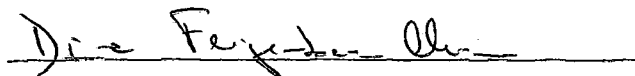


XISTOS OLEÍGENOS: UMA FONTE  
ALTERNATIVA DE ENERGIA


Lauro Roberto Albrecht Ramos

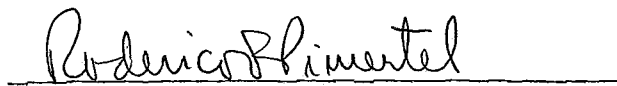
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE  
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

Aprovado por:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dina Feigenbaum Cleiman  
(Presidente)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. João Lizardo R.H. de Araújo

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Ronaldo C. Marinho Persiano

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Ruderico F. Pimentel

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Maio de 1981

Aos

meus pais

AGRADECIMENTOS

A Ricardo Paes de Barros e Sergio Margulis, que contribuíram de maneira decisiva para a elaboração desta tese.

A Dina Feigenbaum Cleiman pela orientação, cooperação e estímulo constantes.

A Ana Isabel e Maria Helena pelo apoio na parte computacional e na datilografia do trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo a discussão sobre as potencialidades dos xistos oleíferos como fonte alternativa de energia no Brasil e a viabilidade econômica de sua utilização para produção de óleo com características bastante semelhantes às do petróleo. Para facilitar a sua compreensão, o trabalho foi dividido em duas partes.

Na primeira é feito um levantamento e análise dos aspectos considerados relevantes para o aproveitamento dos xistos oleíferos, particularmente para a produção de óleo a partir dos recursos da Formação Irati através do processo PETRO-SIX. São apresentados os recursos mundiais e brasileiros de xistos oleíferos, as principais tecnologias de produção de óleo e os principais impactos sócio-ambientais decorrentes de sua utilização.

Na segunda parte é apresentado um modelo de programação dinâmica para a determinação da estratégia ótima de instalação de usinas de processamento de xistos oleíferos, com a conseqüente determinação da oferta de óleo de xisto ao longo do horizonte de análise, em função de diferentes cenários para os preços do petróleo importado.



### Abstract

The present work concerns the potencial of oil shale as an energetic alternative source in Brazil and the economical viability of its use in the production of an oil similar to crude oil. In order to make it easier to follow, the work has been halved.

In the first half an analysis is made of the aspects considered to be relevant to the utilization of the oil shale , particularly concerning shale oil production with resources found at Formação Irati by using the PETROSIX process. National and international oil shale resources are displayed in the work, as well as the latest shale oil production technologies and the main social-environmental impacts resulting from their utilization.

In the second part of the work a model is proposed of dynamic programming to set oil shale processing plant installation optimum strategy and the determination of shale oil supply throughout the period of analysis resulting from the different scenes of imported crude oil prices.

SUMÁRIO

PARTE I - RECURSOS, TECNOLOGIAS E IMPACTOS AMBIENTAIS ...	01
I -- INTRODUÇÃO .....	02
II -- XISTOS OLEÍGENOS; DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS .....	06
III - RECURSOS E RESERVAS MUNDIAIS DE XISTO .....	11
III.1 - Recursos Mundiais .....	11
III.2 - Reservas Mundiais .....	17
IV - RECURSOS BRASILEIROS DE XISTO .....	22
IV.1 - Formação Codó (Maranhão) .....	24
IV.2 - Formação Santana (Ceará) .....	24
IV.3 - Xisto de Alagoas .....	25
IV.4 - Formação Santa Brígida (Bahia) .....	26
IV.5 - Formação Curuá (Pará e Amazonas) .....	26
IV.6 - Xisto de Maraú (Bahia) .....	26
IV.7 - Xisto do Vale do Paraíba .....	27
IV.8 - Xisto da Formação Irati .....	34
IV.8.1 - Descrição da Formação Irati .....	34
IV.8.2 - Avaliação do Potencial da Formação Irati .....	37
IV.8.3.- Recursos Demonstrados da Formação Irati .....	43
IV.9 - Análise Comparativa Entre os Xistos do Vale do Paraíba e da Formação Irati .....	52
V - PRODUÇÃO DE ÓLEO A PARTIR DO XISTO .....	57
V.I - Introdução .....	57

V.2 - Processos Ex-situ .....	58
V.2.1 - Mineração .....	58
V.2.2 - Retortagem .....	63
V.3 - Processos In-Situ .....	75
V.4 - Tratamento do óleo .....	77
VI - IMPACTOS AMBIENTAIS .....	79
VI.1 - Poluição Atmosférica .....	80
VI.2 - Poluição Hídrica .....	85
VI.3 - Manuseio dos Sólidos e Recuperação do Solo..	91
VI.4 - Impactos Sociais .....	93
PARTE II - MODELO DE OFERTA DE ÓLEO DE XISTO .....	94
I - INTRODUÇÃO .....	95
II - CONCEPÇÃO .....	97
III - VARIÁVEIS DO MODELO .....	101
IV - FORMULAÇÃO DO MODELO .....	102
IV.1 - Restrições .....	102
IV.2 - Função-Objetivo .....	104
IV.3 - Resumo .....	107
V - ANÁLISE DO MODELO .....	111
VI - MODELO SIMPLIFICADO .....	132
VII - FORMULAÇÃO DINÂMICA .....	138
VII.1 - Exemplo .....	140
VII.2 - Fluxograma .....	144
VIII- DADOS .....	146

IX - RESULTADOS .....	153
X - COMENTÁRIOS E EXTENSÕES .....	164
Apêndice 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS RECURSOS DE XISTO .....	167
Apêndice 2 - PROGRAMAÇÃO E ALGUMAS SAÍDAS .....	172
Referências Bibliográficas .....	195

PARTE I

RECURSOS, TECNOLOGIAS E IMPACTOS AMBIENTAIS

## PARTE I

## I - INTRODUÇÃO

A indústria de xisto não é uma atividade recente, sendo seu surgimento anterior ao da indústria de 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 locais onde os recursos apresentam características bem mais propícias para exploração que os recursos de xisto típicos (elevados rendimentos em óleo, condições de mineração extremamente favoráveis, ...).

No entanto, face às profundas alterações ocorridas no mercado internacional de petróleo na última década, causadas pela nova política de preços adotada pelos países exportadores, 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, vis a vis que seus impactos ambientais e sua performance econômica não podem ser ainda perfeitamente avaliados, devido à pequena difusão de conhecimento acerca de suas peculiaridades.

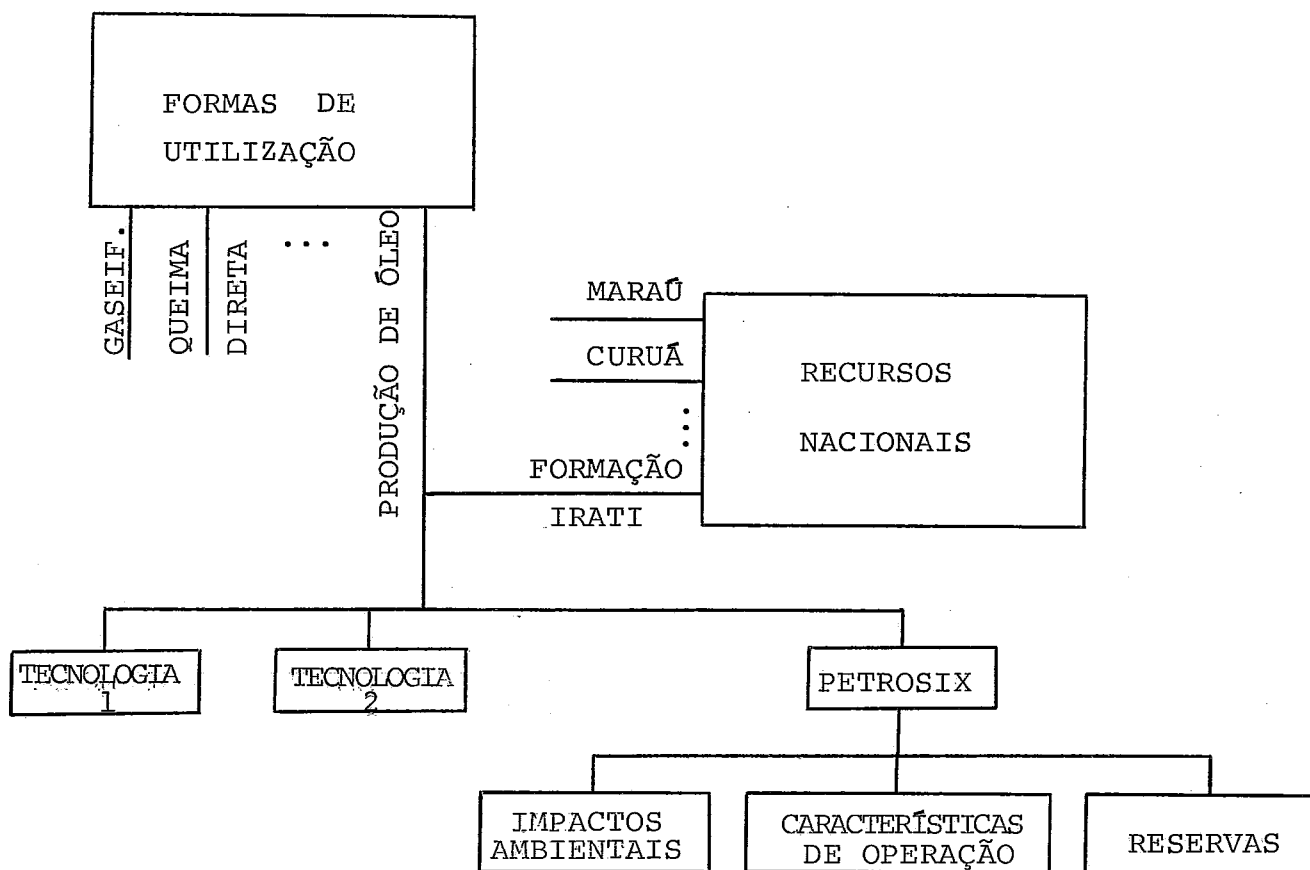
ridades e restrições, o que tem contribuído em parte para que o debate acerca de sua utilização como fonte energética alternativa seja ainda limitado, apesar de haver um consenso quanto ao seu potencial.

Dentro desse panorama, o objetivo principal do presente trabalho é a compilação e análise das informações relevantes para uma discussão sobre a viabilidade econômica da utilização dos xistos oleíferos como fonte energética.

A princípio, face à grande variação de características dos xistos oleíferos de depósito para depósito e às suas diversas possíveis formas de utilização (produção de óleo, gaseificação, queima direta...), a análise do seu desempenho econômico deveria ser parametrizada em função do seu tipo de uso e sua procedência. Entretanto, como no caso brasileiro a maioria dos esforços de pesquisa de aproveitamento dos xistos tem sido concentrados na produção de óleo, em particular a partir dos recursos da Formação Irati, será esta a situação analisada mais detalhadamente.

Quanto às tecnologias para produção de óleo a partir dos xistos será dada ênfase especial ao processo PETROSIX, o único já testado com xisto nacional em escala protótipo, com a apresentação de suas características de operação e dos impactos ambientais associados à sua utilização. Além disso, procurar-se-á determinar que parcelas dos recursos da Formação Irati podem ser consideradas economicamente viáveis, com base no processo PETROSIX, para vários perfis de preços do petróleo importado.

O quadro a seguir procura fornecer uma visualização dessa abordagem.



Este procedimento significa, em última análise, uma pesquisa das respostas a quatro questões básicas:

- 1 - Quais os recursos nacionais de xistos oleíferos ?
- 2 - Quais as principais tecnologias de produção de óleo a partir do xisto e, em particular, quais as características do processo PETROSIX ?



- 3 - Quais os impactos ambientais decorrentes da utilização do processo PETROSIX para a produção de óleo a partir dos recursos da Formação Irati ?
- 4 - Que parcela dos recursos da Formação Irati para a qual a extração de óleo através do processo PETROSIX é economicamente viável (reservas) ?

Nesta primeira parte do trabalho serão discutidas as três primeiras questões, reservando-se a discussão da última questão para a segunda parte do trabalho.

## II - XISTOS OLEÍGENOS: DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS

Embora impróprio segundo a correta nomenclatura geológica — uma denominação mais apropriada seria FOLHELHO — xisto é um termo consagrado pelo uso para designar certas rochas sedimentares compactas, formadas de uma parte orgânica e uma parte inorgânica, das quais é possível extrair-se um óleo de características semelhantes ao óleo de poço.

De acordo com a forma com que se possa extrair este óleo, os xistos podem ser classificados em betuminosos e pirobetuminosos. Nos xistos betuminosos o óleo (BETUME) encontra-se apenas impregnado na parte inorgânica da rocha (matriz inorgânica), podendo ser retirado através dos solventes normais de petróleo.

Nos xistos pirobetuminosos a matéria orgânica, denominada QUEROGÊNIO, não é solúvel nos solventes normais do petróleo. No entanto, quando aquecida a temperaturas de 400°C a 500°C, em atmosfera não oxidante, gera vapor de óleo que condensado forma o óleo de xisto, gases tais como hidrogênio, metano e outros hidrocarbonetos leves, um resíduo sólido que permanece na parte inorgânica e vapor d'água. Este processo de aquecimento é denominado RETORTAGEM por ser geralmente realizado em vasos conhecidos como RETORTAS. É importante frisar que os xistos pirobetuminosos produzem uma certa quantidade de óleo, pequena em relação à produzida por retortagem, quando tratados com solventes ordinários do petróleo, revelando a existência

de hidrocarbonetos em sua composição.

Basicamente a diferença entre estes xistos reside no seu conteúdo orgânico: betume e querogênio. Enquanto betumes são misturas de hidrocarbonetos naturais, solúveis nos solventes comuns, com propriedades físicas e químicas facilmente determináveis, querogênio é uma mistura complexa de matéria orgânica, com propriedades não perfeitamente conhecidas, cuja composição varia de depósito para depósito, e que para seu aproveitamento necessita, obrigatoriamente, da retortagem. Tendo em vista que os xistos encontrados no mundo são em sua maioria pirobetuminosos e como não existem exemplos nacionais de xistos betuminosos, foi adotada neste trabalho a denominação genérica de xistos oleíferos.\*

Nos xistos típicos a parte inorgânica, formada fundamentalmente de calcário e argila, é da ordem de 75% a 90% em peso. O óleo produzido na retortagem representa de 25% a 65% da parte orgânica original, tendo como principais diferenças do óleo de petróleo as maiores porcentagens de oxigênio, compostos nitrogenados insaturados, heterocíclicos.

Além de ser função da origem do xisto, a composição do óleo produzido também depende de uma maneira marcante do processo de retortagem, principalmente da temperatura de pirólise. A porcentagem de enxofre no óleo, assim como de  $H_2S$  (gás

---

\* Este termo tem sido empregado sistematicamente nos trabalhos do Projeto Xistoquímica-UFRJ, em particular nos trabalhos do Prof. Costa Neto (12,13).

sulfídrico) no gás produzido, é fortemente dependente da ocorrência de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) na fase mineral do xisto oleífero, sendo portanto bastante variável de local para local.

Na tabela a seguir é apresentada uma correlação entre o teor de matéria orgânica do xisto e a produção de óleo a partir dele. Esta correlação é bastante útil para estimativas globais, mas não se aplica a casos específicos, uma vez que a fração da parte orgânica do xisto que é transformada em óleo varia de acordo com sua origem e o processo de retortagem utilizado.

TABELA 1

TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA X RENDIMENTO EM ÓLEO

Teor de Matéria Orgânica (% em peso)	Rendimento em óleo de xisto	
	US gal/t curta	l/t
5 - 10	5 - 10	21 - 42
10 - 65	10 - 100	42 - 417

Fonte: Burger (6)

O método de laboratório adequado à determinação do óleo obtível a partir do xisto por retortagem é denominado de "Método Fisher Modificado". É comum medir-se o desempenho de um processo industrial através da porcentagem de óleo obtido por este processo em relação à obtida pelo ensaio Fisher. Desde que esse ensaio não é ideal, não é incoerente obter-se desempenhos industriais superiores a 100%.

O produto gasoso, que representa cerca de 15% da parte orgânica original, pode resultar num combustível de baixo poder calorífico se durante o processo de retortagem empregado este gás é diluído com dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e nitrogênio ( $\text{N}_2$ ). Entretanto, existem outros processos em que isto não ocorre e um gás com alto poder calorífico é obtido.

O resíduo sólido orgânico e a parte inorgânica restante da retortagem são denominados de XISTO RETORTADO. Há processos de retortagem que usam a combustão do carbono do xisto retortado ("carbono residual") como fonte de energia para atender parte da demanda térmica da retortagem. Do xisto retortado é possível também obter-se materiais de construção dependendo naturalmente de sua composição e do processo utilizado.

É importante frisar que o aproveitamento dos numerosos subprodutos possíveis de obter a partir do xisto, tais como o sulfato de amônia, o enxofre, o urânio, o cimento, materiais de construção e diversos produtos químicos, podem desempenhar um importante papel na economicidade do processo de retortagem.

A fim de tornar a definição de xisto mais precisa, várias sugestões têm sido feitas baseadas em suas propriedades físicas e químicas. Dentre elas pode-se citar a mais comum que limita a categoria de xisto às rochas capazes de produzir mais de 40 litros de óleo/t, o que equivale a aproximadamente 1.000 Kcal/Kg. Esta classificação se justifica, em parte, por estudos que demonstram que no estágio atual da tecnologia este é um índice mínimo para o aproveitamento econômico do xisto.

Por outro lado, existem tipos de xisto como a "torbanita", encontrada na Austrália e na República Sul Africana, que produzem até 800 l/t de óleo. Para evitar a classificação de rochas tão ricas em óleo como xistos, alguns estudos sugerem que só sejam consideradas xistos as rochas que, após a retortagem, produzirem mais de 33% de resíduos.

No presente trabalho xistos oleíferos serão definidos formalmente como sendo "rochas compactas de origem sedimentar, capazes de produzir óleo quando destiladas destrutivamente, com mais de 33% de cinzas e teor de matéria orgânica superior a 10% em peso, mas não em quantidades apreciáveis quando tratadas com solventes ordinários do petróleo", o que corresponde à definição adotada pelo Prof. Costa Neto (13) em seus estudos.

### III - RECURSOS E RESERVAS MUNDIAIS DE XISTO

#### III.1 - Recursos Mundiais

De início, é importante ressaltar que os recursos de xisto são, de uma maneira geral, mal conhecidos, com exceção dos depósitos da formação GREEN RIVER nos EUA, dos depósitos KUKERSITE na União Soviética e de algumas áreas específicas da formação IRATI no Brasil (16). Desta maneira, as estimativas globais são pouco precisas e só podem ser feitas com uma boa dose de circunspecção.

A avaliação dos recursos mundiais de xisto tem como base a estimativa que uma parte não desprezível (cerca de 5%) das rochas sedimentares contém mais de 5% de matéria orgânica. Além disso, estima-se que cerca de um décimo desta fatia de rochas sedimentares contém mais de 10% de matéria orgânica, que pode ser, na maioria dos casos, utilizada para sintetizar óleo através de processos tradicionais de aquecimento em atmosfera não oxidante (retortagem). Assim, com base na definição de xisto oleífero, têm-se que os recursos mundiais de xisto são da ordem de 0,5% das rochas sedimentares existentes na crosta terrestre.

A partir desses argumentos e com estimativas adicionais para o volume e densidade das rochas sedimentares, foi avaliada a existência de cerca de 820 trilhões de toneladas de querogênio em rochas sedimentares com mais de 5% de matéria orgânica, e cerca de 140 trilhões de toneladas em xistos (rochas sedimentares com mais de 10% de matéria orgânica).

Estimativas de tonelagem total de querogênio na crosta terrestre variam de 6,5 quatrilhões de toneladas (58) a 3,2 quatrilhões de toneladas (64). De acordo com os mesmos autores, as quantidades existentes de carvão, o combustível fóssil encontrado em maior abundância, são avaliadas em 5 trilhões de toneladas e 7 trilhões de toneladas, respectivamente. Assim, segundo eles, a massa de querogênio é de 50 a 100 vezes superior à de carvão. No entanto, se considerarmos apenas o querogênio contido nos xistos (140 trilhões de toneladas), esta razão torna-se da ordem de 20.

Um fato adicional que reduz as potencialidades energéticas do xisto é a necessidade de um consumo de energia equivalente, em termos de matéria orgânica, a 5%\* do xisto para o processo de obtenção do óleo (retortagem). Como por definição de xisto oleífero este deve conter mais de 10% de matéria orgânica pode-se tomar 50% da matéria contida nos xistos como um limite inferior para a avaliação do seu potencial energético.

Assim, admitindo-se a validade das estimativas acima, pode-se afirmar que o potencial energético do xisto é de cerca de 10 vezes o maior que o do carvão em termos mundiais. Naturalmente, nessa comparação não são levados em conta os aspectos econômicos, uma vez que a mesma diz respeito a recursos. Uma comparação entre reservas será apresentada posteriormente.

---

\* Assumindo-se um aproveitamento térmico de 50%.



Embora seja possível obter vários produtos do xisto, na literatura sã são encontradas avaliações, a nível mundial, para o volume de óleo proveniente do xisto. Na tabela 2, a se guir, são apresentadas as estimativas dos recursos mundiais, classificados por continente e qualidade do xisto (teor médio do óleo — litros/t ou US GAL/t curta)\*.

---

\* 1 US GAL/t curta = 4,17 litros/t.

TABELA 2

RECURSOS MUNDIAIS DE XISTO POR CONTINENTE E POR TEOR DE ÓLEO (10<sup>9</sup> barris)

CONTINENTE	RECURSOS CONHECIDOS		RECURSOS HIPOTÉTICOS		RECURSOS ESPECULATIVOS	
	104-417 l/t 25-100GAL/t curta	42-104 l/t 10-25GAL/t curta	104-417 l/t 25-100GAL/t curta	42-104 l/t 10-25GAL/t curta	104-417 l/t 25-100GAL/t curta	42-104 l/t 10-25GAL/t curta
ÁFRICA	100	PEQUENA	NE*	NE	4.000	80.000
ÁSIA	90	14	2	3.700	5.400	110.000
OCEÂNIA	PEQUENA	1	NE	NE	1.000	20.000
EUROPA	70	6	100	200	1.200	26.000
AMÉRICA DO SUL	PEQUENA	800	NE	3.200	2.000	36.000
AMÉRICA DO NORTE	418	1.600	350	1.700	1.600	56.000
TOTAL (ARREDON- DADO)	680	2.400	450	8.800	15.200	318.000

\* NE - NÃO ESTIMADO

FONTE: (18) e (24)

Os valores apresentados para os recursos conhecidos são bastante criticáveis, pois se baseiam em agregações de estimativas realizadas em épocas diversas e com critérios diferentes, nem sempre compatíveis.

Com base nestas estimativas, o total dos recursos mundiais é estimado como sendo da ordem de 345 trilhões de barris, sendo apenas 1% considerados conhecidos e 4,7% provenientes de recursos com alto teor de matéria orgânica. Dos recursos conhecidos (cerca de 8 trilhões de barris), 20% provêm de xistos com alto teor de matéria orgânica.

TABELA 3

DIVISÃO DOS RECURSOS MUNDIAIS DE XISTO POR CATEGORIAS E TEOR

	RECURSOS CONHECIDOS	RECURSOS HIPOTÉTICOS	RECURSOS ESPECULATIVOS	TOTAL
ALTO TEOR (104-417 l/t)	0,2%	0,1%	4,4%	4,7%
BAIXO TEOR (42-104 l/t)	0,7%	2,6%	92%	95,3%
T O T A L	0,9%	2,7	96,4%	100%

A seguir, na tabela 4, são apresentadas as estimativas de recursos conhecidos de xisto por país, que na realidade são atualizações do USGS (18).

TABELA 4

## RECURSOS CONHECIDOS DE ÓLEO DE XISTO POR PAÍS

PAÍS	RECURSOS CONHECIDOS (bilhões de barris)	PARTICIPAÇÃO (%)
Estados Unidos	2.000	64
Brasil	802	26
União Soviética	113	4
Zaire	100	3
Canadá*	50	1
Itália	35	1
China	28	1
França**	6	0
Suécia	2,3	0
Alemanha Ocidental	2	0
Birmânia	2	0
Grã-Bretanha	1	0
Outros (aprox.)	4	0
Total (aproximado)	3.100	100%

\* Recursos em teor superior a 105 l/t

\*\* Estimativa de Alpern (1)

Fonte: Donnell (16) e Alpern (1).

Deve ser ressaltado que estas estimativas não são necessariamente as melhores para cada país, sendo a razão de sua apresentação o fato de representarem uma visão conjunta dos recursos de xisto aceita internacionalmente. No caso do Brasil, em particular, a estimativa apresentada foi realizada a partir da hipótese de um teor médio de óleo possivelmente maior que o de fato existente, existindo outros estudos mais específicos sobre os recursos brasileiros que apresentam esti

mativas diferentes desta, os quais serão analisados posteriormente.

A seguir são apresentadas as estimativas para a parcela desse volume de óleo que pode ser obtida em bases economicamente viáveis nas condições atuais (reservas).

### III.2 - Reservas Mundiais

Apesar de extremamente incertas e baseadas em critérios diferentes, estimativas mundiais das reservas de xisto são importantes, a fim de permitir que se visualize a grande discrepância entre o potencial de longo prazo (recursos) e o de curto prazo (reservas) do xisto, em comparação a outros combustíveis fósseis.

A classificação de determinado recurso de xisto como reserva é pouco precisa, desde que existem tanto incertezas quanto ao nível de investimentos necessários e dos custos operacionais, como quanto aos impactos sobre estas grandezas causados pelas imposições sociais relativas à poluição, tornando imprecisas as tentativas de avaliar-se as condições necessárias (teor de óleo, profundidade, espessura das camadas, e etc ...) para que seja economicamente viável seu aproveitamento (vide apêndice).

O volume das reservas de óleo de xisto, cerca de 190 bilhões de barris, é apenas pouco mais do que 5% dos recursos conhecidos e aproximadamente 0,05% dos recursos totais de xis

to. Isto evidencia o grande contraste entre os enormes recursos de xisto e sua relativamente pequena importância econômica.

Novamente, é importante frisar que comparações entre as reservas dos vários países são problemáticas, devido às diferenças nos critérios empregados e no nível de incerteza das estimativas.

Nas estimativas acima utilizou-se como critério considerar como reservas de um país os recursos que apresentam as características (teor em óleo, espessura, profundidade, e etc ...) dos já minados naquele país.

Para os EEUU, com base nos dados provenientes de usinas protótipo do U.S. BUREAU OF MINES e de empresas privadas no Colorado, adotou-se como reservas os recursos que possuem um teor em óleo superior a 25 U.S. GAL/t curta (105 l/t) de rocha, uma espessura a 25 pés (7,5 m) e que se localizam a profundidade inferior a 1000 pés (cerca de 300 m).

A nível mundial, basicamente, duas formas de ocorrência de xisto tem sido mineradas. Os depósitos localizados a pequena profundidade, com espessuras superiores a 25 pés (7,5m) os quais podem ser minerados a céu aberto e, portanto, permitem o aproveitamento de recursos com rendimento em óleo médio — 10 a 25 US GAL/t curta (40 a 105 l/t) —, e os depósitos com alto rendimento em óleo — 25 a 100 US GAL/t curta (105 a 415 l/t) —, que apresentem espessura superior a poucos pés e se estendam a profundidades de até 1000 pés (cerca de 300 m) abaixo da superfície.

Os recursos nacionais se enquadram no primeiro grupo uma vez que possuem, nas áreas mais promissoras, um rendimento em óleo da ordem de 80 l/t, apresentam uma espessura em torno de 10 m e uma relação entre material estéril e xisto inferior a 3, o que torna a mineração a céu aberto um empreendimento viável.

Além disso, as estimativas de reservas são relativas a um dado preço de óleo e a um determinado estágio da tecnologia, uma vez que quer um aumento do preço do óleo quer um avanço tecnológico poderá tornar viável o aproveitamento econômico de novas áreas. Deste modo previsões de reservas não relacionadas a um preço para o óleo e um estágio da arte devem ser utilizadas com extenso cuidado.

Não se conhece nenhuma estimativa sobre reservas de xisto que esteja explicitamente referenciada a algum preço para o óleo ou estado da arte. O único estudo que procurou estimar estas reservas a nível mundial, dentre os que se conhece, é o de DUNCAN (18), cujos resultados são citados por vários autores. O fato desta estimativa ser utilizada nas conferências mundiais sobre energia de Detroit (1974) e Istambul (1977), demonstra que apesar de realizada há cerca de 15 anos é ainda a mais largamente aceita.

A tabela a seguir apresenta as reservas mundiais de óleo de xisto, assim como a sua partição pelos países.

TABELA 5

## RESERVAS MUNDIAIS DE ÓLEO DE XISTO

PAÍS	RESERVA (bilhões de barris)	PARTICIPAÇÃO (%)
Estados Unidos	80	41
Brasil	50	26
URSS	32	17
China	14	7
Congo	10	5
Itália	7	4
T O T A L	193	100

Fonte: Duncan (18)

Esta estimativa de 50 bilhões de barris para as reservas nacionais é extremamente contestável, conforme será discutido em uma posterior análise desta e de outras estimativas das reservas nacionais.

A tabela a seguir apresenta as estimativas das reservas mundiais de combustíveis fósseis.



TABELA 6

## RESERVAS MUNDIAIS DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

COMBUSTÍVEIS FÓSIL	RESERVA (bilhões de TEP*)	PARTICIPAÇÃO (%)
Carvão	447,6	70,6
Petróleo	100,0	15,8
Gás Natural	56,4	8,9
Xisto Oleífero	30,0	4,7
T O T A L	634,0	100,0

Fonte: Alpern ( 1 )

\*TEP: Tonelada Equivalente de Petróleo

Da análise até aqui desenvolvida acerca dos recursos e reservas mundiais de xisto, pode-se concluir que, embora a quantidade de matéria orgânica contida nos recursos de xisto seja bastante maior que aquela contida nos recursos dos demais combustíveis fósseis, a parcela que pode ser caracterizada como reserva representa apenas uma pequena parte (5% das reservas mundiais de combustíveis fósseis), uma vez que essa matéria orgânica encontra-se bastante diluída no xisto, seu aproveitamento energético tradicional (produção de óleo sintético) é endotérmico, e os custos operacionais e o investimento por unidade de capacidade instalada (bbl/dia) são elevados.

#### IV - RECURSOS BRASILEIROS DE XISTO

De uma maneira geral, o propósito deste capítulo é a apresentação das informações existentes acerca dos diversos depósitos brasileiros de xisto, assim como de uma avaliação dos recursos dos depósitos mais importantes e de uma análise comparativa entre eles.

Já foi detetada a ocorrência de xisto, com diferentes idades e características, em muitos Estados do território nacional (vide fig. 1). Os principais depósitos brasileiros são:

- 1 - xisto da Formação Codó, no Maranhão;
- 2 - xisto da Formação Santana, no Ceará;
- 3 - xisto de Alagoas;
- 4 - xisto da Formação Santa Brígida, na Bahia;
- 5 - xisto da Formação Curuã, no Amazonas, Pará e Amapá;
- 6 - xisto de Maraú, na Bahia;
- 7 - xisto do Vale do Paraíba, em São Paulo;
- 8 - xisto da Formação Irati, em São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Goiás e Mato Grosso.

Para a maioria desses depósitos são conhecidos apenas os resultados dos ensaios de pirólise com base em amostras esparsas, com exceção dos depósitos do Vale do Paraíba, Formação Irati e Maraú, os quais já foram alvos de estudos mais sistemáticos. A seguir são apresentadas as informações conhecidas acerca dos depósitos acima relacionados.

# OCORRÊNCIAS DE XISTO NO BRASIL



- ① XISTO PERMIANO DA FORMAÇÃO IRATI
- ② XISTO TERCIÁRIO DO VALE DO PARAÍBA - SÃO PAULO
- ③ XISTO CRETÁCEO DE MARAÚ - BAHIA
- ④ XISTO PERMIANO DA FORMAÇÃO STA. BRÍGIDA - BAHIA
- ⑤ XISTO CRETÁCEO DE ALAGOAS
- ⑥ XISTO CRETÁCEO DO CEARÁ
- ⑦ XISTO CRETÁCEO DA FORMAÇÃO CODÓ - MARANHÃO
- ⑧ XISTO DEVONIANO DA FORMAÇÃO CURUA' NO PARÁ, AMAZONAS E AMAPÁ

#### IV.1 - Formação Codó (Maranhão)

Este depósito localiza-se nas proximidades da cidade de Codó, no vale do Rio Itapicuru. Ensaio de laboratório realizados a partir de suas amostras revelaram a composição dada na tabela 7. Também no Estado do Maranhão, foi detectada a ocorrência de xisto nas proximidades de Barra do Corda, com um teor de óleo de 17% em peso.

TABELA 7

COMPOSIÇÃO DO XISTO DE CODÓ  
(Ensaio Fisher)

Água	3,0%
Óleo	10,8%
Resíduo	83,2%
Gás e Perdas	3,0%

Fonte: Kraemer (31)

No entanto, até o momento não foram realizados estudos no sentido de avaliar a capacidade destes depósitos, sabendo-se apenas que é pequena em comparação com outras existentes no país.

#### IV.2 - Formação Santana (Ceará)

Este depósito localiza-se nas proximidades de Crato, no Sul do Ceará. Estudos realizados por Frões Abreu (31) reve

laram um elevado teor de óleo (cerca de 20% em peso). Porém devido à pequena espessura de suas camadas seu aproveitamento econômico não parece viável.

#### IV.3 - Xisto de Alagoas

São conhecidos vários depósitos de xisto ao longo da costa do Estado de Alagoas. Na tabela a seguir são mostrados os resultados obtidos em laboratório com amostras provenientes de alguns destes depósitos.

TABELA 8

COMPOSIÇÃO DO XISTO DE ALAGOAS  
(Ensaio Fisher)

DEPÓSITO	RIACHO DOCE	BICA DA PEDRA	CAMACHO	CAMARAGIBE
Águas Amoniacais	11,0%	11,9%	9,3%	9,1%
Óleo	12,0%	10,6%	4,1%	8,3%
Resíduo	68,8%	70,0%	84,4%	75,9%
Asfalto	-	0,1%	-	0,1%
Gás e Perdas	8,2%	7,4%	2,2%	0,6%

Fonte: Frões Abreu (31)

Até o momento não foram realizados estudos que permitam a avaliação do potencial destes depósitos, mas segundo Bastos (2) existem problemas para sua mineração em larga escala uma vez que as camadas são em geral muito finas e encon-

tram-se abaixo do nível do mar.

#### IV.4 - Formação Santa Brígida (Bahia)

Foi detetada a ocorrência do xisto nesta formação ao Norte da Bahia, sem que se conheça, no entanto, estudos que permitam a sua caracterização.

#### IV.5 - Formação Curuá (Pará e Amazonas)

Foi constatada a presença de xisto em diversos pontos destes Estados, ao Norte e ao Sul do rio Amazonas, ao longo dos rios Xingu, Tapajós, Maicuru, Curuá de Alenquer e Trombetas, no Estado do Pará e dos rios Paramari, Uatumã, Jatapu e Urubu, no Estado do Amazonas. A análise de algumas amostras esparsas indicou um baixo teor de óleo, o que só poderá ser confirmado após um estudo mais sistemático. Não existem informações acerca de seu potencial e nem mesmo da extensão da ocorrência.

#### IV.6 - Xisto de Maraú (Bahia)

Este depósito, localizado no Sul do Estado da Bahia, contém um xisto que revelou-se extremamente rico em matéria orgânica, mostrando-se capaz de produzir cerca de 430 litros de óleo por tonelada de xisto (cerca de 39% em peso). No en-

tanto, sua possança, cujo potencial em termos de quantidade de óleo recuperável foi avaliado em apenas 500.000 barris, é muito pequena, o que torna seu aproveitamento pouco significativo.

Mesmo sob o aspecto econômico seu aproveitamento é duvidoso, uma vez que mesmo a instalação de usinas de pequena capacidade implicaria em uma depreciação de investimento em curto espaço do tempo, face à rápida exaustão das reservas. Se, por exemplo, fosse instalada uma usina com capacidade igual à da usina protótipo de São Mateus do Sul — 1.000 bbl/dia — , isto acarretaria uma depreciação do investimento em menos de dois anos.

#### IV.7 - Xistos do Vale do Paraíba

Este depósito cobre uma área de aproximadamente 200 Km<sup>2</sup>, no Estado de São Paulo, onde se localizam as cidades de Quiririm, Taubaté, Tremembé, Pindamonhangaba e Roseira, sendo cortado por um trecho de cerca de 40 Km da Rodovia Presidente Dutra. Na Figura 2 é apresentada a área de ocorrência de xisto do Vale do Paraíba.

A coluna considerada economicamente aproveitável possui uma espessura de aproximadamente 36 m, sendo que desse total 6 m são formados de materiais de baixo teor em óleo (menos de 2% , considerados estéreis e dispostos em duas camadas. Os restantes 30 m são formados de camadas de xistos oleíferos de três tipos:





- folhelho papiráceo, que forma camadas finas e possui o maior rendimento em óleo, variando de 8 a 12% em peso (aproximadamente 80 l/t a 135 l/t);
- folhelho semipapiráceo, que forma camadas mais grossas mas apresenta um rendimento em óleo menor, variando de 3 a 9% em peso (30 l/t a 95 l/t), representando a maior parte da coluna econômica;
- folhelho conchoidal, que é o mais pobre em óleo sendo eliminado no caso de uma mineração seletiva.

Esta coluna apresenta uma grande uniformidade ao longo do depósito, facilitando assim possíveis extrapolações. O capeamento é de fácil remoção, sendo formado por cerca de 20m de sedimentos inconsolidados. O seu rendimento médio quando considerada integralmente, é da ordem de 4% em peso (cerca de 41 l/t), ensaio Fisher, base úmida, apresentando um elevado teor de umidade (em torno de 33%).

Com a finalidade de proceder a uma avaliação dos recursos de xisto no Vale do Paraíba, uma área de cerca de 10Km<sup>2</sup>, próxima a Tremembé, foi selecionada para pesquisa. Como resultado foi estimado um volume de 119 milhões de barris, considerando a coluna total (teor em óleo da ordem de 41 l/t).

Outra área de aproximadamente 66 Km<sup>2</sup> foi pesquisada com furos isolados, sendo possível indicar um volume de cerca de 785 milhões de barris de óleo. Uma inferência para o volume de recursos totais do Vale do Paraíba foi realizada com base nestes dados, estimando-se como sendo da ordem de 2,2 bi-

lhões de barris.

TABELA 9

RECURSOS CONHECIDOS DE XISTO NO VALE DO PARAÍBA  
(30 m DE ESPESSURA, 4% DE ÓLEO)

CLASSIFICAÇÃO DO RECURSO	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	RECURSOS RM ÓLEO ENSAIO FISHER (10 <sup>6</sup> bbl)
Medido	10	119
Indicado	66	785
Inferido	115	1300
T O T A L (aprox.)	191	2200

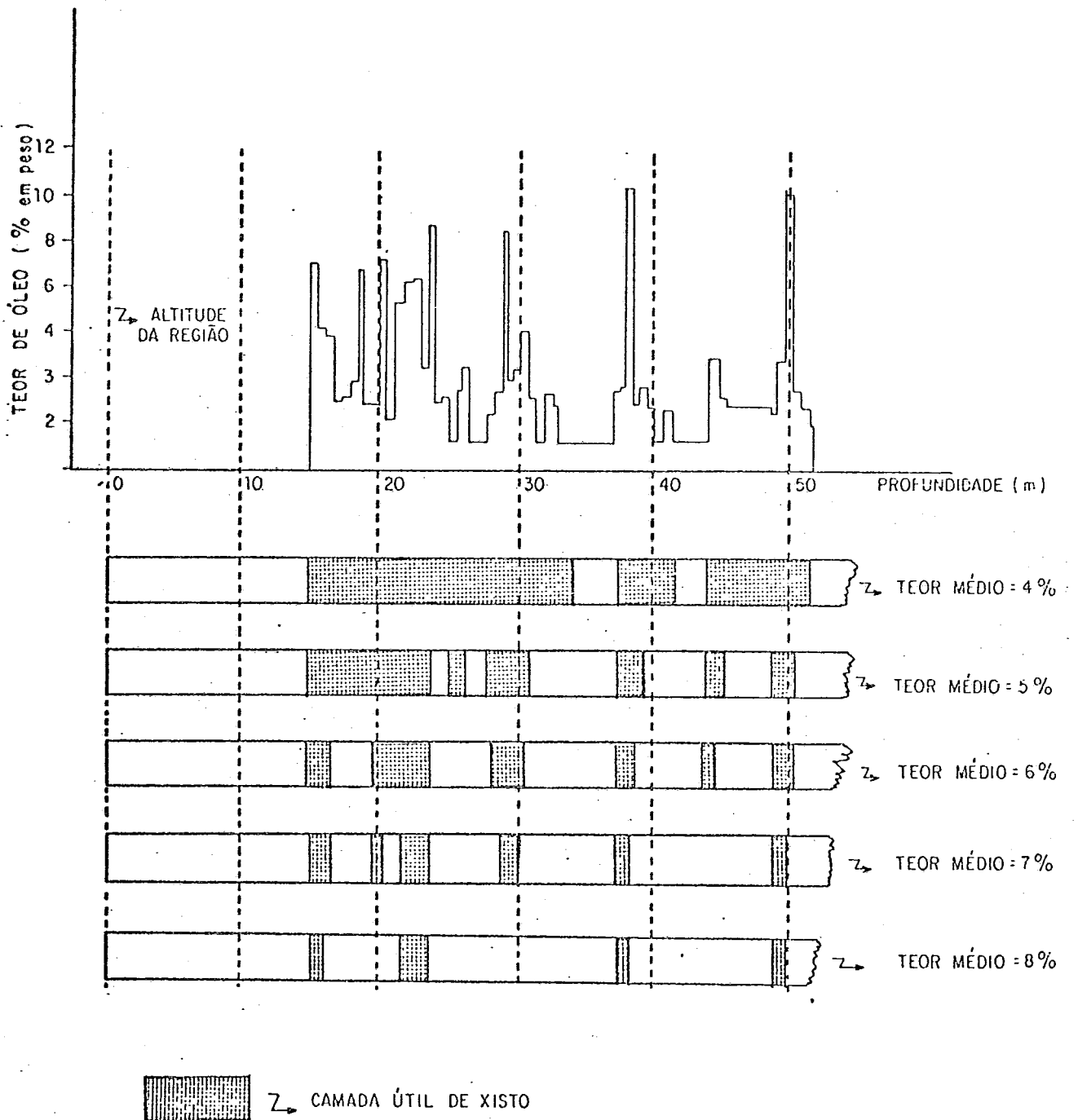
Fonte : Padula (46)

Conforme a descrição anterior, a coluna de xisto do Vale do Paraíba é formada por três tipos de folhelhos, com camadas intercaladas e de teores bem distintos, o que lhe dá a característica de apresentar grandes oscilações no teor de óleo ao longo da camada, variando de 1 a 13% de óleo em peso. O Gráfico 1 mostra o perfil de variação do teor de óleo com a profundidade.

Baseado nesta característica, reforçada pelo fato do aproveitamento integral da coluna implicar em um rendimento baixo (4% de óleo em peso — 41 l/t), foi realizado um estudo sobre uma mineração seletiva das camadas mais ricas.

Gráfico 1

XISTOS DO VALE DO PARAÍBA  
 Teor de óleo x Profundidade ( Furo B-31 )  
 ( Mineração Seletiva )



Este estudo, realizado com dados da área intensamente estudada (próxima a Tremembé), forneceu os dados que podem ser observados na tabela a seguir e no gráfico 2, onde também são apresentadas extrapolações destes estudos para as demais áreas.

TABELA 10

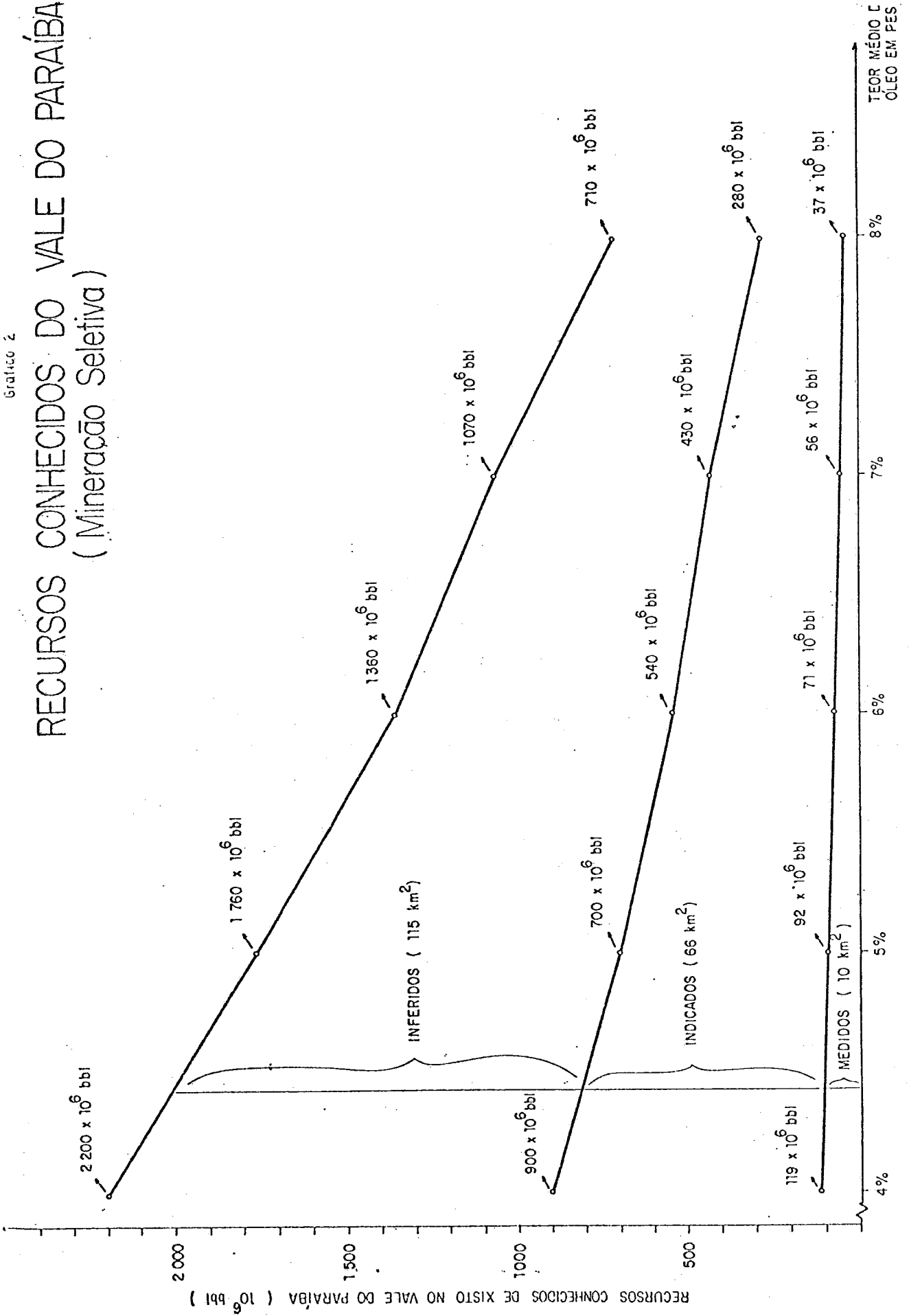
XISTO RECUPERÁVEL EM FUNÇÃO DO TEOR DE ÓLEO  
(JAZIDA DA MINA EXPERIMENTAL - 10 Km<sup>2</sup>)

TEOR MÉDIO -ENSAIO FISHER -BASE ÚMIDA	XISTO ÚTIL		ESTÉRIL		ÓLEO RECUPERÁVEL (MILHÕES DE BAR- RIS)
	Nº DE CAMADAS	ESPESSURA TOTAL (m)	Nº DE CAMADAS	ESPESSURA TOTAL (m)	
4%	3	30,34	2	6,18	119
5%	6	19,02	5	17,00	92
6%	6	12,22	5	23,59	71
7%	6	8,32	5	27,11	56
8%	4	5,23	3	30,21	37

Fonte: Paçula (46)

Uma rápida análise da tabela acima revela que para alcançar um teor médio de 8%, o dobro do inicial, é necessário rejeitar mais da metade (aproximadamente 70%) do óleo considerado recuperável a princípio. Outra observação simples, porém importante, é o aumento do número de camadas e a redução de suas espessuras, acarretando desta maneira custos mais elevados de mineração na medida em que se objetiva teores médios mais elevados.

# RECURSOS CONHECIDOS DO VALE DO PARAÍBA (Mineração Seletiva)



#### IV.8 - Xisto da Formação Irati.

##### IV.8.1 - Descrição da Formação Irati

Apesar da Formação Irati estar presente em quase toda parte da bacia sedimentar do Paraná, somente nos seus afloramentos orientais foi detetada a presença de xistos oleígenos. Estas ocorrências estendem-se desde o Estado do Mato Grosso até a fronteira Brasil-Uruguai (cerca de 2000 Km de extensão), apresentando duas grandes interrupções: uma nas proximidades da cidade de Jataí (GO) até a cidade de Rio Claro (SP), e outra de Araranguá (sul de Santa Catarina) até as proximidades de Gravataí (nordeste de Porto Alegre), o que é ilustrado na Fig. 3.

O número e a espessura das camadas de xistos oleígenos variam ao longo da faixa de ocorrência. Em São Paulo e Sul de Santa Catarina não existem camadas bem definidas, sendo estas finas e intercaladas ritmicamente com material estéril. Já no Paraná, principalmente no sul, e no norte de Santa Catarina, a Formação Irati apresenta duas camadas bem definidas, com teores de óleo aproximadamente iguais. No Rio Grande do Sul, apesar da existência de duas camadas bem definidas, a superior possui, nas regiões já estudadas, um teor médio de óleo baixo (inferior a 3%), de tal forma que seu aproveitamento torna-se inviável.

Outro aspecto importante na avaliação dos recursos de xisto na Formação Irati diz respeito às intrusões de rochas ígneas (diabásio, basalto) na parte superior da formação. Estas



intrusões acarretam duas adversidades à exploração do xisto oleífero. Primeiro, estas rochas ígneas provocam a destilação parcial ou total do querogênio existente, de tal forma que onde elas ocorrem os teores de óleo são baixos ou mesmo nulos. Segundo, estas rochas possuem uma dureza superior e, portanto, tornam os custos de mineração mais elevados. Estas intrusões são particularmente prejudiciais nos Estados do Paraná e Santa Catarina. Neste último uma topografia elevada e irregular eleva ainda mais os custos de mineração.

O teor de óleo, a espessura do capeamento e a relação xisto oleífero/material estéril variam de forma sensível ao longo do depósito. Sabe-se que a Formação Irati apresenta um mergulho na direção oeste que, na região próxima a São Mateus do Sul (PR), foi avaliado em 15 m por quilômetro em relação a horizontal (38).

Dada a diferente atratividade econômica das várias áreas, estas têm sido estudadas com diferentes ênfases. Para os afloramentos em Mato Grosso e Goiás, centro de São Paulo, Sul de Santa Catarina e ao norte de São Gabriel (RS), não há disponibilidade de nenhum dado a respeito de teor de óleo e espessura das camadas.

Para as demais áreas alguns dados existentes são tabelados a seguir. Porém é importante ter-se em mente que, devido às intrusões de diabásio, estes não podem ser extrapolados para toda a região. Por outro lado, estes dados não provêm de estudos com o mesmo nível de detalhamento, podendo assim apresentar diferentes graus de precisão.



TABELA 11

## INFORMAÇÕES GERAIS SOBRE A FORMAÇÃO IRATI

REGIÃO	CAMADA SUPERIOR		CAM. INTER-MEDIÁRIA	CAMADA INFERIOR		TOTAL	
	TEOR (%)	ESPESSURA (m)	ESPESSURA (m)	TEOR (%)	ESPESSURA (m)	TEOR MÉDIO (%)	ESP. TOTAL (m)
SUL DE SÃO PAULO	-	-	-	-	-	4 a 5	-
NORTE DO PARANÁ	4	3-4	10-12	3.8	2-3	-	-
CENTRO-SUL DO PARANÁ	7.5	4	8	7	6-7	-	-
SÃO MATEUS DO SUL (PARANÁ)	6.4	6.4	8.5	9.1	3.2	7.3	9.6
DOM PEDRITO/SÃO GABRIEL (RS)	< 3	8	10-15	6.9	3	-	-
PAPANDUVA/TRÊS BARRAS							
- Trecho Sul	6.4	7	10.1	7.2	3.1	-	-
- Trecho Norte	-	-	-	7.2	3.1	-	-
RIO NEGRO/RIO IGUAÇU	-	-	-	7.2	3.1	-	-

Fonte: PADULA (46)

IV.8.2 - Avaliação do Potencial da Formação Irati

Ao longo dos anos foram feitas várias estimativas para o total de recursos conhecidos e reservas contidos na formação Irati ou regiões específicas dela. Embora realizadas por diferentes estudiosos do assunto, de um modo geral todas tem por base um método relativamente simples e pouco sofisticado, o que se justifica plenamente em função da precariedade do conhecimento da Formação Irati como um todo, apesar de algumas de suas re

giões já terem sido pesquisadas intensamente.

Este método consiste na aproximação da região a ser avaliada por um paralelepípedo de dimensões médias, cujo volume deve ser equivalente à cubagem dos recursos contidos na mesma, acompanhada da estimativa da densidade média e do teor médio em óleo dos xistos ali existentes. O produto destas grandezas, desde que feito em unidades adequadas, permite a avaliação da quantidade de óleo de xisto em potencial, à qual pode-se aplicar um fator de recuperação e obter-se o volume dos recursos conhecidos da região. De uma maneira mais formal sejam:

- R: total de recursos conhecidos ou reservas;
- c: comprimento da faixa de ocorrência;
- e: espessura média da camada de xisto recuperável;
- l: largura média da faixa de ocorrência;
- d: densidade média do xisto;
- t: teor médio em óleo;
- f: fator de recuperação.

Assim o método pode ser resumido pela fórmula:

$$R = c. e. l. d. t. f$$

Na tabela a seguir são apresentadas as principais estimativas existentes para a Formação Irati ou regiões dela, sucedidas por uma breve discussão dos principais parâmetros envolvidos em algumas delas.

TABELA 12

## PRINCIPAIS ESTIMATIVAS PARA A FORMAÇÃO IRATI

AUTOR	REGIÃO	CLASSIFICAÇÃO DO RECURSO	ESTIMATIVA (BILHÕES DE bbl)
MAACK (34)	Estado do Paraná	Reserva*	11
CNP (10)	Formação Irati	Reserva	18,5
OPPENHEIM (31)	Formação Irati	Conhecido	800
UNECO (18)	Formação Irati	Conhecido	300
USGS (18)	Formação Irati	Reserva	50
USGS (18)	Formação Irati	Hipotético	4.000

MAACK (34): O Prof. Maack, inicialmente, estimou que a quantidade visível de xistos no Grupo Irati, no Estado Paraná, é da ordem de 200 bilhões de toneladas. Os parâmetros envolvidos nesta estimativa são apresentados em faixas bastante largas, sendo que as especificações médias consideradas não são fornecidas. Deve-se ressaltar também que o termo xisto é aqui empregado em um sentido bastante amplo, englobando tanto os xistos oleíferos quanto os não-oleíferos.

Assumindo que 10% dessa cubagem é constituída por xistos oleíferos, com um teor em óleo que varia de 4 a 14% (em média 8%), Maack estimou para o Paraná um depósito de 1,6 bilhões de toneladas (11 bilhões de barris) de óleo bruto. Embora não tenha classificado explicitamente esta sua estimativa como sendo

---

\* Maack não empregou explicitamente este termo.

de reservas, uma vez que não adotou esta nomenclatura (vide apêndice), este parece ser o enquadramento mais adequado.

USGS (18): A estimativa da USGS se baseia nas avaliações de Bastos (1951) (2) que, por sua vez, tem como base o estudo de Maack. Entretanto, Bastos alterou este estudo ao extrapolar o teor médio de 8% para as 200 bilhões de toneladas de xisto da Formação Irati no Estado do Paraná, enquanto Maack considerou este teor médio para apenas 10% deste total. Desta maneira, Bastos obteve uma avaliação de cerca de 16 bilhões de toneladas de óleo (110 bilhões de barris). Tal extrapolação não aparece nem um pouco razoável, e, como não é apresentada nenhuma justificativa para a mesma, fica comprometida a credibilidade da estimativa.

A seguir a USGS considerou que aproximadamente a meta de deste óleo poderia ser explorado em condições econômicas viáveis, caracterizando assim uma reserva da ordem de 50 bilhões de barris. Em seu estudo esta foi a única região que a USGS caracterizou como reserva, não só na Formação Irati, como também no Brasil e América Latina.

No entanto, esta estimativa torna-se bastante contestável em função da extrapolação injustificada feita por Bastos. Apesar disto, ou talvez por ignorância deste fato, esta tem sido a estimativa de reservas de xisto da América Latina consagrada internacionalmente.

A USGS estimou também a quantidade de recursos hipotéticos contidos na Formação Irati, considerando uma área de

$650 \times 10^3 \text{ Km}^2$ , com 9,1 m de espessura e um teor médio em óleo de 5%, em 4 bilhões de barris.

CNP (10): Em sua estimativa para a Formação Irati, o CNP considerou uma faixa de ocorrência de xisto de 600 Km de comprimento por 8 Km de largura, com 11 m de espessura média para a secção oleífera. Prevendo uma desuniformidade na disseminação do querogênio na rocha, foi adotado um fator de 50% como segurança, sendo avaliada assim uma cubagem de  $26,4 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

Adicionalmente, foi considerado um rendimento da pirólise de 1 bbl/m<sup>3</sup> e um rendimento operacional da retortagem de 70%, resultando daí a estimativa de uma reserva de cerca de 18,5 bilhões de barris de óleo de xisto na Formação Irati. Não há, todavia, neste estudo do CNP uma preocupação no sentido de explicitar os critérios de definição de reservas utilizados.

OPPENHEIM (31): Segundo Oppenheim o xisto de Irati é visível na direção Norte-Sul por cerca de 1000 Km, com uma largura mínima de 25 Km e uma espessura da ordem de 30 a 50 m. Assumindo um teor médio em óleo de 8%, estima os recursos conhecidos da Formação Irati como sendo da ordem de 800 milhões de barris de óleo de xisto.

Uma análise conjunta dessas quatro estimativas com o objetivo de compará-las não é uma tarefa simples, uma vez que não há coincidência entre elas quanto à região e tipo de recursos avaliados. Mesmo assim existem alguns aspectos comuns que merecem ser salientados.

O mais interessante deles diz respeito ao teor médio de óleo, considerado em todos os estudos como sendo da ordem

de 8%. Este valor parece bastante contestável, haja visto que o xisto atualmente explorado em São Mateus do Sul (PR), uma das regiões mais ricas da formação Irati, revelou um teor em óleo de apenas 7,3% (46), o que faz crer que a média da formação seja sensivelmente inferior ao valor considerado.

Além disso as espessuras médias consideradas parecem excessivamente otimistas, notadamente no estudo feito por Oppenheim (31) (30 a 50 m), pois as espessuras das regiões até agora melhor pesquisadas revelaram-se bastante inferiores (em São Mateus do Sul as duas camadas, quando combinadas, apresentam uma espessura média de 9,6 m).

De um modo geral, pode-se depreender que estas estimativas possuem um grau de incerteza associado muito elevado, uma vez que baseiam-se em uma quantidade relativamente escassa e concentrada de dados que são extrapolados para toda a formação ou região avaliada. Além disso alguns parâmetros considerados parecem estar superestimados, indicando assim uma possível superavaliação dos recursos de xisto contidos na formação Irati.

Apesar destas restrições, estas estimativas são importantes na medida em que constituem a única maneira de se ter uma idéia do potencial em recursos de xisto da formação Irati. Cabe ainda ressaltar que estas são estimativas para a Formação Irati como um todo ou para grandes regiões nela contidas. No item seguinte serão apresentados os estudos detalhados, feitos pela Petrobrás, para determinadas áreas pré-selecionadas de acordo com suas características geológicas, com a

respectiva medição de seus recursos.

#### IV.8.3 - Recursos demonstrados da Formação Irati

Por volta de 1960, como decorrência dos resultados animadores obtidos a partir de amostras de xistos provenientes da formação Irati, a Petrobrás passou a concentrar suas atenções nesta região, visando uma avaliação mais detalhada no sentido de estimar as reservas demonstradas de algumas áreas.

Após intenso e progressivo trabalho de pesquisa geológica, com a execução de sondagens em malhas quadradas em geral de 400 m de lado, foi escolhida uma região de São Mateus do Sul (PR), de 64,5 Km<sup>2</sup>, como local para instalação de uma usina protótipo, em virtude de sua pequena espessura de capeamento, da ausência de intrusões de rochas ígneas, da continuidade lateral das camadas, da boa relação xisto útil/material estéril, do razoável teor de óleo e do baixo teor de umidade (5 a 7%) de seus xistos, que mostravam-se assim bastante suscetíveis de tratamento pelo processo PETROSIX.

Um estudo mais detalhado dessa região revelou que o xisto encontra-se disposto em duas camadas bem definidas, separadas por uma camada intermediária composta por materiais estéreis. A camada superior possui uma espessura média de 6,4 m com teor médio de óleo de 6,4% em peso, enquanto a inferior possui 3,2 m de espessura média com 9,1% de teor médio de óleo em peso. Quando combinadas, as duas camadas apresentam uma espessu-

ra média de 9,6 m com um teor médio de óleo igual a 7,3% em peso. A camada intermediária, composta de materiais não-oleígenos, tem uma espessura média de 8,5 m, sendo o capeamento médio da área 17,5 m. No Gráfico 3 é apresentada a variação do teor com a profundidade nesta região.

Estas características, observadas numa área de 64,5Km<sup>2</sup>, permitiram a medição de recursos de 560 milhões de barris de óleo de xisto na área de São Mateus do Sul. A tabela a seguir apresenta um resumo dessas informações.

TABELA 13

RECURSOS MEDIDOS - SÃO MATEUS DO SUL (PR)

LOCAL	ÁREA CUBADA (Km <sup>2</sup> )	CAPEAMENTO MÉDIO (m)	ESPES- SURA ÚTIL DE XISTO (m)	RELAÇÃO XISTO/ ESTÉRIL	TEOR MÉ- DIO DE ÓLEO (%)	POTENCIAL DE PRODUTOS (Base: Ensaio Fisher)			
						ÓLEO 10 <sup>6</sup> bbl	GLP 10 <sup>6</sup> t	GÁS COMB 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	ENXOFRE 10 <sup>6</sup> t
São Mateus do Sul	64,5	17,5	9,6	1:2,7	7,3	560	3,9	19	8,7

Fonte: PADULA (46)

Em uma segunda fase de seus estudos, a Petrobrás passou a procurar áreas da formação Irati que apresentassem condições similares às de Mateus do Sul, sendo para tanto estabelecidos alguns critérios básicos.

Em primeiro lugar, a área deveria apresentar condições favoráveis para mineração a céu aberto, ou seja, não deve

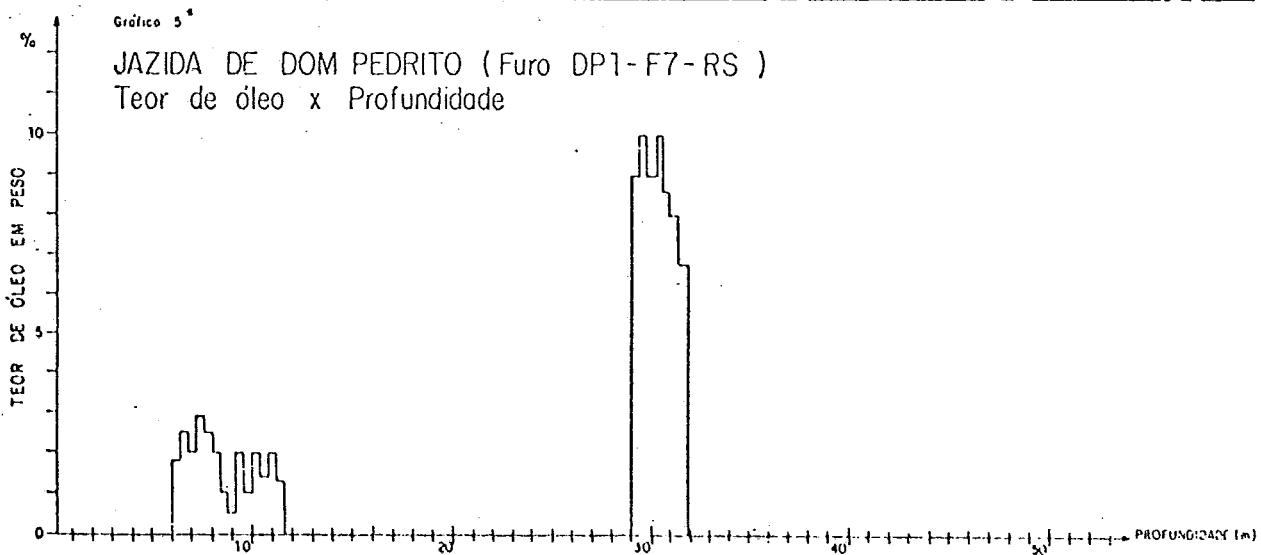
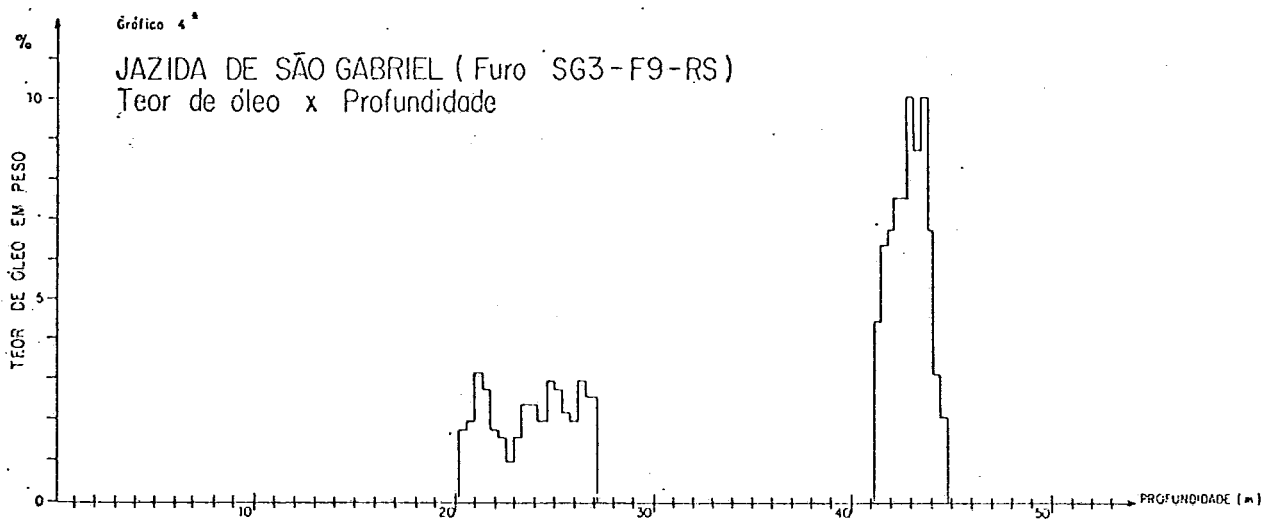
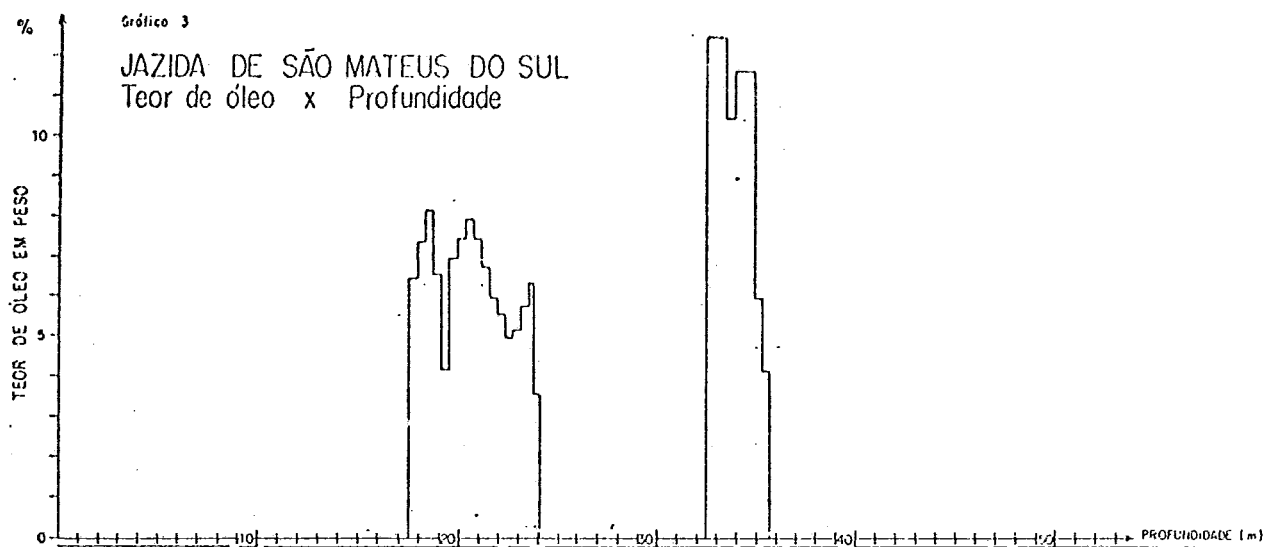


ria haver a ocorrência de intrusões ou perturbações estruturais significativas, tais como descontinuidades laterais e falhamentos, sendo admitido um capeamento máximo de 30 m. Além disso, o número de camadas, espessura e características do xisto deveriam ser compatíveis com os da jazida de São Mateus do Sul, com uma possança tal que possibilitasse a instalação de uma usina industrial com capacidade de 50.000 bbl/dia, utilizando o processo PETROSIX, por pelo menos 30 anos.

Embora não fosse encontrada nenhuma área que preenchesse totalmente estes requisitos, as áreas de São Gabriel e Dom Pedrito, no Estado do Rio Grande do Sul, eram as que se aproximavam do desejado, sendo então escolhidas para pesquisas mais detalhadas.

De maneira análoga à jazida de São Mateus do Sul, o xisto apresenta-se aqui em duas camadas bem definidas, separadas por uma camada de materiais estéreis. No entanto a camada superior, com uma espessura média de 8,0 m, apresenta um teor de óleo inferior a 3% em peso, sendo considerada estéril. A camada inferior, com espessura média de 3,0 m e um teor médio de 6,9 em peso, é a única de interesse. A espessura da camada intermediária oscila entre 10,0 e 15,0 m (vide gráficos 4 e 5).

A partir destes dados foi medida uma reserva de 465 milhões de barris de óleo de xisto para Dom Pedrito e 240 milhões de barris para São Gabriel. No entanto, ao contrário do que ocorre em São Mateus do Sul, o xisto desta área apresenta uma elevada percentagem de finos (10 a 20%). Como o processo PETROSIX não trabalha com finos, esta parcela é rejeitada, o



\* Não são valores médios da região.

que implica em uma queda de rendimento no seu aproveitamento industrial.

Na tabela a seguir são resumidas as principais informações acerca dos xistos de Dom Pedrito e São Gabriel.

TABELA 14

RECURSOS MEDIDOS - SÃO GABRIEL E DOM PEDRITO (RS)

MUNICÍPIO	ÁREA CUBADA (Km <sup>2</sup> )	CAPEAMEN TO MÉDIO (m)	ESPES-SURA ÚTIL DE XISTO (m)	RELAÇÃO XISTO / ESTÉRIL	TEOR MÉ DIO DE ÓLEO (%)	POTENCIAL DE PRODUTOS (Base: Ensaio Fischer)			
						ÓLEO 10 <sup>6</sup> bbl	GLP 10 <sup>6</sup> t	GAS COMB 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	ENXOFRE 10 <sup>6</sup> t
São Gabriel	84,0	16,4	3,1	1:5,4	7,0	240,0	1,8	8,3	3,8
Dom Pedrito	191,0	18,0	2,8	1:6,4	6,8	465,0	3,2	16,0	7,2
TOTAL DOS RECURSOS						705,0	5,0	24,3	11,0

Fonte: PADULA (46)

Finalmente, em uma terceira etapa de seus estudos, a Petrobrás relaxou alguns dos critérios básicos anteriormente estabelecidos, principalmente no tocante às condições de mineração. Assim passou a ser considerada válida a remoção de capeamentos de até 60 m, no caso de mineração a céu aberto de duas camadas de xisto. Também passou a ser admitida a presença de pequenas intrusões de diabásio na camada superior, com o aproveitamento somente da camada inferior através de mineração a céu aberto.

Dentro dessa nova orientação foram selecionadas duas outras áreas para pesquisas mais aprofundadas: a área de Papanduva/Três Barras, em Santa Catarina, e a área de Rio Negro/Rio Iguaçu, no Paraná.

A área de Papanduva/Três Barras (SC), possui uma extensão de aproximadamente  $110 \text{ Km}^2$  e pode ser subdividida em duas partes — trecho norte e trecho sul —, de acordo com presença de intrusões de diabásio ou não.

No trecho sul, que apresenta características semelhantes à São Mateus do Sul, a camada superior possui uma espessura média de 7,0 m com um teor médio em óleo de 6,4% em peso, enquanto para a camada inferior estes parâmetros são iguais a 3,1 m e 7,2%, respectivamente. Quando consideradas conjuntamente as camadas apresentam uma espessura média de 10,1 m e um teor médio de óleo igual a 6,8% em peso, sem que nesse trecho sejam observadas intrusões de diabásio.

A camada intermediária, com cerca de 11,0 m de espessura média, é constituída basicamente de materiais não-oleíferos. Apresenta, no entanto, algumas faixas de xisto que chegam a ter 60 cm de espessura. Atualmente estão sendo desenvolvidos estudos no sentido de seu aproveitamento, mas, até agora, não foram devidamente avaliadas.

No trecho norte, que apresenta as mesmas características do trecho sul, observa-se a presença de intrusões de diabásio, o que implica na perda total ou parcial da camada superior, de acordo com a espessura das mesmas. Embora eventualmente algumas partes da camada superior possam vir a ser aproveitáveis,

na falta de um conhecimento melhor sobre o comportamento e distribuição das intrusões, apenas a camada inferior foi considerada.

Os recursos de óleo de xisto medidos na área de Papanduva/Três Barras se situam em torno de 580 milhões de barris. Na tabela a seguir são apresentadas as principais características desta área.

TABELA 15

RECURSOS MEDIDOS - PAPANDUVA/TRÊS BARRAS (SC)

PAPANDUVA/ TRÊS BARRAS (SC)	CAMA DA	ÁREA CUBA DA (Km <sup>2</sup> )	CAPEAMEN TO MÉDIO (m)	ESPESSURA ÚTIL DE XISTO (m)	RELAÇÃO XISTO / ESTÉRIL	TEOR MÉ DIO DE ÓLEO (%)	POTENCIAL DE PRODUTOS BASE SECA: ENSAIO FISCHER			
							ÓLEO 10 <sup>6</sup> bbl	GLP 10 <sup>6</sup> t	GAS COMB 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	ENXOFRE 10 <sup>6</sup> t
ÁREA SUL	1. <sup>a</sup>	45,0	25,0	7,0	-	6,4	262,0	1,8	8,9	4,0
	2. <sup>a</sup>	50,0	-	3,1	-	7,2	145,0	1,0	4,9	2,3
ÁREA NORTE	2. <sup>a</sup>	60,0	30,0	3,1	-	7,2	173,0	1,2	5,9	2,7
TOTAL DOS RECURSOS							580,0	4,0	19,7	9,0

Fonte: PADULA (46)

A outra área selecionada nesta terceira etapa, Rio Negro/Rio Iguaçu, abrange uma extensão de cerca de 60 Km<sup>2</sup> compreendida entre o Rio Iguaçu e a divisa entre os Estados do Paraná e Santa Catarina, apresentando as mesmas características do trecho norte da área de Papanduva/Três Barras, com intrusões de diabásio na camada superior.

Para efeito de avaliação dos recursos foi levada em consideração apenas a camada inferior de xisto, que apresenta uma espessura média da ordem de 3,1 m, com um teor médio de óleo igual a 7,2% em peso. O capeamento médio (incluindo a camada superior) para mineração a céu aberto deste xisto é de 30,0 m.

Com base nestes dados foi medido um recurso da ordem de 173 milhões de barris de óleo de xisto na região de Rio Negro/Rio Iguaçu, como é mostrado na tabela a seguir.

TABELA 16

RECURSOS MEDIDOS - RIO NEGRO/RIO IGUAÇU

ÁREA	CAMADA	ÁREA CUBADA (Km <sup>2</sup> )	CAPEAMENTO MÉDIO (m)	ESPESSURA ÚTIL DE XISTO (m)	RELAÇÃO XISTO / ESTÉRIL	TEOR MÉDIO DE ÓLEO (%)	POTENCIAL DE PRODUTOS BASE SECA: ENSAIO FISCHER			
							ÓLEO 10 <sup>6</sup> bbl	GLP 10 <sup>6</sup> t	GAS COMB 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	ENXOFRE 10 <sup>6</sup> t
Rio Iguaçu	2 <sup>a</sup>	60,0	30,0	3,1	1:4,6	7,2	173,3	1,2	5,9	2,7
Rio Negro										

Fonte: PADULA (46)

Em resumo, de acordo com os trabalhos desenvolvidos até agora e em consonância com o atual estágio da tecnologia de industrialização do xisto no Brasil, a Petrobrás já identificou um volume de recursos superior a dois bilhões de barris de óleo de xisto na formação Irati (vide tabela 17).

Naturalmente áreas que dentro dos critérios até aqui utilizados se mostraram inadequadas para um aproveitamento econômico, poderão tornar-se promissoras em função do desenvolvimento da tecnologia de mineração e processamento do xisto, vindo assim aumentar a quantidade de recursos com perspectivas de aproveitamento econômico.

TABELA 17

## RECURSOS MEDIDOS - FORMAÇÃO IRATI

ESTADO E MUNICÍPIO	CAMA DA	ÁREA CUBADA (Km <sup>2</sup> )	CAPEAMEN TO MÉDIO (m)	ESPESSUR A ÚTIL DE XISTO (m)	RELAÇÃO XISTO / ESTÉRIL	TEOR DE ÓLEO (%)	POTENCIAL DE PRODUTOS BASE SECA: ENSAIO FISCHER				OBSERVA ÇÕES
							ÓLEO 10 <sup>6</sup> bbl	GLP 10 <sup>6</sup> t	GAS COMB / 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	ENXO FRE 10 <sup>6</sup> t	
PARANÁ	1. <sup>a</sup>	60,0	17,5	6,4	1:2,7	7,3	560,0	3,9	19,0	8,7	-
SÃO MATEUS DO SUL	2. <sup>a</sup>	64,5	-	3,2							
PARANÁ	2. <sup>a</sup>	60,0	30,0	3,1	1:4,6	7,2	173,0	1,2	5,9	2,7	intrusão na 1. <sup>a</sup> ca mada
S. CATARINA	1. <sup>a</sup>	45,0	25,0	7,0	-	6,8	580,0	4,0	19,7	9,0	intrusão na 1. <sup>a</sup> ca mada do trecho Norte
PAPANDUVA/ TRÊS BARRAS	2. <sup>a</sup>	110,0	-	3,1							
R.G.DO SUL	2. <sup>a</sup>	275,0	17,5	2,9	1:6,1	6,9	705,0	5,0	24,3	11,0	Elevada percenta gem de fi nos Baixo teor de óleo na 1. <sup>a</sup> camada
TOTAL DOS RECURSOS							2018,0	14,1	68,9	31,4	-

Fonte: PADULA (46)

#### IV.9 - Análise comparativa entre os xistos do Vale do Paraíba e da Formação Irati

Conforme já foi salientado anteriormente, a Petrobrás iniciou suas atividades de pesquisa do xisto no Vale do Paraíba, deslocando posteriormente seu foco de atenções para o xisto da formação Irati. Isto foi consequência de uma série de características diferentes entre o xisto do Vale do Paraíba (XVP) e o xisto da formação Irati (XFI), as quais tornam muito mais interessante e apropriado o aproveitamento do XFI.

A principal delas, sem dúvida, diz respeito à diferença de teor de umidade observada entre os dois xistos. Enquanto o XFI possui um teor de umidade de 5 a 7%, o XVP atinge a 33% (33). Uma vez que a retortagem, a mais importante etapa do ciclo de aproveitamento do xisto, ocorre em temperatura de cerca de 500° C, a água contida no xisto cru é então evaporada. Sendo a evaporação um processo endotérmico, quanto maior o teor de umidade do xisto maior será o consumo de energia envolvido em seu aproveitamento, podendo inclusive chegar a comprometer o balanço energético do processo.

De acordo com os testes realizados pela Petrobrás, com o processo PETROSIX, no caso do XVP a secagem, eliminação da água e retortagem consumiram de 80 a 83% do potencial térmico do processo. Já para o XFI, em função do seu pequeno teor em água, o potencial térmico absorvido no processo é de cerca de 25% (33). Desta maneira, a fração líquida de óleo obtida a partir do XFI é maior que a partir do XVP.



Outro aspecto favorável ao aproveitamento do XFI diz respeito à sua composição química, uma vez que revela-se potencialmente mais rico nos subprodutos típicos da industrialização do xisto, como o enxofre e hidrocarbonetos gasosos, que o XVP.

Os dois xistos, submetidos ao ensaio Fischer, revelaram as seguintes características:

TABELA 18

RESULTADO DO ENSAIO FISCHER PARA O XFI E O XVP

CARACTERÍSTICA	XFI	XVP
TEOR DE ÓLEO	7,3%	4%
TEOR DE ÁGUA	7%	33%
TEOR DE ENXOFRE	4%	0,7%
RELAÇÃO <u>TONELADA DE XISTO</u> <u>BARRIL DE ÓLEO</u>	2	3,6

Fonte: Sayão Lobato (33)

No que tange à mineração, na jazida de São Mateus do Sul (PR) o XFI apresenta-se em duas camadas, com um teor médio de óleo igual a 7,3% em peso e uma espessura total de 9,6 m, sendo a razão entre material estéril e xisto útil da ordem de 2,7. No Vale do Paraíba, embora a espessura total da camada seja bem superior (36m), o seu teor de óleo varia largamente ao longo da coluna, sendo que o seu aproveitamento integral implica em um teor médio de óleo de 4% em peso. Para obter-se rendi

mento em óleo semelhante ao observado em São Mateus do Sul , além de uma redução na espessura aproveitável ocorre também um aumento no número de camadas, implicando assim na necessidade de uma mineração seletiva e, conseqüentemente, na elevação dos custos de mineração, além de uma diminuição na quantidade de óleo produzido.

Na tabela a seguir são apresentados os parâmetros envolvidos em algumas possibilidades de mineração seletiva para o XVP, e os correspondentes do XFI (jazida de São Mateus do Sul).

TABELA 19

XFI E XVP (MINERAÇÃO)

CARACTERÍSTICA	XVP					XFI
	4%	5%	6%	7%	8%	
TEOR MÉDIO DE ÓLEO	4%	5%	6%	7%	8%	7,3%
NÚMERO DE CAMADAS	3	6	6	6	4	2
ESPESSURA TOTAL (m)	30,3	19,0	12,2	8,3	5,2	9,6
RELAÇÃO $\frac{\text{MATERIAL ESTÉRIL}}{\text{XISTO ÚTIL}}$	0,9	2,0	3,6	5,7	9,7	2,7

Fonte: Padula (46)

Aliada a esses fatores existe a constatação, feita a partir dos estudos efetuados pela Petrobrás e estimativas dos pesquisadores do assunto, de que as reservas de xisto contidas na formação Irati são bem maiores que as do Vale do Paraíba ,

conforme foi apresentado no decorrer deste trabalho. Além disso, deve ser citado que o XVP apresenta dificuldades para o seu manuseio, em função da sua alta pegajosidade, o que acarreta uma elevação dos custos da seção de preparação de sólidos (34).

Finalmente, a título de comparação, a tabela a seguir apresenta alguns dados resultantes da experiência da Petrobrás, através da utilização do processo PETROSIX, com estes dois xistos.

TABELA 20

XFI E XVP (PROCESSO PETROSIX)

CARACTERÍSTICA	XFI	XVP
Movimentação de sólidos para produção de 1.000 barris de óleo de xisto*	8,35 t/bbl	10,47 t/bbl
Subprodutos por barril de óleo de xisto		
- GLP	0,075 bbl	-
- enxofre	17 Kg	3 Kg
- gás combustível (seco e depurado)	36,5 m <sup>3</sup>	42,0 m <sup>3</sup>
- poder calorífico do gás (em poder do óleo combustível equivalente)	0,18 bbl	0,09 bbl
Área anual de lavra média para 10000 bpdó**	0,26 Km <sup>2</sup>	0,39 Km <sup>2</sup>
Água vaporizada na retorta por barril de óleo de xisto	0,16 t	1,07 t

Fonte: Sayão Lobato (33)

\* Incluindo o xisto retortado.

\*\*Barris por dia de operação.

Foi com base nestes e outros dados comparativos que a Petrobrás deslocou o seu interesse do xisto do Vale do Paraíba para o xisto da formação Irati, escolhendo a região de São Mateus do Sul como local para construção de uma usina protótipo para aproveitamento do xisto pelo processo PETROSIX.

## V - PRODUÇÃO DE ÓLEO A PARTIR DO XISTO

### V.1 - Introdução

Embora exista uma considerável gama de diferentes possibilidades para o aproveitamento dos recursos de xisto, tanto em termos energéticos quanto não-energéticos, a tendência generalizada dentro do contexto mundial é no sentido de utilizá-lo primordialmente como fonte energética alternativa para a produção de óleo, de características semelhantes ao petróleo de poço.

Em particular no caso do Brasil, que devido à sua pequena produção de petróleo depende fortemente das importações do produto, o anseio de diminuir essa dependência externa faz com que essa tendência se acentue, de modo que todos os esforços empreendidos no desenvolvimento da indústria do xisto estão concentrados no sentido de aproveitá-lo para a produção de óleo.

Dentro desse panorama, procurar-se-á apresentar neste capítulo uma descrição sucinta dos principais processos de produção de óleo a partir do xisto.

Estes processos podem ser agrupados, de uma maneira geral, em duas categorias:

- processos ex-situ: nos processos dessa categoria o xisto é retirado de seu leito natural para posterior retortagem na superfície;

- processos in-situ: processos em que o xisto é retortado em seu leito natural, dispensando dessa maneira a mineração.

Na primeira parte do capítulo serão discutidos os processos ex-situ, enquanto os processos in-situ serão discutidos na segunda parte. Finalmente, em uma terceira e última parte, será abordada a questão do tratamento do óleo após a retortagem.

## V.2 - Processos Ex-situ

### V.2.1 - Mineração

Para que o xisto possa ser retortado na superfície (processos ex-situ) é necessário que ele seja removido de sua formação subterrânea natural. As técnicas de mineração podem ser classificadas, basicamente, em duas categorias:

- mineração de superfície (open-pit, strip);
- mineração subterrânea (room-and-pillar, block caving, etc.)

Vários fatores influem na escolha do tipo de mineração a ser empregado, tais como: acessibilidade e extensão do depósito, condições topográficas, espessura do capeamento, teor de óleo do xisto a ser minado e muitos outros. Entretanto, independentemente da técnica escolhida, todas minerações de xisto em escala comercial terão duas características em comum: serão grandes e caras.

Para que se tenha um ponto de referência, a usina de xisto de São Mateus do Sul, para uma produção de cerca de 50.000 bbl/dia, irá requerer a remoção de 112.000 t de xisto por dia. Isto considerando-se apenas o minério, pois se for computado também o material estéril deslocado este número se eleva para cerca de 417.000 t/dia.

- Mineração de Superfície:

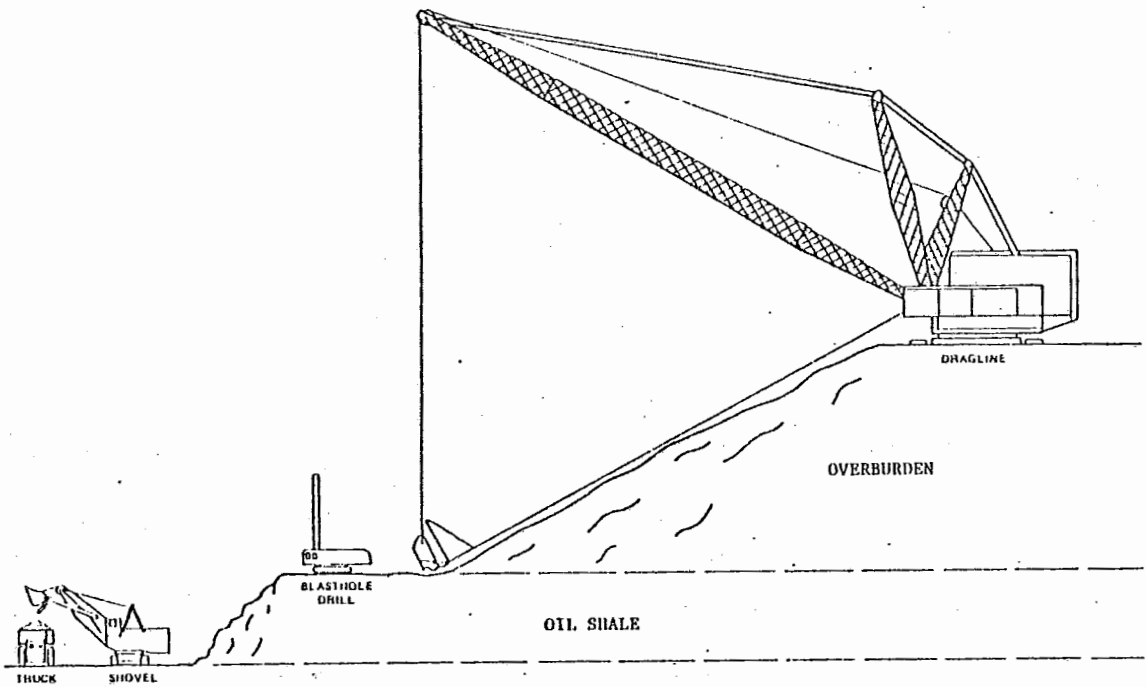
A princípio a mineração de superfície é a mais adequada para depósitos que estão cobertos por capeamentos não muito espessos, sendo econômica em operações de larga escala por permitir uma alta recuperação dos recursos e a utilização de grandes e eficientes equipamentos de mineração.

Na mineração strip (fig. 4), que é a que será empregada em São Mateus do Sul, o capeamento é removido por uma dragline, uma grande e potente escavadeira, e é colocado em uma área adjacente. Quando o depósito fica exposto, vários buracos são perfurados e recheados com explosivos. O xisto é assim fracionado em pedaços razoavelmente pequenos, que podem ser colocados em caminhões e transportados da área de mineração para as retortas. A dragline é então deslocada para trás, remove mais capeamento e o processo continua.

A mineração do tipo open-pit é conceitualmente simples e seus aspectos técnicos são razoavelmente bem conhecidos. Inicialmente um grande buraco é cavado até que o fundo do depósito seja alcançado. As paredes são então escavadas (fig. 5) de modo que o diâmetro do buraco cresce à medida que a mina vai

Figura 4

## MINERAÇÃO STRIP MINING





sendo explorada. O buraco não é cilíndrico devido à pressão a que as paredes estão submetidas. Durante a preparação do poço e antes que o fundo seja alcançado, este tem a forma de um cone circular invertido. Após o fundo ser atingido, a remoção de material das paredes cria um tronco de cone invertido.

Uma grande diferença entre os métodos strip e open-pit diz respeito à disposição do capeamento removido. Na mineração strip ele pode ser provisoriamente depositado em áreas adjacentes à mina e, uma vez exaurido um trecho, recolocado no buraco. Já na mineração tipo open-pit, o capeamento deve ser transportado para longe da mina de modo a não impedir a expansão da mineração, uma vez que pela natureza desta técnica ele não pode ser recolocado dentro do buraco durante o processo de extração do minério.

#### - Mineração Subterrânea:

Os métodos de mineração subterrânea são bastante adequados para depósitos que estão localizados a grandes profundidades, especialmente quando são razoavelmente espessos.

Um dos métodos mais utilizados de mineração subterrânea é o método room-and-pillar, que é mostrado na fig. 6. Neste método, uma parte do xisto é removido, formando grandes quartos subterrâneos, e o resto é deixado no local sob a forma de pilares para suportar o teto da mina. A razão entre as quantidades de xisto removido e de xisto deixado na mina como pilares depende da dureza do xisto, da altura da mina e da espessura de capeamento e xisto acima do teto da mina. Falando em termos mé

Figura 5

# MINERAÇÃO OPEN - PIT

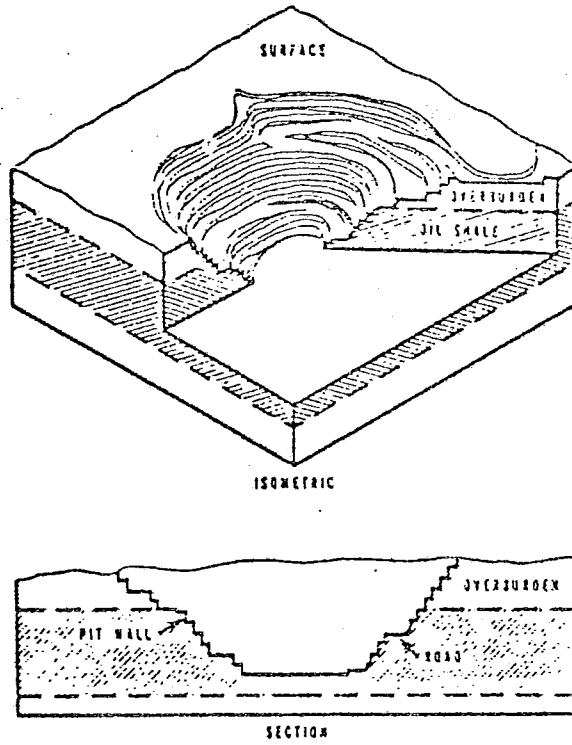
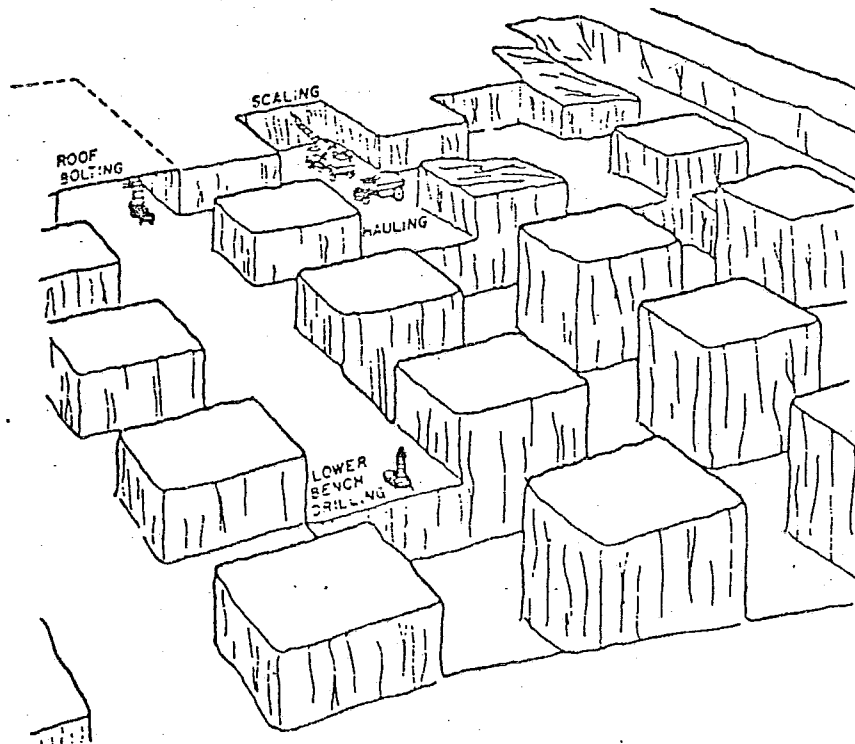


Figura 6

# MINERAÇÃO ROOM - AND - PILLAR



dios, cerca de 60% do xisto da zona de mineração é removido para posterior retortagem, enquanto os 40% restantes permanecem no subsolo sob a forma de pilares.

No caso do xisto americano, para suprir uma usina com produção de 50.000 barris por dia de óleo de xisto é necessária a remoção de 65.000 t de xisto por dia, havendo muito poucas minas de outros minérios produzindo quantidades similares a esta através da utilização da técnica room-and-pillar.

Existem várias outras técnicas de mineração subterrânea (block caving, longwall, etc...). No entanto, como no caso específico do xisto brasileiro a mineração de superfície parece ser mais indicada, uma descrição destas outras técnicas fugiria ao escopo do trabalho. Melhores informações acerca destas técnicas podem ser encontradas em (40).

#### V.2.2 - Retortagem

Uma retorta é um vaso no qual substâncias são destiladas ou decompostas pelo calor. Nas retortas de xisto, o xisto é aquecido para decompor o querogênio a temperaturas em torno de 500° C, e o óleo e o gás produzidos pela decomposição são removidos da retorta. Vários diferentes tipos de retortas têm sido desenvolvidos ao longo do processo de desenvolvimento da pesquisa de industrialização do xisto e, embora estas retortas sejam fruto das mais diversas concepções, elas podem ser convenientemente classificadas em um número limitado de categorias, de

acordo com a maneira pela qual o calor é transferido para o xisto:

- Classe I : aquecimento indireto por radiação e condução através das paredes da retorta;
- Classe II : aquecimento direto através da circulação de gases quentes resultantes da combustão de uma parte da matéria orgânica contida no xisto, sendo que esta combustão ocorre no interior da retorta;
- Classe III : aquecimento direto pela circulação através do xisto de um fluido condutor de calor aquecido externamente;
- Classe IV : transferência de calor pelo contato direto entre o xisto e sólidos quentes reciclados.

Atualmente esta classificação, que foi sugerida por Guthrie em 1964, pode ser expandida pela consideração de mais uma categoria:

- Classe V : outros métodos de transferência de calor, incluindo laser, micro-ondas e circulação de substâncias que desprendem calor através de reações químicas ou nucleares.

Retortas de cada uma das quatro primeiras categorias foram utilizadas no passado, sendo que algumas versões de cada tipo ainda estão em uso atualmente. Já as retortas mais exóticas da Classe V podem eventualmente vir a ser desenvolvidas para uma utilização generalizada, mas ao que tudo indica seu uso estará confinado aos laboratórios ainda por algum tempo.

As primeiras retortas da Classe I eram simples fornalhas imóveis nas quais o xisto era aquecido pela combustão externa de madeira ou carvão. Com a carga aquecida, o gás e o óleo vaporizado produzidos passavam para o topo da retorta, sendo o óleo recuperado da corrente por grosseiros condensadores a ar refrigerado. A eficiência térmica dessas primeiras unidades era muito baixa, sendo sua utilização justificada pela ampla disponibilidade de combustíveis sólidos e a relativa preciosidade dos combustíveis líquidos.

Retortas mais sofisticadas desta classe foram desenvolvidas no século passado a partir do início da extração intensiva de óleo de xisto na Escócia, quando passou a haver uma maior preocupação com o aumento da eficiência térmica do processo, o que foi conseguido através da recuperação do calor remanescente do gás conduzido e das correntes de gás produzido.

Nas retortas de Classe II, entre as primeiras que surgiram, o xisto era queimado como combustível sólido e o único produto útil era o calor de combustão, sendo o desprendimento de óleo ou gás puramente incidental pois todos os pro

dutos combustíveis eram consumidos no processo. As primeiras re  
tortas eram simples fogões ou espaços aquecedores que evolui  
ram gradualmente para mais sofisticados trocadores de calor e  
caldeiras. Retortas de combustão direta ainda são utilizadas na  
Estônia, onde o xisto local (kukersite) é queimado como combust  
tível sólido para geração de eletricidade.

Quando a recuperação do óleo contido nos xistos passou  
a tornar-se mais importante outras retortas de Classe II pas-  
saram a ser desenvolvidas. Nestas retortas apenas uma parte  
da carga de xisto era queimada. O calor de combustão era trans  
ferido para o xisto em outra parte da retorta e os produtos da  
pirólise do xisto não queimado eram recuperados da corrente de  
gás de saída (combustão segregada). Este princípio é ainda uti  
lizado em várias retortas modernas como, por exemplo, a UNION  
"A", PARAHO e NTU.

Muitas retortas de Classe III foram projetadas no iní  
cio do Século XX e algumas de suas concepções são evidentes em  
processos modernos como o PETROSIX e o UNION "B". No caso mais  
simples, o fluxo de gases quentes provenientes de um processo  
de combustão separado (combustão de carvão em caldeiras, por  
exemplo) é circulado através do leito de xisto. Estes gases  
aquecem o xisto até a temperatura de pirólise e o óleo e gás  
originados desta são carregados pelo fluxo até os equipamentos  
de recuperação. Várias retortas foram projetadas de modo a per  
mitir o uso do carbono residual contido no xisto retortado de  
um processo contínuo como combustível para aquecedores de ga-  
ses. Estes gases provenientes dos aquecedores são então injeta

dos na retorta para produzir mais gás e mais carbono residual. Uma variante deste procedimento é utilizada no processo PETRO-SIX, que será discutido com mais detalhes um pouco mais adiante.

As retortas de Classe IV foram desenvolvidas recentemente. Estas retortas apresentam seu funcionamento baseado no contato direto do xisto cru com sólidos quentes condutores de calor, ao invés de condutores de calor gasosos como nas retortas de Classe III. Atualmente são usados três tipos de retortas da Classe IV. A retorta TOSCO II, que usa bolas de cerâmica como condutores de calor, a LURGI-RUHRGAS, que foi desenvolvida para gaseificação de carvão e usa xisto retortado ou areia como condutores de calor, e a UTT-500, soviética, que também usa xisto retortado como condutor de calor.

Atualmente, os requisitos exigidos de um processo de retortagem para que ele possa ser considerado economicamente viável são os seguintes:

- 1 - o processo deve ser contínuo;
- 2 - deve ser capaz de operar com altas taxas de produção;
- 3 - ele deve ser termicamente auto-suficiente, sem requerer combustível externo (ou seja, toda energia requerida pode ser obtida pela queima do gás produzido ou carbono residual);
- 4 - deve requerer baixos investimentos de capital;
- 5 - deve ser mecanicamente simples e facilmente operável, acarretando assim baixos custos operacionais;

- 6 - deve ser capaz de processar com eficiência uma faixa larga de tamanho das partículas de xisto cru;
- 7 - deve operar de maneira a não causar sérios danos ao meio ambiente.

As retortas com aquecimento indireto (Classe I) possuem uma baixa taxa de transferência de calor e, conseqüentemente, requerem instalações amplas e caras para elevadas taxas de produção. Atualmente nenhuma retorta de Classe I é considerada viável para aplicações comerciais. As candidatas são retortas das Classes II, III e IV, sendo que muitas delas encontram dificuldades para preencher todos os requisitos listados acima.

A seguir será feita uma descrição mais detalhada dos processos TOSCO II e PETROSIX. O primeiro por ter sido o mais testado até aqui além da originalidade de sua concepção, e o PETROSIX por ser o que vem sendo utilizado, e deve continuar a sê-lo no futuro, no processamento dos xistos brasileiros.

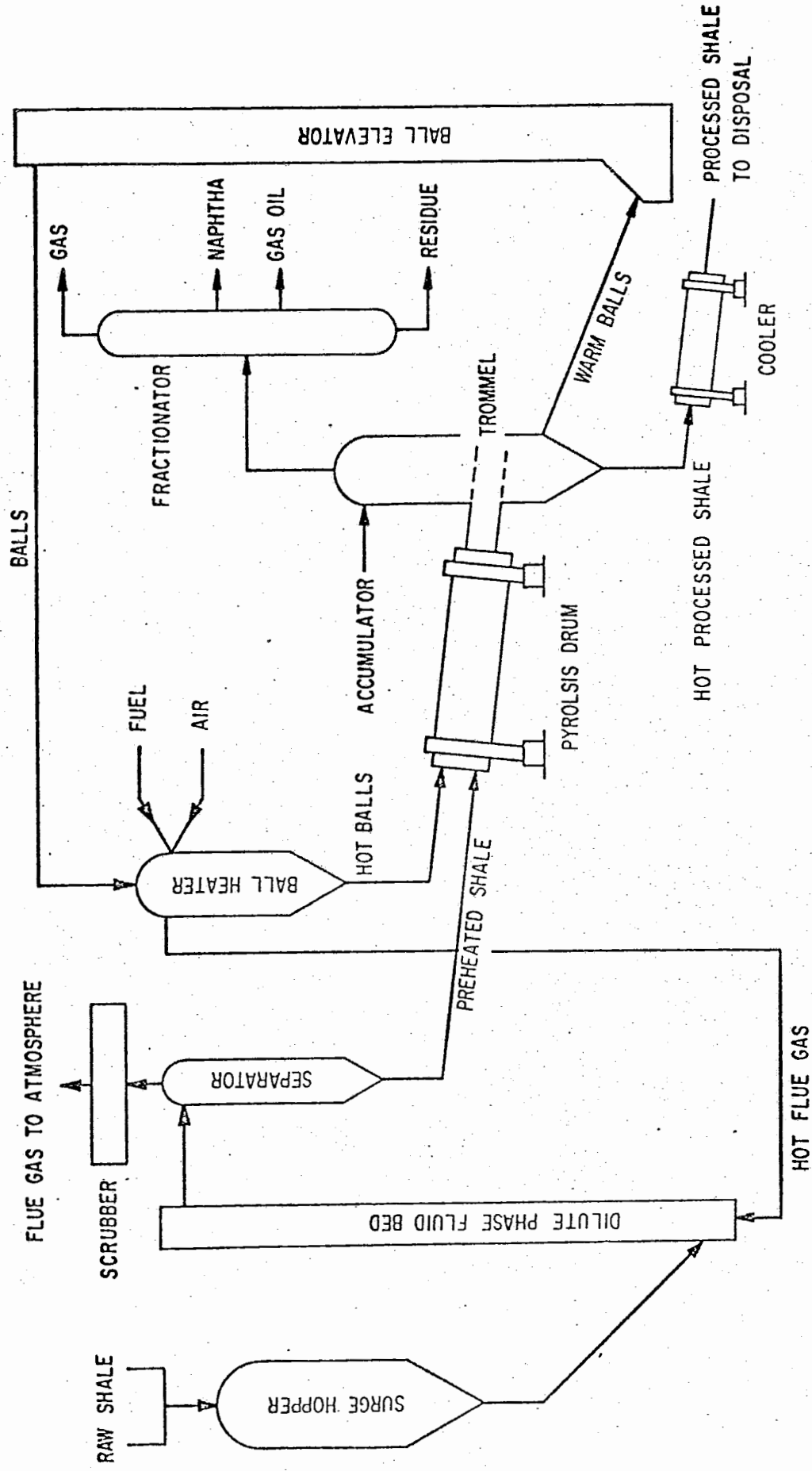
- TOSCO II:

O TOSCO II, mostrado na fig. 7, é um sistema de retortagem de Classe IV que utiliza bolas cerâmicas quentes para transmitir calor ao xisto finamente dividido. Inicialmente o xisto é fracionado em partículas bem pequenas (cerca de 1 cm) e entra no sistema através de tubos elevadores (lift pipes). Correntes de gases quentes no interior destes tubos elevam o xisto e o aquecem. A retorta é um tambor rotativo de aço, onde o xisto preaquecido entra em contato com as bolas de cerâmica



Figura 7

POCESSO DE REPORTAGEM TOSCO II



quentes que elevam sua temperatura para cerca de 500º . O óleo e o gás produzidos são retirados da retorta e coletados para o refino. O xisto retortado é separado das esferas durante a passagem sobre uma grade perfurada. As bolas são elevadas para o aquecedor onde são reaquecidas (até 650º C) por uma corrente de gases quentes e retornam ao tambor de pirólise.

As taxas de recuperação de óleo no processo TOSCO II são altas, aproximando-se e em alguns casos excedendo aquelas obtidas em ensaios de laboratório cuidadosamente controlados (ensaio Fisher, p.ex.). Os gases obtidos durante a retortagem também são de alta qualidade, mas a maior parte deste gás é consumido no aquecimento das esferas, restando pouco para ser aproveitado.

O processo TOSCO II tem duas grandes vantagens. A primeira é sua capacidade de retortagem de finos (partículas de xisto extremamente pequenas), o que não acontece com a maioria dos outros processos e torna possível o aproveitamento de todo o xisto da jazida. Outra vantagem é que este sistema de retortagem foi estudado intensivamente na prática por muito anos , propiciando um bom conhecimento de seus aspectos operacionais.

Mas, apesar do fato de trabalhar com partículas pequenas de xisto ser vantajoso por um lado, a necessidade de fracionamento do xisto implica em uma elevação dos custos operacionais, sendo que estes custos acarretam uma redução na vantagem do aproveitamento integral do depósito. Além disso, a complexidade mecânica do TOSCO II, que possui muitas partes móveis (elevadores, tambor de pirólise, etc...) que estão sujeitas a

quebras e desgaste mecânico, é um aspecto desvantajoso, uma vez que um problema em um destes dispositivos provoca a parada de todo o sistema, a menos que dispendiosos dispositivos de reserva tenham sido considerados no projeto.

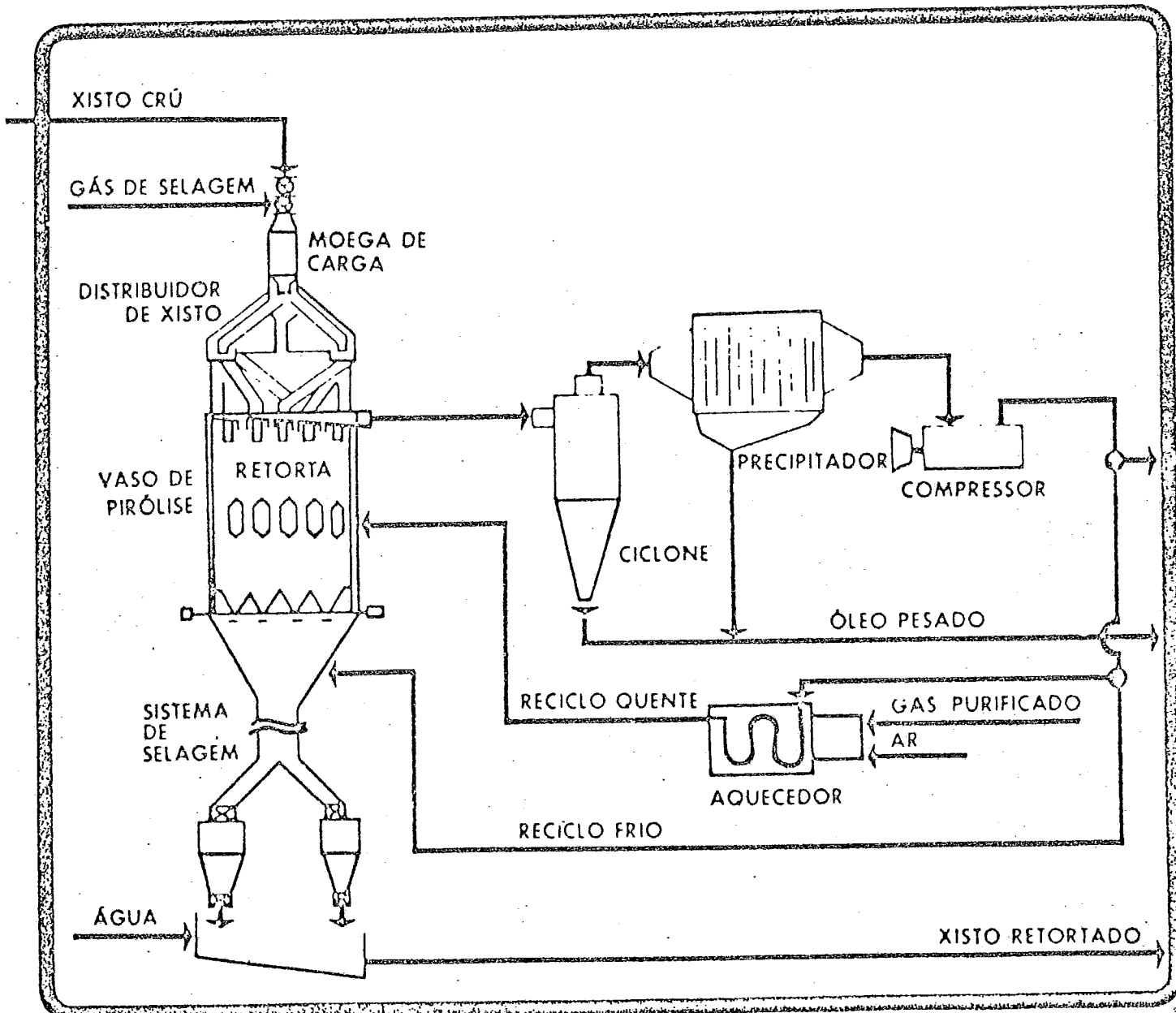
- PETROSIX:

Este processo de retortagem, que é mostrado na figura 8, caracteriza-se pelo escoamento gravitacional de partículas de xisto nas retortas, em contracorrente com um fluxo gasoso aquecido externamente e capaz de suprir toda a demanda energética necessária à pirólise. Tanto o escoamento do xisto como o fluxo de gases devem-se processar nas melhores condições de uniformidade ao longo de toda seção da retorta. Durante este processo formam-se quatro zonas distintas na retorta, na seguinte seqüência:

- zona de secagem: na zona de secagem o fluxo de xisto frio descendente entra em contato com a corrente ascendente de gases quentes e vai se aquecendo até que toda umidade nele contida se desprende, incorporando-se à corrente de gases;

- zona de aquecimento: após as partículas de xisto cru tornarem-se completamente secas pela perda de umidade sob a forma de vapor d'água, elas atravessam a zona de aquecimento onde recebem a quantidade de calor necessária para elevar sua temperatura até o ponto em que se inicia o desprendimento de vapores de hidrocarbonetos, indicativos do início da pirólise;

Figura 8  
PROCESSO PETROSIX



- zona de pirólise: na zona de pirólise desprendem-se vapores de óleo, gases de pirólise e vapor d'água às custas da transformação da matéria orgânica contida nas partículas sólidas por força da energia calorífica fornecida pela mistura dos ciclos frio e quente;

- zona de resfriamento: por escoamento gravitacional o xisto retornado tem, após a pirólise, acesso à zona de resfriamento, onde perde grande parte do calor para o fluxo de ciclo frio ascendente até ser descarregado na base da retorta.

A corrente de gases efluentes da retorta é composta de vapor d'água, óleo em fase de vapor ou são forma de neblina e gases da pirólise. Em virtude da velocidade considerável com que escoam os gases há de se contar também com a presença de partículas sólidas arrastadas do leito de xisto.

Numa primeira etapa de tratamento estas partículas, bem como as maiores gotículas de óleo como neblina, são retiradas do fluxo por separadores centrífugos (ciclones). Em seguida um trabalho mais refinado de remoção de óleo e limpeza do gás é feito por intermédio de precipitadores eletrostáticos.

Efetuada esta primeira etapa de remoção mecânica ou eletrostática de partículas sólidas de óleo, o fluxo de gases é dividido em três partes. A primeira delas é orientada para a linha de descarga e atravessa sucessivamente as seguintes seções:

a) de recuperação de óleo leve, onde os hidrocarbonetos a partir do pentano e grande parte do vapor d'água são re-

cuperados por condensação;

b) de recuperação de enxôfre, onde a quase totalidade de sulfeto de hidrogênio, dióxido de enxôfre e gás carbônico são retiradas. Em seguida esses gases sofrerão tratamento até a obtenção de enxôfre a partir do sulfeto de hidrogênio;

c) obtenção de gás liquefeito de petróleo (GLP) com retirada de propano, propeno, butano e buteno. A mistura gasosa remanescente composta principalmente de hidrogênio, metano, etano, eteno, monóxido de carbono e nitrogênio que constitui o gás combustível resultante pode ser utilizada, se necessário, como fonte suplementar de calor para o sistema.

A segunda parte constitui o reciclo frio e será inserida na base da retorta através de um distribuidor de gases. A terceira e última corrente que constituirá o transportador de calor da fonte externa para o sistema atravessará o aquecedor de gases do processo, onde será aquecida à temperatura adequada para que, ao ser injetada através do distribuidor de gases situado no primeiro terço da altura do vaso, possa fornecer, ao misturar-se com a corrente ascendente de reciclo frio, a temperatura adequada para pirólise (450-550° C).

### V.3 - Processos in-situ

A retortagem do xisto em seu próprio leito natural (processos in-situ) apresenta algumas vantagens significativas sobre os processos mais convencionais de mineração e retortagem na superfície. Em primeiro lugar o processamento in-situ requer a mineração de pequena quantidade ou nenhum xisto do depósito e, como já foi discutido anteriormente, a exploração comercial de uma jazida de xisto através de processos de superfície requer a mineração de grandes quantidades de xisto, representando uma parcela significativa dos custos de produção de óleo. Ao mesmo tempo, o depósito do xisto retortado na superfície é um dos grandes problemas gerados pelo emprego destes métodos, problema este que não existe para os processos in-situ, haja visto que o xisto retortado permanece naturalmente no interior do depósito. Além disso este tipo de processamento é aplicável a depósitos de várias espessuras e profundidades, inclusive alguns onde a aplicação das técnicas convencionais de mineração não é adequada.

A maioria dos processos de retortagem in-situ (assim como nos processos de superfície) utiliza um fluido para transferir ao xisto o calor necessário à retortagem. Entretanto em suas condições naturais a maior parte dos depósitos de xisto é impermeável à passagem do fluxo de fluidos, sendo que apenas as parcelas que são naturalmente permeáveis ou que podem ser artificialmente permeabilizadas são adequadas a este tipo de tratamento. Na ausência de permeabilidade a transferência de calor para retortagem pode ser feita através de condução térmica

ca, mas, em função do xisto não ser um bom condutor de calor , este tipo de transferência de calor torna o processo lento e ineficiente.

Existem duas linhas de desenvolvimento das tecnologias de retortagem in-situ. A primeira, denomina "in-situ modificada" requer que uma parte do material seja minado de modo a permitir um espaço vazio e uma superfície livre para facilitar o fracionamento do xisto no local, tornando-o permeável. Após o fracionamento efetua-se a retortagem in-situ. Esta tecnologia pode ser aplicada tanto em uma configuração horizontal, aplicável no caso de depósitos pouco espessos, quanto em configuração vertical, mais adequada para depósitos razoavelmente espessos. O xisto que é removido no início do processo pode eventualmente ser retortado na superfície, de acordo com a conveniência econômica de tal procedimento.

A segunda linha de retortagem in-situ utiliza técnicas de fracionamento para quebrar o xisto no seu leito natural, sem a remoção de nenhuma parte da jazida, procedendo-se então à retortagem propriamente dita. Esta técnica é denominada de "in-situ verdadeira". Neste tipo de retortagem bombea-se ar para o interior do depósito, de modo a sustentar a combustão, sendo que os produtos da pirólise são recuperadas através de poços previamente perfurados.

Em ambas tecnologias in-situ o querogênio é decomposto e os fragmentos de pequeno peso molecular resultantes da decomposição são transportados para a região a frente da zona de combustão. Deve ser tomado muito cuidado no controle deste pro



cesso de modo que a queima dos produtos não resulte na recuperação de um óleo pobre.

Finalmente, como último tópico, cabe salientar que um aspecto ainda não perfeitamente conhecido diz respeito à contaminação de lençóis d'água subterrâneas, do mesmo modo que acontece com o problema de lixiviação provocado pelo depósito do xisto retortado nos processos de superfície.

#### V.4 - Tratamento do óleo

Para que o óleo obtido a partir do xisto possa ser refinado nas mesmas unidades onde é processado o petróleo, é necessário que antes que seja submetido a um tratamento para eliminação de suas impurezas. Entre estas, o mais inconveniente são os compostos nitrogenados, em função de sua instabilidade, odor, propriedade de formar e catalizar a formação de gomas e em razão de sua ação deletéria sobre os catalizadores de refino de natureza ácida.

A alta relação carbono/hidrogênio existente neste óleo obtido a partir do xisto sugere a utilização de processos que adicionem hidrogênio ou retirem carbono, distinguindo-se a hidrogenação catalítica das frações leves (hidrocarbonetos) e o coqueamento retardado das frações pesadas.

O esquema que provavelmente será adotado pela PETROBRÁS é o seguinte: o óleo cru é fracionado apenas em um corte pesado, que é submetido ao coqueamento retardado, e um corte le

ve que é enviado todo a uma unidade de hidrotreatamento, de onde sai como produto principal o que se chama de cru sintético. Este produto é, posteriormente, destilado junto com o petróleo e convertido nos devidos de interesse comercial (nafta, gasóleo leve e gasóleo pesado).

Quanto à questão da localização das unidades de hidrotreatamento há de se considerar a própria estrutura refino do país. Nos Estados Unidos, por exemplo, onde predominam unidades de reforma catalítica para refino de petróleo, é grande a produção de hidrogênio, o que eventualmente viabiliza o seu transporte para as usinas de xisto a fim de ser utilizado no hidrotreatamento do óleo. Já no caso brasileiro a situação é bastante diversa, haja visto a existência de apenas duas unidades de reforma — a da REPAR (Refinaria do Paraná) e a da REDUC (Refinaria de Duque de Caxias) — que são fontes de hidrogênio, o que faz com que o hidrotreatamento do óleo cru deva ser feito junto às refinarias.

## VI - IMPACTOS AMBIENTAIS

Uma das grandes dificuldades associadas à industrialização dos xistos oleíferos diz respeito aos impactos ambientais acarretados pelo seu aproveitamento, pois, além do considerável número de tipos de poluição que lhe são específicos, mesmo no que concerne aos aspectos que são comuns a outras atividades a industrialização do xisto apresenta um caráter mais crítico, em função do considerável porte de suas instalações.

Dentro deste panorama, o presente capítulo tem por objetivo apresentar uma descrição sucinta dos principais problemas de poluição vinculados ao processo de industrialização do xisto, assim como das atividades desenvolvidas pela PETROBRÁS para saná-los.

Antes, porém, é importante que sejam feitas algumas ressalvas importantes. Primeiramente, ao se fazer referência à industrialização do xisto estar-se-á reportando à produção de óleo em particular, pois, apesar do xisto apresentar várias outras formas alternativas de utilização, este parece ser o caminho a ser seguido pela PETROBRÁS, pelo menos a médio prazo, no aproveitamento dos recursos nacionais.

Em segundo lugar, ao se tratar dos diversos aspectos de poluição advindas da industrialização do xisto, considerar-se-á apenas as tecnologias EX-SITU\*. A razão da não preocupação com as tecnologias ditas IN-SITU\* justifica-se pelo fato que ,

---

\* Ver capítulo V.

além destes processos possuírem um grau bem menor de desenvolvimento, a sua aplicabilidade às condições de ocorrência dos recursos nacionais parece inviável.

Finalmente, como último tópico, cabe salientar que , apesar de ser bastante claro que deva existir um compromisso entre a quantidade poluição gerada por uma usina de xisto e sua capacidade de produção, uma análise da questão sob este prisma ainda não é factível, isto face à relativa incipiência desta indústria no Brasil e no mundo.

#### VI.1 - Poluição Atmosférica

Um dos importantes impactos ambientais decorrentes da industrialização do xisto diz respeito ao incremento na poluição atmosférica nas áreas de implantação das usinas de beneficiamento.

De uma maneira geral as fontes de poluição atmosférica, no tocante à operação das usinas, podem ser classificadas em duas classes. A primeira seria formada pelos vários focos emissores de material particulado devido ao manuseio dos sólidos, envolvendo basicamente a mineração, o transporte e a britagem do xisto cru, assim como o despejo do xisto retortado e os finos. A segunda seria formada pelas várias fontes emissoras de gases ao longo do processo de retortagem do xisto, beneficiamento dos produtos e nas facilidades e utilidades da usina (produção de vapor e energia elétrica, etc.).

Uma diferença básica entre estas duas classes de fontes de poluição atmosférica refere-se ao tipo de poluentes. Enquanto as fontes da primeira classe apresentam essencialmente um só tipo\* de poluente (material particulado), nas fontes da segunda classe são observadas emissões de vários tipos de poluentes, como dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio ( $\text{HO}_x$ ) e material particulado.

Dentre as fontes da primeira classe destaca-se a fase de mineração, sendo que, inclusive, o tipo de mineração utilizada é um dos fatores determinantes da quantidade de material particulado emitido. É interessante mencionar, a título de ilustração, que existem estimativas (20) de que o volume de material particulado emitido utilizando-se mineração a céu aberto é cerca de 7,5 vezes superior ao emitido utilizando-se mineração subterrânea.

Apesar da natureza dos problemas de poluição devidos à mineração não ser específica do xisto, uma vez que estes são semelhantes aos verificados no aproveitamento de outros minerais, onde uma longa experiência já foi acumulada, eles são peculiares quanto ao volume de material que será minerado e, conseqüentemente, quanto ao volume de material particulado a ser lançado na atmosfera. Para que se tenha uma idéia a respeito, a usina a ser instalada em São Mateus do Sul exigirá

---

\* Na realidade durante o transporte do xisto por caminhões também há emissão de gases, mas toda literatura disponível considera desprezíveis tais emissões. Uma estimativa destas emissões pode ser encontrada em (21).

a mineração diária de 112000 toneladas de xisto cru, o que implicará no manuseio de 417000 toneladas de material sólido(33). Para uma melhor avaliação destas dimensões basta notar que em 1975 as maiores minas de mineração a céu aberto e subter<sub>u</sub>rânea nos Estados Unidos produziam respectivamente 110000 t e 50000 t por dia ( 57 ).

Nas fontes da segunda classe (processo de produção de óleo e beneficiamento dos produtos) a emissão de poluentes, a menos de eventuais vazamentos, ocorre através de chaminés que emitem diluída no ar a parte dos gases não aproveitáveis produ<sub>z</sub>idos no processo.

De um modo geral os gases produzidos nesta etapa podem ser classificados em dois tipos básicos.

- gases de combustão: são os gases gerados como consequência da demanda energética do processo (energia térmica necessária ao processo de retortagem, à produção de vapor, à produção de energia elétrica e ao processo de beneficiamento do óleo). Supondo-se uma combustão completa os poluentes contidos nos gases de combustão são  $SO_2$  e  $HO_x$ , além de particulados. Caso a combustão não seja completa encontra-se ainda CO e hidrocarbonetos leves;

- gases de retortagem são os gases produzidos junto com o óleo de xisto e água quando as moléculas de querogênio são craqueadas no interior da retorta. Estes gases são formados principalmente de hidrocarbonetos leves e, tipicamente, de parcelas de hidrogênio e  $H_2S$ , as quais variam de acordo com a natureza do xisto e o processo de retortagem empregado.

Nos processos em que o  $H_2S$  é separado dos gases de retortagem e utilizado para produção de enxofre elementar, como é o caso do processo PETROSIX, há uma produção de  $SO_2$  que não é recuperável, sendo esta a principal fonte poluidora da atmosfera derivada dos gases de retortagem.

Na usina de São Mateus do Sul, segundo as previsões da PETROBRÁS, os gases efluentes da planta de produção de enxofre (unidade CLAUSS) serão oxidados, lançando no ar 90 t/dia de  $SO_2$ , além de particulado e  $NO_x$ .

Entretanto esta previsão da quantidade de  $SO_2$  a ser lançada na atmosfera não reflete fielmente o problema, uma vez que os efeitos perniciosos dos poluentes atmosféricos são função da concentração destas substâncias na atmosfera, e sobre isto não existe ainda nenhuma informação a respeito.

Em todo caso a operação da usina de xisto em São Mateus do Sul terá que se conformar à legislação a respeito, que objetiva estabelecer as concentrações máximas que mantêm a qualidade do ar em níveis toleráveis, de tal forma que os efeitos danosos possam ser considerados não significantes.

No Brasil há legislação de controle do meio ambiente a níveis estadual e federal. No caso da poluição atmosférica os limites máximos estabelecidos são todos idênticos entre as diversas legislações, sendo apresentados na tabela a seguir ao lado de alguns limites adotados nos Estados Unidos.

TABELA 21

PADRÕES DE QUALIDADE DO AR ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Poluentes	Período	Brasil	Estados Unidos				
			Primário <sup>4</sup>	Secundário <sup>5</sup>	Classe I <sup>5</sup>	Classe II <sup>7</sup>	Colorado <sup>8</sup>
Material	Ano <sup>2</sup>	80	75	60	5	10	45
Particulado	Dia <sup>1</sup>	240	260	150	10	30	150
Dióxido de Enxofre	Ano <sup>3</sup>	80	80	60	2	15	-
	Dia <sup>1</sup>	365	365	260	5	100	15
	3 horas <sup>1</sup>	-	-	1300	25	700	-
Monóxido de Carbono	8 horas <sup>1</sup>	10000	10000	10000	-	-	-
	1 hora <sup>1</sup>	40000	40000	40000	-	-	-
Oxidantes Fotoquímicos	1 hora <sup>1</sup>	160	160	160	-	-	-
Hidrocarbonetos	3 horas <sup>1</sup>	-	160	160	-	-	-
Óxidos de Nitrogênio	Ano <sup>3</sup>	-	100	100	-	-	-

1 - Não pode ser ultrapassado mais de uma vez por ano

2 - Média geométrica dos dados diários

3 - Média aritmética dos dados diários

4 - Concentração máxima permitida para proteger a saúde humana

5 - Concentração máxima permitida para proteger plantas e animais

6 - Áreas como parques onde pouco ou nenhum desenvolvimento pode ocorrer

7 - Áreas com desenvolvimento controlado

8 - Para "Non-Designated Areas", isto é, áreas não poluídas e que o Estado pretende manter. Deve-se notar que os índices nacionais também são aplicáveis nestas áreas.

FONTE : Legislação do Estado de São Paulo, (14) (8).



## VI.2 - Poluição Hídrica

Em uma usina de xisto ocorre a produção de diversos efluentes líquidos e sólidos que não são passíveis de um aproveitamento economicamente viável, o que implica em sua rejeição. Os principais efluentes são:

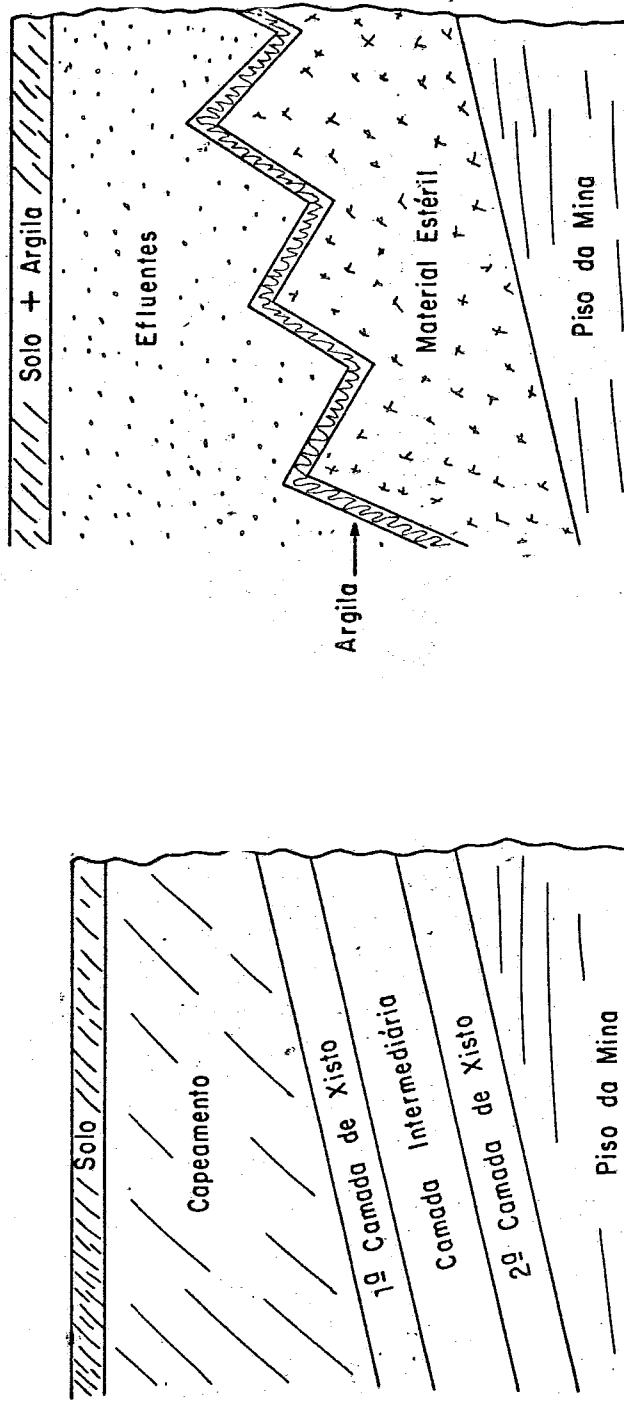
- material estéril (capeamento + camada intermediária);
- finos (partículas de xisto com granulometria inferior a 1/4');
- xisto retortado;
- água de retortagem;
- borra (resíduo sólido úmido com uma porcentagem de óleo de cerca de 10%).

Em função do grande volume destes rejeitos a melhor solução parece ser o seu depósito, após um eventual tratamento, nas cavas de mineração, recobrando-os posteriormente com uma camada de solo a fim de permitir o reflorestamento da área. No caso da usina de São Mateus do Sul o esquema adotado pela PETROBRÁS para o depósito dos efluentes é aquele mostrado na figura 3.

A forma de disposição dos rejeitos do processo de beneficiamento do xisto implica em uma série de efeitos nas águas e nas camadas do terreno, os quais estão bastante interligados, havendo implicações das alterações do terreno sobre as águas e vice-versa.

Figura 9

# PERFIL VERTICAL DA ÁREA DE MINERAÇÃO



a) Antes da Mineração

b) Após a Mineração

As alterações no solo e nas camadas do terreno são não somente a troca de sua disposição mas, principalmente, as transformações físicas e químicas que ocorrem no intervalo de tempo entre a mineração e o recebimento com a última camada de solo e reflorestamento.

As transformações químicas ocorrem principalmente com a camada de xisto que, após ser submetida às altas temperaturas de retortagem, com o aproveitamento da matéria orgânica e parte do enxofre nela contidos, volta à cava de mineração sob a forma de xisto retortado, água de retortagem, finos e borra. Quanto às transformações físicas, elas ocorrem em função da mudança da compactação das diversas camadas do terreno, inclusive a de xisto. Esta mudança da compactação é consequência do afrouxamento e fratura durante a mineração, assim como, no caso da camada de xisto, da retortagem, tendo como principal consequência o aumento da permeabilidade do terreno.

De um modo geral, todas estas transformações ocorridas com as camadas do terreno têm consequentes efeitos sobre as águas (em verdade a própria mineração já implica na alteração do sistema de drenagem natural), mas será dada aqui uma atenção especial ao problema de lixiviação das águas pluviais e lençóis freáticos.

A lixiviação consiste na dissolução e arraste pelas águas pluviais de sais e substâncias tóxicas contidos nas diversas camadas, principalmente na de xisto retortado. Estas águas percolam por entre as diversas camadas, podendo atingir lençóis d'água subterrâneos que, ao aflorarem, lançam nos rios

de superfície aqueles sais e substâncias tóxicas, gerando assim problemas de poluição hídrica.

Há de se ressaltar que existem muitos aspectos a serem melhor esclarecidos para que se possa avaliar a gravidade do problema associado à lixiviação. Em primeiro lugar, é preciso que se conheça bem a questão da infiltração vertical das águas e, se for o caso, qual o efeito que as tentativas de impermeabilização das camadas através da utilização de argila (vide figura 3) vão surtir. Em segundo lugar, este talvez o ponto mais delicado, há de se analisar melhor a possibilidade de direcionamento das águas e sua eventual captação para tratamento. Além disso, existem incertezas relativas quanto às concentrações dos poluentes nas águas lixiviadas pelo xisto retornado e água de retortagem.

A PETROBRÁS vem desenvolvendo pesquisas na usina protótipo de São Mateus do Sul no sentido de avaliar corretamente estes problemas, acreditando-se que até a entrada em operação da usina industrial eles venham a ser devidamente equacionados. Entretanto, persistem ainda algumas questões básicas a serem melhor esclarecidas para que se possa considerar o problema efetivamente solucionado.

A primeira delas diz respeito à viabilidade das técnicas de controle e captação das águas contaminadas. O cenário esperado pela PETROBRÁS é que as águas lixiviadas ao atingirem o piso da mina, por este ser impermeável, escoem segundo a sua inclinação para a frente da mineração, possibilitando assim sua captação via bombeamento. No entanto não existe ainda ne-

nhuma experiência mais concreta no sentido de avaliar a viabilidade de utilização deste procedimento.

Além disso, não foram ainda realizadas experiências no sentido de procurar avaliar a contaminação das águas pluviais ao atravessarem uma camada de xisto retortado e água de retortagem. Até o momento só foram realizadas análises sobre lixiviação do xisto retortado, o que não é suficiente, uma vez que de acordo com os planos da PETROBRÁS o xisto retortado será depositado nas cavas de mineração juntamente com a água de retortagem.

A tese sustentada até o momento pela equipe da PETROBRÁS é que a contaminação das águas pluviais por lixiviação não atingirá níveis que venham a transgredir a legislação e acarretar maiores problemas, sendo que, no caso disso vir a ocorrer, poderia ser feito um tratamento na água de retortagem antes de la ser depositada na cava de mineração, uma vez que é justamente nesta água que se encontram as principais substâncias potencialmente poluidoras (vide tabelas 22 e 23). No entanto estas expectativas não foram, pelo menos até aqui, comprovadas através de experiências conclusivas, permanecendo assim alguma incerteza relativa à solução destes problemas.

TABELA 22

## COMPOSIÇÃO MINERAL DAS CINZAS DO XISTO DE IRATI

Substância	% em peso
SiO <sub>2</sub>	63,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,0
FeO	2,3
TiO <sub>2</sub>	0,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,4
CaO	2,8
MgO	2,0
K <sub>2</sub> O	5,4
Na <sub>2</sub> O	4,6
Indeterminado	2,4

TABELA 23

## COMPOSIÇÃO DA ÁGUA DE RETORTAGEM DO XISTO DE IRATI

Substância	Concentração (mg/l)
Fenóis	247
Sulfetos	4352
Enxofre	5520
Nitrogênio Amoniacal	3630
Óleo	510
Sólidos em suspensão	4
Sólidos dissolvidos	486
Sólidos totais	490
DQO	16056
DBQO	4406

### VI.3 - Manuseio dos Sólidos e Recuperação do Solo

Um outro problema que merece ser analisado diz respeito à utilização da mineração a céu aberto que, a exemplo do que ocorre em São Mateus do Sul, deverá ser empregada em larga escala nas principais reservas de xisto do Brasil, acarretando sérios danos ao relevo da região e à paisagem (desmatamento). Além disso existem problemas quanto à estabilidade dos taludes, ao transporte e manuseio dos explosivos e ao manuseio e depósito do xisto retortado.

Relativamente à recuperação do solo minerado, inicialmente é feita a separação do solo que aguarda o regresso à vala do xisto retortado. Este, após ser depositado é recoberto com o solo alterado, que é uma mistura do solo e subsolo originais. O problema deste procedimento é a eventual degradação da qualidade do solo, com conseqüentes dificuldades para a revegetação.

Para a realização de estudos neste sentido foi firmado um convênio entre a PETROBRÁS e o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais de Piracicaba - IPEF. Os trabalhos efetuados consistiram em estudos em viveiros e, numa segunda fase, em canteiros, com a observação do desenvolvimento de três espécies vegetais: Pinus Taenda, Mimosa Scabrela (bracatinga) e Eucalyptus Viminalis.

Os resultados observados nos estudos em viveiros mostram que o solo alterado, com calagem e fertilizantes, é adequado ao desenvolvimento dessas espécies vegetais. A observação em

canteiros prossegue mas, segundo a PETROBRÁS, os resultados obtidos até aqui são suficientes para que não haja maiores preocupações com a solução do problema em escala industrial.

Quanto ao xisto retornado, além dos aspectos ligados à lixiviação, existe ainda a possibilidade de ocorrência do fenômeno de combustão espontânea, uma vez que ele ainda contém carbono residual e enxofre em sua composição.

Para uma melhor avaliação deste problema têm sido feitas, em São Mateus do Sul, diversas experiências com a deposição do xisto retornado na área de mineração e o acompanhamento da evolução das temperaturas por intermédio de termopares. Segundo a PETROBRÁS, os dados colhidos permitiram o equacionamento do problema no projeto de lavra do xisto, de modo que o xisto retornado possa ficar exposto em condições seguras até ser integralmente recoberto com o solo alterado.

Embora a PETROBRÁS não tenha até agora tecido maiores considerações acerca da questão, existe na literatura a respeito alguma preocupação quanto à presença de substâncias tóxicas e cancerígenas (benzopireno) no xisto retornado. Entretanto existem poucos estudos a este respeito, sendo sabido apenas que experiências de laboratório mostram que o benzopireno pode ser oxidado pelo ozônio gerando um composto inofensivo, não havendo ainda nenhuma experiência neste sentido em escala industrial.



#### VI.4 - Impactos Sociais

Além dos problemas de poluição atmosférica e hídrica, depósito do xisto retornado e água de retortagem, alterações do solo e produção de substâncias tóxicas discutidos até aqui, existem outros menos enfatizados pela bibliografia conhecida, mas que merecem ser objetos de atenção.

O primeiro deles é relativo ao uso da terra, pois apesar das ocorrências de xisto acontecerem em regiões relativamente não muito férteis (27), há o problema sócio-econômico envolvido com a perda da atual produção e as eventuais desapropriações, sendo interessante salientar que o tipo existente na região não é aproveitável para a nova atividade, o que acarretará uma cadeia de migrações, mudanças no tipo da região e modificações nos hábitos e na vida sócio-cultural da região.

Bastante ligado a estas mudanças existe um segundo problema que é o da infraestrutura das cidades e dos municípios locais, uma vez que o brusco crescimento populacional acarreta a necessidade de construção de estradas (inclusive para o funcionamento da própria usina), escolas e hospitais, saneamento básico, meios de transporte e demais estruturas fundamentais para o desenvolvimento de uma comunidade.

No sentido de melhor avaliar e estudar estes impactos para o caso específico de São Mateus do Sul, a PETROBRÁS e o Governo do Estado do Paraná firmaram um convênio com a Universidade Federal do Paraná, cujos resultados deram origem ao PAI - Plano de Ação Integrada - (27).

PARTE II

MODELO DE OFERTA DE ÓLEO DE XISTO

PARTE II - MODELO DE OFERTA DE ÓLEO DE XISTO

I - INTRODUÇÃO :

Uma dificuldade que surge ao se deparar com a meta de formular um modelo para o comportamento da indústria do xisto no Brasil diz respeito à disponibilidade de dados. Face à relativa incipiência desta indústria, informações sobre algumas relações importantes como, por exemplo, os compromissos existentes entre as diferentes tecnologias e a relação entre índices de poluição e escala das usinas, não são disponíveis sob forma quantitativa.

Por outro lado, os trabalhos da SIX (SUPERINTENDÊNCIA DE INDUSTRIALIZAÇÃO DO XISTO) já permitem boas estimativas dos custos de produção, considerando a utilização do processo PETROSIX, para a usina a ser instalada em São Mateus do Sul (PR). Além disso, a SIX possui conhecimento geológico de várias regiões da Formação Irati, sendo plausível pensar em extrapolações econômicas, apesar destas envolverem um considerável grau de imprecisão. Assim sendo, admitiu-se que seria possível obter dados sobre os custos de produção de óleo para usinas de xisto em várias regiões da Formação Irati.

Dentro desse panorama, procurou-se desenvolver um modelo de longo prazo, de implementação e manipulação bastante simples, trabalhando apenas com o processo PETROSIX e que levasse em conta as economias advindas do aprimoramento tecnológico associado ao desenvolvimento da indústria do xisto no Brasil.

Quanto aos aspectos ecológicos envolvidos no problema, foi considerado que os custos de produção fornecidos pela SIX incluiriam os custos com equipamentos e instalações necessários para a manutenção da qualidade do meio ambiente dentro dos padrões considerados aceitáveis pela legislação pertinente ao setor, estando referidos a um dimensionamento ótimo das usinas a serem instaladas.

Finalmente, o objetivo do modelo é a determinação da estratégia ótima de instalação das 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 xisto em cada período para cada possível cenário de preços do petróleo importado. Ou seja:

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

onde

$O(t)$  : oferta de óleo de xisto no ano  $t$ ;

$\Pi^t$  : preço do petróleo importado no ano  $t$ .

## II - CONCEPÇÃO

Para a modelagem do problema de produção e abastecimento de petróleo no Brasil, considerou-se uma boa aproximação a representação dos recursos nacionais de xisto e petróleo, assim como do mercado nacional de óleo, através de conjuntos de áreas produtoras e consumidoras.

Assim sendo, serão designadas por N e L o número de áreas potencialmente produtoras de óleo de xisto e petróleo, respectivamente, enquanto M representará o número de mercados regionais.

Com a finalidade de simplificar a exposição do modelo, foram utilizadas os índices  $i, j, k$  com o seguinte significado:

$i \rightarrow i$ -ésima área produtora de xisto ( $i = 1, \dots, N$ );

$j \rightarrow j$ -ésima área produtora de petróleo ( $j = 1, \dots, L$ );

$k \rightarrow k$ -ésimo mercado regional ( $k = 1, \dots, M$ ).

A cada uma das N áreas potencialmente produtoras de óleo de xisto será associado um vetor dado que quantifique as suas características relevantes ao modelo. A princípio, este vetor possuirá as seguintes componentes :

$PX_i \rightarrow$  capacidade anual de produção (bbl/ano)\*;

$TI_i \rightarrow$  tempo necessário para a instalação da usina (anos);

$TE_i \rightarrow$  tempo de exaustão de seus recursos (anos);

---

\* Admitiu-se que este dado tenha sido determinado em uma otimização anterior.

Naturalmente esta função deve possuir as seguintes características:

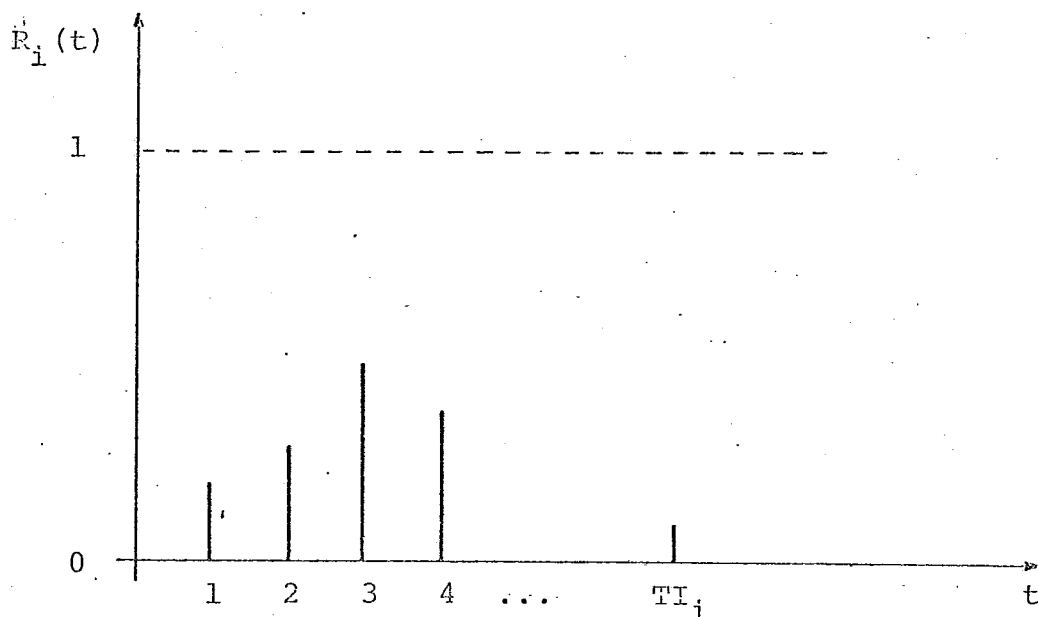
$$\sum_{t=1}^{TI_i} R_i(t) = 1$$

e

$$R_i(t) = 0 \quad \forall t > TI_i \quad \text{e} \quad \forall t \leq 0$$

De uma maneira genérica, esta função deve ser da forma mostrada na Figura 11, a seguir.

FIGURA 11 - FUNÇÃO DE DILUIÇÃO DO INVESTIMENTO



$K_i$  → capital necessário para a instalação da usina (US\$)\*;

$C_i$  → custo operacional anual (US\$/ano)\*.

A cada área produtora de petróleo será associada a sua produção anual, que poderá variar com o tempo, representada por  $PP_j^t$ .

De maneira semelhante, será associada a cada mercado regional sua respectiva demanda ao longo do tempo, representada por  $D_k^t$ .

Adicionalmente serão considerados ainda como parâmetros conhecidos: o preço do petróleo internacional para cada mercado em cada ano ( $\Pi_k^t$ ), o custo de transporte de um barril de óleo de uma área de produção para um dado mercado regional ( $CT_{ik}$  ou  $CT_{jk}$ ) e a disponibilidade de capital para investimentos em xisto em cada ano ( $KM^t$ ).

Finalmente, será considerada 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 já instaladas for aumentando. Desta maneira, serão consideradas conhecidas duas funções  $F(.)$  e  $G(.)$  com os seguintes significados :

$F(x)$  → atenuação percentual do capital quando a capa

---

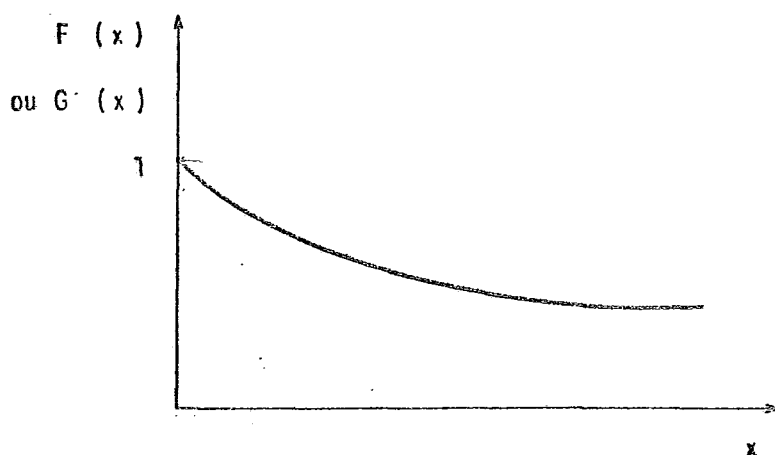
\* Não considerando-se ainda os efeitos do aprendizado, e levando-se em conta os investimentos e custos necessários para atender as especificações ambientais.

cidade total já instalada é  $x^*$ ;

$G(x)$  → atenuação percentual nos custos operacionais quando a capacidade total já instalada é  $x$ .

A forma dessas funções é mostrada esquematicamente na figura 10 a seguir:

FIGURA 10 - FUNÇÕES DE APRENDIZADO



Além destas funções será necessário considerar uma função que forneça a parcela do investimento necessária em cada um dos anos de instalação de uma usina. Esta função, que será denominada  $R_i(\cdot)$ , é definida por:

$R_i(t)$  → parcela do investimento necessária no ano  $t$  de instalação da usina  $i$ .

\* Para efeito de cálculo dessas atenuações assumiu-se que elas serão determinadas pelo valor de  $x$  no ano de decisão de instalação da usina. Note que  $x$  não é a capacidade total produtiva, uma vez que inclui as usinas já instaladas cujas reservas já se exauriram.



### III - VARIÁVEIS DO MODELO

Nestes termos as principais variáveis de decisão do modelo serão:

$h_i$  → instante de decisão de instalação de uma usina de xisto na região  $i$ ;

$qx_{ik}^t$  → quantidade de óleo de xisto produzido na região  $i$  e consumido no mercado  $k$  no ano  $t$ ;

$qp_{jk}^t$  → quantidade de petróleo produzido na região  $j$  e consumido no mercado  $k$  no ano  $t$ ;

$qi_k^t$  → quantidade de petróleo importado pelo mercado  $k$  no ano  $t$ ;

## IV - FORMULAÇÃO DO MODELO

IV.1 - Restrições

Inicialmente, deve-se considerar que a soma dos consumos de óleo de xisto provenientes da região  $i$  nos  $M$  mercados deve ser igual a capacidade instalada nesta região, em cada ano  $t$ :

R1 (restrição de oferta de óleo de xisto)

$$\sum_{k=1}^M q_{x_{ik}}^t = \begin{cases} PX_i & \text{se } TI_i \leq t-h_i \leq TI_i + TE_i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

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

Analogamente a soma dos consumos de petróleo proveniente da região de produção  $j$  nos  $M$  mercados deve ser igual à capacidade desta região, em cada ano  $t$ .

R2 (restrição de oferta de petróleo nacional)

$$\sum_{k=1}^M q_{p_{jk}}^t = PP_j^t \quad \forall j \in \{1, \dots, L\}; \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

Por outro lado, a demanda de cada mercado regional, em qualquer ano  $t$ , deve ser atendida por óleo de xisto, petróleo nacional ou petróleo importado.

R3 (restrição de demanda)

$$\sum_{i=1}^N q_{x_{ik}}^t + \sum_{j=1}^L q_{p_{jk}}^t + q_i^t \geq D_k^t$$

$$\forall k \in \{1, \dots, M\}, \quad t \in \{0, 1, \dots\}$$

No que tange ao capital necessário para a instalação de uma usina de processamento de xisto em uma determinada área  $i$ , há de se considerar que a experiência acumulada com a instalação de usinas anteriores por certo possibilitará alguma redução em relação aquele que seria inicialmente necessário ( $K_i$ ). Procurar-se-á representar esta economia através de uma função ( $F(\cdot)$ ) da capacidade total já instalada no instante de decisão de instalação de uma usina na região  $i$  ( $h_i$ ). Desta forma o capital realmente desembolsado será:

$$K_i = F\left(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}\right)$$

onde  $A_i$  é o conjunto de usinas já instaladas no instante de decisão de instalação de uma usina na área  $i$ . Ou seja:

$$A_i = \{i' / TI_{i'} \leq h_i - h_{i'}\}$$

Desde que esse capital não será desembolsado em um único ano, mas sim ao longo do período de instalação da usina, não havendo desembolso anterior ou posterior a este período, é necessário que utilizemos a função  $R_i(t)$ , já definida, no sentido de se obter os investimentos anuais. Como  $R_i(t)$  representa a fração dos investimentos a ser desembolsada no  $t$ -ésimo ano do período de instalação, tem-se então que o capital investido na região  $i$  no ano  $t$  é dado por:

$$K_i \cdot f\left(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}\right) R_i(t - h_i)$$

Uma vez conhecido o investimento para cada região em cada ano  $t$  e sendo conhecido o limite máximo para investimentos em xisto em cada ano, é possível formular a última restrição do modelo, a qual estabelece que a soma dos investimentos em cada região não pode ser maior que a disponibilidade máxima para tal em cada ano  $t$ .

R4 (restrição de capital)

$$\sum_{i=1}^N K_i \cdot f\left(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}\right) R_i(t - h_i) \leq KM^t$$

$$\forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

#### IV.2 - Função Objetivo

A função objetivo do modelo consiste na minimização dos custos de atendimento das demandas dos mercados regionais ao longo do tempo. Este custo pode ser visualizado como sendo formado pelas seguintes parcelas:

- custo operacional anual para produção de óleo de xisto;
- investimentos em usinas para processamento do xisto;
- custo de transporte do óleo de xisto das regiões produtoras para os mercados consumidores;
- custo das importações de petróleo;

- custos de transporte do petróleo nacional das regiões produtoras para os mercados consumidores;
- custo operacional e investimentos em petróleo nacional.

Quanto a este último item, não há necessidade de incluí-lo na função objetivo, uma vez que sendo seguramente a opção mais viável o petróleo nacional será sempre totalmente utilizado antes que o óleo de xisto ou petróleo importado\* sejam cogitados. Sendo assim esta parcela é invariante com respeito às variáveis do modelo e, portanto, sem influência na minimização.

Quanto ao custo operacional para produção de óleo de xisto em uma determinada usina, foi também admitida uma redução devido à experiência adquirida com a operação das usinas anteriormente instaladas. Novamente tal atenuação será retratada através de uma função  $G(\cdot)$  da capacidade total já instalada quando da decisão de sua instalação. Assim, este custo para cada ano  $t$  é dado por:

$$\sum_{i \in B_t} C_i G\left(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}\right) \quad (\text{custo operacional})$$

$$\forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

---

\* Na verdade, a produção nacional de petróleo é função do preço do petróleo no mercado internacional. Entretanto será considerado que isto já foi levado em conta na determinação de  $PP_j^t$ .

onde  $B_t$  é o conjunto das usinas em operação no  $t$ , definido por:

$$B_t = \{i / TT_i \leq t - h_i \leq TT_i + TE_i\}$$

O investimento total em xisto no ano  $t$  é dado por:

$$\sum_{i=1}^N K_i F\left(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}\right) R_i (t - h_i) \quad (\text{investimento em xisto})$$

$$\forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

Os custos de transporte de óleo de xisto e petróleo nacional das regiões produtoras para os mercados consumidores podem ser expressos, respectivamente, por:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M CT_{ik} q_{ik}^t \quad (\text{custo de transporte de óleo de xisto})$$

e

$$\sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^M CT_{jk} q_{jk}^t \quad (\text{custo de transporte do petróleo nacional})$$

$$\forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

Finalmente, o custo de importação de petróleo pode ser obtido através da seguinte relação:

$$\sum_{k=1}^M \Pi_k^t q_k^t \quad (\text{custo de importação de petróleo})$$

Assim, com todos os custos envolvidos no processo devidamente quantificados, a função objetivo do modelo fica sendo:

$$\text{Min } \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t \left[ \sum_{i \in B_t} C_i G(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}) + \sum_{i=1}^N K_i F(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}) R_i(t-h_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M CT_{ik} q_{x_{ik}}^t + \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^M CT_{jk} q_{p_{jk}}^t + \sum_{i=1}^M \Pi_k^t \cdot q_{i_k}^t \right]$$

onde  $\gamma$  é a taxa de desconto anual considerada.

#### IV.3 - Resumo (MOD1)

$$\text{F.O.: MIN } \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t \left[ \sum_{i \in B_t} C_i G(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}) + \sum_{i=1}^N K_i F(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}) R_i(t-h_i) + \sum_{k=1}^M \left( \sum_{i=1}^N CT_{ik} q_{x_{ik}}^t + \sum_{j=1}^L CT_{jk} q_{p_{jk}}^t + \Pi_k^t q_{i_k}^t \right) \right]$$

Sujeito a :

$$1) \sum_{k=1}^M q_{x_{ik}}^t = \begin{cases} PX_i & \text{se } TI_i \leq t-h_i \leq TI_i + TE_i \quad \forall i \in \{1, \dots, N\} \\ 0 & \text{caso contrário} \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\} \end{cases}$$

$$2) \sum_{k=1}^M q_{p_{jk}}^t = PP_j^t \quad \forall j \in \{1, \dots, L\} \\ \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$3) \sum_{i=1}^N q_{ik}^x t + \sum_{j=1}^L q_{jk}^p t + q_{ik}^i t \geq D_k^t \quad \forall k \in \{1, \dots, M\}$$

$$\forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$4) \sum_{i=1}^N K_i F \left( \sum_{i' \in A_i} P X_{i'} \right) R_i (t - h_i) \leq K M^t \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$q_{ik}^x t, q_{jk}^p t, q_{ik}^i t \geq 0 \quad \forall i, j, k, t$$

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

$$A_i = \{i' / T I_i \leq h_i - h_{i'}\}$$

$$B_t = \{i / T I_i \leq t - h_i \leq T I_i + T E_i\}$$

Simbologia :

- N → número de áreas potencialmente produtoras de óleo de xisto;
- L → número de áreas potencialmente produtoras de petróleo;
- M → número de mercados regionais;
- i → i-ésima área potencialmente produtora de óleo de xisto (i=1, ..., N);
- j → j-ésima área potencialmente produtora de petróleo (j=1, ..., L);
- k → k-ésimo mercado regional (k=1, ..., M);
- $h_i$  → instante de decisão de instalação de uma usina na região i;



- $qx_{ik}^t$  → quantidade de óleo de xisto produzido na região  $i$  e consumido no mercado  $k$  no ano  $t$ ;
- $qp_{jk}^t$  → quantidade de petróleo produzido na região  $j$  e consumido no mercado  $k$  no ano  $t$ ;
- $qi_k^t$  → quantidade de petróleo importado pelo mercado  $k$  no ano  $t$ ;
- $PP_j^t$  → capacidade de produção de petróleo da região  $j$  no ano  $t$ ;
- $PX_i$  → capacidade anual de produção de óleo de xisto da usina na região  $i$ ;
- $TI_i$  → tempo necessário para a instalação de uma usina na região  $i$ ;
- $TE_i$  → tempo de exaustão das reservas da região  $i$ ;
- $K_i$  → capital necessário para a instalação de uma usina na região  $i$ ;
- $C_i$  → custo operacional anual de uma usina na região  $i$ ;
- $CT_{ik}$  → custo de transporte de um barril de óleo de xisto da região  $i$  para o mercado  $k$ ;
- $CT_{jk}$  → custo de transporte de um barril de petróleo da região  $j$  para o mercado  $k$ ;
- $\Pi_k^t$  → preço do barril de petróleo importado pelo mercado  $k$  no ano  $t$ ;
- $D_k^t$  → demanda por óleo do mercado  $k$  no ano  $t$ ;
- $KM^t$  → limite máximo para os investimentos em xisto no ano  $t$ ;

- $\gamma$  → taxa de desconto anual;
- $F(.)$  → função aprendizado para o capital;
- $G(.)$  → função aprendizado para o custo operacional;
- $R(.)$  → função de diluição do capital;
- $A_i$  → conjunto de usinas já instaladas no instante de decisão de instalação de uma usina na região  $i$ ;
- $B_t$  → conjunto das usinas em operação no ano  $t$ ;

## V - ANÁLISE DO MODELO

Analisando o modelo anterior pode-se notar que, além de variáveis inteiras, existem não-linearidades tanto na função objetivo quanto em algumas restrições. Tais características dificultam o seu tratamento através de técnicas mais comuns e eficientes de programação matemática.

Assim, tendo em vista que o modelo apresentado possui, além de um caráter dinâmico evidente, restrições cujo conjunto de coeficientes das variáveis é formado quase que em sua totalidade por valores nulos ou unitários, foi feita a opção por uma abordagem através de programação dinâmica.

Como na resolução de um problema de programação dinâmica o tempo de computação é extremamente sensível à dimensão do vetor de estado, e nas várias tentativas somente foram obtidos vetores de estado com dimensão da ordem de  $N$  ( $n^2$  de áreas potencialmente produtoras de óleo de xisto), o que acarretaria um tempo computacional grande em demasia, tornou-se inevitável uma simplificação do modelo no sentido de reduzir esta dimensão.

Em particular notou-se que caso fosse conhecida a priori a ordem em que as usinas entrariam em operação, o número de componentes do vetor de estado seria bastante reduzido. 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 possui

se 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 consideração de mercados regionais, os quais forçam a entrada no modelo dos custos de transporte, fazendo com que os custos de produção não sejam diretamente comparáveis. Ou seja, eventualmente uma usina que apresente custos de produção mais elevados que outra pode vir a ser instalada antes, face à sua maior proximidade de um determinado mercado a ser atendido, requerendo assim menores custos com o transporte do óleo produzido;

- 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 desta possuir um custo de produção maior; 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 investimentos em xisto a cada período, pode ocorrer uma situação em que uma usi

na com custos de produção menores que as demais, mas com capacidade maior, não possa ser instalada por requerer um investimento acima deste limite.

Assim sendo, o procedimento imediato será introduzir algumas alterações no modelo, e assumir que uma ordenação a priori dos instantes de instalação das usinas seja uma hipótese razoável.

A primeira modificação consistirá na globalização da oferta e da demanda, eliminando-se do modelo a localização dos mercados e fontes produtoras. Este procedimento, além de ser interessante sob o aspecto de adequação do modelo, é bastante razoável em virtude das diferenças de composição que o óleo de xisto, petróleo nacional e os vários tipos de petróleo importado apresentam e da relativamente rígida estrutura que as refinarias apresentam. Desta forma, o óleo consumido em uma dada região pode ser muito mais função dos parâmetros técnicos das refinarias ali existentes do que dos custos de transporte. Adicionalmente, pode-se dizer que a utilização do óleo de xisto envolve um tratamento anterior em uma unidade de hidrogenação, unidade esta que não é disponível na maioria das refinarias atuais e nem é provável que o seja no futuro.

Como segunda modificação a ser introduzida no modelo, assumir-se-á que os tempos de instalação das usinas serão iguais. Como consequência disto pode-se, a partir de agora, adotar este valor como nossa unidade de tempo\*.

---

\* Note que com isto  $R_i(.)$  não é mais necessária.

$$\pi_i = \pi \quad i \in \{1, \dots, N\}$$

Após a introdução destas alterações, o modelo passa ter a seguinte formulação:

MOD2 :

$$\text{Min } \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} \left[ \sum_{i \in B_t} C_i G \left( \sum_{i' \in A_i} P X_{i'} \right) + \sum_{i \in U_t} K_i F \left( \sum_{i' \in A_i} P X_{i'} \right) + \pi^t \cdot q_i^t \right]$$

sa:

$$\sum_{i \in B_t} P X_i + P P^t + q_i^t \geq D^t \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$\sum_{i \in U_t} K_i F \left( \sum_{i' \in A_i} P X_{i'} \right) \leq K M^t \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$h_i \in \{0, 1, \dots\}, \quad q_i^t \geq 0 \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$\forall i \in \{1, \dots, N\}$$

onde\* :

$U_t = \{i/h_i=t\}$  : é o conjunto de usinas a serem instaladas no ano t;

$q_i^t$  : total das importações de petróleo no ano t;

$D^t$  : demanda total de óleo no ano t;

$PP^t$  : produção total de petróleo nacional do ano t;

\* O restante da simbologia utilizada está definida na pág. .

e

$$\bar{\gamma} = \gamma^{TT} .$$

Mesmo com as modificações inseridas, ainda não é possível afirmar que a solução ótima do MOD2 deve necessariamente apresentar as usinas de menor custo de produção entrando em operação antes das demais. Para que isto possa ser garantido, conforme será demonstrado a seguir, é suficiente que determinadas condições\* sejam satisfeitas.

A primeira condição a ser obedecida é que as usinas a serem instaladas nas  $N$  regiões consideradas tenham capacidade iguais, de modo que a instalação de qualquer uma delas em um dado estágio do processo tenha o mesmo efeito nas funções de aprendizado.

$$PX_i = PX \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

Desta maneira, como a capacidade total instalada será sempre determinada pelo número de usinas instaladas até o período considerado, pode-se passar a utilizar como argumento das funções de aprendizado o número de usinas instaladas até o período considerado. Ou seja:

$$F \left( \sum_{i' \in A_i} PX_{i'} \right) = F^* (n_i)$$

---

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

e

$$G\left(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}\right) = G^*(n_i)$$

onde :

$n_i$  : número de usinas instaladas até o período de decisão de instalação da usina  $i^*$ .

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 seria expresso por:

$$CP_i = K_i F\left(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}\right) + \sum_{t=1}^{TE_i} \bar{\gamma}^{-t} C_i G\left(\sum_{i' \in A_i} PX_{i'}\right)$$

ou

$$CP_i = K_i F^*(n_i) + \sum_{t=1}^{TE_i} \bar{\gamma}^{-t} C_i G^*(n_i)$$

\* Note que se a hipótese de ordenação for admitida então  $n_i < i$ .



$$CP_i = K_i F^*(n_i) + C_i \frac{\bar{\gamma}(1-\bar{\gamma})^{TE_i}}{1-\bar{\gamma}} G^*(n_i)$$

É possível definir, para facilidade de manipulação algébrica,  $\bar{C}_i$  como sendo o custo operacional total durante toda a vida útil da usina, considerado no instante de decisão de sua instalação e não levando em conta os efeitos de aprendizado. Ou seja:

$$\bar{C}_i = C_i \frac{\bar{\gamma}(1-\bar{\gamma})^{TE_i}}{1-\bar{\gamma}}$$

Reescrevendo então o custo de produção tem-se que:

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

A segunda condição estabelece que, se no início do processo a usina  $i_1$  apresenta custos de produção mais elevados que a usina  $i_2$ , isto é:

$$K_{i_1} + \bar{C}_{i_1} \geq K_{i_2} + \bar{C}_{i_2}$$

então a seguinte relação deve ser observada:

$$K_{i_1} F^*(n) + \bar{C}_{i_1} G^*(n) \geq K_{i_2} F^*(n) + \bar{C}_{i_2} G^*(n)$$

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

A terceira condição visa a 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  $i_1$  e  $i_2$  forem tais que:

$$K_{i_1} + \bar{C}_{i_1} \geq K_{i_2} + \bar{C}_{i_2}$$

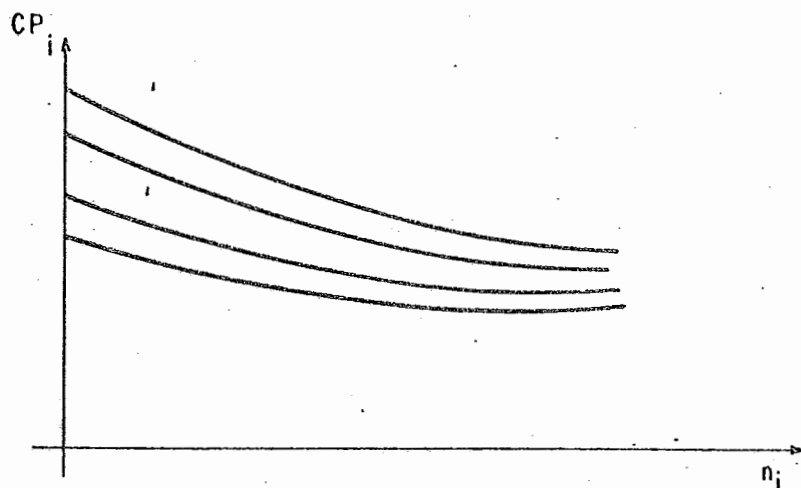
for válida a seguinte relação:

$$K_{i_1} (F^*(n) - F^*(m)) + \bar{C}_{i_1} (G^*(n) - G^*(m)) \geq K_{i_2} (F^*(n) - F^*(m)) + \bar{C}_{i_2} (G^*(n) - G^*(m))$$

$$0 \leq n < m \leq N$$

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

FIGURA 12 - 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 ( $\Delta CP$ ) será maior na mais "cara" (isto é, as curvas são sempre convergentes).

Adicionalmente será considerado que os tempos de exaustão das reservas de cada uma das  $N$  regiões serão iguais. Ou seja:

$$TE_i = TE \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

O próximo passo será procurar provar que estas condições são suficientes para garantir que a ordenação segundo os custos de produção das usinas será observada na solução ótima do problema.

TEOREMA :

Se as  $N$  usinas de xisto forem ordenadas e indexadas "a priori" segundo a ordem crescente de seus custos de produção, é condição SUFICIENTE para que o MOD2 sem restrição de capital apresente uma solução ótima na qual os instantes de instalação das usinas -  $\{h_i\}$  - atendam a relação

$$i_1 > i_2 \Rightarrow h_{i_1} \geq h_{i_2}$$

que :

$$(I) \quad \left. \begin{array}{l} PX_{i_1} = PX \\ TE_{i_1} = TE \end{array} \right\} \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

$$(II) \quad (K_{i_1} - K_{i_2}) F^*(n) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) G^*(n) \geq 0$$

$$\forall (i_1, i_2) \in \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, N\}, \quad i_1 > i_2$$

$$0 \leq n \leq N$$

$$(III) \quad (K_{i_1} - K_{i_2}) (F^*(n) - F^*(m)) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) (G^*(n) - G^*(m)) \geq 0$$

$$\forall (i_1, i_2) \in \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, N\}, \quad i_1 > i_2$$

$$0 \leq n < m \leq N$$

Prova :

Seja  $\{\hat{h}_i\}, \{\hat{q}_i^t\}$  uma solução do MOD2 sem restrição de capital.

Suponha que existe um par  $(i_1, i_2)$  tal que

$$i_1 > i_2 \quad \text{e} \quad \hat{h}_{i_1} < \hat{h}_{i_2}$$

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

$$V = \sum_{i=1}^N \bar{\gamma}^i (K_i F^*(\hat{n}_i) + \bar{C}_i G^*(\hat{n}_i)) + \sum_{t=0}^{\infty} \bar{\gamma}^t \hat{q}_i^t \Pi^t$$

Trocando-se os instantes de instalação das duas usinas  $i_1$  e  $i_2$  tem-se uma nova solução  $\{\bar{h}_i\}$ ,  $\{\bar{q}_i^t\}$  e, conseqüente, um novo conjunto  $\{\bar{n}_i\}$  tal que:

$$(i) \quad \bar{q}_i^t = \hat{q}_i^t, \quad \forall t$$

$$(ii) \quad \bar{h}_i = \hat{h}_i \quad \forall i \notin \{i_1, i_2\}$$

$$\bar{h}_{i_1} = \hat{h}_{i_2}$$

$$\bar{h}_{i_2} = \hat{h}_{i_1}$$

$$(iii) \quad \bar{n}_i = \hat{n}_i \quad \forall i \notin \{i_1, i_2\}$$

$$\bar{n}_{i_1} = \hat{n}_{i_2}$$

$$\bar{n}_{i_2} = \hat{n}_{i_1}$$

$$(iv) \quad \sum_{i \in B_t} PX_i \text{ não se altera já que, por (I) :}$$

$$PX_i = PX \quad \text{e} \quad TE_i = TE \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

$\therefore \sum_{i \in B_t} PX_i = \# B_t \cdot PX$ , e a troca não altera o nº de elementos de qualquer conjunto  $B_t$ .

Assim  $\{\bar{q}_i^t\}$   $\{\bar{h}_i\}$  mantém viável a restrição de demanda do MOD2 e, portanto a nova solução é viável.

O novo valor da função objetivo é dada então por:

$$V' = \sum_{i=1}^n \bar{\gamma}^i \bar{h}_i (K_i F^*(\bar{n}_i) + \bar{C}_i G^*(\bar{n}_i)) + \sum_{t=0}^{\infty} \bar{\gamma}^t q_i^t \Pi^t$$

logo, como decorrência de (i), (ii) e (iii), tem-se que:

$$\begin{aligned} V-V' = & \bar{\gamma}^{\hat{h}_{i_1}} (K_{i_1} F^*(\hat{n}_{i_1}) + \bar{C}_{i_1} G^*(\hat{n}_{i_1})) + \bar{\gamma}^{\hat{h}_{i_2}} (K_{i_2} F^*(\hat{n}_{i_2}) + \\ & + \bar{C}_{i_2} G^*(\hat{n}_{i_2})) - \bar{\gamma}^{\bar{h}_{i_1}} (K_{i_1} F^*(\bar{n}_{i_1}) + \bar{C}_{i_1} G^*(\bar{n}_{i_1})) - \\ & - \bar{\gamma}^{\bar{h}_{i_2}} (K_{i_2} F^*(\bar{n}_{i_2}) + \bar{C}_{i_2} G^*(\bar{n}_{i_2})) \end{aligned}$$

De (ii) e (iii) tem-se que

$$\begin{aligned} V-V' = & \bar{\gamma}^{\hat{h}_{i_1}} ((K_{i_1} - K_{i_2}) F^*(\hat{n}_{i_1}) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) G^*(\hat{n}_{i_1})) - \\ & - \bar{\gamma}^{\hat{h}_{i_2}} ((K_{i_1} - K_{i_2}) F^*(\hat{n}_{i_2}) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) G^*(\hat{n}_{i_2})) \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{V-V'}{\bar{\gamma}^{\hat{h}_{i_1}}} = (K_{i_1} - K_{i_2}) F^*(\hat{n}_{i_1}) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) G^*(\hat{n}_{i_1}) -$$

$$- \bar{\gamma}^{\hat{h}_{i_2} - \hat{h}_{i_1}} ((K_{i_1} - K_{i_2}) F^*(\hat{n}_{i_2}) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) G^*(\hat{n}_{i_2}))$$

Por construção  $\frac{\hat{h}_{i_2} - \hat{h}_{i_1}}{\bar{\gamma}} \leq 1$ . Assim por (II) tem-se que:

$$\frac{V-V'}{\bar{\gamma} \hat{h}_{i_1}} \geq (K_{i_1} - K_{i_2}) F^*(\hat{n}_{i_1}) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) G^*(\hat{n}_{i_1}) - (K_{i_1} - K_{i_2}) F^*(\hat{n}_{i_2}) - (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) G^*(\hat{n}_{i_2})$$

$$\therefore \frac{V-V'}{\bar{\gamma} \hat{h}_{i_1}} \geq (K_{i_1} - K_{i_2}) (F^*(\hat{n}_{i_1}) - F^*(\hat{n}_{i_2})) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) (G^*(\hat{n}_{i_1}) - G^*(\hat{n}_{i_2}))$$

Por (III) tem-se então que:

$$\frac{V-V'}{\bar{\gamma} \hat{h}_{i_1}} \geq 0 \Rightarrow V - V' \geq 0$$

$$\therefore V \geq V'$$

Assim, qualquer solução  $\{\hat{h}_i\}$ ,  $\{\hat{q}_i^t\}$  que apresente um par  $(i_1, i_2)/i_1 > i_2$  e  $\hat{h}_{i_1} < \hat{h}_{i_2}$  pode ser melhorada fazendo-se  $\bar{h}_{i_1} = \hat{h}_{i_2}$  e  $\bar{h}_{i_2} = \hat{h}_{i_1}$ . Logo a solução ótima, caso exista, deve ser tal que :

$$i_1 > i_2 \Rightarrow \hat{h}_{i_1} \geq h_{i_2}$$

cqd

COROLÁRIO 1:

Se as funções aprendizado forem tais que

$$F^*(n) = G^*(n); \quad 0 \leq n \leq N$$

então as condições (II) e (III) são automaticamente satisfeitas.

Prova :

Sejam duas usinas  $i_1$  e  $i_2$  tais que:

$$K_{i_1} + \bar{C}_{i_1} \geq K_{i_2} + \bar{C}_{i_2}$$

$$\therefore (K_{i_1} - K_{i_2}) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) \geq 0$$

Como, por hipótese,  $F^*(n) = G^*(n) \quad 0 \leq n \leq N$ , pode-se escrever que:

$$(K_{i_1} - K_{i_2})F^*(n) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2})G^*(n) = [(K_{i_1} - K_{i_2}) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2})]F^*(n)$$

Por definição  $F^*(n) \geq 0, \quad 0 \leq n \leq N$ . Logo

$$[(K_{i_1} - K_{i_2}) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2})] \cdot F^*(n) \geq 0 \quad 0 \leq n \leq N$$

$$\therefore (K_{i_1} - K_{i_2})F^*(n) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2})G^*(n) \geq 0 \quad 0 \leq n \leq N$$



o que corresponde à condição (II).

De maneira análoga:

$$(K_{i_1} - K_{i_2}) (F^*(n) - F^*(m)) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) (G^*(n) - G^*(m)) = [(K_{i_1} - K_{i_2}) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2})] (F^*(n) - F^*(m))$$

Como, por definição,  $F(\cdot)$  é sempre decrescente, tem-se que:

$$F^*(n) - F^*(m) \geq 0 \quad 0 \leq n < m \leq N$$

Logo :

$$[(K_{i_1} - K_{i_2}) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2})] (F^*(n) - F^*(m)) \geq 0$$

$$\therefore (K_{i_1} - K_{i_2}) (F^*(n) - F^*(m)) + (\bar{C}_{i_1} - \bar{C}_{i_2}) (G^*(n) - G^*(m)) \geq 0$$

$$0 \leq n < m \leq N$$

o que corresponde à condição (III).

cqd

COROLÁRIO 2 :

Seja o MOD2 com uma restrição de capital total\*, isto é:

$$\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{\gamma^i} K_i F^*(n_i) \leq KTM$$

onde:

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

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

$$i_1 > i_2 \Rightarrow h_{i_1} \geq h_{i_2}$$

é SUFICIENTE que:

- (i) as condições (I), (II) e (III) sejam satisfeitas;
- (II)  $K_{i_1} \geq K_{i_2}$ ,  $\forall (i_1, i_2) \in \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, N\} / i_1 > i_2$ .

Prova :

Seja  $\{\hat{h}_i\}$ ,  $\{\hat{q}_i^t\}$  uma solução do MOD2 com restrição capital total.

---

\* Ou seja, o MOD2 sem restrição de capital para cada período e sim uma restrição de capital para todos os períodos.

Suponha que existe um par  $(i_1, i_2)$  tal que:

$$i_1 > i_2 \quad \text{e} \quad \hat{h}_{i_1} < \hat{h}_{i_2}$$

Já foi provado anteriormente que trocando os instantes de instalação das usinas  $i_1$  e  $i_2$ , obtêm-se uma nova solução  $\{\bar{h}_i\}, \{\bar{q}_i^t\}$  que melhora o valor da função objetivo e mantém viável a restrição de demanda. Basta então mostrar que esta nova solução mantém viável a restrição de capital total.

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

$$KT = \sum_{i=1}^N \frac{\hat{h}_i}{\bar{\gamma}} K_i F^*(\hat{h}_i) \leq KTM$$

ou

$$KT = \sum_{i=1}^N \frac{\hat{h}_i}{\bar{\gamma}} K_i F^*(\hat{h}_i) + \frac{\hat{h}_{i_1}}{\bar{\gamma}} K_{i_1} F^*(\hat{h}_{i_1}) + \frac{\hat{h}_{i_2}}{\bar{\gamma}} K_{i_2} F^*(\hat{h}_{i_2}) \leq KTM$$

$$i \notin \{i_1, i_2\}$$

A nova solução  $\{\bar{h}_i\}, \{\bar{q}_i^t\}$  é tal que:

$$a) \quad \bar{h}_i = \hat{h}_i \quad \forall i \notin \{i_1, i_2\}$$

$$\bar{h}_{i_1} = \hat{h}_{i_2}$$

$$\bar{h}_{i_2} = \hat{h}_{i_1}$$

$$b) \bar{n}_i = \hat{n}_i \quad i \notin \{i_1, i_2\}$$

$$\bar{n}_{i_1} = \hat{n}_{i_2}$$

$$\bar{n}_{i_2} = \hat{n}_{i_1}$$

$$c) \bar{q}_i^t = \hat{q}_i^t \quad t \in \{0, 1, \dots\}$$

Portanto :

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

ou

$$KT' = \sum_{i=1}^N \bar{\gamma}_i^{\bar{h}_i} K_i F^*(\bar{n}_i) + \bar{\gamma}_{i_1}^{\bar{h}_{i_1}} K_{i_1} F^*(\bar{n}_{i_1}) + \bar{\gamma}_{i_2}^{\bar{h}_{i_2}} K_{i_2} F^*(\bar{n}_{i_2})$$

$$i \notin \{i_1, i_2\}$$

ou utilizando-se (a) e (b):

$$KT' = \sum_{i=1}^N \bar{\gamma}_i^{\hat{h}_i} K_i F^*(\hat{n}_i) + \bar{\gamma}_{i_1}^{\hat{h}_{i_2}} K_{i_1} F^*(\hat{n}_{i_2}) + \bar{\gamma}_{i_2}^{\hat{h}_{i_1}} K_{i_2} F^*(\hat{n}_{i_1})$$

$$i \notin \{i_1, i_2\}$$

Logo,

$$KT' - KT = K_{i_1} (\bar{\gamma}_{i_2}^{\hat{h}_{i_2}} F^*(\hat{n}_{i_2}) - \bar{\gamma}_{i_1}^{\hat{h}_{i_1}} F^*(\hat{n}_{i_1})) + K_{i_2} (\bar{\gamma}_{i_1}^{\hat{h}_{i_1}} F^*(\hat{n}_{i_1}) -$$

$$- \bar{\gamma}_{i_2}^{\hat{h}_{i_2}} F^*(\hat{n}_{i_2}))$$

$$\therefore KT' - KT = (K_{i_1} - K_{i_2}) \left( \bar{\gamma}^{i_2} F^*(\hat{n}_{i_2}) - \bar{\gamma}^{i_1} F^*(\hat{n}_{i_1}) \right)$$

mas, por construção:

$$\hat{n}_{i_1} < \hat{n}_{i_2} \Rightarrow \bar{\gamma}^{i_1} \geq \bar{\gamma}^{i_2}$$

e

$$\hat{n}_{i_1} < \hat{n}_{i_2} \Rightarrow F^*(\hat{n}_{i_1}) \geq F^*(\hat{n}_{i_2})$$

$$\therefore \bar{\gamma}^{i_2} F^*(\hat{n}_{i_2}) - \bar{\gamma}^{i_1} F^*(\hat{n}_{i_1}) \leq 0$$

Por (ii), tem-se que :

$$K_{i_1} \geq K_{i_2} \Rightarrow K_{i_1} - K_{i_2} \geq 0$$

Logo:

$$KT' - KT \leq 0 \Rightarrow KT' \leq KT$$

Assim a nova solução  $\{\bar{h}_i\}$ ,  $\{\bar{q}_i^t\}$  mantém viável a restrição de capital total. Desta maneira, qualquer solução  $\{\hat{h}_i\}$ ,  $\{\hat{q}_i^t\}$  que apresente um par  $(i_1, i_2)/i_1 > i_2$  e  $\hat{n}_{i_1} < \hat{n}_{i_2}$  pode ser melhorada trocando-se os instantes de instalações das usinas  $i_1$  e  $i_2$ , permanecendo viável.

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

$$i_1 > i_2 \Rightarrow \hat{h}_{i_1} \geq \hat{h}_{i_2}$$

cqd

COROLÁRIO 3 :

Para que o MOD2 apresente solução ótima, caso exista, tal que

$$i_1 > i_2 \Rightarrow \hat{h}_{i_1} \geq \hat{h}_{i_2}$$

é SUFICIENTE que:

(i) as condições (I), (II) e (III) sejam satisfeitas;

(ii)  $K_{i_1} + \dots + K_{i_p} \leq \alpha$

onde  $(i_1, \dots, i_p)$  são as  $p$  usinas que requerem maior investimento.

(iii)  $(K_{i'_1} + \dots + K_{i'_{p+1}}) F^{*(N-p-1)} \geq \beta$

onde  $(i'_1, \dots, i'_{p+1})$  são as  $(p+1)$  usinas que requerem menor investimento.

(iv)  $\alpha \leq KM^t \leq \beta \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\}$

ou seja, em qualquer período podem ser instaladas quaisquer  $p$  usinas, mas em nenhum período podem ser instaladas  $(p+1)$  usinas.

Prova :

Seja  $\{\hat{h}_i\}, \{\hat{q}_i^t\}$  uma solução do MOD2. Suponha que existe um par  $(i_1, i_2)$  tal que:

$$i_1 > i_2 \quad \text{e} \quad \hat{h}_{i_1} < \hat{h}_{i_2}$$

Já foi provado que trocando os instantes de instalação das usinas  $i_1$  e  $i_2$ , a nova solução assim obtida —  $\{\bar{h}_i\}, \{\bar{q}_i^t\}$  — melhora o valor da função objetivo e mantém viável a restrição de demanda. Assim, é necessário apenas provar que esta nova solução mantém viável a restrição de capital.

De (iii) e (iv) é imediato que tem-se no máximo  $p$  usinas instaladas no período  $\hat{h}_{i_1}$ , assim como no período  $\hat{h}_{i_2}$ .

Ora, trocando os instantes de instalação das usinas  $i_2$  e  $i_1$  continua-se tendo no máximo  $p$  usinas instaladas nestes períodos.

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

Desta maneira, qualquer solução  $\{\hat{h}_i\}, \{\hat{q}_i^t\}$  que apresente um par  $(i_1, i_2)/i_1 > i_2$  e  $\hat{h}_{i_1} < \hat{h}_{i_2}$  pode ser melhorada trocando-se os instantes de instalação das usinas  $i_1$  e  $i_2$ , permanecendo viável.

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

$$i_1 > i_2 \Rightarrow \hat{h}_{i_1} \geq \hat{h}_{i_2}$$

cqd

VI - MODELO SIMPLIFICADO

Conforme foi discutido no item anterior, a solução ótima do MOD2 não necessariamente apresenta os instantes de decisão de instalação ordenados segundo a ordem crescente dos custos de produção das usinas.

Entretanto, como o conhecimento a priori da ordem de instalação das usinas reduz consideravelmente as dificuldades computacionais para a resolução do problema, uma vez que torna possível formulá-lo como um modelo de programação dinâmica com vetor de estado de apenas uma dimensão, a meta do trabalho passou a ser a obtenção da solução do modelo simplificado de custo mínimo, dentre as que atendem a ordenação mencionada.

Neste sentido procurou-se determinar sob que circuns-tâncias seria possível garantir que esta ordenação seria observada na solução ótima do problema, que são aquelas retratadas pelas condições do teorema demonstrado no item anterior e seu terceiro corolário. No entanto, deve ser ressaltado que, embora de um modo geral seja de se esperar que elas se verifiquem na realidade, pode ser que isso não ocorra e, nesse caso, ao adotar-se a ordenação a priori das usinas estar-se-ia trabalhando em um sub-ótimo do problema. Por outro lado, tais condições são suficientes mas não necessárias, sendo que ligeiras transgressões podem não alterar a solução ótima encontrada sob a hipótese de ordenação.

Admitindo, para simplicidade de notação, que se  $i_1 < i_2$  então os custos de produção da usina  $i_1$  são menores que os



da usina  $i_2$ , pode-se formular o MOD2, com restrição de ordenação, da seguinte forma

$$\text{Min } \sum_{t=0}^{\infty} \bar{\gamma}^t \left[ \sum_{i \in B_t} C_i G^*(n_i) + \sum_{i \in U_t} K_i F^*(n_i) + \Pi^t q_i^t \right]$$

sa:

$$(R1) \sum_{i \in B_t}^N P X_i + P P^t + q_i^t \geq D^t \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$(R2) \sum_{i \in U_t} K_i F^*(n_i) \leq K M^t \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$(R3) h_{i_1} \geq h_{i_2} \quad (i_1, i_2) \in \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, N\} / i_1 > i_2$$

$$(R4) h_i \in \{0, 1, \dots\}, q_i^t \geq 0 \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$\forall i \in \{1, \dots, N\}$$

Sabe-se, no entanto, que as reservas nacionais de xisto e petróleo serão incapazes de tornar o país auto-suficiente em óleo, para qualquer cenário razoável do preço internacional do petróleo. Esta informação se utilizada no modelo é útil na medida em que permite simplificações adicionais.

Explicitando-a em função das variáveis do modelo tem-se que:

$$\sum_{i=1}^N PX_i + PP^t \leq D^t \quad \forall t \in \{0,1,\dots\}$$

como

$$\sum_{i \in B_t} PX_i \leq \sum_{i=1}^N PX_i \quad \forall t \in \{0,1,\dots\}$$

tem-se que

$$\sum_{i \in B_t} PX_i + PP^t \leq D^t \quad \forall t \in \{0,1,\dots\}$$

$$\therefore D^t - \sum_{i \in B_t} PX_i - PP^t \geq 0 \quad \forall t \in \{0,1,\dots\}$$

como, de (R1):

$$q_i^t \geq D^t - \sum_{i \in B_t} PX_i - PP^t \quad \forall t \in \{0,1,\dots\}$$

tem-se que

$$q_i^t \geq 0 \quad \forall t \in \{0,1,\dots\}$$

Logo a não-negatividade do conjunto de variáveis  $q_i^t$  está assegurada, sendo portanto a restrição  $q_i^t \geq 0 \forall t \in \{0,1,\dots\}$  desnecessária. Isto implica que a variável pode ser visualiza-

da como irrestrita de sinal no modelo, o que permite eliminá-la.

Definindo-se por  $i_t$  a usina de mais elevados custos de produção a ser instalada no período  $t$ , tem-se a seguinte formulação do modelo.

$$\text{Min } \sum_{t=0}^{\infty} \bar{\gamma}^t \left[ \sum_{i \in B_t} (C_i G^*(i_{t-1}) - \Pi^t P X_i) + \sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} K_i F^*(i_{t-1}) + \Pi^t D_*^t \right]$$

sa:

$$\sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} K_i F^*(i_{t-1}) \leq KM^t \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$h_{i_1} \geq h_{i_2} \quad \forall (i_1, i_2) \in \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, N\} / i_1 > i_2$$

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

onde:

$$D_*^t = D^t - PP^t$$

O termo  $\Pi^t D_*^t$  é constante e, portanto, não afetará a otimização podendo ser retirado da função objetivo. Esta pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\text{Min } \sum_{t=0}^{\infty} \bar{\gamma}^t \left[ \sum_{i \in B_t} (C_i G^*(i_{t-1}) - \Pi^t P X_i) + \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \left. \sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} K_i F^*(i_{t-1}) \right) = \\
= \text{Max} \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} & \left[ \sum_{i \in B_t} (\Pi^t P X_i - C_i G^*(i_{t-1})) - \sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} K_i F^*(i_{t-1}) \right] = \\
= \text{Max} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} \left( \sum_{i \in B_t} (\Pi^t P X_i - C_i G^*(i_{t-1})) - \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} \sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} K_i F^*(i_{t-1}) \right) \right] = \\
= \text{Max} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} \sum_{i: i_{t-1}/t-h_i \leq TE} (\Pi^t P X_i - C_i G^*(i_{t-1})) - \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} \sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} K_i F^*(i_{t-1}) \right] = \\
= \text{Max} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} \sum_{i/h_i=t} \sum_{t'=1}^{TE} (\Pi^{t+t'} P X_i - C_i G^*(i_{t-1})) - \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} \sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} K_i F^*(i_{t-1}) \right] = \\
= \text{Max} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} \sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} \sum_{t'=1}^{TE} (\Pi^{t+t'} P X_i - C_i G^*(i_{t-1})) - \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} \sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} K_i F^*(i_{t-1}) \right] = \\
= \text{Max} \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^{-t} \sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} \left[ \sum_{t'=1}^{TE} (\Pi^{t+t'} P X_i - C_i G^*(i_{t-1})) - K_i F^*(i_{t-1}) \right]
\end{aligned}$$

Assim, finalmente pode-se formular o problema da seguinte maneira:

MOD SIMPLIFICADO :

$$\text{Max } \sum_{t=0}^{\infty} \bar{\gamma}^t \sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} \left[ \sum_{t'=1}^{TE} \bar{\gamma}^{t'} (\Pi^{t+t'} \text{PX} - C_i G^*(i_{t-1})) - K_i F^*(i_{t-1}) \right]$$

sa:

$$\sum_{i=i_{t-1}+1}^{i_t} K_i F^*(i_{t-1}) \leq KM^t \quad \forall t \in \{0, 1, \dots\}$$

$$h_{i_1} \geq h_{i_2} \quad \forall (i_1, i_2) \in \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, N\} / i_1 > i_2$$

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

## VII - FORMULAÇÃO DINÂMICA

Para um horizonte de planejamento  $T$ , o modelo simplificado apresentado na página anterior pode ser formulado em termos de programação dinâmica, com  $i_t$  sendo a variável de estado. Definindo  $V(i_t, t)$  como sendo a função de valor, que representa qual o lucro máximo advindo da instalação de  $i_t$  usinas até o período  $t$ , pode-se escrever que:

$$V(i_t, t) = \underset{(i_0, \dots, i_{t-1}) \in I_{t-1}}{\text{Max}} \left\{ \sum_{t'=1}^t \gamma^{-t'} \left[ \begin{array}{l} i_{t'} \\ \sum_{i=i_{t'-1}+1} \end{array} \left[ -K_i F^*(i_{t'-1}) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \sum_{t''=1}^{TE} \gamma^{-t''} (\Pi^{t'+t''} (PX - C_i G^*(i_{t'-1}))) \right] \right] \right\}$$

onde :

$$I_{t-1} = \{(i_0, \dots, i_{t-1}) / \sum_{i=i_{t'-1}+1}^{i_{t'}} K_i F^*(i_{t'-1}) \leq KM^{t'} \text{ e } i_{t'} \geq i_{t'-1}, \forall t' \in \{1, \dots, t\}\}$$

Definindo:

$$F_D(i_t, i_{t+1}, t+1) = \sum_{i_t < i \leq i_{t+1}} \left( \sum_{t'=1}^{TE} \gamma^{-t'} \left[ \Pi^{t+t'} \cdot (PX - C_i G^*(i_t)) \right] \right) - K_i F^*(i_t)$$

tem-se a seguinte fórmula de recorrência:

$$V(i_{t+1}, t+1) = \max_{i_t \in I'_t} \{F_D(i_t, i_{t+1}, t+1) + \frac{1}{\gamma} V(i_t, t)\}$$

onde :

$$I'_t = \{i_t / \sum_{i=i_t+1}^{i_{t+1}} K_i F^*(i_t) \leq KM^{t+1} \quad e \quad i_t \leq i_{t+1}\}$$

Assim, pode-se formular o problema da seguinte maneira:

FORMULAÇÃO DINÂMICA :

$$V(i_{t+1}, t+1) = \max_{i_t \in I'_t} \{F_D(i_t, i_{t+1}, t+1) + \frac{1}{\gamma} V(i_t, t)\}$$

$$F_D(i_t, i_{t+1}, t+1) = \sum_{i_t < i \leq i_{t+1}} \left[ \sum_{t'=1}^{TE} \frac{1}{\gamma^{t'}} (\Pi^{t+t'} PX - C_1 G^*(i_t)) \right] - K_1 F^*(i_t)$$

$$V(0,0) = 0 \quad V(i,0) = -\infty \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}$$

Segundo esta formulação a solução ótima do problema seria dada por:

$$V_{\text{ótimo}} = \max_{i \in \{0, 1, \dots, N\}} V(i, T)$$

Há de se ressaltar ainda que  $T$  corresponde ao horizonte para instalação das usinas, mas que na realidade o tempo de análise é  $T+TE$ , uma vez que ao se decidir acerca da instalação de uma usina no  $T$ -ésimo período é preciso levar-se em conta os  $TE$  períodos subsequentes (como fica claro por  $F_D(i_t, i_{t+1}, T)$ ).

### VII.1 - Exemplo :

Para exemplificar a abordagem de programação dinâmica proposta até aqui é mostrada a seguir a solução de um problema fictício, bastante simples, cujos dados são fornecidos a seguir (as usinas já se encontram ordenadas):

$$N = 5$$

$$T = 6$$

$$\bar{\gamma} = 1,0 \quad (\text{por simplicidade de cálculo})$$

$i$	$K_i$	$C_i$	$PX_i$	$TE_i$	$\bar{C}_i$
1	40000	212,50	100	8	1700
2	41365	275,00	100	8	2200
3	45055	285,63	100	8	2285
4	48951	294,13	100	8	2353
5	50000	376,50	100	8	3012



	0	1	2	3	4
F(.)	1,0	0,967	0,910	0,858	0,800
G(.)	1,0	0,909	0,875	0,850	0,830

$$KM^t = 50.000 \quad \forall t \in \{0,1,\dots,6\}$$

$$\begin{array}{lll} \Pi^1 = 100 & \Pi^6 = 65 & \Pi^{11} = 90 \\ \Pi^2 = 130 & \Pi^7 = 70 & \Pi^{12} = 90 \\ \Pi^3 = 40 & \Pi^8 = 75 & \Pi^{13} = 55 \\ \Pi^4 = 60 & \Pi^9 = 80 & \Pi^{14} = 35 \\ \Pi^5 = 65 & \Pi^{10} = 85 & \end{array}$$

Como a restrição de capital é 50000 em todos os períodos, observando-se os valores de  $K_i$  percebe-se que não é possível a instalação de duas usinas no mesmo período. Assim sendo já se pode saber qual será atenuação devida ao aprendizado para cada usina e montar o seguinte quadro.

i	$K_i^* F^*(i-1)$	$\bar{C}_i G^*(i-1)$	$CP_i$
1	40.000	1.700	53.600
2	40.000	2.000	56.000
3	41.000	2.000	57.000
4	42.000	2.000	58.000
5	40.000	2.500	60.000

Existem também condições de calcular a economia, em termos de substituição de importação de petróleo, auferida pela instalação de uma usina no período  $t$ , que como  $\bar{\gamma} = 1,0$  é dada por

$$\sum_{t'=t+1}^{TE} \Pi^{t+t'} \cdot PX$$

Assim sendo, temos que:

PERÍODO	ECONOMIA
1º	58.500
2º	54.000
3º	59.000
4º	62.000
5º	61.000
6º	58.000

Desta maneira a rede de caminhos possíveis para esse problema é aquela mostrada na figura 13.

Desta maneira a solução ótima do problema na instalação de quatro usinas, assim distribuídas: a primeira usina é instalada no primeiro período, a segunda usina no terceiro período, a terceira no quarto e a quarta no quinto. Ou seja:

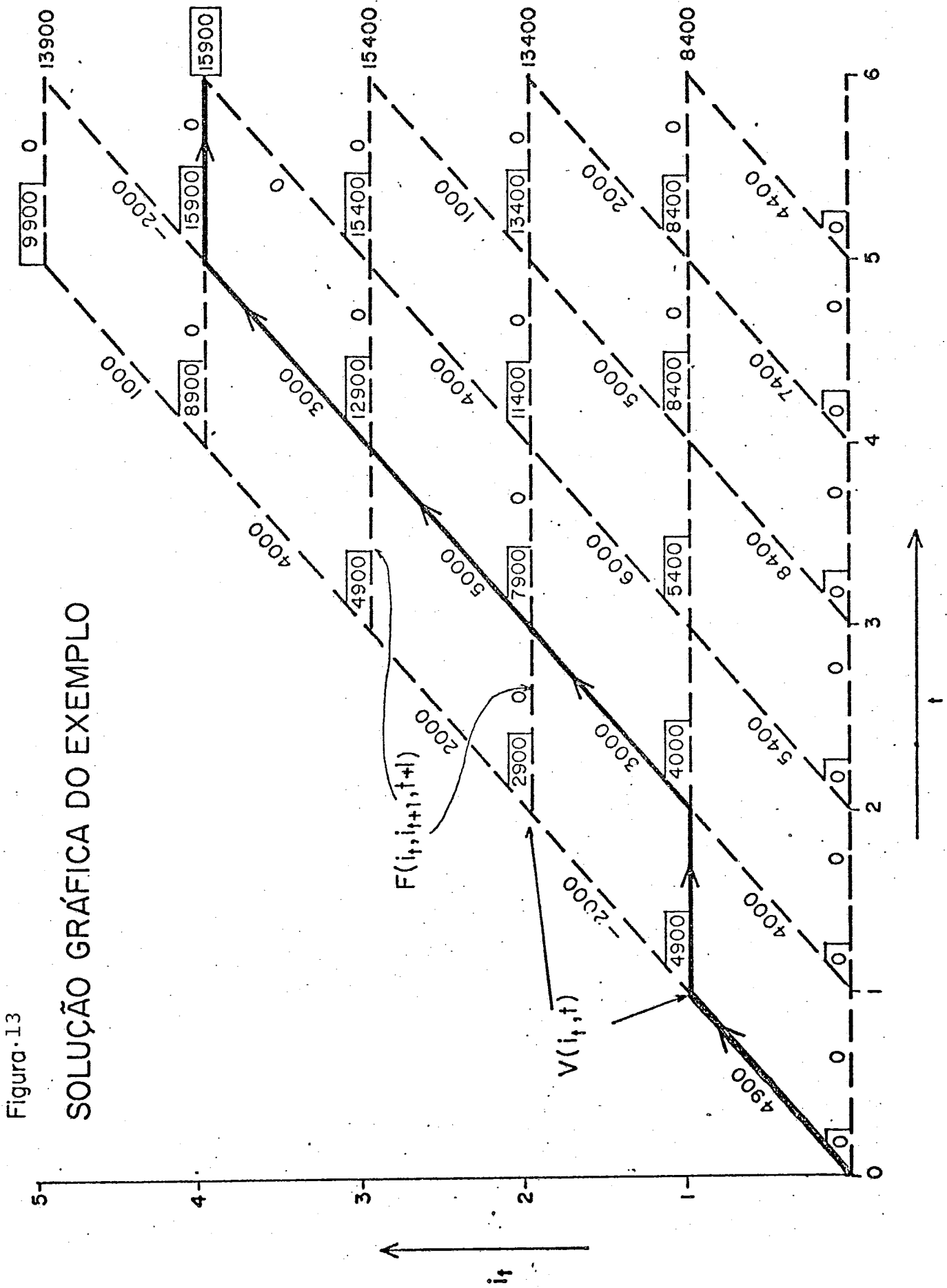
$$\hat{h}_1 = 1$$

$$\hat{h}_2 = 3$$

$$\hat{h}_3 = 4$$

$$\hat{h}_4 = 5$$

$$e \quad V_{\text{ótimo}} = V(4,6) = 15.900$$



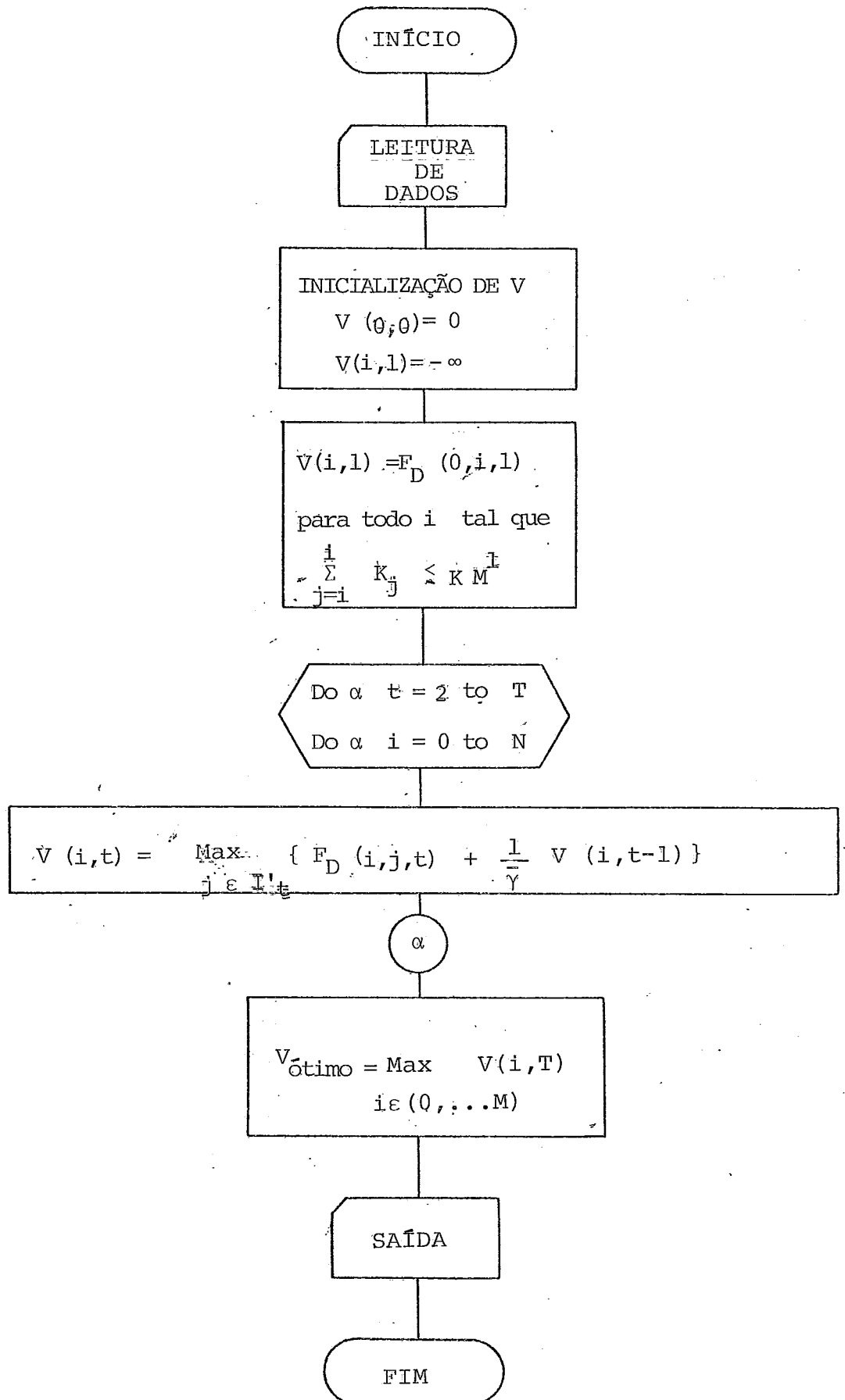
## VII.2 - Fluxograma:

Para resolver o problema da determinação da estratégia ótima de instalação das usinas de xisto de forma a maximizar as economias auferidas pela utilização do óleo de xisto como substituto do petróleo importado, segundo a formulação dinâmica apresentada, procedeu-se à elaboração de um programa segundo o fluxograma apresentado na página seguinte.

Para um maior esclarecimento dos detalhes de programação e exemplificação do formato de saída são apresentados, no apêndice 2, a listagem do programa e a saída de algumas simulações feitas.

Figura 12

## FLUXOGRAMA DO PROGRAMA



## VIII - DADOS:

De acordo com o atual nível de conhecimento geológico da Formação Irati e com as expectativas de evolução da tecnologia nos próximos anos, a PETROBRÁS considera potencialmente exeqüível a instalação de 7 usinas de xisto, com uma produção diária de 22.600 barris e uma vida útil de 30 anos (fator de operação = 90%), assim distribuídas e ordenadas:

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

A PETROBRÁS possui estimativas detalhadas de investimentos e custos operacionais para as duas usinas da área de São Mateus do Sul, considerando uma extrapolação razoável um incremento de 20% tanto nos investimentos quanto nos custos operacionais ao se passar de uma área para outra. Tais estimativas são apresentadas na tabela 24, de acordo com as taxas de desconto consideradas (5%, 10%, 15%).

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 considerada também uma segunda situação onde o investimento e custos

TAB. 24 : INVESTIMENTO E CUSTO OPERACIONAL DAS USINAS (ORIGINAL)  
(em milhões de dólares)

USINA	TAXA DE DESCONTO					
	5%		10%		15%	
	$K_i$	$C_i$	$K_i$	$C_i$	$K_i$	$C_i$
1	1242	453	958	410	796	371
2	1242	453	958	410	796	371
3	1490	544	1150	492	956	445
4	1490	544	1150	492	956	445
5	1788	652	1380	590	1147	534
6	1788	652	1380	590	1147	534
7	2146	783	1655	708	1376	641

TAB. 25 : INVESTIMENTO E CUSTO OPERACIONAL DAS USINAS (ORIGINAL + 50%)  
(em milhões de dólares)

USINA	TAXA DE DESCONTO					
	5%		10%		15%	
	$K_i$	$C_i$	$K_i$	$C_i$	$K_i$	$C_i$
1	1863	680	1437	615	1194	557
2	1863	680	1437	615	1194	557
3	2236	815	1724	738	1433	668
4	2236	815	1724	738	1433	668
5	2683	978	2069	886	1719	801
6	2683	978	2069	886	1719	801
7	3219	1170	2483	1060	2063	962

operacionais originais de cada usina seriam acrescidos de 50%, o que é mostrado na tabela 25.

Há de ressaltar ainda que, para tornar possível a resolução do problema por programação dinâmica, considerou-se todos os desembolsos relativos a investimentos como sendo feitos no primeiro período (período de instalação da usina). Para tanto foi considerado o valor presente do fluxo de desembolsos, de acordo com as taxas de desconto utilizadas, sendo esta a razão de se observar diferentes valores para o investimento para diferentes taxas de desconto. Além disso, no que concerne aos custos operacionais apresentados, estes se referem a um período de 5 anos, que foi o tamanho adotado para o período de instalação de uma usina de xisto.

Quanto às funções de aprendizado, na ausência de qualquer estudo ou publicação que tratasse deste aspecto, foi feita uma estimativa baseada na opinião de pessoas ligadas ao estudo de xisto e implantação das usinas, tanto da equipe da PETROBRÁS quanto de outros locais. A curva adotada para as simulações feitas no presente trabalho foi a seguinte:

TABELA 26 : FUNÇÕES DE APRENDIZADO .

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



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

Finalmente, no que diz respeito à questão dos preços do petróleo importado, foram considerados quatro cenários:

- cenário 1: uma curva assintótica a 100 dólares por barril, com crescimento inicial de 1% ao ano. Ou seja:

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

- cenário 2: uma curva assintótica a 100 dólares por barril, com crescimento inicial de 5% ao ano. Ou seja:

$$PP^t = 100(1 - 0,68 e^{-0,02381t})$$

- cenário 3: uma curva exponencial com crescimento anual de 2%. Ou seja:

$$PP^t = 32 \cdot 1,02^t ;$$

- cenário 4: uma curva exponencial com crescimento anual de 5%, limitada em 100 dólares por barril. Ou seja:

$$PP^t = \min \{100, 32 \cdot (1,05)^t\}$$

A escolha do limite máximo de 100 dólares por barril para o preço do petróleo importado foi feita com base em estudos que estimam que ficaria entre 80 e 120 dólares o custo de se produzir em larga escala, por intermédio da gaseificação

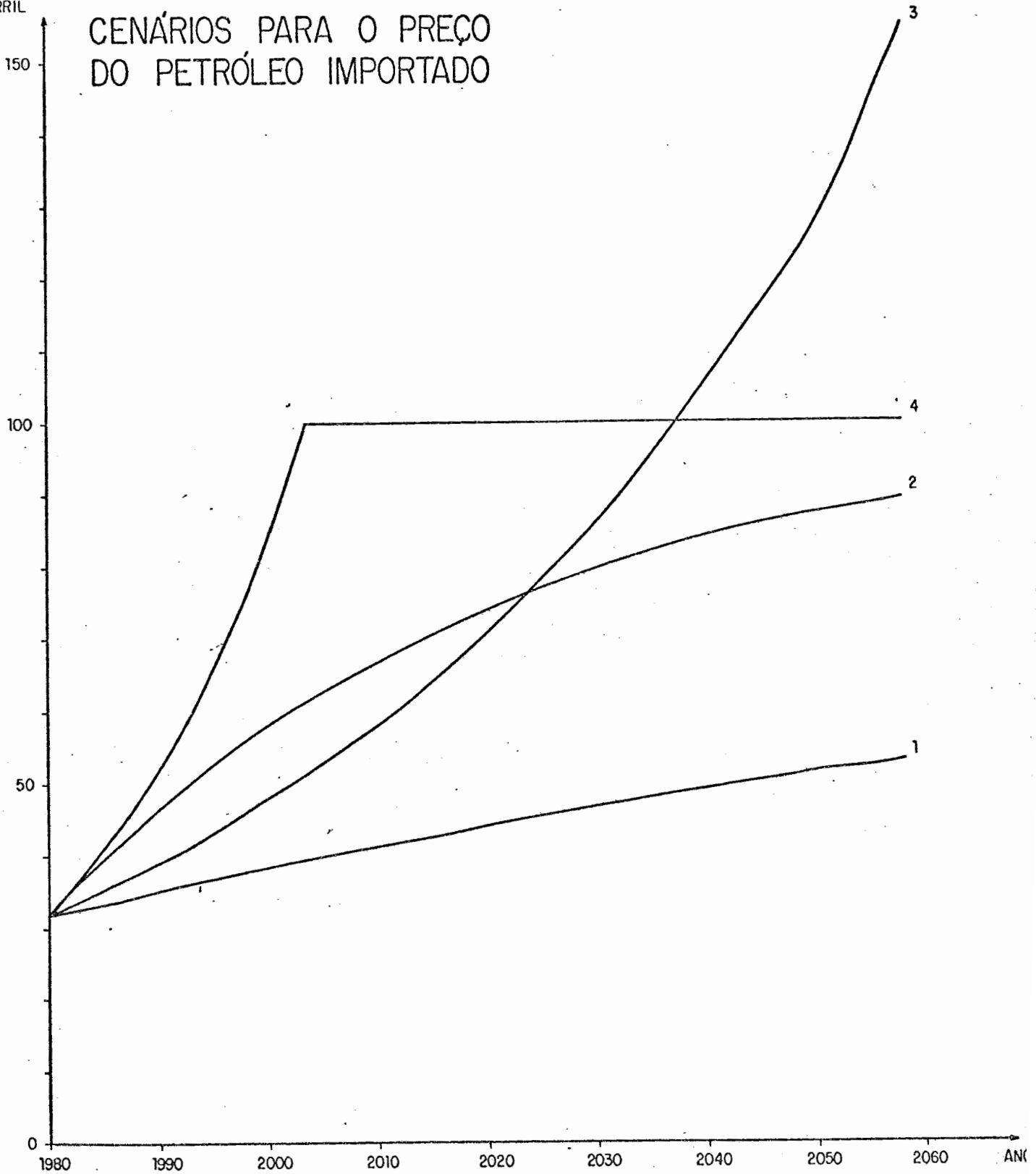
TAB. 27 : CENÁRIOS PARA OS PREÇOS DO PETRÓLEO IMPORTADO

(US\$/barril)

CENÁRIOS PERÍODOS	1	2	3	4
0	32,00	32,00	32,00	32,00
1	32,96	36,69	33,96	37,04
2	34,52	43,79	37,49	47,28
3	36,05	50,10	41,40	60,34
4	37,54	55,70	45,70	77,01
5	39,00	60,67	50,46	78,29
6	40,42	65,09	55,71	100
7	41,81	69,01	61,51	100
8	43,17	72,49	67,91	100
9	44,49	75,57	74,98	100
10	45,79	78,31	82,79	100
11	47,05	80,75	91,40	100
12	48,29	82,91	100,92	100
13	49,49	84,83	111,42	100
14	50,67	86,53	123,02	100
15	51,82	88,04	135,82	100
16	52,94	89,38	149,98	100

PREÇO DO  
BARRIL

Gráfico 7

CENÁRIOS PARA O PREÇO  
DO PETRÓLEO IMPORTADO

do carvão, a quantidade de energia equivalente a um barril de petróleo.

Os quatro cenários de preços do petróleo importado considerados são apresentados com mais detalhes na tabela 27 e no gráfico, 7 , a seguir.

Desta maneira, o número de casos considerados foi:

taxa de desconto:	3
custos de produção:	2
restrição de capital:	2
preço do petróleo:	4
<hr/>	
total de simulações:	48

## IX - RESULTADOS:

O propósito deste item é a apresentação dos resultados obtidos nas 48 simulações efetuadas. Por uma questão de espaço a apresentação será feita através de tabelas, só sendo apresentadas algumas saídas de computador no apêndice 2 o título de ilustração.

Para facilitar a comparação e análise dos resultados, as simulações serão agrupadas de dois modos: de acordo com os cenários para o preço do petróleo importado e de acordo com as hipóteses de taxas de desconto e custos de produção, assim designadas:

- hipótese 1: taxa de desconto: 50%  
custos de produção: original
- hipótese 2: taxa de desconto: 5%  
custos de produção: original + 50%
- hipótese 3: taxa de desconto: 10%  
custos de produção: original
- hipótese 4: taxa de desconto: 10%  
custos de produção: original + 50%
- hipótese 5: taxa de desconto: 15%  
custos de produção: original
- hipótese 6: taxa de desconto: 15%  
custos de produção: original + 50%

TABELA 28 : PERÍODO DE INSTALAÇÃO DAS USINAS (HIPÓTESE 1)

TAXA DE DESCONTO = 5%

CUSTO: ORIGINAL

CENÁRIO USINA	1		2		3		4	
	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR
1	01	01	01	01	01	01	01	01
2	01	01	01	01	01	01	01	01
3	02	02	01	02	02	02	01	02
4	02	02	01	02	02	02	01	02
5	03	03	02	03	03	03	02	03
6	03	04	02	04	03	04	02	04
7	04	05	02	05	04	05	02	05
Economia	4502	4455	13016	12247	9224	9155	22947	21240

\* SR: sem restrição de capital

\*\* CR: com restrição de capital

\*\*\* A economia é dada em milhões de dólares (valor presente).

TABELA 29: PERÍODO DE INSTALAÇÃO DAS USINAS (HIPÓTESE 2)

TAXA DE DESCONTO = 5%

CUSTO: ORIGINAL + 50%

CENÁRIO USINA	1		2		3		4	
	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR
1	04	03	01	01	03	02	01	01
2	05	04	01	02	04	03	01	02
3	06	05	02	03	05	04	02	03
4	07	06	02	04	05	05	02	04
5	08	07	03	05	06	06	03	05
6	08	08	03	06	07	07	03	06
7	-	-	04	07	08	08	03	07
Economia	600	584	7066	6607	5019	4987	16708	13679

\* SR: sem restrição de capital

\*\* CR: com restrição de capital

\*\*\* A economia é dada em milhões de dólares (valor presente).

TABELA 30 : PERÍODO DE INSTALAÇÃO DAS USINAS (HIPÓTESE 3)

TAXA DE DESCONTO = 10%

CUSTO: ORIGINAL

CENÁRIO USINA	1		2		3		4	
	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR
1	01	01	01	01	01	01	01	01
2	01	01	01	01	01	01	01	01
3	02	02	01	02	02	02	01	02
4	02	02	01	02	02	02	01	02
5	03	03	02	03	03	03	02	03
6	04	04	02	03	03	03	02	03
7	07	07	02	04	04	04	02	04
Economia	645	645	3065	2755	1704	1704	5790	5117

\* SR: sem restrição de capital

\*\* CR: com restrição de capital

\*\*\* A economia é dada em milhões de dólares (valor presente).



TABELA 31 : PERÍODO DE INSTALAÇÃO DAS USINAS (HIPÓTESE 4)

TAXA DE DESCONTO = 10%

CUSTO: ORIGINAL + 50%

CENÁRIO USINA	1		2		3		4	
	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR
1	07	07	01	01	03	03	01	01
2	08	08	02	01	04	03	01	01
3	-	-	03	02	05	04	02	02
4	-	-	03	03	05	05	02	03
5	-	-	04	04	06	06	03	04
6	-	-	04	05	06	07	03	05
7	-	-	05	06	07	08	03	06
Economia	3	3	835	777	356	342	3154	2636

\* SR: sem restrição de capital

\*\* CR: com restrição de capital

\*\*\* A economia é dada em milhões de dólares (valor presente).

TABELA 32 : PERÍODO DE INSTALAÇÃO DAS USINAS (HIPÓTESE 5)

TAXA DE DESCONTO = 15%

CUSTO: ORIGINAL

USINA \ CENÁRIO	1		2		3		4	
	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR
1	03	03	01	01	01	01	01	01
2	04	04	01	01	02	02	01	01
3	05	05	02	02	03	03	01	01
4	06	06	02	02	03	03	01	02
5	08	08	02	02	04	04	02	02
6	08	08	03	03	04	04	02	02
7	-	-	03	03	05	05	02	03
Economia	11	11	534	534	175	175	1307	1291

\* SR: sem restrição de capital

\*\* CR: com restrição de capital

\*\*\* A economia é dada em milhões de dólares (valor presente).

TABELA 33 : PERÍODO DE INSTALAÇÃO DAS USINAS (HIPÓTESE 6)

TAXA DE DESCONTO = 15%

CUSTO: ORIGINAL + 50%

CENÁRIO USINA	1		2		3		4	
	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR
1	-	-	03	03	05	05	02	02
2	-	-	04	04	06	06	02	02
3	-	-	05	05	07	07	03	03
4	-	-	05	05	07	07	03	03
5	-	-	06	06	08	08	03	04
6	-	-	07	07	08	08	03	04
7	-	-	-	-	-	-	04	05
Economia	0	0	31	31	9	9	417	404

\* SR: sem restrição de capital

\*\* CR: com restrição de capital

\*\*\* A economia é dada em milhões de dólares (valor presente).

TABELA 34 : PERÍODO DE INSTALAÇÃO DAS INDÚSTRIAS

## CENÁRIO 1

USINA	TAXA DE DESCONTO: 5%				TAXA DE DESCONTO: 10%				TAXA DE DESCONTO: 15%			
	CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIG.+ 50%		CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIG.+50%		CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIG.+50%	
	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	GR
1	01	01	04	03	01	01	07	07	03	03	-	-
2	01	01	05	04	01	01	08	08	04	04	-	-
3	02	02	06	05	02	02	-	-	05	05	-	-
4	02	02	07	06	02	02	-	-	06	06	-	-
5	03	03	08	07	03	03	-	-	08	08	-	-
6	03	04	08	08	04	04	-	-	08	08	-	-
7	04	05	-	-	07	07	-	-	-	-	-	-
ECONOMIA	4502	4455	600	584	645	645	3	3	11	11	0	0

\* SR: sem restrição de capital

\*\* CR: com restrição de capital

\*\*\*A economia é dada em milhões de dólares (valor presente).

TABELA 35.: PERÍODO DE INSTALAÇÃO DE INDÚSTRIAS

CENÁRIO 2

USINA	TAXA DE DESCONTO: 5%				TAXA DE DESCONTO: 10%				TAXA DE DESCONTO: 15%					
	CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIGI- NAL	
	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR
1	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	01	03	03
2	01	01	01	02	01	01	02	01	01	01	01	01	04	04
3	01	02	02	03	01	02	03	02	03	02	02	02	05	05
4	01	02	02	04	01	02	03	03	04	04	02	02	05	05
5	02	03	03	05	02	03	04	04	04	02	02	02	06	06
6	02	04	03	06	02	03	04	05	04	03	03	03	07	07
7	02	05	04	07	02	04	05	06	04	05	06	03	-	-
Economia	13016	12247	7066	6607	3065	2755	835	777	534	534	534	31	31	31

\* SR: sem restrição de capital

\*\* CR: com restrição de capital

\*\*\*A economia é dada em milhões de dólares (valor presente).

TABELA 36: PERÍODO DE INSTALAÇÃO DAS INDÚSTRIAS

CENÁRIO 3

USINA	TAXA DE DESCONTO: 5%				TAXA DE DESCONTO: 10%				TAXA DE DESCONTO: 15%			
	CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIG.+50%		CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIG.+50%		CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIG.+50%	
	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR
1	01	01	03	02	01	01	03	03	01	01	05	05
2	01	01	04	03	01	01	04	03	02	02	06	06
3	02	02	05	04	02	02	05	04	03	03	07	07
4	02	02	05	05	02	02	05	05	03	03	07	07
5	03	03	06	06	03	03	06	06	04	04	08	08
6	03	04	07	07	03	03	06	07	04	04	08	08
7	04	05	08	08	04	04	07	08	05	05	-	-
ECONOMIA	9224	9155	5019	4987	1704	1704	356	342	175	175	9	9

\* SR: sem restrição de capital

\*\* CR: com restrição de capital

\*\*\* A economia é dada em milhões de dólares (valor presente).

TABELA 37 : PERÍODO DE INSTALAÇÃO DE INDÚSTRIAS

CENÁRIO 4

USINA	TAXA DE DESCONTO: 5%			TAXA DE DESCONTO: 10%			TAXA DE DESCONTO: 15%					
	CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIG. +50%	CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIG. +50%	CUSTO ORIGI- NAL		CUSTO ORIG. +50%			
	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR	SR	CR		
1	01	01	01	01	01	01	01	01	01	02	02	
2	01	01	02	01	01	01	01	01	01	02	02	
3	01	02	03	01	02	02	02	01	01	03	03	
4	01	02	04	01	02	02	03	01	02	03	03	
5	02	03	05	02	03	03	04	02	02	03	04	
6	02	04	06	02	03	03	05	02	02	03	04	
7	02	05	07	02	04	03	06	02	03	04	05	
Economia	22947	21240	16708	13679	5790	5117	3154	2636	1307	1291	417	404

\* SR: sem restrição de capital

\*\* CR: com restrição de capital

\*\*\* A economia é dada em milhões de dólares (valor presente).

## X - COMENTÁRIOS E EXTENSÕES:

Um fato que chama a atenção ao se analisar os resultados das simulações realizadas é que a estratégia ótima de instalação das usinas de xisto é bastante sensível às considerações feitas em relação à taxa de desconto, preços do petróleo importado e custos de produção de óleo de xisto.

Para que se tenha idéia acerca da sensibilidade aos preços do petróleo importado basta que seja feita uma comparação entre os resultados obtidos para o cenário 1 (tabela 34) com aqueles obtidos para o cenário 4 (tabela 37). Também é interessante notar-se que, embora no cenário 3 os preços do petróleo importado atinjam níveis mais elevados que no cenário 2, a economia proporcionada pela instalação das usinas em todas as situações, consideradas é maior no cenário 2 (...) (vide tabelas 35 e 36). Isto é perfeitamente explicável em virtude de, nos períodos iniciais, os preços serem maiores no cenário 2 e, em ambos os casos, as taxas de crescimento do preço do petróleo serem inferiores às taxas de desconto consideradas. Isto explica também o aumento da razão entre estas economias à medida que aumenta a taxa de desconto.

No que se refere aos custos de produção, o seu efeito na solução ótima fez-se sentir de uma maneira marcante quando foi considerada uma taxa de desconto de 15% (hipóteses 5 e 6 - tabelas 32 e 33). Nos demais casos o que se observa mais é um espalhamento nos períodos de instalação das usinas, o que pode ser creditado também a maior influência da restrição de capital ao se elevar os custos de produção.



Quanto ao efeito das taxas de desconto na solução ótima, este fica bastante evidente ao se comparar os resultados obtidos quanto se considera as hipóteses 2 e 6 (vide tabelas 29 e 33). Além disso, como já foi comentado anteriormente, seu efeito é grande também nas economias proporcionadas pela instalação das usinas, notadamente ao se considerar os cenários 2 e 3 para os preços do petróleo importado.

Já no que se refere às restrições de capital, o único efeito que se fez sentir foi o espalhamento dos períodos de instalação das usinas. Tal comportamento era de se esperar, uma vez que o número de períodos para instalação de usinas (8) era maior que o número de usinas a serem instaladas (7), a restrição de capital era tal que permitia, em qualquer situação, a instalação de pelo menos uma usina por período e o preço do petróleo importado era crescente em todos os quatro cenários considerados.

Uma experiência importante que pode ser realizada é a variação do horizonte (número de períodos) para instalação das usinas, isto no sentido de melhor avaliar seu efeito na estratégia ótima, principalmente ao se incorporar restrições de capital ao modelo.

Além disso existem algumas extensões extremamente interessantes que podem ser efetuadas, como a flexibilização do modelo no sentido de permitir a consideração de usinas com diferentes capacidades de produção, o que viria de encontro aos planos da PETROBRÁS de exploração de algumas regiões de menor potencial na Formação Irati através da instalação de usinas de menor porte, e também no sentido de viabilizar a variação dos tamanhos dos períodos de instalação das usinas, o que permitiria uma diluição do capital necessário para tal, de maneira a me-

lhor assimilar os efeitos das restrições de capital. Por outro lado, paralelamente poderia ser desenvolvido um estudo detalhado visando a incorporação de incertezas, tanto nos preços do petróleo importado quanto nos custos de produção de óleo de xisto.

Finalmente, poderiam ser feitos estudos semelhantes para outras fontes alternativas de energia, assim como para o setor de refino, no sentido de melhor avaliar o papel dos xistos oleígenos e destas outras fontes dentro do panorama energético brasileiro.

APÊNDICE 1CLASSIFICAÇÃO DOS RECURSOS DE XISTO

O propósito deste apêndice é a apresentação do critério de classificação de recursos de xisto adotado no presente trabalho, o qual é descrito no U. S. Geological Survey Bulletin 1450- (59) e que vem sendo utilizado pela Petrobrás na avaliação dos recursos nacionais de xisto.

Os recursos potenciais de xisto de uma região podem ser classificados, basicamente, de duas formas:

- quanto ao nível de conhecimento geológico;
- quanto ao nível de atratividade econômica do seu aproveitamento.

Quanto ao nível do conhecimento geológico os recursos são classificados em CONHECIDOS e NÃO-CONHECIDOS. São considerados conhecidos os recursos para os quais existem estudos geológicos detalhados, de tal forma que sua dimensão é avaliada com base em medidas e mapeamentos sistemáticos, e cuja composição é obtida a partir de ensaios de laboratório com amostras da malha pesquisada.

A classe de recursos conhecidos engloba também áreas contíguas onde houve um levantamento apenas parcial, mas cuja dimensão e composição podem ser extrapoladas sem grandes erros a partir dos dados da região intensamente estudada.

Os recursos estudados de forma mais completa, cujos erros de estimação presume-se que sejam inferiores a 20%, são denominados recursos MEDIDOS (ou PROVADOS). Conforme a confiabilidade das estimativas diminui, os recursos conhecidos passam a se denominar INDICADOS e INFERIDOS. A soma dos recursos provados e indicados denomina-se recursos DEMONSTRADOS.

Os recursos não-conhecidos compõem-se tanto daqueles já detetados mas que, entretanto, ainda não possuem um levantamento de dados em quantidade suficiente que possibilite uma boa avaliação, denominados recursos HIPOTÉTICOS; quanto daqueles ainda não detetados mas cuja existência é conjecturada, chamados de recursos ESPECULATIVOS.

Quanto à viabilidade econômica do seu aproveitamento, os recursos de xisto podem ser classificados em:

- recursos econômicos;
- recursos subeconômicos.

Os recursos econômicos são aqueles cujo aproveitamento é considerado economicamente viável nas condições de preço e tecnologia atuais. Recursos conhecidos considerados econômicos são denominados RESERVAS.

Os subeconômicos são aqueles que, por razões de profundidade, teor de óleo, dimensão, localização ou outra qualquer, não são aproveitáveis de forma econômica atualmente, porém há perspectivas de que venham a sê-lo em um futuro próximo (25 anos (36)), quer por expectativas relacionadas ao comportamento dos preços quer por previsões de avanços tecnolôgi

cos. Em seu trabalho Meyer (36) denomina os recursos que não possuem perspectiva de aproveitamento nos próximos 25 anos de ocorrências.

O Quadro A.1, a seguir, procura fornecer uma visão geral desta classificação.

QUADRO A.1

## CLASSIFICAÇÃO DOS RECURSOS

	CONHECIDOS		NÃO CONHECIDOS
	DEMONSTRADOS		
	MEDIDOS	INDICADOS	
	INFERIDOS		
ECONÔMICO	RESERVAS		
SUB ECONÔMICO	RECURSOS		

FONTE: (36)

De um modo geral as tentativas de determinação das condições necessárias (teor de óleo, espessura das camadas, etc.) para que um determinado recurso de xisto possa ser aproveitado em condições economicamente viáveis são pouco precisas, devido a existência tanto de incertezas conjunturais,

tais como o preço do petróleo, a disponibilidade deste no mercado e as imposições sociais relativas a poluição ambiental, quanto de incertezas intrínsecas ao seu aproveitamento, como o volume de investimentos necessários e o custo operacional, por exemplo.

Desta maneira, como o conceito de reserva está diretamente relacionado com as condições de viabilidade econômica de seu aproveitamento, a classificação de um determinado recurso de xisto como reserva torna-se um tanto imprecisa.

Além disso, as especificidades das economias locais e principalmente o fato do volume das reservas locais de petróleo ser um fator determinante para a viabilidade econômica da exploração de um depósito de xisto, fazem com que a definição de um critério global e objetivo seja praticamente impossível. Entretanto devido à necessidade de uma avaliação das reservas mundiais de óleo de xisto algumas conceituações foram tentados.

Duncan (18) ao estudar as reservas mundiais propôs que fossem considerados como reservas nos EUA os recursos capazes de produzir mais de 25 USGAL/t curta (105 l/t) de rochas, com uma espessura superior a 25 pés (7,5 m) e localizados a menos de 1000 pés (300 m) de profundidade, limites estes baseados em dados provenientes de usinas protótipo do U.S. Bureau of Mines e de empresas privadas no Colorado. Para os demais países seriam considerados reservas os depósitos que apresentassem teor de óleo e espessura de camadas similares aos dos depósitos já utilizados. Estes depósitos podem ser

agrupados, de maneira aproximada, em dois grupos:

- depósitos produzindo entre 25 e 100 USGAL/t curta (105 a 415 l/t, com espessura superior a poucos pés de profundidades de até 1000 pés (300 m));
- depósitos produzindo de 10 a 25 USGAL/t curta (40 a 105 l/t com espessura superior a 20 pés (7,5 m) e mineráveis a céu aberto.

APÊNDICE 2

PROGRAMAÇÃO E ALGUMAS SAÍDAS



OPTIONS SPECIFIED

OBJECT,NUDECK

OPTIONS USED

AGGREGATE	ALCOUNT	ATTN LTR (FULL)
GOSTMT	NUDECK	CHARS 7 (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)
INSOURCE	NOFESU	NOCOMPILE(S)
LMESSAGE	NOFLOW	FLAC(1)
NEST	NOCONUMBER	LINECOUNT(60)
OBJECT	NOIMPRESISE	MARGINS(2,72,1)
OPTIONS	NOINCLUDE	SERUENG: (72,30)
SOURCE	NOINTERRUPT	SIZE(257744)
SYMT	NOLIST	NOSYNTAX(S)
	NOMACRO	XREF(FULL)
	NOMAP	
	NOMARGINI	
	NOMDECK	
	NONUMBER	
	NOFFSET	
	NOOPTIMIZE	
	NOSTORAGE	
	NOTERMINAL	

STMT LEV NT

```

10 1 0 GET LIST(NS) ;
11 1 0 DO 51M = 1 TO NS ;
12 1 1 GET LIST((PR(TEMPO)) DO TEMPO = 0 TO PR( )) ;
13 1 1 CALL PRDIN ;
14 1 1 CALL PUTOUT ;
15 1 1 END ;
16 1 0 GET LIST(FLAG) ;
17 1 0 IF FLAG = '1' THEN GO TO INCL ;
18 1 0 IF FLAG = '2' THEN GO TO INCL ;
19 1 0 PRDIN:PROC ;
20 2 0 V(0,0) = 0 ;
21 2 0 V(*,1) = -1.0E+20 ;
22 2 0 V(0,1) = 0. ;
23 2 0 D = 0 ;
24 2 0 DO ESTJ=1 TO N ;
25 2 1 KAP = 0. ;
26 2 1 DO EST_AUX = 1 TO ESTJ ;
27 2 2 KAP = KAP + K(EST_AUX) ;
28 2 2 END ;
29 2 1 IF KAP > KAP_MAX(I) THEN GO TO PROO ;
30 2 1 CALL ARCO(0,ESTJ,I) ;
31 2 1 V(ESTJ,I) = RESULT ;
32 2 1 END ;
33 2 0 PROC:DO TEMPO = 2 TO T ;
34 2 1 DO ESTJ = 0 TO N ;
35 2 2 V(ESTJ,TEMPO) = V(ESTJ,TEMPO-1)/GAMA ;
36 2 2 D(ESTJ,TEMPO) = ESTJ ;
37 2 2 IF ESTJ = 0 THEN GO TO PROJ ;
38 2 2 DO ESTI = ESTJ-1 TO 0 BY -1 ;
39 2 3 KAP = 0. ;
40 2 3 DO EST_AUX = ESTI+1 TO ESTJ ;
41 2 4 KAP = KAP + K(EST_AUX)*R(ESTI) ;
42 2 4 END ;
43 2 3 IF KAP > KAP_MAX(TEMPO) THEN GO TO PROJ ;
44 2 3 CALL ARCO(ESTI,ESTJ,TEMPO) ;
45 2 3 IF V(ESTJ,TEMPO) < V(ESTI,TEMPO-1)/GAMA + RESULT THEN DO ;
46 2 4 V(ESTJ,TEMPO) = V(ESTI,TEMPO-1)/GAMA + RESULT ;
47 2 4 D(ESTJ,TEMPO) = ESTI ;
48 2 4 END ;
49 2 3 END ;
50 2 2 PRGI:END ;
51 2 1 END ;
52 2 0 VOT = 0 ;
53 2 0 DO 55TJ = 0 TO N ;
54 2 1 IF VOT < V(ESTJ,T) THEN DO ;
55 2 2 VOT = V(ESTJ,T) ;
56 2 2 DUT = ESTJ ;
57 2 2 END ;
58 2 1 END ;
59 2 0 VOT = GAMA**T#VOT ;
60 2 0 END PRDIN ;
61 1 0 ARCO:PROC(ESTJ,IP) ;
62 2 0 DCL (E1,J,IP,ETI) BIN FIXED(0) ;
63 2 0 RESULT = 0 ;

```

SOURCE LISTING

STMT LEV NT

```

1 0 XLISTC:PROC OPTIONS(MAIN) :
2 1 0 ON ENDFILE(LYJIN) GO TO FIN ;
3 1 0 DCL V(O:20, F:20) D/C FLOAT(8) *
L(O:20, F:20) BIN FIXED(8) *
PP(O:20) DEC FLOAT(6) *
F(O:20) D/C FLOAT(8) *
F1(O:20) D/C FLOAT(8) *
K(O:20) B/C FLOAT(8) *
KI(O:20) D/C FLOAT(8) *
KL(O:20) D/C FLOAT(8) *
KAP_MAX(O:20) D/C FLOAT(8) *
C(O:20) DEC FLOAT(8) *
CL(O:20) D/C FLOAT(8) *
CP(O:20) D/C FLOAT(8) *
COP(O:20) DEC FLOAT(8) *
QP(O:20) DEC FLOAT(8) *
TE(O:20) D/C FLOAT(8) *
FRP(O:20) D/C FLOAT(8) *
R(O:20) DEC FLOAT(8) *
LCOU(O:20) D/C FLOAT(8) *
ECOP(O:20) D/C FLOAT(8) *
PI(O:20) BIN FIXED(8) *
PE(O:20) BIN FIXED(8) *
NUI(O:20) BIN FIXED(8) *
NUP(O:20) BIN FIXED(8) *
TAMPO T
T BIN FIXED(8) *
ESTI BIN FIXED(8) *
ESTJ BIN FIXED(8) *
I I
J J
SET_AUX SET_AUX
N NS
NS BIN FIXED(8) *
SIM SIM
P P
PIME BIN FIXED(8) *
DOT DOT
VCT VCT
GAMA GAMA
KAP KAP
RESULT RESULT
FLAC FLAC
4 1 0 GET LIST(CAMA, N, P) ;
5 1 0 SET LIST(( QUESTI) * W(ESTI) * K(ESTI) * TE(ESTI)
DO ESTI = 1 TO N) ;
6 1 0 INO2:GET LIST (I) ;
7 1 0 SET LIST(( KAP_MAX(TEMP) DO TEMPL = 0 TO 7)) ;
8 1 0 INO1:SET LIST(( FC(ESTI) DO ESTI = 0 TO N-1)) ;
9 1 0 SET LIST(( FC(ESTI) DO ESTI = 0 TO N-1)) ;

```

STMT LFV NT

```

64 2 0 DO ESTI = EI+1 TO EJ ;
65 2 1 RESULT = RESULT - K(ESTI)*F(I) ;
66 2 1 DO TIME = TP+1 TO TP+TZ(ESTI) ;
67 2 2 RESULT = RESULT + GAMA**(TIME - TP)*(FP(TIME)*G(ESTI) -
        C(ESTI)*FI(ESTI)) ;
68 2 2 END ;
69 2 1 END ;
70 2 0 END ARCU ;
71 1 0 OUTPUT=PRUC ;
72 2 0 ESTJ = DOT ;
73 2 0 ESTI = D(NOT,I) ;
74 2 0 DO TEMPO = T-1 TO 0 BY -1 ;
75 2 1 NUI(TEMPO,I) = ESTI ;
76 2 1 KI(TEMPO,I) = 0. ;
77 2 1 FKP(TEMPO,I) = 0. ;
78 2 1 R(TEMPO,I) = 0. ;
79 2 1 DO J = ESTI+1 TO ESTJ ;
80 2 2 PI(J) = TEMPO+1 ;
81 2 2 PE(J) = TEMPO+TE(J)+1 ;
82 2 2 KL(J) = K(J) * F(ESTI) ;
83 2 2 CL(J) = C(J) * FI(ESTI) ;
84 2 2 KI(TEMPO+1) = KI(TEMPO+1)+KL(J) ;
85 2 2 END ;
86 2 1 IF KAP_MAX(TEMPO+1) < I.0E+10 THEN DO ;
87 2 2 FKP(TEMPO+1) = KAP_MAX(TEMPO+1)-KI(TEMPO+1) ;
88 2 2 IF ESTJ < N THEN
        R(TEMPO+1) = FKP(TEMPO+1) / (K(ESTJ+1)*F(ESTI)) ;
89 2 2 END ;
90 2 1 ESTJ = ESTI ;
91 2 1 ESTI = D(ESTI+TEMPO) ;
92 2 1 END ;
93 2 1 DO J = 1 TO DOT ;
94 2 1 ECGU(J) = -KL(J) ;
95 2 1 CP(J) = KL(J) ;
96 2 1 DO TEMPO = PI(J) + 1 TO PE(J) ;
97 2 2 ECGU(J) = ECGU(J) + GAMA**(TEMPO - PI(J)) *
        (X(J)*FP(TEMPO)-CL(J)) ;
98 2 2 CP(J) = CP(J) + GAMA**(TEMPO-PI(J))*CL(J) ;
99 2 2 END ;
100 2 2 ECGU(J) = GAMA**PI(J)*ECGU(J) ;
101 2 1 END ;
102 2 0 DO TEMPO = T+1 TO T+10 ;
103 2 1 NUI(TEMPO) = DOT ;
104 2 1 END ;
105 2 0 DO TEMPO = 1 TO T+10 ;
106 2 1 NOP(TEMPO) = 0 ;
107 2 1 QP(TEMPO) = 0. ;
108 2 1 COP(TEMPO) = 0. ;
109 2 1 DO J = 1 TO NUI(TEMPO) ;
110 2 2 IF PE(J) > TEMPO-1 THEN DO ;
111 2 3 NOP(TEMPO) = NOP(TEMPO) + 1 ;
112 2 3 QP(TEMPO) = QP(TEMPO) + Q(J) ;
113 2 3 COP(TEMPO) = COP(TEMPO) + CL(J) ;
114 2 3 END ;

```

XLIST:PROC OPTIENS(PAIN) ;

PC/I OPTIMIZING COMPILER

STMT LEV NT

```

115 2 2  END ;
116 2 1  EOP(TEMPO) = (QP(TEMPO)*PP(I*NPIC)-CUP(TEMPO))*GARA**TEMPO ;
117 2 1  END ;
118 2 0  PUT SKIP(1) ;
119 2 0  PUT PAGE ;
120 2 0  PUT EDIT ;
121 2 0  PUT EDIT ( (1)* , 'ACORDAR' , (7)* ) ;
122 2 0  PUT EDIT ( (2)(COL(2) , A , SKIP ) ) ;
123 2 0  PUT EDIT ( 'TAMANHO DO PERIODO CONSIDERADO : ' , P , 'ANUS' ) ;
124 2 0  PUT EDIT ( COL(10) , A , COL(55) , P'Z' , X(1) , A ) SKIP ;
125 2 0  PUT EDIT ( 'AREA DE RESERVA PARA O PERIODO : ' , GARA +
'COES' ) ( COL(10) , A , COL(55) , P'9V.99' ) SKIP ;
126 2 0  PUT EDIT ( 'NUMERO DE ARCAS CONSIDERADAS : ' , N ) ;
127 2 1  PUT EDIT ( COL(10) , A , COL(55) , P'99' ) SKIP ;
128 2 0  PUT EDIT ( 'HORIZONTE PARA INSTALACAO DAS USINAS : ' , T ,
'PERIODOS' ) ( COL(10) , A , COL(55) , P'99' , X(1) ,
A ) SKIP ;
129 2 0  PUT EDIT ( 'AREA' , 'CAPITAL SUM' , 'CUSTO OPERACIONAL' ,
'CAPACIDADE DE ' , 'TEMPO DE' , 'APRENDIZADO' ,
'SEM APRENDIZADO' , 'PRODUCAO' , 'EXAUSTAO' ) ;
130 2 0  PUT EDIT ( COL(13) , A , COL(10) , A , COL(34) , A , COL(54) , A
, COL(70) , A , SKIP , COL(20) , A , COL(35) , A ,
COL(56) , A , COL(70) , A ) SKIP(5) ;
131 2 0  PUT EDIT ( 'DO I = 1 TO N ;
(I,K(I)*1.0E-6+0.5,C(I)*1.0E-6+0.5,(I)*1.0E-6+0.05,
TE(I) ) (COL(14) , P'99' , COL(23) , P'ZZZZZ' ,
COL(40) , P'ZZZZZ' , COL(59) , P'9V.9' , COL(73) ,
P'ZZ' ) SKIP(2) ;
132 2 1  END ;
133 2 0  PUT EDIT ( ( I-1 DO I = 1 TO N ) ( COL(54) , (10)( P'9' , X(9) )
) SKIP(4) ;
134 2 0  PUT EDIT ( 'ATENUACAO NO CAPITAL - F( ) - ' , (F(I-1)+0.0005
DO I=1 TO N) ( COL(10) , A , COL(53) , (10)( P'2V.ZZZ , X(5) ) )
SKIP(2) ;
135 2 0  PUT EDIT ( 'ATENUACAO NO CUSTO OPERACIONAL - G( ) - ' ,
(F(I-1)+0.0005 DO I=1 TO N) ( COL(10) , A , COL(53) , (10) (
P'2V.ZZZ , X(9) ) ) SKIP(2) ;
136 2 0  PUT EDIT ( 'PERIODO' , ( I DO I = 1 TO T + 10 ) ) ( COL(10) , A ,
COL(22) , (22)( P'ZZ' , X(3) ) ) SKIP(6) ;
137 2 0  PUT EDIT ( 'PRECO DO' , ( PP(I)+0.5 DO I = 1 TO T+10 ) )
( SKIP(2) , COL(10) , A , SKIP , COL(21) , (22)( P'ZZZ'
, X(2) ) ) ;
138 2 0  PUT EDIT ( 'PETROLEO' ) ( COL(10) , A ) SKIP ;
139 2 0  PUT EDIT ( '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 BARRIL'
, ' IS POR PERIODO' ,
' O TEMPO DE EXAUSTAO E DADO EM NUMERO DE PERIODOS' ,
' O PRECO DO PETROLEO E DADO EM DOLARES POR BARRIL' )
( SKIP(7) , COL(10) , A , (2)( SKIP , COL(10) , (2)A ) ,
(2)( SKIP , COL(10) , A ) ) ;
140 2 0  PUT PAGE ;
141 2 0  PUT EDIT ( (14)* , 'RESULTADO-I*' , (14)* ) ;
142 2 0  PUT EDIT ( (3)(COL(3) , A , SKIP ) ) ;

```

STMT LEV NF

```

138 2 0 PUT EDIT ( 'PERIODO', 'DISPONIBILIDADE', 'K', 'NO DE USINAS',
'PRODUCAO DE', 'PERIFICIO LIQUIDO', 'DE CAPITAL',
'EM OPERACAO', 'VALOR DE XISTC', 'POR PERIODO' )
( COL(1), A, COL(2), A, COL(4), A, COL(5), A, COL(6), A,
A, COL(7), A, COL(8), A, SKIP, COL(12), A,
COL(13), A, COL(14), A, COL(15), A ) SKIP(4) ;
139 2 0 DO I = 1 TO T ;
140 2 1 PUT EDIT ( I, KAP_MAX(I)*1.0E-6+0.5, R(I)+0.05, NCP(I),
R(I)/1645 + 0.5, RCP(I)*1.0E-6 + 0.5 )
( COL(1), F'99', COL(2), F'ZZZZ', COL(4), F'99', COL(5), F'ZZZZ',
F'99', COL(15), F'99', COL(16), F'ZZZZ', COL(17), F'99', COL(18),
COL(19), F'ZZZZZ' ) SKIP(2) ;
141 2 1 END ;
142 2 0 DO I = T + 1 TO PE(OUT) ;
143 2 1 PUT EDIT(I,NCP(I),R(I)/1645 + 0.5, RCP(I)*1.0E-6 + 0.5 )
(COL(1), F'99', COL(2), F'ZZZZ', COL(4), F'99', COL(5), F'ZZZZZ',
COL(15), F'ZZZZZ') SKIP(2) ;
144 2 1 END ;
145 2 0 PUT EDIT ( 'A DISPONIBILIDADE DE CAPITAL E DADA EM MILHOES DE',
'DOLARES (VALOR CORRENTE)',
'A PRODUCAO DE BLEN DE XISTC E DADA EM NUMERO DE',
'BARRIS POR DIA',
'O BENEFICIO LIQUIDO POR PERIODO E DADO EM MILHOES',
'DE DOLARES (VALOR CORRENTE)',
'R = FOLGA DE CAPITAL NO PERIODO / CAPITAL NECESSA',
'RIO PARA INSTALACAO DA PROXIMA USINA' )
( (4) COL(10), (2)A, SKIP ) SKIP(6) ;
146 2 0 PUT PAGE ;
147 2 0 PUT EDIT ( (14)'*', 'RESULTADOS-2', (14)'*' )
( (3) COL(3), A, SKIP ) ;
148 2 0 PUT EDIT ('NUMERO DE USINAS INSTALADAS : ', DLT )
(COL(12), A, COL(14), F'259', ) SKIP(4) ;
149 2 0 PUT EDIT ('ECONOMIA TOTAL PROPORCIONADA : ', VUT*1.0E-6 + 0.5,
'MILHOES DE DOLARES (VALOR PRESENTE)', )
(COL(12), A, COL(13), F'ZZZZZ', COL(14), A ) SKIP(2) ;
150 2 0 PUT EDIT ('AREA', 'PERIODO DE', 'PERIODO DE', 'CAPACIDADE DE',
'CUSTO DE', 'CAPITAL', 'ECONOMIA', 'INSTALACAO',
'EXAUSTAO', 'PRODUCAO', 'PROGNOZ' )
( COL(12), A, COL(13), A, COL(14), A, COL(15), A, COL(16), A, COL(17),
A, COL(18), A, COL(19), A, COL(20), A, COL(21), A, COL(22), A,
COL(23), A, COL(24), A, COL(25), A, COL(26), A, COL(27), A,
A ) SKIP(6) ;
151 2 0 DO J=1 TO DOT ;
152 2 1 PUT EDIT ( J, PI(J), PE(J),
R(J)/1645 + 0.5, RCP(J)*1.0E-6 + 0.5,
KL(J)*1.0E-6 + 0.1, RCU(J)*1.0E-6 + 0.5 )
( COL(1), F'99', COL(2), F'99', COL(3), F'99', COL(4), F'99',
COL(5), F'99', COL(6), F'99', COL(7), F'ZZZZZ', COL(8), F'99',
P'ZZZZ', COL(9), F'ZZZZZ', ) SKIP(3) ;
153 2 1 END ;
154 2 0 PUT EDIT ( 'A CAPACIDADE DE PRODUCAO DE CADA AREA E DADA EM',
'NUMERO DE BARRIS POR DIA',
'O CUSTO DE PRODUCAO (CAPITAL+CUSTO OPERACIONAL TO',
'TAL) E DADO EM MILHOES DE DOLARES (VALOR CORRENTE)',

```

STMT LEV NT

```

1- A ECONOMIA TOTAL PROPORCIONADA POR CADA USINA E
1 CADA UM MILHOES DE DOLARES (VALOR PRESENTE) ;
1 O CAPITAL (COM APENDIZADO) E DADO EM MILHOES DE
1 DOLARES (VALOR CORRENTE) ;
1 (4) (COLIC) , (2) (SKIP) ) SKIP(0) ;

```

```

155 2 0 PUT FACE ;
156 2 0 END OUTPUT ;
157 1 0 FIM:END XISTO ;

```







DCL NO. IDENTIFIER

71 OUTPUT

70,103,113

ENTRY RETURN(DECIMAL /\* SINGLE \*/ FLOAT (6))  
14

3 P

AUTOMATIC ALIGNED BINARY FIXED (6,C)  
5,111

3 PE

(0:20) AUTOMATIC ALIGNED BINARY FIXED (6,C)  
11,70,113,144,153

3 PI

(0:20) AUTOMATIC ALIGNED BINARY FIXED (6,C)  
20,58,77, 8,100,152

3 PF

(0:20) AUTOMATIC ALIGNED DECIMAL /\* SINGLE \*/ FLOAT (6)  
12,67,97,115,112

19 PROIN

ENTRY RETURN(DECIMAL /\* SINGLE \*/ FLOAT (6))  
13

33 PROG

/\* STATEMENT LABEL CONSTANT \*/  
19

50 PROI

/\* STATEMENT LABEL CONSTANT \*/  
17,43

3 Q

(0:20) AUTOMATIC ALIGNED DECIMAL /\* SINGLE \*/ FLOAT (6)  
5,67,97,111,127,112

3 QP

(0:20) AUTOMATIC ALIGNED DECIMAL /\* SINGLE \*/ FLOAT (6)  
107,112,111,116,140,143

3 R

(0:20) AUTOMATIC ALIGNED DECIMAL /\* SINGLE \*/ FLOAT (6)  
78,88,141

3 RESULT

AUTOMATIC ALIGNED DECIMAL /\* SINGLE \*/ FLOAT (6)  
1,45,40,3,35,85,87,87

3 SIM

AUTOMATIC ALIGNED BINARY FIXED (6,C)  
11,11

\*\*\*\*\* SYSIN

EXTERNAL FILE  
1,4,5,6,7,8,9,10,12,16

\*\*\*\*\* SYSPRINT

EXTERNAL FILE PRINT  
12,117,1 1,121,122,123,124,125,127,128,130,131,132,133,134,135,136,137,138,  
140,141,142,143,144,147,148,149,150,152,154,155

3 T

AUTOMATIC ALIGNED BINARY FIXED (6,C)  
8,7,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100,101,102,103,104,105,106,107,108,109,110,111,112,113,114,115,116,117,118,119,120,121,122,123,124,125,126,127,128,129,130,131,132,133,134,135,136,137,138,139,140,141,142,143,144,145,146,147,148,149,150,151,152,153,154,155,156,157,158,159,160,161,162,163,164,165,166,167,168,169,170,171,172,173,174,175,176,177,178,179,180,181,182,183,184,185,186,187,188,189,190,191,192,193,194,195,196,197,198,199,200,201,202,203,204,205,206,207,208,209,210,211,212,213,214,215,216,217,218,219,220,221,222,223,224,225,226,227,228,229,230,231,232,233,234,235,236,237,238,239,240,241,242,243,244,245,246,247,248,249,250,251,252,253,254,255,256,257,258,259,260,261,262,263,264,265,266,267,268,269,270,271,272,273,274,275,276,277,278,279,280,281,282,283,284,285,286,287,288,289,290,291,292,293,294,295,296,297,298,299,300,301,302,303,304,305,306,307,308,309,310,311,312,313,314,315,316,317,318,319,320,321,322,323,324,325,326,327,328,329,330,331,332,333,334,335,336,337,338,339,340,341,342,343,344,345,346,347,348,349,350,351,352,353,354,355,356,357,358,359,360,361,362,363,364,365,366,367,368,369,370,371,372,373,374,375,376,377,378,379,380,381,382,383,384,385,386,387,388,389,390,391,392,393,394,395,396,397,398,399,400,401,402,403,404,405,406,407,408,409,410,411,412,413,414,415,416,417,418,419,420,421,422,423,424,425,426,427,428,429,430,431,432,433,434,435,436,437,438,439,440,441,442,443,444,445,446,447,448,449,450,451,452,453,454,455,456,457,458,459,460,461,462,463,464,465,466,467,468,469,470,471,472,473,474,475,476,477,478,479,480,481,482,483,484,485,486,487,488,489,490,491,492,493,494,495,496,497,498,499,500,501,502,503,504,505,506,507,508,509,510,511,512,513,514,515,516,517,518,519,520,521,522,523,524,525,526,527,528,529,530,531,532,533,534,535,536,537,538,539,540,541,542,543,544,545,546,547,548,549,550,551,552,553,554,555,556,557,558,559,560,561,562,563,564,565,566,567,568,569,570,571,572,573,574,575,576,577,578,579,580,581,582,583,584,585,586,587,588,589,590,591,592,593,594,595,596,597,598,599,600,601,602,603,604,605,606,607,608,609,610,611,612,613,614,615,616,617,618,619,620,621,622,623,624,625,626,627,628,629,630,631,632,633,634,635,636,637,638,639,640,641,642,643,644,645,646,647,648,649,650,651,652,653,654,655,656,657,658,659,660,661,662,663,664,665,666,667,668,669,670,671,672,673,674,675,676,677,678,679,680,681,682,683,684,685,686,687,688,689,690,691,692,693,694,695,696,697,698,699,700,701,702,703,704,705,706,707,708,709,710,711,712,713,714,715,716,717,718,719,720,721,722,723,724,725,726,727,728,729,730,731,732,733,734,735,736,737,738,739,740,741,742,743,744,745,746,747,748,749,750,751,752,753,754,755,756,757,758,759,760,761,762,763,764,765,766,767,768,769,770,771,772,773,774,775,776,777,778,779,780,781,782,783,784,785,786,787,788,789,790,791,792,793,794,795,796,797,798,799,800,801,802,803,804,805,806,807,808,809,810,811,812,813,814,815,816,817,818,819,820,821,822,823,824,825,826,827,828,829,830,831,832,833,834,835,836,837,838,839,840,841,842,843,844,845,846,847,848,849,850,851,852,853,854,855,856,857,858,859,860,861,862,863,864,865,866,867,868,869,870,871,872,873,874,875,876,877,878,879,880,881,882,883,884,885,886,887,888,889,890,891,892,893,894,895,896,897,898,899,900,901,902,903,904,905,906,907,908,909,910,911,912,913,914,915,916,917,918,919,920,921,922,923,924,925,926,927,928,929,930,931,932,933,934,935,936,937,938,939,940,941,942,943,944,945,946,947,948,949,950,951,952,953,954,955,956,957,958,959,960,961,962,963,964,965,966,967,968,969,970,971,972,973,974,975,976,977,978,979,980,981,982,983,984,985,986,987,988,989,990,991,992,993,994,995,996,997,998,999,1000

3 TE

(0:20) AUTOMATIC ALIGNED DECIMAL /\* SINGLE \*/ FLOAT (6)  
1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20



XISIT:PSOC OPTIONS(M,IN)

PL/I OPTIMIZING COMPILER

DCL NO.	IDENTIFIEN	LEVEL	OFFSET	LENGTH	TOTAL LENGTH
3	C	1	4	4	4
3	CL	1	4	4	4
3	CGP	1	4	4	4
3	CP	1	4	4	4
3	D	1	4	4	4
3	ECOP	1	4	4	4
3	ECCU	1	4	4	4
3	F	1	4	4	4
3	FI	1	4	4	4
3	FKP	1	4	4	4
3	K	1	4	4	4
3	KAP_MAX	1	4	4	4
3	KI	1	4	4	4
3	KL	1	2	42	42
3	NOP	1	2	42	42
3	NUI	1	2	42	42
3	PE	1	2	42	42
3	PI	1	4	124	124
3	PP	1	4	4	4
3	Q	1	4	4	4
3	QP	1	4	4	4
3	R	1	4	4	4
3	TE	1	4	4	4
3	V	2	4	1764	1764
SUM OF CONSTANT LENGTHS					4366

XMTKSPAC OPTIM (MAIN)

PL/I OPTIMIZING COMPILER

COMPILER DIAGNOSTIC MESSAGES

ERROR ID L STMT MESSAGE DESCRIPTION

COMPILER INFORMATORY MESSAGES

IELO5331 I NO 'DECLARE' STATEMENT(S) FOR 'SYSIN', 'SYSPRINT'.

END OF COMPILER DIAGNOSTIC MESSAGES

COMPILE TIME 0.09 MINS SPILL FILE: 10 AUGUST SIZE 4051

\*\*\*\*\*  
 \*DADOS\*  
 \*\*\*\*\*

TAMANHO DO PETROLEO :  
 TAXA DE DESCONT. : 0.774  
 NUMERO DE AREAS : 07  
 HORIZONTE PARA INSTALACAO DAS USINAS : 08 PERIODOS

AREA	CAPITAL POR APRENDIZADO	CUSTO UNITARIO COM. S.M. APRENDIZADO	CAPACIDADE DE PRODUCAO (MILHARES DE BARRIS)	TEMPO DE EXAUSTAO
01	1242	452	37.1	6
02	1242	452	37.1	6
03	1490	544	37.1	6
04	1490	544	37.1	6
05	1788	551	37.1	6
06	1788	621	37.1	6
07	2146	782	37.1	6

	0	1	2	3	4	5	6
ATENUACAO DO CAPITAL - F(.) -	1.000	.950	.910	.880	.850	.830	.810
ATENUACAO DO 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	17	18
PRECO DO PETROLEO	37	44	50	56	61	65	69	72	76	78	81	83	85	87	88	89		

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

\*\*\*\*\*  
 \*RESULTADOS-1\*  
 \*\*\*\*\*

PERIODO	DISPONIBILIDADE DE CAPITAL	VALOR EM MILHOES DE DOLARES	NUMERO DE UNIDADES EM OPERACAO	PRODUCAO DE GLEO DE XISTO	SENEFICIO LIQUIDO POR PERIODO
01	7.7	00	00	00000	
02	0.0	04	04	00001	2701
03	0.0	07	07	157957	4285
04	0.0	07	07	157957	3042
05	0.0	07	07	157957	3332
06	0.0	07	07	157957	2826
07	0.0	07	07	157957	3357
08	0.0	03	03	067696	511

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

\*\*\*\*\*  
 #RESULTADOS-2#  
 \*\*\*\*\*

NUMERO DE USINAS INSTALADAS : 07

ECONOMIA TOTAL PROPORCIONADA : 15016 MILHÕES DE DOLARES (VALOR PRESENTE)

AREA	PERIODO DE INSTALACAO	PERIODO DE EXAUSTAO	CAPACIDADE DE PRODUCAO	CUSTO DE PRODUCAO	CAPITAL	ECONOMIA
01	01	07	22565	2460	1242	2246
02	01	07	22565	2460	1242	2246
03	01	07	22565	2953	1490	1864
04	01	07	22565	2953	1490	1864
05	02	08	22565	3010	1520	1719
06	02	08	22565	3010	1520	1719
07	02	08	22565	3613	1824	1358

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



\*\*\*\*\*  
 #DADOS\*  
 \*\*\*\*\*

TAMANHO DO PERIODO CONSIDERADO : 5 ANOS  
 TAXA DE DESCONTOS ANUAL PARA O PERIODO : 15,90  
 NUMERO DE AREAS CONSIDERADAS : 07  
 HORIZONTE PARA INSTALACAO DAS UNIDADES : 18 PERIODOS

AREA	CAPITAL SEM APRENDIZADO	CUSTO OPERACIONAL SEM APRENDIZADO	CAPACIDADE DE PRODUCCAO	TEMPO DE EXAUSTAO	1	2	3	4	5	6								
01	1437	615	27.1	6														
02	1437	615	27.1	6														
03	1724	756	27.1	6														
04	1724	756	27.1	6														
05	2069	886	27.1	6														
06	2069	886	27.1	6														
07	2483	1060	27.1	6														
ATENUACAO NO CAPITAL - F(0) -					1.000	0.950	0.910	0.850	0.830	0.810								
ATENUACAO NO CUSTO OPERACIONAL - G(0) -					1.000	0.910	0.880	0.850	0.830	0.810								
PERIODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
PRECO UU	33	35	36	36	39	40	42	43	44	46	47	48	49	51	52	53		
PETROLEO																		

- O CAPITAL E DADO EM MILHOES DE DOLLARES
- O CUSTO OPERACIONAL E DADO EM MILHOES DE DOLLARES / PERIODO OU EM PERIODO
- A CAPACIDADE DE PRODUCCAO E DADA EM MILHOES DE BARREIS POR PERIODO
- O TEMPO DE EXAUSTAO E DADO EM ANOS POR PERIODO
- O PRECO DO PETROLEO E DADO EM DOLLARES POR GARRIL

\*\*\*\*\*  
 \*RESULTADOS-I\*  
 \*\*\*\*\*

PERIODO	DISPONIBILIDADE DE CAPITAL	INDICADOR	NO DE BARRAS EM PRODUÇÃO	PRODUÇÃO EM MILHÕES DE DÓLARES	BENEFÍCIO LÍQUIDO POR PERÍODO
01	3000	2.1	00	00000	
02	3000	2.1	00	00000	
03	3000	2.1	00	00000	
04	3000	2.1	00	00000	
05	3000	2.1	00	00000	
06	3000	2.1	00	00000	
07	3000	1.1	00	00000	
08	3000	1.0	01	00000	14
09			00	40000	10
10			02	40000	11
11			02	40000	7
12			02	40000	4
13			02	40000	3
14			01	20000	1

-- A DISPONIBILIDADE DE CAPITAL É DADA EM MILHÕES DE DÓLARES (VALOR CORRENTE)  
 -- A PRODUÇÃO DE GLEU DE XISTO É DADA EM NÚMERO DE BARRAS POR DIA  
 -- O BENEFÍCIO LÍQUIDO POR PERÍODO É DADO EM MILHÕES DE DÓLARES (VALOR CORRENTE)  
 -- R = FOLGA DE CAPITAL NECESSÁRIO PARA INSTALAÇÃO DA PRÓXIMA USINA

NUMERO DE USINAS INSTALADAS : 02

ECONOMIA TOTAL PROGRAMADA : 3 MILHÕES DE DOLÁRES (VALOR PRESENTE)

AREA	PERIODO DE INSTALACAO	PERIODO DE EXAUSTAO	CAPACIDADE DE PRODUCAO	CUSTO DE PRODUCAO	CAPITAL	ECONOMIA
01	07	10	42000	2200	1437	
02	08	14	42000	4170	1360	3

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

\*\*\*\*\*  
 \*RESULTADOS-2\*  
 \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
 \*UADUS\*  
 \*\*\*\*\*

TAMANO DO PERIODO CONSIDERADO : 5 ANOS  
 TAXA DE DESCONTO APLICADA PARA O PERIODO : 0.144  
 NUMERO DE AREAS CONSIDERADAS : 07  
 HORIZONTE PARA INSTALACAO DAS UNIDADES : 08 PERIODO

AREA	CAPITAL SEM APPLICACAO	CUSTO OPERACIONAL SEM APPLICACAO	VALOR DA UNIDADE	PERIODO DE CONSIDERACAO
01	1194	557	57.1	0
02	1194	557	57.1	0
03	1433	600	57.1	0
04	1433	600	57.1	0
05	1719	601	57.1	0
06	1719	601	57.1	0
07	2095	502	57.1	0

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ATENUACAO NO CAPITAL - F(.) -							1.000	0.950	0.900	0.850	0.800	0.750	0.700	0.650	0.600	0.550	0.500	0.450
ATENUACAO NO CUSTO OPERACIONAL - C(.) -							1.000	0.950	0.900	0.850	0.800	0.750	0.700	0.650	0.600	0.550	0.500	0.450

PERIODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
PRECO DO PETROLEO	37	47	60	77	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

- 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 BARREIS POR PERIODO
- O TEMPO DE EXAUSTAO E DADO EM MILHOES DE PERIODOS
- O PRECO DO PETROLEO E DADO EM DOLARES POR BARREL

\*\*\*\*\*  
 #RESULTADOS-I\*  
 \*\*\*\*\*

PERIODO	DISPONIBILIDADE DE CAPITAL	R	PRODUTOS	VALOR DE CAPITAL	VALOR DE CAPITAL	VALOR DE CAPITAL
01	3000	0.0	00	000000		
02	3000	0.0	00	000000		
03	3000	0.0	04	341151	295	
04	3000	0.0	04	030201	354	
05	3000	0.0	06	131392	314	
06	3000	0.0	07	137957	163	
07	3000	0.0	07	137957	73	
08	3000	0.0	07	137957	32	
09			05	112027	10	
10			05	07090	3	
11			01	42565	0	

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

NUMERO DE USINAS INSTALADAS : 07

ECONOMIA TOTAL PROPORCIONADA : 404 MILHÕES DE DÓLARES (VALOR PRESENTE)

AREA	PERIODO DE INSTALACAO	PERIODO DE EXAUSTAO	CAPACIDADE DE PRODUCAO	CUSTO DE PRODUCAO	CAPITAL	ECONOMIA
01	02	06	22500	1635	1194	94
02	02	06	22500	1635	1194	94
03	03	09	22500	1700	1304	67
04	03	09	22500	1700	1304	67
05	04	10	22500	2001	1461	35
06	04	10	22500	2001	1461	35
07	05	11	22500	2312	1691	11

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

\*\*\*\*\*  
 WNE-SULFURS-2  
 \*\*\*\*\*

Referências Bibliográficas

- (1) ALPERN, B. Xistos betuminosos; reservas, petrografia, valorização. Atualidades do Conselho Nacional de Petróleo, Brasília, 10 (61): 69-83, jul/ago. 1978
- (2) BASTOS, Anibal A. Oil Shale in Brazil. UNSCCUR Proceedings, Fuel and Energy Resources. P.62-64
- (3) BRASIL, Ministério das Minas e Energia. Balanço energético nacional. Brasília, 1978. 108 p.
- (4) BRUNI, Carlos Egydio e PADULA, Vicente Tomazelli. O interesse mundial na exploração do xisto e o esforço brasileiro para sua industrialização. In: ANAIS do Congresso da Sociedade Brasileira de Geologia, 28<sup>o</sup>. Porto Alegre, 1974. v.1 p.103-119
- (5) BUDIANSKY, Stephen. Dispersion modeling. Environmental Science & Technology, 14 (4): 370 - 374, Apr.1980
- (6) BURGER, J. L'exploitation des pyroschistes ou schistes bitumeux; données générales et perspectives d'avenir. Revue de l'Institut Français du Pétrole, Paris, 38 (3): 315-372, mai/juin 1973
- (7) CHAVES, Flávio de Magalhães. O xisto betuminoso. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, 1975. 45 p.
- (8) COMBAZ, André. Les schistes bitumineux: nature et promesses Total Inform., Geneve (62): 6-13, 1975
- (9) COMBAZ, A. and GONI, J. Research in bituminous shale in France. In: UNITAR Conference on Energy and the Future, 1<sup>st</sup>. Laxenburg, Austria, 1976. The future supply of nature made petroleum and gas. New York, Pergamon Press, 1977. Chapter 48 p.857-871.
- (10) CONSIDERAÇÕES em torno do xisto. Atualidades do Conselho Nacional de Petróleo, Brasília, 4:70, nov/dez.1974
- (11) CONTROLE de produção em minas de carvão. s.n.t. 37 p.
- (12) COSTA NETO, Cláudio. Perspectivas para o aproveitamento dos xistos oleígenos no Brasil. Rio de Janeiro, Projeto Xisto-química/UFRJ, 1978. 106 p.

- (13) COSTA NETO, Cláudio. Xistos Oleíferos; Matéria prima que o Brasil tem. Rio de Janeiro, Projeto Xistoquímica/UFRJ, 1979. 80 p (Publicação nº 28)
- (14) CULBERTSON, William and PITMAN, Janet K. Oil Shale. US Mineral Resources, U.S. Geological Survey Prof. Paper 820 p. 497-503.
- (15) DECORA, Andrew W. and CAPENTER, Harry C. Multipurpose utilization of oil shale In: UNITAR Conference on Energy and the Future, 1 st. Laxenburg Austria 1976. The future supply of nature made petroleum and gas. New York, Pergamon Press, 1977 Chapter 46 p.821-842
- (16) DONNELL. John R. Global Oil-Shale Resources and Costs. In. UNITAR Conference on Energy and the Future, 1 st. Laxenburg, Austria, 1976. The Future Supply of Nature Made Petroleum and Gas. New York, Pergamon Press, 1977. Chapter 47 p.843-856.
- (17) DUIR, J.H., DEERING, R.F and JACKSON, H.R. Continuous upflow retort improves shale processing. Hydrocarbon processing. May 1977, p.147-150
- (18) DUNCAN, Donald C. and SWANSON, Vernon E. Organic-rich Shale of the United States and World Land Areas. Washington, Survey Circular, 523).
- (19) ENERGIA: fontes alternativas. São Paulo, APC-Assessoria de promoção e cultura, v.1, n.2, maio/jun.1979., bimestral.
- (20) ENGINEERING SCIENCE. Air quality assessment of the oil shale development program in the Piceance Creek Basin, In: US Federal Energy Administration. Project Independence Blueprint. Task Force Report Potential Future Role of Oil Shale: prospects and constraints. Washington, 1974 Appendix M - p.709-833.
- (21) ERICSON, Neil R. and MORGAN, Peter. The economic feasibility of shale-oil; an activity analysis. The Bell Journal of Economics, New York, 9 (2): 457-487, Autumn 1978.
- (22) EUA. Department of the Interior. Final environmental Statement for the prototype oil shale leasing program; regional impacts of oil shale development. Washington, 1973, Vol.1



- (23) 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. Chapter, III - H - p, 202-264.
- (24) EUA. Environmental Protection Agency. Water pollution potential of spent oil shale residues. Fort Collins, Colorado State University, 1971. 117 p. il. (Water pollution control research series)
- (25) EUA. Federal Energy Administration: Social and Economic Impacts of Oil Shale Development. In: . Project Independence Blueprint. Task Force Report; Potential Future Role of Oil Shale: Prospects and Constraints. Washington, 1974. Chapter IX, p.233-258.
- (26) A EXPLORAÇÃO do xisto; uma alternativa agora possível. Dirigente Industrial, mar. 1974 p.20-32.
- (27) FORTE NETTO, Luis et alli, Plano de Ação Imediata de São Mateus do Sul; modelo descritivo e modelo teórico. São Mateus do Sul, PETROBRÁS, sem data. Vol.1 (Revisão I).
- (28) FORTE NETTO, Luis et alli, Plano de Ação Imediata de São Mateus do Sul; modelo prescritivo, São Mateus do Sul, PETROBRÁS, sem data. Vol.2 (Revisão 1)
- (29) HUBBERT, King. World Energy Resources In. CARROL, Owen Energy Resources for the Developing Nations. New York, Institute for Energy Research/Energy Management Training Program, 1979. vol.2 p.433-515.
- (30) HUGHES, Evan E. et alli. Oil Shale air pollution Control. Washington, US Environmental Protection Agency, 1975. 105 p. (EPA-600/2 - 75-009)
- (31) KRAEMER, A.J. Oil Shale in Brazil. Washington, US Department of the Interior, 1950. 36p. (Report of Investigation,4655).
- (32) LEWIS, A.E. Oil from shale; the potential, the problem, and a plan for development. Energy; the international journal, Oxford, 5 (4); 373-387, Apr. 1980.
- (33) LOBATO, F. Sayão. Xisto betuminoso. Atualidades do Conselho Nacional de Petróleo. Brasília, 5 (43): 6-11, jul/ago.1975

- (34) MAACK, Reinhard. O problema do petróleo em relação ao xisto piro-betuminoso no Paraná. A retorta, Curitiba
- (35) MESQUITA, Hilnor Canguçu de. Xisto betuminoso. Atualidades do Conselho Nacional de Petróleo, Brasília, 10 (62): 39-47, set./out.1978.
- (36) MEYER, Richard F. Oil and Gas Resource Evaluation In. CARROL, Owen. Energy Resources for the Developing Nations. New York Institute for Energy Research/Energy Management Training Program, 1979 vol.2 p.599-640
- (37) MOREIRA, Homero Baggio. Xisto; um recurso para complementar a produção de petróleo no Brasil. Curitiba, PETROBRÁS/SIX, 1079. 44 p.
- (38) MOREIRA, Homero Baggio. Xisto; uma contribuição efetiva para complementar a produção de petróleo (Separata de matéria publicada na Revista Técnica do Instituto de Engenharia-a do Paraná, nº 16, jun. 1979)
- (39) MOREIRA, Homero Baggio. O xisto; uma das opções energéticas substitutivas do petróleo. In: Congresso Brasileiro de Petróleo, 1. R.J., 1978 - Anais do... Rio de Janeiro, IBP, 1978. V.1, P-IV, p.21-50
- (40) MORRISON, R.G.K. and RUSSELL, Paul L. Selecting a mining method - rock mechanics, other factors. In: Economics of the Mineral Industries. (Seeley W. Mudd Series) Cap.3 Section 9 p.1-21
- (41) NATIONAL Petroleum Council. U.S. Energy Outlook - Oil Shale Availability. Washington, 1973. 87 p.
- (42) OLIVEIRA, Gilberto Sobrino Marques de, Tecnologia brasileira para explorar a Formação Iratí. Energia; fontes alternativas, São Paulo, 1 (2): 49-56, mai/jun. 1979.
- (43) OLIVEIRA, Gilberto Sobrino Marques de, Utilização do xisto como fonte alternativa do petróleo In: ANAIIS do Congresso Brasileiro de Energia, 1. Dez. 1978.
- (44) OLIVEIRA, Gilberto Sobrino Marques de e BARTHOLO, José Moreira. Xisto; significado de um potencial. Rio de Janeiro, Centro de Aperfeiçoamento e Pesquisas de Petróleo, 1964. 24p. (Separata do Boletim Técnico da PETROBRÁS, nº especial comemorativo do decênio de instalação da Empresa).

- (45) OZEROV, J.M. and POLOZOV, V.J. Principles of oil shale commercial classification. In: United Nations Symposium on the Development and Utilization of Oil Shale Resources , Section II. Tallin, All-Union Research Institute of Petroleum Chemistry, 1967 p.1-38.
- (46) PADULA, Vicente Tomazelli. Folhetos pirobetuminosos; reservas conhecidas e potenciais. In: SEMINÁRIO sobre Modelo Energético, Curitiba, set. 1979, 19p.
- (47) PADULA, Vicente Tomazelli. Oil Shales of the Permian Irati Formation, Brazil. In: UNITED NATIONS Symposium on the Development and Utilization of Oil Shale Resources, Sect. 1, Tallin, 1968. 22p
- (48) PETROBRÁS. Departamento Industrial. A industrialização de xisto pela PETROBRÁS. Rio de Janeiro, 1968. 21p.
- (49) PETROBRÁS, SEGEN-DENAR/SETAU. Levantamento de aspectos urbanos; São Mateus do Sul. São Mateus do Sul, 1977. 26p.
- (50) POLOZOV, V.I. e OZEROV, I.N. Principles of Oil Shale Commercial Classification. UN Symp. on Development and Utilization of Oil Shale Resources, sect 2, Tallin, 1968.
- (51) PROCESSES, procedures, and methods to control pollution from mining activities. Washington, U.S. Environmental Protection Agency, 1973. 390 p. il.
- (52) RAJARAM, V., KAUPPILA, T.A and BOLMER, R.L. Oil shale mining and the environment Mining Engineering, 30 (4): 360-363, Apr. 1978.
- (53) LES RÉSERVES de pétrole non conventionnel et leur mobilisation; schistes bitumineux In: RESSOURCES Énergétiques Mondiales 1985-2000, Istambul, 1977 - Les ressources de pétrole; rapport complet réalisé pour la Commission de Preservation de la Conférence Mondiale de l'Energie. Paris, Technip, 1978. Troisieme partie, p.53-56.
- (54) RIBEIRO, Carlos A. S. et alli. Xisto; energia em potencial. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, 1964 155p.
- (55) SCHORA, F.C., TARMAN, P.B and FELDKIRCHNER, H.L. State-of-the-art; above ground shale processing. Hydrocarbon processing, Feb. 1977, p.113-119

- (56) SLADEK, Thomas A. Oil Shale. A paper for discussion at a Seminar on National Energy Planning in Brazil, Nov.12-17, 1979. 33p.
- (57) SLADEK, Thomas A. Recent trends in oil shale - Part 2: Mining and shale oil extraction processes. Mineral Industries Bulletin. Golden, Colorado, 18 (1): 1-20, Jan. 1975.
- (58) UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. Utilization of Oil Shale; progress and prospects. New York. 1967. 112p.
- (59) U.S. Department of the Interior. Principles of the Mineral Resources Classification System of the U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey. Washington, 1976. (Geological Survey Bulletin, 1450-A)
- (60) U.S. Federal Energy Administration. Project Independence Blueprint. Task Force Report Potential Future Role of Oil Shale: Prospects and Constraints. Washington, 1974 833p (FEA/N-74/546)
- (61) VARISCO, Aldo. O processo PETROSIX, a usina protótipo do Irati. In: Conferências do Simpósio sobre Ciência e Tecnologia do Xisto. Curitiba, Academia Brasileira de Ciências, 1971 p.225-254
- (62) WARD, J.C. et alli. Water pollution of spent oil shale residues from above - ground reporting. Fort Collings, Colorado State University, s.n.t.
- (63) WEISMANTEL, Guy E. Shale oil, not long now. Chemical Engineering, May/1974, p.62-64.
- (64) YENT, T.F. Oil Shales of United States; a review. In: Science and Tecnology of Oil Shale. Ann Arbor, Ann Arbor Science publ. 1976 Chapter 1 p.1-17
- (65) ZIMMERMAN, Martin B. Modeling depletion ina mineral industry; the case of coal, The Bell Journal of Economics, New York, 8(1); 41-65, Spring 1977.