)  $K_p \geqslant K_q, \forall (p, q) \in \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, N\} / CP_p > CP_q$ .

*Prova* – Ver apêndice.

*Corolário 2* – Para que o MOD1 apresente solução ótima, caso exista, tal que  $CP_p > CP_q \Rightarrow h_p \geqslant h_q$  é suficiente que:

- a) as condições (I), (II) e (III) sejam satisfeitas;
- b)  $K_{i_1} + \dots + K_{i_m} \leqslant \alpha$ , onde  $(i_1, \dots, i_m)$  são as  $m$  usinas que requerem maior investimento;
- c)  $(K_{i'_1} + \dots + K_{i'_{m+1}}) F(N - m - 1) \geqslant \beta$ , onde  $(i'_1, \dots, i'_{m+1})$  são as  $(m + 1)$  usinas que requerem menor investimento; e
- d)  $\alpha \leqslant KM^t \leqslant \beta, t \in \{0, 1, \dots\}$ , ou seja, em qualquer período podem ser instaladas quaisquer  $m$  usinas, mas em nenhum período podem ser instaladas  $(m + 1)$  usinas.

*Prova* – Ver apêndice.

<sup>10</sup> Ou, em outras palavras, o MOD1 sem uma restrição de capital para cada período, e sim com uma restrição de capital para todos os períodos.

## 6.4 — Modelo ordenado

No sentido de permitir a adoção da hipótese de ordenação *a priori* das usinas, procurou-se determinar sob que circunstâncias seria possível garantir que esta ordenação seria observada na solução ótima do problema, que são aquelas retratadas pelas condições do teorema 1 e seu segundo corolário. No entanto, deve ser ressalvado que, embora de um modo geral seja de se esperar que elas se verifiquem na realidade, pode ser que isto não ocorra e, ao adotar a ordenação, encontre-se um subótimo do problema. Por outro lado, tais condições não são necessárias, sendo que ligeiras transgressões podem não alterar a solução ótima encontrada sob a hipótese de ordenação.

Admitindo, por simplicidade de notação, que, se  $i < j$ , então os custos de produção da usina  $i$  são menores que os da usina  $j$ , pode-se formular o MODI com restrição de ordenação da seguinte forma:

$$\text{Max} \sum_{t=0}^{\infty} (1+r)^{-t} \sum_{i|h_i=t} \left[ \sum_{t'=1}^{TE} (1+r)^{-t'} (\pi(t+t')PX - C_i G(n_i)) - K_i F(n_i) \right]$$

Sujeito a:

$$\sum_{i|h_i=t} K_i F(n_i) \leq KM^t \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\} \quad (\text{restrição de capital})$$

$$h_i \geq h_j \quad \forall (i, j) / i > j \quad (\text{restrição de ordenação})$$

$$n_i = |\{j/h_j < h_i\}|$$

$$h_i \in \{0, 1, \dots\} \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

Devido à restrição de ordenação, pode-se escrever que:

$$n_i = \max \{j/h_j < h_i\}$$

Definindo  $m_t$  o número de usinas instaladas até o período  $t - 1$ , tem-se que:

$$m_t = \max \{j/h_j < t\}$$

Logo:

$$n_i = m_{h_i} \\ \{i/h_i = t\} = \{i/m_t < i \leq m_{t+1}\}$$

Assim, pode-se reescrever o modelo substituindo as variáveis  $\{h_i, i = 1, \dots, N\}$  e  $\{n_i, i = 1, \dots, N\}$  por  $\{m_t, t \in /N\}$ . A Nova formulação torna-se então:

MOD2

$$V = \text{Max} \sum_{t=0}^{\infty} (1+r)^{-t} \sum_{i=m_t+1}^{m_{t+1}} \left[ \sum_{t'=1}^{TE} (1+r)^{-t'} (\pi(t+t')) PX - C_i G(m_t) - K_i F(m_t) \right]$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=m_t+1}^{m_{t+1}} K_i F(m_t) \leq KM^t \quad t \in \{0, 1, \dots\} \\ m_{t_1} \geq m_{t_2} \quad (t_1, t_2) \in \{0, 1\} \times \{0, 1, \dots\} / t_1 > t_2 \\ m_t \in \{0, 1, \dots, N\} \quad t \in \{0, 1, \dots\} \\ m_0 = 0$$

### 6.5 — Formulação como um problema de programação dinâmica

Visando agora à obtenção de formulação do problema através de programação dinâmica, define-se:

$V(l, T)$ : valor máximo do MOD2 quando o horizonte de análise é limitado em  $T$  períodos e é acrescentada a restrição de que o número de usinas a serem instaladas neste horizonte é  $l$  ( $m_{T+1} = l$ );

$F(j, l, t)$ : valor presente do lucro advindo da instalação de  $l - j$  usinas no período  $t$ , dado que já foram instaladas  $j$  usinas anteriormente e que a instalação destas  $l - j$  usinas é viável ( $-\infty$ , caso contrário).

Ou, de um modo formal:

$$V(l, T) = \max \sum_{t=0}^T (1+r)^{-t} \sum_{i=m_t+1}^{m_{t+1}} \left[ \sum_{t'=1}^{TE} (\pi(t+t')PX - C_i G(m_t)) - K_i F(m_t) \right]$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=m_t+1}^{m_{t+1}} K_i F(m_t) \leq KM^t \quad \forall t \in \{0, 1, \dots, T\}$$

$$m_{t_1} \geq m_{t_2} \quad \forall (t_1, t_2) \in \{0, 1, \dots, T+1\} \times \{0, 1, \dots, T+1\} / t_1 > t_2$$

$$m_t \in \{0, 1, \dots, N\} \quad \forall t \in \{0, 1, \dots, T\}$$

$$m_{T+1} = l, m_0 = 0$$

e

$$F(j, l, t) = \begin{cases} \sum_{i=j+1}^l (1+r)^{-t} \left[ \sum_{t'=1}^{TE} (1+r)^{-t'} (\pi(t+t')PX - C_i G(j)) - K_i F(j) \right] \\ \text{se } l > j \text{ e } \sum_{i=j+1}^l K_i F(j) \leq KM^T \\ 0 & \text{se } l = j \\ -\infty & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Com base nestas definições, tem-se que:

$$V(l, T) = F(0, l, T) \quad l \in \{0, 1, \dots, N\}$$

$$V(l, T) = \max \{V(j, T-1) + F(j, l, T), j = 0, 1, \dots, l\}$$

$$V T \in \{2, 3, \dots\}$$

e

$$V = \max \left\{ \lim_{T \rightarrow \infty} V(l, T), l = 0, 1, \dots, N \right\}$$

Esta é, portanto, a fórmula de recorrência para obter a solução do MOD2. No entanto, como pode ser depreendido da última expressão, a programação dinâmica utilizada tem um horizonte infinito, o que, naturalmente, acarreta obstáculos para a sua implementação. No entanto, para algumas situações de interesse é possível a transformação deste horizonte infinito em um horizonte finito, o que é apresentado e demonstrado no teorema a seguir.

A demonstração deste teorema baseia-se fundamentalmente na constatação de que, para cenários razoáveis<sup>11</sup> para o preço do petróleo, o valor dos arcos  $(F(j, l, t))$  positivos deve cair a partir de um horizonte  $T$ , ou seja:

$$F(j, l, t) \leq F(j, l, t') \quad \forall (j, l, t, t') / t \geq t' \geq T \quad \text{e} \quad F(j, l, t') \geq 0$$

Se, ao lado disto, a solução for estável na vizinhança deste horizonte, ou seja,  $V(l, T-1) = V(l, T) \quad \forall l = 0, 1, \dots, N$ , então é simples mostrar que:

$$V = \max \{V(l, T), l = 0, 1, \dots, N\}$$

Certamente, estes fatos não constituem novidade e deve ser possível derivá-los para este caso específico a partir de teoremas mais gerais de programação dinâmica, de modo que a razão de sua apresentação e demonstração neste trabalho não resulta de sua origi-

<sup>11</sup> Ver, na Subseção 6.6, os cenários adotados neste trabalho.

nalidade, mas sim de sua utilidade, uma vez que fornece uma expressão analítica para obtenção do horizonte  $T$ , caso ele exista.

*Teorema 2* – Seja  $b_{i,m}(t) = e^{-\gamma t} (PX \cdot \bar{\pi}(t) - CP_{i,m})$  o benefício líquido acarretado pela instalação da usina  $i$  no ano  $t$ , supondo que  $m$  usinas já haviam sido instaladas anteriormente, onde:

$$\bar{\pi}(t) = \sum_{t'=1}^{TE} e^{-\gamma t'} \cdot \pi(t+t')$$

$$\gamma = \ln(I+r)$$

$$CP_{i,m} = K_i \cdot F(m) + \bar{G}_i \cdot G(m)$$

e  $\pi(t)$  é o preço do petróleo no período  $t$ .

Se  $\pi(t)$  é  $C^2$  de  $R \rightarrow R$  e as seguintes condições são satisfeitas:

a)  $\pi(t) > 0$  e  $\pi'(t) > 0, \forall t > 0$ ;

b) a equação  $h(t) = \frac{\gamma}{PX} \cdot CP_{i,m}$  tem solução única  $t_{i,m}$  para qualquer  $(i, m) \in \{1, \dots, N\} \times \{0, \dots, N-1\}$ , onde:

$$h(t) = \sum_{t'=1}^{TE} e^{-\gamma t'} \cdot [\gamma \cdot \pi(t+t') - \pi'(t+t')] ;$$

c)  $h'(t) > 0, \forall t \in [t_{1,N-1}, t_{N,0}]$ ; e

d)  $\exists T > t_{N,0}, T \in N$ , tal que a seqüência  $\{KM^t, t = T, T+1, \dots\}$  é decrescente e  $V(l, T) = V(l, T-1)$  para  $l = 0, \dots, N$ .

Então, tem-se que:

$$V = V(L, T) = \max \{V(l, T), l = 0, \dots, N\}$$

*Prova* – Ver apêndice.

A tabela a seguir apresenta as restrições sobre os parâmetros das funções  $\pi(t) = ae^{\alpha t}, \alpha > 0$ , e  $\pi(t) = a-be^{-\alpha t}, \alpha > 0$ , para

que as condições "a, b e c" do teorema 2 sejam satisfeitas e apresenta a expressão para o cálculo de  $t_{i,m}$ :

Funções	Restrições	Valor de $t_{i,m}$
$\pi(t) = ae^{\alpha t}$	$a > 0$ $\gamma > \alpha$	$-\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[ \frac{a \cdot (\gamma - \alpha) \cdot PX \cdot \sum_{t'=1}^{TE} e^{(\alpha - \gamma)t'}}{\gamma \cdot CP_{i,m}} \right]$
$\pi(t) = a - be^{-\alpha t}$	$a > b > 0$ $PX \cdot a \cdot \sum_{t'=1}^{TE} e^{-\gamma t'} > CP_{i,m}$	$\frac{1}{\alpha} \ln \left[ \frac{PX \cdot b \cdot (1 + \alpha/\gamma) \cdot \sum_{t'=1}^{TE} e^{-(\gamma + \alpha)t'}}{PX \cdot a \cdot \sum_{t'=1}^{TE} e^{-\gamma t'} - CP_{i,m}} \right]$

Finalmente, há de se dizer que, apesar de computacionalmente muito eficiente, a solução numérica direta do problema de forma recursiva, utilizando-se a equação de Belman, cria dificuldades para a análise de sensibilidade da solução a certos parâmetros. Neste sentido, seria de grande utilidade a obtenção de uma solução total ou parcialmente analítica. Entretanto, mesmo assumindo que as funções de aprendizado para capital e custos operacionais seriam as mesmas e que há inexistência de restrições de capital, o máximo que se obteve foi a condição de otimalidade a seguir, de utilidade bastante discutível:

$$\begin{aligned} & \overline{CP}_{m_t} [F(m_{t-1}) - (1+r)^{-1} F(m_{t-1})] + (1+r)^{-1} \sum_{i=m_t+1}^{m_t+1} \overline{CP}_i [F(m_t) - \\ & - F(m_t - 1)] \leq \Delta R(m_t) \leq \overline{CP}_{m_t+1} [F(m_{t-1}) - \\ & - (1+r)^{-1} F(m_t)] + (1+r)^{-1} \sum_{i=m_t+2}^{m_t+1} \overline{CP}_i [F(m_t+1) - F(m_t)] \quad \forall t \end{aligned}$$

onde:

$$\Delta R(m_t) = PX [\bar{\pi}(t-1) - (1+r)^{-1} \bar{\pi}(t)]$$

$$\overline{CP}_i = K_i + \bar{C}_i$$

No caso de ausência de aprendizado, é possível a obtenção de uma condição de otimalidade mais simples, apresentada a seguir, o que não constitui surpresa, já que neste caso não existe interdependência entre as usinas e os instantes de instalação de cada uma delas podem ser obtidos através de otimizações individuais:

$$\overline{CP}_{m_t} < \frac{\Delta R(m_t, t)}{1 - (1 + r)^{-t}} < \overline{CP}_{m_{t+1}}$$

## 6.6 — Dados

De acordo com o atual nível de conhecimento geológico da Formação Irati e com as expectativas de evolução da tecnologia nos próximos anos, pode ser considerada potencialmente exequível a instalação de sete usinas de processamento de xisto, com uma produção diária em torno de 25.000 barris e uma vida útil de 30 anos (fator de operação = 90%), assim distribuídas e ordenadas:

- duas usinas na região de São Mateus do Sul (usinas 1 e 2);
- duas usinas na região de Dom Pedrito/São Gabriel (usinas 3 e 4);
- duas usinas na região de Papanduva/Três Barras (usinas 5 e 6); e
- uma usina na região de Rio Negro/Rio Iguaçu (usina 7).

Conforme foi citado no início do trabalho, a PETROBRÁS possui estimativas detalhadas de investimentos e custos operacionais para as duas usinas da área de São Mateus do Sul, que constituirão a base de todos os dados deste gênero utilizados nas simulações efetuadas.

Durante o período de funcionamento de uma usina, há a necessidade de troca de diversos equipamentos, o que implica, naturalmente, a existência de reinvestimentos. Nestes trabalhos, os reinvestimentos foram incorporados aos custos operacionais através de sua anualização segundo as taxas de desconto consideradas, julgando-se como investimentos apenas os desembolsos a serem efetuados durante o período de instalação da usina. Desta maneira, o valor

presente do custo operacional por barril e os requisitos de capital por unidade de capacidade (barril por dia de operação), obtidos a partir das estimativas da PETROBRÁS segundo as taxas de desconto adotadas (7,5% a.a., 10% a.a., 12,5% a.a.), são os constantes da Tabela 3.

TABELA 3

*Custo operacional e investimento unitários  
(usina de São Mateus do Sul) – julho de 1980*

$r$ (%)	$K_u$ $\left( \frac{\text{US\$}}{\text{bbl/dia}} \right)$	$CO_u$ (US\$/bbl)
7,5	36.596	12,61
10,0	34.973	12,33
12,5	33.460	12,04

FONTE: PETROBRÁS (1980).

Como nas simulações foram consideradas usinas com capacidade de produção diária ( $p \times d$ ) de 25.000 barris com um fator de operação ( $FO$ ) de 90% e, além disso, o tamanho do período adotado ( $P$ ) foi de cinco anos, tem-se que:

$$K = p \times d \cdot K_u$$

e:

$$C = \sum_{t=0}^{P-1} (1+r)^{-t} 365 \cdot FO \cdot p \times d \cdot CO_u$$

Assim, os dados de investimentos e custos operacionais para as usinas da região de São Mateus do Sul usados neste trabalho são os apresentados a seguir (Tabela 4).

TABELA 4

*Custo operacional e investimento (usina de São Mateus do Sul)*

$r(\%)$	$K$ (US\$. 10 <sup>6</sup> )	$C$ $\left( \frac{\text{US}\$. 10^6}{\text{período}} \right)$
7,5	914,9	450,4
10,0	874,3	422,2
12,5	836,5	396,1

Para as demais usinas, considerou-se uma extrapolação razoável<sup>12</sup> um incremento de 20%, tanto no investimento quanto nos custos operacionais, ao se passar de uma região para outra, segundo a ordenação apresentada (cf. Tabelas 5, 6 e 7).

Finalmente, como é muito comum que as estimativas de custos de empreendimentos deste porte e gênero acabem se verificando inferiores ao que efetivamente se observa na prática, foi considerado um nível de contingências ( $NC$ ), tanto nos custos operacionais quanto no investimento de cada usina, no sentido de incorporar uma margem de segurança a estes dados. Desta maneira, tem-se que:

$$K' = (I + NC) \cdot K$$

$$C' = (I + NC) \cdot C$$

sendo que valores considerados para  $NC$  foram 0, 20, 50 e 100%.

Quanto às funções de aprendizado, foram considerados três diferentes comportamentos para elas, apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10.

<sup>12</sup> Isto com base na sensibilidade dos autores em relação à questão, respaldada pela discussão informal do assunto com alguns membros da equipe técnica da PETROBRÁS.

TABELA 5

*Custo operacional e investimento por usina (r = 10% a.a.)*

$i$	$K_i$	$C_i$
1	874	422
2	874	422
3	1.049	567
4	1.049	507
5	1.259	608
6	1.259	608
7	1.511	730

TABELA 6

*Custo operacional e investimento por usina (r = 7,5% a.a.)*

$i$	$K_i$	$C_i$
1	915	450
2	915	450
3	1.098	541
4	1.098	541
5	1.318	645
6	1.318	645
7	1.581	778

TABELA 7

*Custo operacional e investimento por usina (r = 12,5% a.a.)*

$i$	$K_i$	$C_i$
1	837	396
2	837	396
3	1.004	475
4	1.004	475
5	1.205	570
6	1.205	570
7	1.446	685

TABELA 8

*Função de aprendizado lento*

$n$	0	1	2	3	4	5	6
$F(n)$	1,0	0,95	0,91	0,88	0,85	0,83	0,81
$G(n)$	1,0	0,95	0,91	0,88	0,85	0,82	0,81

TABELA 9

*Função de aprendizado rápido*

$n$	0	1	2	3	4	5	6
$F(n)$	1,0	0,90	0,85	0,83	0,82	0,81	0,81
$G(n)$	1,0	0,90	0,85	0,83	0,82	0,81	0,81

TABELA 10

*Função de aprendizado nulo*

$n$	0	1	2	3	4	5	6
$F(n)$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$G(n)$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

No que tange à questão de disponibilidade de capital, foram consideradas duas situações: uma em que não haveria restrições de capital e outra onde o limite máximo para investimentos em instalação de usinas de xisto seria de 3 bilhões de dólares por período.

No que diz respeito à questão dos preços do petróleo importado, foram considerados cinco cenários:

– cenário 1: uma curva assintótica a 100 dólares por barril, com crescimento inicial de 1% a.a. e preço inicial de US\$ 32/bbl (julho de 1980), ou seja,  $PPA = 100 (1 - 0,68 e^{-0,00472 t})$ ;

– cenário 2: uma curva assintótica a 100 dólares por barril, com crescimento inicial de 5% a.a. e preço inicial de US\$ 32/bbl (julho de 1980), ou seja,  $PPA_2^t = 100 (1 - 0,68 e^{-0,02381 t})$ ;

– cenário 3: uma curva exponencial com crescimento de 1% a.a. e preço inicial de US\$ 32/bbl (julho de 1980), ou seja,  $PPA_3^t = 32.1,01^t$ ;

– cenário 4: uma curva exponencial com crescimento de 2% a.a. e preço inicial de US\$ 32/bbl (julho de 1980), ou seja,  $PPA_4^t = 32.1,02^t$ ;

– cenário 5: uma curva exponencial com crescimento de 3% a.a. e preço inicial de US\$ 32/bbl (julho de 1980), ou seja,  $PPA_5^t = 32.1,03^t$ ; e

– cenário 6: uma curva exponencial com crescimento de 5% a.a., limitada a US\$ 100/bbl, e com preço inicial de US\$ 32/bbl (julho de 1980), ou seja,  $PPA^g = \min (100, 32.1,05^t)$ .

A escolha do limite máximo de 100 dólares por barril nos cenários 1, 2 e 6 foi feita com base em estudos que indicam que ficaria entre 80 e 120 dólares o custo de se produzir em larga escala, por intermédio da liquidação de carvão, a quantidade de energia equivalente a um barril de petróleo.

Os seis cenários de preços do petróleo importado são apresentados no Gráfico 3.

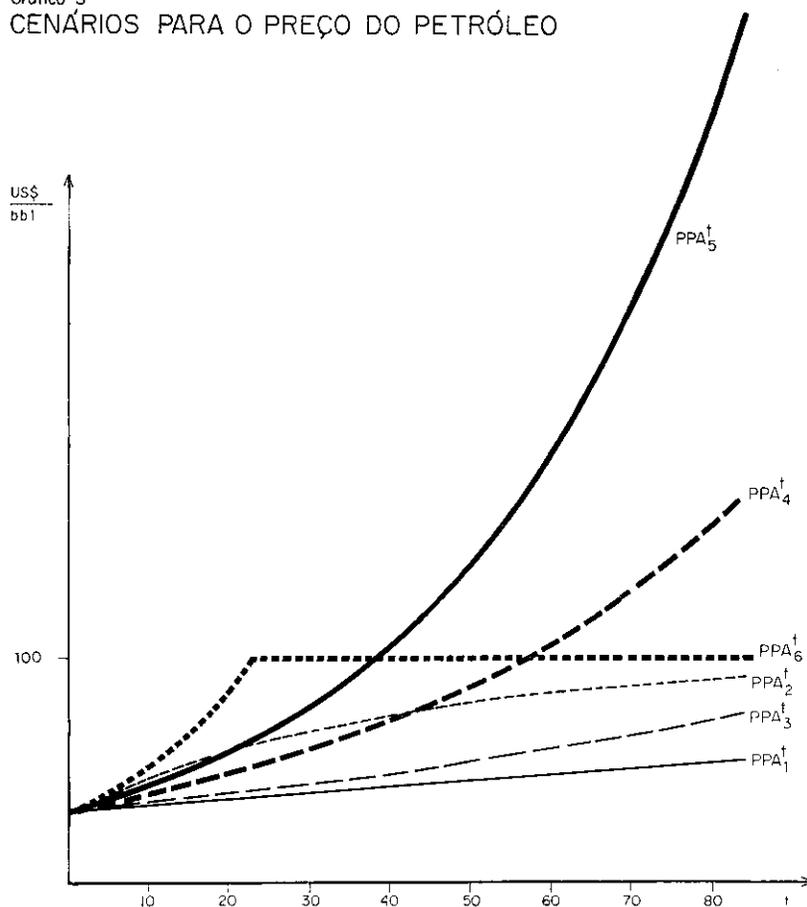
Na realidade, nas simulações efetuadas não foi usado o preço do petróleo importado, e sim o do óleo combustível, uma vez que este será basicamente o produto final das usinas de xisto. Para tanto, corrigiu-se os preços do petróleo apresentados multiplicando-os pela relação  $\frac{27,5}{32}$ , que corresponde à observada entre os preços do óleo combustível e o petróleo no mercado internacional na época

(julho de 1980) em que foram feitas as estimativas de custo da PETROBRÁS (1980).

Além disso, como o período considerado é de cinco anos e o instante escolhido para os cálculos foi o início do período, tem-se que o preço efetivamente utilizado para termos de comparação para cada período e taxa de desconto é:

$$\pi_j(t) = \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 (1+r)^{-i} PPA_j^{5t+i}$$

Gráfico 3  
CENÁRIOS PARA O PREÇO DO PETRÓLEO



Desta maneira, as simulações efetuadas foram:

	Caso-base	Variações
$r$	10,0%	7,5 e 12,5%
$NC$	20%	0,50 e 100%
Função de aprendizado	lento	rápido, nulo
Restrição de capital	com	sem
$\pi$	$\pi_2, \pi_4$	$\pi_1, \pi_3, \pi_5$ e $\pi_6$

Total de simulações: 22.

## 6.7 — Resultados

Uma vez definido o modelo, são agora apresentados os resultados obtidos através de sua utilização. Neste sentido, são mostradas na tabela a seguir as estratégias ótimas de instalação das usinas para cada uma das 22 simulações realizadas, com o objetivo de permitir uma comparação direta dos resultados para uma melhor avaliação do efeito dos diversos parâmetros na solução do problema. São mostradas também, a título de ilustração, as listagens dos *outputs* dos dois casos-base.

Embora em sua maioria os resultados sejam auto-explicativos, cabe aqui salientar alguns pontos. O primeiro deles diz respeito à extrema sensibilidade da solução ao nível das contingências e do cenário de preço do petróleo importado considerados, o que, na verdade, não constitui surpresa, uma vez que todo o desenvolvimento do modelo baseia-se na comparação direta entre os custos de produção do óleo de xisto e o preço do petróleo importado.

Já no que diz respeito à restrição de capital, não houve influência alguma na solução, o que mostra que, para os valores considerados, não houve tendência de aglomeração dos instantes de instalação das usinas, o que também era previsível, pois além da diferença entre seus custos de produção existe uma interligação entre as usinas por intermédio das funções de aprendizado.

Outra constatação é o espalhamento dos períodos de instalação quando não foi considerada a existência de ganhos com o aprendizado. Tal espalhamento é explicado pela inexistência de atenuação

TABELA 11  
*Resultados das simulações (h<sub>1</sub>)*

Usina	$r$												NC						Aprendizado						Restrição de capital					
	Caso-base*			7,5%			12,5%			0%			50%			100%			Rápido			Nulo			Sem			Cenário		
	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$	$\pi_3$	$\pi_4$	$\pi_5$			
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
3	1	2	1	1	1	3	1	1	1	2	4	6	7	1	2	1	2	1	2	5	4	1	1	1	1	1	1			
4	2	3	2	2	4	1	1	2	3	5	7	8	2	3	2	4	2	3	7	5	2	2	2	2	2	2	2			
5	3	4	3	3	5	3	3	4	6	10	10	3	4	3	4	3	5	3	4	11	8	3	3	3	3	3	3			
6	3	4	3	4	3	5	3	3	5	7	11	11	3	4	4	6	3	4	12	9	3	3	3	3	3	3	3			
7	4	5	4	5	6	3	4	6	8	19	12	4	5	6	7	4	5	18	11	4	4	4	4	4	4	4	4			
Economia**	1.852	909	4.530	2.823	605	229	2.861	1.686	694	385	73	108	1.995	1.003	1.443	696	1.852	909	41	112	2.428	4.818	41	112	2.428	4.818	41			

\*Caso-base:  $r = 10\%$  a.a.;

NC = 20%;

Aprendizado = lento;

Restrição de capital = 3.10<sup>9</sup> US\$/período.

\*\*A economia é dada em milhões de dólares.

nos custos de produção das usinas, o que acarreta o retardamento de sua viabilização econômica e faz com que a restrição de capital torne-se ativa, notadamente no caso das últimas usinas.

Quanto às taxas de desconto, o que pode ser percebido na faixa considerada é um grande efeito na economia auferida ao longo do processo, além de um pequeno espalhamento na solução, ambos como era de se esperar.

Finalmente, embora o modelo não se preste propriamente a previsões, em face da diversidade de hipóteses sobre os parâmetros envolvidos, é interessante ressaltar que, para uma vasta gama de simulações efetuadas, a primeira usina, que corresponde à de São Mateus do Sul (Paraná), é instalada logo no primeiro período, o que leva a crer que, assumindo-se a validade das estimativas de custo da PETROBRÁS, os recursos de xisto desta região já são

TABELA 12

Dados — caso-base:  $\pi_2$

Área	Capital sem aprendizado	Custo opera- cional sem apren- dizado	Capa- cidade de produ- ção	Tempo de exaus- tão								
1	1.049	506	41,1	6								
2	1.049	506	41,1	6								
3	1.259	607	41,1	6								
4	1.259	607	41,1	6								
5	1.510	730	41,1	6								
6	1.510	730	41,1	6								
7	1.812	875	41,1	6								
		0	1	2	3	4	5	6				
Atenuação no capital — $F(\cdot)$		1,000	0,950	0,910	0,880	0,850	0,830	0,810				
Atenuação no custo operacional — $G(\cdot)$		1,000	0,950	0,910	0,880	0,850	0,830	0,810				
Período	1 2	3 4	5 6	7 8	9 10	11 12	13 14	15 16				
Preço do petróleo	34 40	45 50	54 57	61 63	66 68	70 72	74 75	76 77				

- NOTAS: -- Tamanho do período considerado: cinco anos.  
 -- Taxa de desconto adotada para o período: 10,0%.  
 -- Número de áreas consideradas: sete.  
 -- Horizonte para instalação de usinas: 10 períodos.  
 -- O capital é dado em milhões de dólares.  
 -- O custo operacional é dado em milhões de dólares/produção de um período.  
 -- A capacidade de produção é dada em milhões de barris por período.  
 -- O tempo de exaustão é dado em número de períodos.  
 -- O preço do petróleo (no primeiro ano do período) é dado em dólares por barril.

passíveis de aproveitamento em condições economicamente viáveis, tornando assim justificáveis investimentos com vistas à sua exploração.

TABELA 13

Resultados 1 — caso-base:  $\pi_2$

Período	Disponibilidade de capital	R	Número de usinas em operação	Produção de óleo de xisto	Benefício líquido por período
1	3.000	0,7	00	0	
2	3.000	0,5	02	50.000	192
3	3.000	0,3	04	100.000	319
4	3.000	0,0	06	150.000	397
5	3.000	0,0	07	175.000	342
6	3.000	0,0	07	175.000	260
7	3.000	0,0	07	175.000	188
8	3.000	0,0	05	125.000	86
9	3.000	0,0	03	75.000	32
10	3.000	0,0	01	25.000	6

NOTAS: -- A disponibilidade de capital é dada em milhões de dólares (valor corrente).  
 -- A produção de óleo de xisto é dada em número de barris por dia.  
 -- O benefício líquido por período é dado em milhões de dólares (valor presente).  
 -- R = Folga de capital no período: capital necessário para instalação da próxima usina.

TABELA 14

Resultados 2 — caso-base:  $\pi_2$

Área	Período de instalação	Período de exaustão	Capacidade de produção	Custo de produção	Capital	Economia
1	1	7	25.000	1.831	1.049	426
2	1	7	25.000	1.831	1.049	426
3	2	8	25.000	1.999	1.146	288
4	2	8	25.000	1.999	1.146	288
5	3	9	25.000	2.241	1.283	170
6	3	9	25.000	2.241	1.283	170
7	4	10	25.000	2.562	1.468	84

NOTAS: — Número de usinas instaladas: sete.  
 — Economia total proporcionada: 1.852 milhões de dólares (valor presente).  
 — A capacidade de produção de cada área é dada em número de barris por dia.  
 — O custo de produção (capital+custo operacional total) é dado em milhões de dólares (valor corrente).  
 — A economia total proporcionada por cada usina é dada em milhões de dólares (valor presente).  
 — O capital (com aprendizado) é dado em milhões de dólares (valor corrente).

## Bibliografia

- BURGER, J. L'exploitation des pyrichistes ou schistes bitumeux: données générales et perspectives d'avenir. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, Paris, 38 (3) :315-72, maio/jun. 1973.
- COSTA NETO, Cláudio. *Perspectivas para o aproveitamento dos xistos oleígenos no Brasil*. Rio de Janeiro, Projeto Xistoquímica/UFRJ, 1978.
- . *Xistos oleígenos: matéria-prima que o Brasil tem*. Rio de Janeiro, Projeto Xistoquímica/UFRJ, 1979.
- DONNEL, John R. *Global oil-shale resources and costs*. Trabalho apresentado na UNITAR Conference on Energy and the Future. Luxemburg, Austria, 1976.
- . *The future supply of nature made petroleum and gas*. New York, Pergamon Press, 1977.
- DUNCAN, Donald C., e SWANSON, Vernon E. *Organic-rich shale of the United States and world land areas*. Survey Circular, 523. Washington, 1965.
- EUA, Department of the Interior. Impact on existing economic and social environment. In: *Final environment regional impacts of oil-shale leasing program: regional impacts of oil-shale development*. Washington, 1973.
- KRAMER, A. J. *Oil shale in Brazil*. Washington, U. S. Department of the Interior, 1950.
- MOREIRA, Homero Baggio. *Xisto, um recurso para complementar a produção de petróleo no Brasil*. Curitiba, PETROBRÁS/SIX, 1978.
- PADULA, Vicente Tomazelli. *Folhetos pirobetuminosos: reservas conhecidas e potenciais*. Trabalho apresentado no Seminário sobre Modelo Energético. Curitiba, set. 1979.

- PETROBRÁS. *Usina industrial do xisto de São Mateus do Sul: 1.ª etapa*. Rio de Janeiro, ago. 1980.
- RIBEIRO, Carlos A. S., et alii. *Xisto: energia em potencial*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, 1964.
- VARISCO, Aldo. *O processo PETROSIX, a usina protótipo de Irati*. Trabalho apresentado nas Conferências do Simpósio sobre Ciência e Tecnologia do Xisto. Curitiba, Academia Brasileira de Ciências, 1971.