

ipea/inpes
Serv. de
Documentação

DOCUMENTO PRELIMINAR
GRUPO DE ENERGIA

Nº 4

"Um Modelo de Crescimento para
a Indústria do Xisto".

Ricardo Paes de Barros
Lauro R. A. Ramos
Fevereiro de 1982

ipea
04-82

Um modelo de crescimento para a
indústria do xisto



RJF0472/85

IPEA - RJ


INSTITUTO DE PLANEJAMENTO
ECONÔMICO E SOCIAL
Serviço de Documentação
F.º 472
Data 05/06/85

Sumário

	pág.
I . Introdução.....	01
II - Formas de Utilização dos Xistos Oleígenos.....	02
III - Recursos Brasileiros de Xisto.....	02
IV - Processo PETROSIX.....	06
V - Impactos Ambientais.....	08
VI - Modelo.....	10
VI.1 - Idéia Básica.....	11
VI.2 - Limitações do Modelo.....	14
VI.3 - A Questão da Ordenação.....	15
VI.4 - Modelo Ordenado.....	27
VI.5 - Formulação como um Problema de Programação Dinâmica.....	29
VI.6 - Dados.....	38
VI.7 - Resultados.....	47
Referências.....	56

I - Introdução

Apesar de não ser uma atividade recente - a indústria do xisto surgiu anteriormente à do petróleo -, devido às amplas vantagens comparativas do petróleo, tanto no plano econômico-tecnológico quanto nos aspectos ecológicos associados ao seu aproveitamento, ela 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.

Entretanto, face às profundas alterações ocorridas no mercado internacional do petróleo na última década, este quadro tende a se modificar, particularmente no caso do Brasil, que tem uma dependência acentuada das importações do produto e cuja ambição de diminuí-la faz com que se possa prever um grande empenho do 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 e sua performance econômica ainda não podem ser perfeitamente avaliados. Além disso, apesar de haver um consenso quanto ao seu potencial como fonte energética alternativa, o debate acerca de sua utilização ainda é limitado, o que se deve em parte à pequena difusão de conhecimentos a respeito de suas peculiaridades e restrições.

II - Formas de Utilização dos Xistos Oleígenos

Em virtude da presença de pequenos teores de matéria orgânica e de diversos minerais em sua composição, os xistos oleígenos possuem uma vasta gama de formas de utilização, tanto energéticas como não energéticas. No Brasil, vem sendo dada ênfase especial para a sua utilização como fonte energética, em que pese a existência de vários grupos engajados na pesquisa de utilizações alternativas (ver |2| e |3|).

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, como os recursos de xistos oleígenos em função de suas peculiaridades não se mostram muito eficientes para a queima direta e a gaseificação e existe, por outro lado, uma grande pressão por parte da demanda de combustíveis líquidos, a produção de óleo tem sido o objetivo básico para o seu aproveitamento. Nesse 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.

III - 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 tal magnitude 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 de arte tal que permitisse a extração do óleo de todas as jazidas em condições economicamente viáveis, o que, entretanto, não se observa no momento.

Os recursos nacionais de xistos oleíferos encontram-se espalhados ao longo do território (ver Figura 1), havendo ocorrências em quase todos os Estados, e são, de maneira geral, mal conhecidos, merecendo destaque, dentre eles, pelo seu potencial, as Formações Curuá (Amazonas, Pará e Amapá) e Irati (Centro-Sul do País). Quanto à Formação Curuá, o conhecimento acerca de suas características é praticamente nulo, sabendo-se apenas que a área de ocorrência é muito grande e que os ensaios de laboratório efetuados a partir de algumas amostras esparsas revelaram que os xistos possuem pequenos teores de matéria orgânica (a PETROBRÁS, pelo menos até o momento, não tem alocado maiores recursos para estudá-la mais detalhadamente). No que concerne à Formação Irati, que se estende desde o Estado de Mato Grosso até a fronteira Brasil-Uruguai com algumas interrupções e variações no número e na espessura das camadas, pode-se dizer que é uma das poucas ocorrências de xisto no Brasil sobre a qual existe um razoável nível de conhecimento.

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, enquanto no sul do Paraná, norte de Santa Catarina e Rio Grande do Sul a formação apresenta duas camadas bem definidas, separadas por uma de material estéril. No entanto, os baixos teores médios de óleo (Rio Grande do Sul) e as intrusões de rochas ígneas (Paraná e Santa Catarina)

FIGURA 1

OCORRÊNCIAS DE XISTO NO BRASIL



- ① Xisto permiano da formação Irati
- ② Xisto terciário do Vale do Paraíba (São Paulo)
- ③ Xisto cretáceo de Marau (Bahia)
- ④ Xisto permiano da formação Santa Brigida (Bahia)
- ⑤ Xisto cretáceo de Alagoas
- ⑥ Xisto cretáceo do Ceará
- ⑦ Xisto cretáceo da formação Codó (Maranhão)
- ⑧ Xisto devoniano da Formação Curuá (Amazonas, Pará e Amapá)

Tabela 1

Recursos e Reservas de Óleo de Xisto por Países

Países	Recursos Conhecidos (10 ⁹ bbl)	Participação (%)	Reservas (10 ⁹ 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	193	100

Fontes: |4| e |5|.

Tabela 2

Reservas Medidas da Formação Irati

Regiões	Capeamento Médio (m)	Relação Xisto/Mat. Es. féril	Teor Médio em Óleo (%)	Potencial de Produtos				Observações
				Óleo (10 ⁶ bbl)	GLP (10 ⁶ t)	Gás Combust. (10m ³)	Enxofre (10 ⁶ t)	
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 ^a camada
Papanduva/ Três Barras	25,0	-	6,8	580	4,0	19,7	9,0	Intrusão em uma parte da 1 ^a 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 ^a camada e elevada percentagem de finos
Total das Reservas				2.018	14,1	68,9	31,4	

Fonte: |9|.

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 exploração industrial na Formação Irati, tendo sido selecionadas até aqui as de São Mateus do Sul (Paraná), Dom Pedrito/São Gabriel (Rio Grande do Sul), Papanduva/Três Barras (Santa Catarina) e rio Negro/rio Iguaçu (Paraná), o que permitiu a medição de reservas da ordem de dois bilhões de barris de óleo de xisto.

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

IV - 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 (retortagem) 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 destes, esta iniciativa não teve êxito, sendo 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 (ver |11| e |12|).

Apesar de adaptar-se às características dos xistos nacionais e de sua simplicidade quando comparado a outras tecnologias, proporcionando ainda uma alta recuperação de óleo, o processo PETROSIX tem um aproveitamento energético ainda distante do máximo possível, uma vez que não permite a utilização dos finos produzidos na britagem, assim como do carbono residual contido no resíduo sólido (xisto retortado), o que poderia ser aplicado para atender à demanda térmica do processo (a energia líquida produzida no processo corresponde a 43% da energia contida no xisto). No entanto, apesar da existência de vários pontos passíveis de aperfeiçoamento com conseqüentes economias, é inquestionável o fato de a PETROBRÁS possuir hoje uma tecnologia de operabilidade já comprovada quando aplicada aos recursos nacionais, o que se revela 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, e da atual fase de instalação da primeira Usina Industrial de Xisto, também em São Mateus do Sul.

Os dados econômicos da Usina Industrial, entretanto, ainda apresentam um considerável grau de incerteza, mas ao encerrar o projeto básico para a sua construção, com capacidade de produção líquida

da anual, em uma primeira etapa, de $1.180 \times 10^3 \text{ m}^3$ de óleo combustível, $120 \times 10^3 \text{ m}^3$ de nafta e $165 \times 10^3 \text{ t}$ de enxofre, a PETROBRÁS estimou em aproximadamente US\$ 1,1 bilhão os investimentos necessários durante o período de construção (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% (ver |10|).

V - 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, pois 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 para contorná-los no caso específico da industrialização do xisto, a principal fonte de preocupação e atenção. Como a dificuldade no acúmulo de experiência é agravada ainda pela grande diferença dos problemas que se verificam nas diversas regiões de ocorrência de xisto, o esforço que vem sendo feito para conhecer e controlar os efeitos da sua industrialização mundialmente e, em particular, no caso americano (ver |6|) 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 SO_2 e material particula-

do. 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, mas há que se ressaltar que o centro das discussões acerca do problema diz respeito ao compromisso entre o custo destes 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, existem possibilidades de contaminação dos recursos hídricos da região, devido à lixiviação das águas pluviais ao percolarem por entre as camadas de material rejeitado (xisto retornado, água de retortagem, finos, etc.), e, além disso, problemas ligados à própria deposição dos rejeitos sólidos (combustão espontânea, alteração do relevo) e à recuperação do solo minerado com vistas à revegetação. A lixiviação e a combustão espontânea são dois problemas que ainda não estão completamente dominados, tendo sido feitas até agora apenas simulações parciais, cujos resultados, por um lado, dão margem a supor que eles podem ser devidamente contornados a custos razoáveis, mas 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 situarem-se em áreas rurais pouco desenvolvidas e sem infra-estrutura básica para atender às necessidades de sua implantação e operação, o que torna indispensável que se dê especial atenção ao 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 este mesmo tipo de situação ocorre em várias atividades correlatas.

VI - 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 de petróleo importado:

$$O(t) = f(t, \pi(0), \pi(1), \dots)$$

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

VI.1 - Idéia Básica

No presente trabalho levou-se em conta que os recursos de xisto de uma determinada região podem ser representados por M áreas de características homogêneas¹ e que para o seu aproveitamento é necessária a instalação de uma ou mais usinas em cada área, perfazendo um total de N usinas. Considerou-se, 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 as da mesma área ou de áreas diferentes².

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

¹ No caso específico a ser apresentado, a região analisada foi a da Formação Irati, sendo a sua divisão em áreas realizada segundo os critérios de caracterização de reservas adotados pela PETROBRÁS e que foram apresentados na Seção III (ver |8| e |9|).

² 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, em virtude do uso simultâneo de algumas unidades. Este inconveniente pode ser parcialmente resolvido através da imputação das variações de custo à segunda usina a ser instalada.

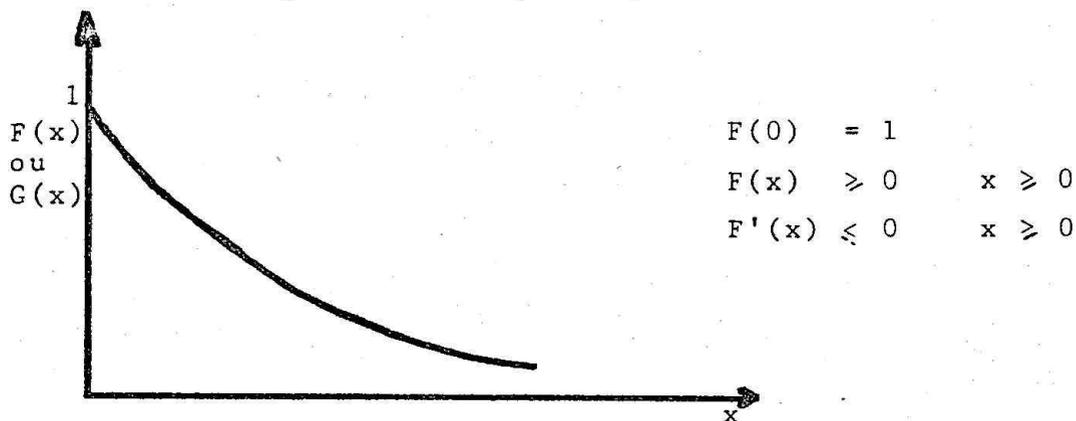
Além disso, incorporou-se ao modelo a existência de economias, tanto nos custos operacionais quanto no capital necessário para a instalação das usinas de processamento de xisto, devido ao acúmulo de experiência na medida em que o número de usinas instaladas vai aumentando. Desta maneira, são consideradas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

$F(x)$ → Índice de atenuação do capital quando o número de usinas já instaladas é x ; e

$G(x)$ → Índice de atenuação nos custos operacionais quando o número de usinas já instaladas é x .

As características e a forma dessas funções-aprendizado são mostradas a seguir (ver Figura 2).

Figura 2 - Funções Aprendizado



Sob as hipóteses apresentadas até aqui, pode-se dizer que a obtenção do esquema ótimo³ de aproveitamento dos recursos de xisto de uma certa região resume-se na determinação dos instantes ótimos de instalação de cada uma das possíveis usinas de processamento de

³ Ótimo sendo entendido aqui como a maximização dos lucros sujeita a restrições de capital.

xisto ou, de maneira mais formal, o problema consiste na determinação de $\{h_i, i = 1, \dots, N\}$, de modo que:

MOD1

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

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 ;⁴

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 ;

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 .

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

Por motivos de praticidade, o tamanho adotado para o período 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.⁵ 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 o seu pequeno porte, a programação dinâmica foi escolhida como a técnica mais recomendável para sua resolução.

VI.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 um 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.

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 segundo regiões consumidoras, que considerasse as estruturas das refinarias e da demanda de cada uma destas regiões, os aspectos da oferta de petróleo nacional e, além disso, os principais parâmetros que

⁵ 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 obrigatoriedade de hipóteses adicionais para a validade desta formulação, conforme será visto mais adiante (subseção VI.6).

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.⁶ 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, alidadas à praticidade de sua formulação, foram os principais motivos responsáveis pela adoção do MOD1.

VI.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 conhecido a priori a ordem em que as usinas entrariam em operação, o vetor de estado poderia ter apenas um componente, que seria o número de usinas já instaladas.

⁶ 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 sua natureza dinâmica.

Um critério de ordenação que parece bastante plausível é o efetuado segundo os custos de produção de cada usina, de modo que sempre seria escolhida para ser instalada aquela que possuísse os menores custos de produção entre as 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:

- o fato de existirem economias retratadas pelas funções de aprendizado pode acarretar uma seqüência de instalação das usinas distinta daquela determinada pela ordenação de acordo com os custos de produção iniciais de duas maneiras: primeiro, pode tornar mais interessante a entrada em operação de uma usina de maior capacidade, apesar desta possuir um custo de produção maior;⁷ 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; e

- 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

⁷ Isto depende, naturalmente, do cenário para os preços do petróleo no mercado internacional e da taxa de desconto considerado.

antes das demais, conforme será demonstrado a seguir, é suficiente⁸ que determinadas condições sejam satisfeitas.

A primeira delas 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 ($\sum_{t=h_i+1}^{h_i+TE_i} (1+r)^{-t} PX_i \pi(t)$).

Desta maneira:

$$PX_i = PX \quad \forall i \in (1, \dots, N)$$

$$TE_i = TE \quad \forall i \in (1, \dots, N)$$

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:

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

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

⁸ É importante frisar que tais condições são suficientes, mas não necessárias.

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:

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 a garantia de que os efeitos de aprendizado serão sempre maiores nas usinas de maiores custos de produção iniciais, o que 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:

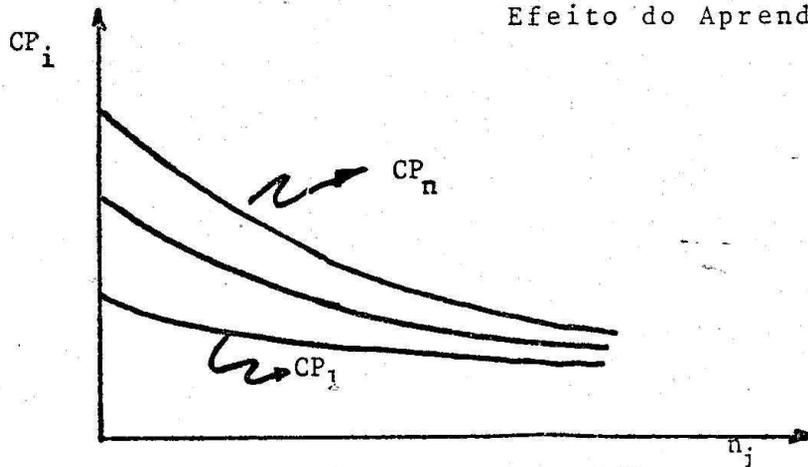
$$K_p (F(n)-F(m)) + \bar{C}_p (G(n)-G(m)) \geq K_q (F(n)-F(m)) + \bar{C}_q (G(n)-G(m)).$$

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

A figura a seguir permite melhor visualização do comportamento dos custos de produção das diversas usinas, caso estas condições sejam obedecidas.

Figura 3

Efeito do Aprendizado nos Custos de Produção



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 - $(h_i)_N$ - sejam ordenados segundo os custos de produção, ou seja:

$$CP_p > CP_q \Rightarrow h_p \geq h_q$$

é suficiente que:⁹

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

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

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

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

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

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

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

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

Prova:

Seja $(\hat{h}_i)_N$ uma solução do MOD1 sem restrição de capital e suponha-se que existe um par (p,q) tal que:

$$CP_p > CP_q \quad \text{e} \quad \hat{h}_p < \hat{h}_q$$

Assim, o valor da função-objetivo pode ser expresso por:

$$V = \sum_{i=1}^N (1+r)^{-\hat{h}_i} \left[\sum_{t'=1}^{TE} (1+r)^{-t'} PX \pi(\hat{h}_i+t') - K_i F(\hat{h}_i) - \bar{C}_i G(\hat{h}_i) \right]$$

ou:

$$V = \sum_{i=1}^N \sum_{t'=1}^{TE} (1+r)^{-(\hat{h}_i+t')} PX \pi(\hat{h}_i+t') - \sum_{i=1}^N (1+r)^{-\hat{h}_i} (K_i F(\hat{h}_i) + \bar{C}_i G(\hat{h}_i))$$

Trocando-se os instantes de instalação das usinas p e q , tem-se uma nova solução $(\bar{h}_i)_N$, definida por:

$$(i) \quad \bar{h}_i = \hat{h}_i \quad \forall i \notin \{p,q\}$$

$$\bar{h}_p = \hat{h}_q$$

$$\bar{h}_q = \hat{h}_p$$

Logo, tem-se que:

$$(ii) \quad \bar{n}_i = \hat{n}_i \quad \forall i \notin \{p, q\}$$

$$\bar{n}_p = \hat{n}_q$$

$$\bar{n}_q = \hat{n}_p$$

onde \bar{n}_i e \hat{n}_i são definidos da mesma forma que n_i (p.11)

O novo valor da função-objetivo é então dado por:

$$V' = \sum_{i=1}^N \sum_{t'=1}^{TE} (1+r)^{-(\bar{h}_i+t')} \text{PX} \pi(\bar{h}_i+t') - \sum_{i=1}^N (1+r)^{-\bar{h}_i} (K_i F(\bar{n}_i) + \bar{C}_i(\bar{n}_i))$$

De (i), tem-se que a troca não altera a receita, ou seja:

$$(iii) \quad \sum_{i=1}^N \sum_{t'=1}^{TE} (1+r)^{-(\bar{h}_i+t')} \text{PX} \pi(\bar{h}_i+t') = \sum_{i=1}^N \sum_{t'=1}^{TE} (1+r)^{-(\hat{h}_i+t')} \text{PX} \pi(\hat{h}_i+t')$$

De (iii), tem-se que:

$$V' - V = (1+r)^{-\hat{h}_p} [K_p F(\hat{n}_p) + \bar{C}_p G(\hat{n}_p)] + (1+r)^{-\hat{h}_q} [K_q F(\hat{n}_q) + \bar{C}_q G(\hat{n}_q)] - \\ - (1+r)^{-\bar{h}_p} [K_p F(\bar{n}_p) + \bar{C}_p G(\bar{n}_p)] - (1+r)^{-\bar{h}_q} [K_q F(\bar{n}_q) + \bar{C}_q G(\bar{n}_q)]$$

De (i) e (ii), tem-se que:

$$V' - V = (1+r)^{-\hat{h}_p} [(K_p - K_q) F(\hat{n}_p) + (\bar{C}_p - \bar{C}_q) G(\hat{n}_p)] - \\ - (1+r)^{-\hat{h}_q} [(K_p - K_q) F(\hat{n}_q) + (\bar{C}_p - \bar{C}_q) G(\hat{n}_q)]$$

Logo:

$$\frac{V' - V}{(1+r)^{-\hat{h}_p}} = (K_p - K_q) F(\hat{n}_p) + (\bar{C}_p - \bar{C}_q) G(\hat{n}_p) - (1+r)^{\hat{h}_p - \hat{h}_q} \left[(K_p - K_q) F(\hat{n}_q) + (\bar{C}_p - \bar{C}_q) G(\hat{n}_q) \right]$$

Por construção, $(1+r)^{\hat{h}_p - \hat{h}_q} < 1$ e, por (II):

$$(K_p - K_q) F(\hat{n}_q) + (\bar{C}_p - \bar{C}_q) G(\hat{n}_q) \geq 0$$

Logo:

$$\frac{V' - V}{(1+r)^{-\hat{h}_p}} \geq (K_p - K_q) F(\hat{n}_p) + (\bar{C}_p - \bar{C}_q) G(\hat{n}_p) - (K_p - K_q) F(\hat{n}_q) - (\bar{C}_p - \bar{C}_q) G(\hat{n}_q)$$

$$\therefore \frac{V' - V}{(1+r)^{-\hat{h}_p}} \geq (K_p - K_q) \left[F(\hat{n}_p) - F(\hat{n}_q) \right] + (\bar{C}_p - \bar{C}_q) \left[G(\hat{n}_p) - G(\hat{n}_q) \right]$$

Por (III), tem-se que:

$$\frac{V' - V}{(1+r)^{-\hat{h}_p}} \geq 0 \Rightarrow V' - V \geq 0$$

$$\therefore V' \geq V$$

Assim, qualquer solução $(\hat{h}_i)_N$ que apresente um par $(p,q)/CP_p > CP_q$ e $\hat{h}_p < \hat{h}_q$ pode ser melhorada fazendo-se $\bar{h}_p = \hat{h}_p$ e $\bar{h}_q = \hat{h}_p$. Logo, a solução ótima, caso exista, deve ser tal que:

$$CP_p > CP_q \Rightarrow h_p \geq h_q$$

Corolário 1:

Seja o MOD1 com uma restrição de capital total,¹⁰ isto é:

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

onde:

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

Para que a solução ótima, caso exista, seja tal que:

$$CP_p > CP_q \Rightarrow h_p > h_q$$

é suficiente que:

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

Prova:

Seja $(\hat{h}_i)_N$ uma solução do MOD1 com restrição de capital total e suponha-se que exista um par (p,q) tal que:

$$CP_p > CP_q \text{ e } \hat{h}_p < \hat{h}_q$$

Como já foi provado no teorema anterior que trocando os instantes de instalação das usinas p e q obtém-se uma nova solução $(\bar{h}_i)_N$ que melhora o valor da função objetivo, basta então mostrar que esta nova solução mantém viável a restrição de capital total.

¹⁰ Ou seja, o MOD1 sem uma restrição de capital para cada período, e sim com uma restrição de capital para todos os períodos.

Ora, para a solução $(\hat{h}_i)_N$ tem-se que o total de capital despendido (valor presente) é:

$$KT = \sum_{i=1}^N (1+r)^{-\hat{h}_i} K_i F(\hat{n}_i) \leq KTM$$

A nova solução $(\bar{h}_i)_N$, como já visto, é tal que:

$$(a) \quad \bar{h}_i = \hat{h}_i \quad \forall i \neq \{p, q\}$$

$$\bar{h}_p = \hat{h}_q$$

$$\bar{h}_q = \hat{h}_p$$

$$(b) \quad \bar{n}_i = \hat{n}_i \quad \forall i \neq \{p, q\}$$

$$\bar{n}_p = \hat{n}_q$$

$$\bar{n}_q = \hat{n}_p$$

Portanto:

$$KT' = \sum_{i=1}^N (1+r)^{-\bar{h}_i} K_i F(\bar{n}_i)$$

Assim:

$$KT' - KT = (1+r)^{-\bar{h}_p} K_p F(\bar{n}_p) + (1+r)^{-\bar{h}_q} K_q F(\bar{n}_q) - (1+r)^{-\hat{h}_p} K_p F(\hat{n}_p) - (1+r)^{-\hat{h}_q} K_q F(\hat{n}_q)$$

De (a) e (b), tem-se que:

$$KT' - KT = K_p \left[(1+r)^{-\bar{h}_q} F(\bar{n}_q) - (1+r)^{-\hat{h}_p} F(\hat{n}_p) \right] + K_q \left[(1+r)^{-\hat{h}_p} F(\hat{n}_p) - (1+r)^{-\bar{h}_q} F(\bar{n}_q) \right]$$

$$\therefore KT' - KT = (K_p - K_q) \left[(1+r)^{-\bar{h}_q} F(\bar{n}_q) - (1+r)^{-\hat{h}_p} F(\hat{n}_p) \right]$$

Mas, por construção:

$$\hat{h}_p < \hat{h}_q \Rightarrow (1+r)^{-\hat{h}_p} \geq (1+r)^{-\hat{h}_q}$$

e
$$\hat{n}_p < \hat{n}_q \Rightarrow F(\hat{n}_p) \geq F(\hat{n}_q)$$

Portanto:

$$(1+r)^{-\hat{h}_q} F(\hat{n}_q) - (1+r)^{-\hat{h}_p} F(\hat{n}_p) \leq 0$$

Como, por hipótese, $CP_p > CP_q$, por (ii) tem-se que:

$$K_p \geq K_q \Rightarrow K_p - K_q \geq 0$$

Logo:

$$KT' < KT \Rightarrow KT' \leq KTM$$

Assim, uma vez que a nova solução $(\bar{h}_i)_N$ mantém viável a restrição de capital total, qualquer solução $(\hat{h}_i)_N$ que apresente um par $(p,q)/CP_p > CP_q$ e $\hat{h}_p < \hat{h}_q$ pode ser melhorada trocando-se os instantes de instalação das usinas p e q , permanecendo viável.

Logo, a solução ótima, caso exista, deve ser tal que:

$$CP_p > CP_q \Rightarrow h_p \geq h_q$$

cqd

Corolário 2:

Para que o MOD1 apresente solução ótima, caso exista, tal que:

$$CP_p > CP_q \Rightarrow h_p > h_q$$

é suficiente que:

- (i) as condições (I), (II) e (III), sejam satisfeitas;
- (ii) $K_{i_1} + \dots + K_{i_m} \leq \alpha$, onde (i_1, \dots, i_m) são as m usinas que requerem maior investimento;
- (iii) $(K_{i'_1} + \dots + K_{i'_{m+1}}) F(N-m-1) \geq \beta$, onde (i'_1, \dots, i'_{m+1}) são as $(m+1)$ usinas que requerem menor investimento; e
- (iv) $\alpha \leq KM^t \leq \beta \quad t \in \{0, 1, \dots\}$.

Isto quer dizer que em qualquer período podem ser instaladas quaisquer m usinas, mas em nenhum período podem ser instaladas $(m+1)$ usinas.

Prova:

Seja $(\hat{h}_i)_N$ uma solução do MOD1 e suponha-se que existe um par (p, q) tal que:

$$CP_p > CP_q \quad e \quad \hat{h}_p < \hat{h}_q$$

Como já foi provado que trocando os instantes de instalação das usinas p e q , a nova solução assim obtida - $(\bar{h}_i)_N$ - melhora o valor da função objetivo, é necessário somente provar que esta nova solução mantém viável a restrição de capital.

De (iii) e (iv), é imediato que tem-se no máximo m usinas instaladas no período \hat{h}_p , assim como no período \hat{h}_q .

Ora, trocando os instantes de instalação das usinas p e q , continua-se tendo no máximo m usinas instaladas nestes períodos.

Mas de (ii) e (iv) tem-se que essas usinas, quaisquer que sejam elas, satisfazem a restrição de capital. Logo, a nova solução $(\bar{h}_i)_N$ mantém viável a restrição de capital.

Desta maneira, qualquer solução $(\hat{h}_i)_N$ que apresente um par $(p, q) / CP_p > CP_q$ e $\hat{h}_p < \hat{h}_q$ pode ser melhorada trocando-se os instantes de instalação das usinas p e q , permanecendo viável.

Logo, a solução ótima, caso exista, deve ser tal que:

$$CP_p > CP_q \Rightarrow h_p \geq h_q$$

cqd

VI.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 ressaltado que, embora de 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-se, 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

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

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

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

$$m_0 = 0$$

VI.5 - Formulação como um Problema de Programação Dinâmica

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

$V(\ell, T)$: 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 ($m_{T+1} = \ell$); e

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

Ou, de modo formal:

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

sujeito a:

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

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

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

$$m_{T+1} = \ell, \quad m_0 = 0$$

e

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

Com base nestas definições, tem-se que:

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

$$V(\ell, T) = \max \{V(j, T-1) + F(j, \ell, T), j=0, 1, \dots, \ell\} \quad \forall T \in \{2, 3, \dots\}$$

e

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

Esta é, assim, 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. Entretanto, 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 razoáveis¹¹ para o preço do petróleo, o valor dos arcos $(F(j, \ell, t))$ positivos deve cair a partir de um horizonte T , ou seja:

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

Se, ao lado disto, a solução for estável na vizinhança deste horizonte, ou seja:

$$V(\ell, T-1) = V(\ell, T) \quad \forall \ell=0, 1, \dots, N$$

então é simples mostrar que:

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

¹¹ Ver, na subseção VI.6, os cenários adotados neste trabalho.

Certamente estes fatos não constituem novidade, devendo 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 originalidade, 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:

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

$$\gamma = \ln(1+r)$$

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

$\pi(t) \rightarrow$ preço do petróleo no período t

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

(i) $\pi(t) > 0$ e $\pi'(t) > 0 \quad \forall t > 0$

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

onde:

$$h(t) = \sum_{t'=1}^{TE} e^{-\gamma t'} \left| \gamma \cdot \pi(t+t') - \pi'(t+t') \right|$$

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

(iv) $\exists T > t_{N,0}$, $T \in \mathbb{N}$ tal que a sequência

$\{KM^t, t = T, T+1, \dots\}$ é decrescente e

$$V(\ell, T) = V(\ell, T-1) \text{ para } \ell = 0, \dots, N$$

então tem-se que:

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

Prova:

(A) Derivando-se $b_{i,m}(t)$, tem-se que:

$$b'_{i,m}(t) = e^{-\gamma t} [\gamma \cdot CP_{i,m} - PX \cdot h(t)]$$

$$b''_{i,m}(t) = -\gamma \cdot b'_{i,m}(t) - e^{-\gamma t} \cdot PX \cdot h'(t)$$

Por (ii), tem-se que $t_{i,m}$ é a solução única da equação

$$b'_{i,m}(t) = 0$$

Por (iii), e desde que $b'_{i,m}(t_{i,m}) = 0$, tem-se que

$b''_{i,m}(t_{i,m}) < 0$. Logo, $t_{i,m}$ é o único ponto de máximo de $b_{i,m}(t)$.

(B) Para $\forall t' > T, t' \in \mathbb{N}$, a função $F(\ell, j, t)$ é tal que:

a) se $\ell < j$, por definição $F(\ell, j, t) = -\infty$ logo

$$F(\ell, j, t) \leq F(\ell, j, t') \text{ para } \forall t > t', t \in \mathbb{N}$$

b) se $\ell = j$, por definição $F(\ell, j, t) = 0$ logo

$$F(\ell, j, t) \leq F(\ell, j, t') \text{ para } \forall t > t', t \in \mathbb{N}$$

c) se $\ell > j$ e $\sum_{i=j+1}^{\ell} K_i \cdot F(j) > KM^{t'}$ então por (iv)

$$\sum_{i=j+1}^{\ell} K_i \cdot F(j) > KM^t \text{ por } \forall t > t' \quad t \in \mathbb{N} \text{ logo}$$

$$F(\ell, j, t) = -\infty \quad \forall t \geq t' \quad \text{logo}$$

$$F(\ell, j, t) \leq F(\ell, j, t') \text{ para } \forall t > t', t \in \mathbb{N}$$

d) se $\ell > j$ e $\sum_{i=j+1}^{\ell} K_i \cdot F(j) \leq KM^{t'}$ então

$$\sum_{i=j+1}^{\ell} b_{i,j}(t') = F(\ell, j, t')$$

e

$$\sum_{i=j+1}^{\ell} b_{i,j}(t) \geq F(\ell, j, t) \quad \forall t \geq t'$$

Por (ii) e (iii), tem-se que:

se $CP_{i,m} \geq CP_{j,l}$, então $t_{i,m} \geq t_{j,l}$ e, como

$$CP_{N,0} \geq CP_{i,m} \quad \text{para } \forall (i,m) \in \{1, \dots, N\} \times \{0, \dots, N-1\}$$

tem-se que $t_{i,m} \leq t_{N,0}$ para $\forall (i,m) \in \{1, \dots, N\} \times \{0, \dots, N-1\}$

como $b'_{i,m}(t) \leq 0$ para $t \geq t_{i,m}$.

Por (iv) $T > t_{N,0}$, tem-se que:

$$b_{i,m}(t) \leq b_{i,m}(t') \quad \forall t \geq t' \quad t \in \mathbb{N}$$

Logo:

$$F(\ell, j, t') = \sum_{i=j+1}^{\ell} b_{i,j}(t') \geq \sum_{i=j+1}^{\ell} b_{i,j}(t) \geq F(\ell, j, t)$$

Assim, em qualquer situação, tem-se que:

$$(v) \quad F(\ell, j, t') \geq F(\ell, j, t) \quad \forall t' \geq T \text{ e } \forall t \geq t'$$

$$(c) \quad \text{por (iv), } V(\ell, T) = V(\ell, T-1) \quad \forall \ell \in \{0, \dots, N\}$$

$$\text{e, por (v) } F(\ell, j, T) \geq F(\ell, j, T+1) \quad \forall (\ell, j) \in \{0, \dots, N\} \times \{0, \dots, N\}$$

Logo, tem-se que

$$V(\ell, T+1) \leq V(\ell, T) \quad \forall \ell \in \{0, \dots, N\}$$

Como, por definição, $F(\ell, \ell, t) = 0 \quad \forall \ell, t,$ logo

$$V(\ell, T+1) \geq V(\ell, T)$$

Assim, $V(\ell, T+1) = V(\ell, T)$

Por indução, utilizando-se (v) pode-se mostrar que:

$$V(\ell, t) = V(\ell, T) \text{ para } \forall t \geq T, \quad t \in \mathbb{N}, \quad \ell \in \{0, \dots, N\}$$

Logo, como por definição:

$$V = \max \left\{ \lim_{t \rightarrow \infty} V(\ell, t), \quad \ell = 0, 1, \dots, N \right\}$$

tem-se que:

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

cqd

A tabela a seguir apresenta as restrições sobre os parâmetros das funções

$$(1) \pi(t) = a e^{\alpha t} \quad \alpha > 0$$

$$(2) \pi(t) = a - b e^{-\alpha t} \quad \alpha > 0$$

para que as condições (i), (ii) e (iii) do Teorema 2 sejam satisfeitas e apresenta a expressão para o cálculo de $t_{i,m}$.

Função	Restrições	Valor de $t_{i,m}$
(1)	$a > 0$ $\gamma > \alpha$	$-\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[\frac{a \cdot (\gamma - \alpha) \cdot \text{PX} \cdot \sum_{t'=1}^{\text{TE}} e^{(\alpha - \gamma)t'}}{\gamma \cdot \text{CP}_{i,m}} \right]$
(2)	$a > b > 0$ $\text{PX} \cdot a \sum_{t'=1}^{\text{TE}} e^{-\gamma t'} > \text{CP}_{i,m}$	$\frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{\text{PX} \cdot b \cdot (1 + \alpha / \gamma) \cdot \sum_{t'=1}^{\text{TE}} e^{-(\gamma + \alpha)t'}}{\text{PX} \cdot a \cdot \sum_{t'=1}^{\text{TE}} e^{-\gamma t'} - \text{CP}_{i,m}} \right]$

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 pressupondo a inexistência de restrições de capital e, também, de que as funções de aprendizado para capital e custos operacionais seriam as mesmas, o máximo que se obteve foi a condição de otimalidade a seguir, de utilidade bastante discutível:

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

onde:

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

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

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:

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

VI.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 deste 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, levando-se em conta 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:

Tabela 4

Custo Operacional e Investimento Unitários (Usina de São Mateus do Sul)

Julho/80

r (%)	K_u ($\frac{US\$}{bb1/do}$)	CO_u (US\$/bb1)
7,5	36.596	12,61
10	34.973	12,33
12,5	33.460	12,04

FONTE: |10|.

Como nas simulações foram consideradas usinas com capacidade de produção diária (pxd) 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:

$$K = pxd \cdot K_u$$

e

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

Assim, os dados de investimentos e custos operacionais para as usinas da região de São Mateus do Sul usados neste trabalho são:

Tabela 5

Custo Operacional e Investimento (Usina de São Mateus do Sul)

r (%)	K (US\$.10 ⁶)	C ($\frac{\text{US$.10}^6}{\text{período}}$)
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 um incremento de 20%, tanto no investimento quanto nos custos operacionais, ao se passar de uma região para outra segundo a ordenação apresentada (ver Tabelas 3, 4 e 5).

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:

$$K' = (1+NC).K$$

$$C' = (1+NC).C$$

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

Tabela 6
Custo Operacional e Investimento por Usina (r=10% a.a.)

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

Tabela 7
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 8
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

Quanto as funções de aprendizado, foram consideradas três diferentes comportamento para elas, apresentadas nas tabelas a seguir.

Tabela 9

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	0.83	0.81

Tabela 10

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 11

Função de Aprendizado Nulo

n	0	1	2	3	3	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 três bilhões de dólares por período.

No que diz respeito à questão dos preços do petróleo importado, foram considerados seis 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/80), ou seja:

$$PPA_1^t = 100 (1 - 0,68 e^{-0,00472 t})$$

- 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/80), 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 80), ou seja:

$$PPA_3^t = 32. 1,01^t$$

- Cenário 4: uma curva exponencial de crescimento de 2% a.a. e preço inicial de US\$ 32/bbl (julho de 80), 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/80), ou seja:

$$PPA_5^t = 32. 1,03^t$$

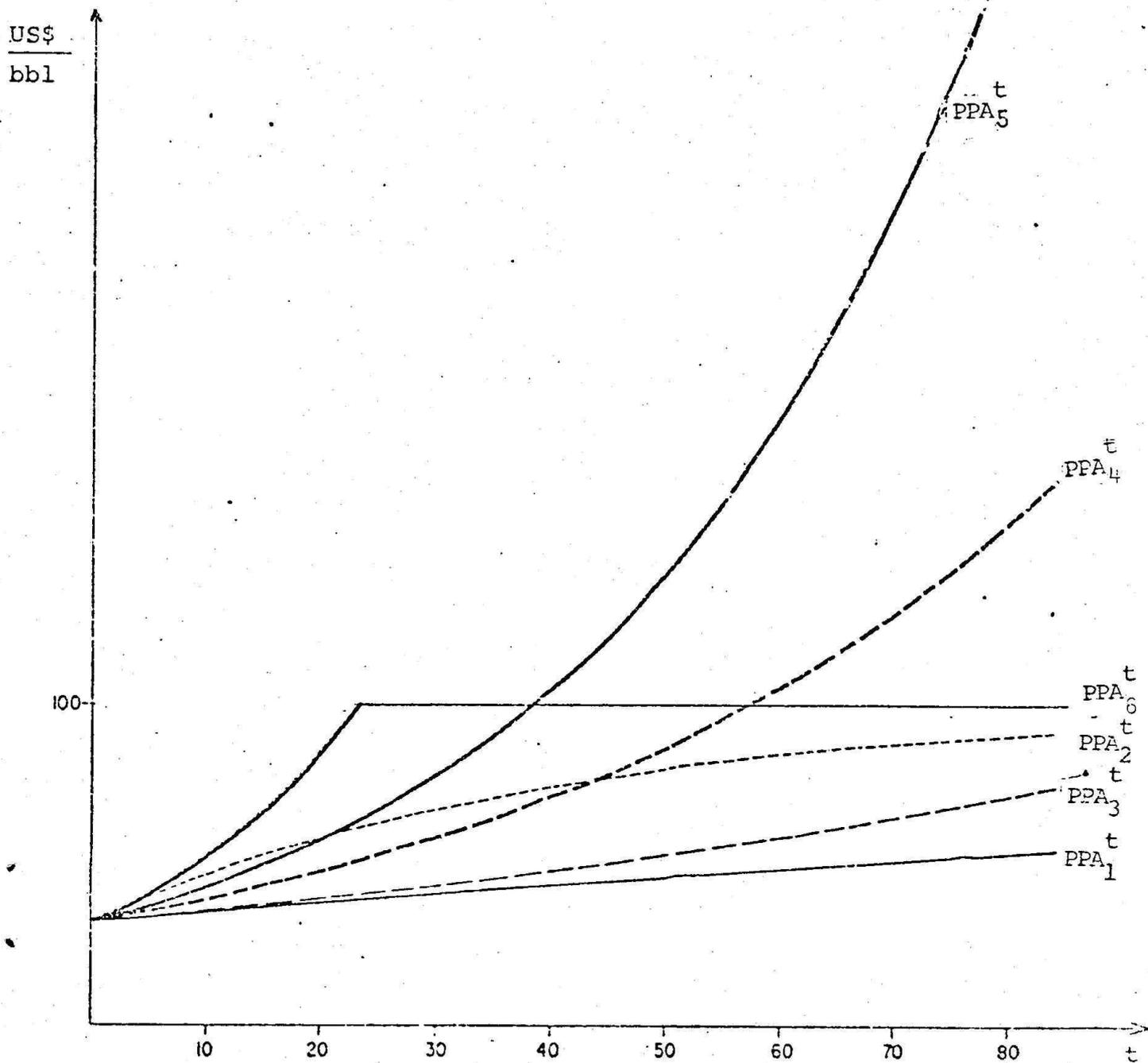
- Cenário 6: uma curva exponencial com crescimento de 5% a.a. limitada a US\$ 100/bbl e preço inicial de US\$ 32/bbl (julho/80), ou seja:

$$PPA_6^t = \min (100, 32. 1,05^t)$$

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.

Figura 4

Cenários para o Preço do Petróleo



Os seis cenários de preços do petróleo importado são apresentados na Figura 4.

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 do petróleo no mercado internacional na época em que foram feitas as estimativas de custo da PETROBRÁS (julho/80) |10|.

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:

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

Desta maneira, as simulações efetuadas foram:

r	Caso-Base 10,0%	Variações 7,5% e 12,5%
NC	20%	0%, 50% e 100%
função de aprendizado	lento	rápido, nulo
restrição de capital	com	sem
π	π_2, π_4	π_1, π_3, π_5 e π_6

Total de Simulações: 22.

VI.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 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 de contingências e 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, para os valores considerados, ter havido 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 nos custos de produção das usinas, o que acarreta o retardamento de sua via

Tabela 12
RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

USINA	CASO BASE		r				NC						APRENDIZADO				REST.DE CAPITAL		CENÁRIO			
			7,5%		12,5%		0%		50%		100%		Rápido		Nulo		Sem					
CENÁRIO	π_2	π_4	π_2	π_4	π_2	π_4	π_2	π_4	π_2	π_4	π_2	π_4	π_2	π_6	π_2	π_4	π_2	π_4	π_1	π_3	π_5	π_6
1	01	01	01	01	01	02	01	01	01	03	05	06	01	01	01	02	01	01	04	03	01	01
2	01	02	01	01	01	03	01	01	02	04	06	07	01	02	01	02	01	02	05	04	01	01
3	02	03	02	02	02	04	01	02	03	05	07	08	02	03	02	04	02	03	07	05	02	02
4	02	03	02	02	02	04	02	02	03	05	08	09	02	03	02	04	02	03	08	06	02	02
5	03	04	03	03	03	05	02	03	04	06	10	10	03	04	03	05	03	04	11	08	03	03
6	03	04	03	04	03	05	03	03	05	07	11	11	03	04	04	06	03	04	12	09	03	03
7	04	05	04	05	05	06	03	04	06	08	19	12	04	05	06	07	04	05	18	11	04	04
Economia	1852	909	4530	2823	605	229	2861	1686	694	385	73	108	1995	1003	1443	696	1852	909	41	112	2428	4818

* A economia é dada em milhões de dólares

** Caso base: r: 10% aa.

NC = 20%

Aprendizado: lento

Restrição de capital: $3 \cdot 10^9$ US\$/período

bilização 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, como era de se esperar.

Finalmente, embora o modelo não se preste propriamente a previsões face à diversidade de hipóteses sobre os parâmetros envolvidos, é interessante ressaltar que, para uma vasta gama de simulações efetuadas, a primeira usina, que corresponde à Usina de São Mateus do Sul (Paraná), é instalada logo no primeiro período, o que leva a crer que, presumindo-se a validade das estimativas de custo da PETROBRÁS, os recursos de xisto desta região já são passíveis de aproveitamento em condições economicamente viáveis, tornando assim justificáveis investimentos com vistas à sua exploração.

 DADOS

TAMANHO DO PERIODO CONSIDERADO : 5 ANOS
 TAXA DE DESCONTO ADOPTADA PARA O PERIODO : 10.0%
 NUMERO DE AREAS CONSIDERADAS : 07
 HORIZONTE PARA INSTALACAO DAS USINAS : 10 PERIODOS

AREA	CAPITAL SEM APRENDIZADO	CUSTO OPERACIONAL SEM APRENDIZADO	CAPACIDADE DE PRODUCAO	TEMPO DE EXAUSTAO
01	1049	506	41.1	6
02	1049	506	41.1	6
03	1259	607	41.1	6
04	1259	607	41.1	6
05	1510	730	41.1	6
06	1510	730	41.1	6
07	1812	875	41.1	6

	0	1	2	3	4	5	6
ATENUACAO NO CAPITAL - F(.) -	1.000	.950	.910	.880	.850	.830	.810
ATENUACAO NO CUSTO OPERACIONAL - G(.) -	1.000	.950	.910	.880	.850	.830	.810

PERIODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
PRECO DO PETROLEO	34	40	45	50	54	57	61	63	66	68	70	72	74	75	76	77

- O CAPITAL E DADO EM MILHOES DE DOLARES
- O CUSTO OPERACIONAL E DADO EM MILHOES DE DOLARES / PRODUCAO DE UM PERIODO
- A CAPACIDADE DE PRODUCAO E DADA EM MILHOES DE BARRIS POR PERIODO
- O TEMPO DE EXAUSTAO E DADO EM NUMERO DE PERIODOS
- O PRECO DO PETROLEO (NO PRIMEIRO ANO DO PERIODO) E DADO EM DOLARES POR BARRIL

CASO BASE: π_2

 RESULTADOS-1

PERIODO	DISPONIBILIDADE DE CAPITAL	R	NO DE USINAS EM OPERACAO	PRODUCAO DE OLEO DE XISTO	BENEFICIO LIQUIDO POR PERIODO
01	3000	0.7	00	0	
02	3000	0.5	02	50000	192
03	3000	0.3	04	100000	349
04	3000	0.0	06	150000	397
05	3000	0.0	07	175000	342
06	3000	0.0	07	175000	260
07	3000	0.0	07	175000	188
08	3000	0.0	05	125000	86
09	3000	0.0	03	75000	32
10	3000	0.0	01	25000	6

- A DISPONIBILIDADE DE CAPITAL E DADA EM MILHOES DE DOLARES (VALOR CORRENTE)
- A PRODUCAO DE OLEO DE XISTO E DADA EM NUMERO DE BARRIS POR DIA
- O BENEFICIO LIQUIDO POR PERIODO E DADO EM MILHOES DE DOLARES (VALOR PRESENTE)
- R = FOLGA DE CAPITAL NO PERIODO / CAPITAL NECESSARIO PARA INSTALACAO DA PROXIMA USINA.

CASO BASE: π_2

 RESULTADOS-2

NUMERO DE USINAS INSTALADAS : 07

ECONOMIA TOTAL PROPORCIONADA : 1852 MILHOES DE DOLARES (VALOR PRESENTE)

AREA	PERIODO DE INSTALACAO	PERIODO DE EXAUSTAO	CAPACIDADE DE PRODUCAO	CUSTO DE PRODUCAO	CAPITAL	ECONOMIA
01	01	07	25000	1831	1049	426
02	01	07	25000	1831	1049	426
03	02	08	25000	1999	1146	288
04	02	08	25000	1999	1146	288
05	03	09	25000	2241	1283	170
06	03	09	25000	2241	1283	170
07	04	10	25000	2562	1448	84

- A CAPACIDADE DE PRODUCAO DE CADA AREA E DADA EM NUMEROS DE BARRIS POR DIA
- O CUSTO DE PRODUCAO (CAPITAL+CUSTO OPERACIONAL TOTAL) E DADO EM MILHOES DE DOLARES (VALOR CORRENTE)
- A ECONOMIA TOTAL PROPORCIONADA POR CADA USINA E DADA EM MILHOES DE DOLARES (VALOR PRESENTE)
- O CAPITAL (COM APRENDIZADO) E DADO EM MILHOES DE DOLARES (VALOR CORRENTE)

CASO BASE: π_4

DADOS

TAMANHO DO PERIODO CONSIDERADO : 5 ANOS
TAXA DE DESCONTO ADOPTADA PARA O PERIODO : 10,0%
NUMERO DE AREAS CONSIDERADAS : 07
HORIZONTE PARA INSTALACAO DAS USINAS : 10 PERIODOS

AREA	CAPITAL SEM APRENDIZADO	CUSTO OPERACIONAL SEM APRENDIZADO	CAPACIDADE DE PRODUCAO	TEMPO DE EXAUSTAO
01	1049	504	41.1	6
02	1049	506	41.1	6
03	1259	607	41.1	6
04	1259	607	41.1	6
05	1510	730	41.1	6
06	1510	730	41.1	6
07	1812	878	41.1	6

	0	1	2	3	4	5	6
ATENUACAO DO CAPITAL - F(t) -	1.000	.950	.910	.880	.850	.830	.810
ATENUACAO DO CUSTO OPERACIONAL - G(t) -	1.000	.950	.910	.890	.850	.830	.810

PERIODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
PRECO DO PETROLEO	30	34	37	41	45	50	55	61	67	74	82	90	100	110	122	134

- O CAPITAL E DADO EM MILHOES DE DOLARES
- O CUSTO OPERACIONAL E DADO EM MILHOES DE DOLARES / PRODUCAO DE UM PERIODO
- A CAPACIDADE DE PRODUCAO E DADO EM MILHOES DE BARRIS POR PERIODO
- O TEMPO DE EXAUSTAO E DADO EM NUMERO DE PERIODOS
- O PRECO DO PETROLEO EM DOLARES POR BARRIL

CASO BASE: π_3

 RESULTADOS-1

PERIODO	DISPONIBILIDADE DE CAPITAL	R	NO DE USINAS EM OPERAÇÃO	PRODUÇÃO DE CILINDRO DE VÍDEO	BENEFÍCIO LÍQUIDO POR PERÍODO
01	3000	1.9	00	0	
02	3000	1.7	01	25000	7
03	3000	0.8	02	50000	77
04	3000	0.3	04	100000	135
05	3000	0.0	04	150000	169
06	3000	0.0	07	175000	169
07	3000	0.0	07	175000	151
08	3000	0.0	04	100000	104
09	3000	0.0	02	50000	45
10	3000	0.0	03	75000	39
11			01	25000	7

- A DISPONIBILIDADE DE CAPITAL É DADA EM MILHÕES DE DÓLARES (VALOR CORRENTE)
- A PRODUÇÃO DE CILINDRO DE VÍDEO É DADA EM NÚMERO DE CILINDROS POR DIA
- O BENEFÍCIO LÍQUIDO POR PERÍODO É DADO EM MILHÕES DE DÓLARES (VALOR PRESENTE)
- R = FOLDA DE CAPITAL NO PERÍODO X CAPITAL INTRODUZIDO PARA INSTALAÇÃO DA PRÓXIMA USINA

-CASO BASE: π_4

 RESULTADOS-24

NUMERO DE USINAS INSTALADAS : 07

ECONOMIA TOTAL PROPORCIONADA : 909 MILHONES DE DOLARES (VALOR PRESENTE)

AREA	PERIODO DE INSTALACION	PERIODO DE EXHAUSTAO	CAPACIDADE DE PRODUCCION	CUSTO DE PRODUCCION	CAPITAL	ECONOMIA
01	01	07	25000	1831	1049	174
02	02	09	25000	1739	954	226
03	03	09	25000	1999	1146	138
04	03	09	25000	1999	1146	138
05	04	10	25000	2241	1283	89
06	04	10	25000	2241	1283	89
07	05	11	25000	2562	1468	53

- A CAPACIDADE DE PRODUCCION DE CADA AREA E DADA EM NUMERO DE MARRIS POR DIA
- O CUSTO DE PRODUCCION (CAPITAL+CUSTO OPERACIONAL TOTAL) E DADO EM MILHONES DE DOLARES (VALOR CORRENTE)
- A ECONOMIA TOTAL PROPORCIONADA POR CADA USINA E DADA EM MILHONES DE DOLARES (VALOR PRESENTE)
- O CAPITAL (COM APRENDIZADO) E DADO EM MILHONES DE DOLARES (VALOR CORRENTE)

REFERÊNCIAS:

- |01| BURGER, J. L'exploitation des pyrarchistes ou schistes bitumeux; données générales et perspectives d'avenir. Revue de l'Institut Français du Pétrole, Paris, 38 (3): 315-372, mai/juin 1973.
- |02| COSTA NETO, Claudio. Perspectivas para o aproveitamento dos xistos oleígenos no Brasil. Rio de Janeiro, Projeto Xistoquímica/UFRJ, 1978. 106 p.
- |03| COSTA NETO, Claudio. Xistos oleígenos; Matéria-prima que o Brasil tem. Rio de Janeiro, Projeto Xistoquímica/UFRJ, 1979. 80 p. (Publicação nº 28).
- |04| DONNEL, John R. Global Oil-Shale Resources and Costs. In: UNITAR Conference on Energy and the Future, 1st. Laxenburg, Austria, 1976. The Future Supply of Nature Made Petroleum and Gas. New York, Pergamon Press, 1977. Chapter 47, p.843-856.
- |05| DUNCAN, Donald C., e SWANSON, Vernon E. Organic-rich Shale of the United States and World Land Areas. Washington, Survey Circular, 523.
- |06| EUA. Department of the Interior. Impact on Existing Economic and Social Environment. In: Final Environment Regional Impacts of Oil-Shale Leasing Program; Regional Impacts os Oil Shale Development, Washington, 1973. Chapter III-H-p. 202-264.
- |07| KRAEMER, A. J. Oil Shale in Brazil. Washington, US Department of the Interior, 1950. 36 p. (Report of Investigation, 4655).
- |08| MOREIRA, Homero Baggio. Xisto, um recurso para complementar a produção de petróleo no Brasil. Curitiba, PETROBRÁS/SIX, 1978. 44 p.

- |09| PADULA, Vicente Tomazelli. Folhelhos pirobotuminosos; reservas conhecidas e potenciais. In: Seminário sobre Modelo Energético, Curitiba, set. 1979, 19 p.
- |10| PETROBRÁS. Usina Industrial do Xisto de São Mateus do Sul; 1^a etapa. Rio de Janeiro, ago. 1980.
- |11| RIBEIRO, Carlos A. S. et alli. Xisto: energia em potencial. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, 1964, 155 p.
- |12| VARISCO, Aldo. O processo PETROSIX, a usina protótipo de Irati. In: Conferências do Simpósio sobre Ciência e Tecnologia do Xisto. Curitiba, Academia Brasileira de Ciências, 1971, p. 225-254.