

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE
GÁS NATURAL: UMA APLICAÇÃO DE
PROGRAMAÇÃO DINÂMICA**

Autor : Claudinei de Camargo Sant'Ana

Orientador: Paulo de Barros Correia

09/95

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Sa59o Sant'Ana, Claudinei de Camargo
Otimização do transporte de gás natural, uma aplicação
de programação dinâmica / Claudinei de Camargo
Sant'Ana.--Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientador: Paulo de Barros Correia.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Gás natural.. 2. Programação dinâmica.
3. *Gasoduto. I. Correia, Paulo de Barros.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE GÁS NATURAL: UMA APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Autor : Claudinei de Camargo Sant'Ana

Orientador: Paulo de Barros Correia

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Claudinei de Camargo
Sant'Ana E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 01/03/95.

Paulo de Barros Correia
ORIENTADOR

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos

Dissertação de Mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da
Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de
Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 01 de Setembro 1995

S.P. - Brasil



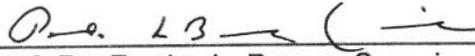
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

Dissertação de Mestrado

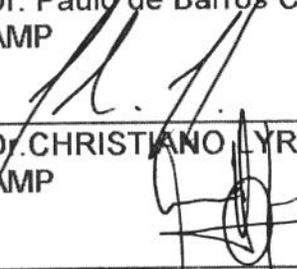
OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE
GÁS NATURAL: UMA APLICAÇÃO DE
PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Autor : Claudinei de Camargo Sant'Ana

Orientador: Paulo de Barros Correia



Prof. Dr. Paulo de Barros Correia , Presidente
UNICAMP



Prof. Dr. CHRISTIANO LYRA FILHO
UNICAMP



Prof. Dr. OSVAIR VIDAL TREVISAN
UNICAMP

Campinas, 01 de Setembro de 1995

ÍNDICE

APRESENTAÇÃO	
Relação de figuras	01
Relação de gráficos	02
Relação de mapas	03
Relação de tabelas	04
Notação	05
Dedicatória	08
Agradecimento	09
Resumo	10
Abstract	11
CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO	12
CAPÍTULO II	
FONTE ENERGÉTICA	
2.1 - Introdução	16
2.2 - Gás natural	17
2.3 - Gás natural no mundo	19
2.4 - Gás natural no Brasil	22
2.5 - Comentários	26
CAPÍTULO III	
TRANSPORTE DE GÁS NATURAL	
3.1 - Introdução	29
3.2 - Caracterização do problema	
3.2.1 - Compressores	29
3.2.2 - Turbinas a gás	35
3.2.3 - Caracterização do transporte de gás natural	37
3.3 - Comentários	42
CAPÍTULO IV	
TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO	
4.1 - Introdução	43
4.2 - Caracterização metodológica	43
4.3 - Programação dinâmica, processo de decisões seqüenciais	45
4.4 - Perfil do problema de transporte via gasoduto	47
4.5 - Comentários	48
CAPÍTULO V	
OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE	
5.1 - Introdução	49
5.2 - Formulação	
5.2.1 - Função objetivo	49
5.2.2 - Restrições do modelo	50
5.3 - Modelo matemático com uma variável de estado	51
5.4 - Modelo matemático com duas variáveis de estado	53

5.6 - Algoritmo computacional	56
CAPÍTULO VI	
ESTUDO DE CASO	
6.1 - Introdução	68
6.2 - Aplicação do modelo	69
6.3 - Resultados do modelo com uma variável de estado	70
6.4 - Resultados do modelo com duas variáveis de estado	73
6.4 - Conclusões	75
CAPÍTULO VII	
CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS	77
BIBLIOGRAFIA	78

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura	Título	pg
01	Composição do gás natural	17
02	Representação do problema de redes	44
03	Representação do sistema de gasodutos	45
04	Representação seqüencial das decisões	46
05	Representação das trajetórias	46
06	Representação do problema com uma variável	52
07	Pressão de sucção na primeira estação	53
08	Representação do problema com duas variáveis	55
09	Variações possíveis	55
10	Variações possíveis para ultima estação	56
11	Configuração do sistema para oito estações	69

RELAÇÃO DE GRÁFICOS

Gráfico	Título	pg
01	Evolução das reservas mundiais de petróleo e GN	20
02	Comportamento Pressão/Volume	32
03	Relação Potência/Distância	34
04	Perda de carga/Distância	41

RELAÇÃO DE MAPAS

Mapa	Título	pg
01	Sistema gasodutos	23
02	Rede de gasodutos Bolivianos	28
03	Gasoduto Bolívia/Brasil	68

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela	Título	pg
01	Evolução das reservas de GN	19
02	Distribuição % do consumo de GN por setor	21
03	Consumo de energia primária matriz 1992	24
04	Utilização do GN na América Latina 1991	25
05	Reservas e produção de GN no Brasil	26
06	Reservas de GN	27
07	Classificação em função da pressão	29
08	Índices para equação da vazão	39
09	Índices para fórmulas de vazão	40
10	Distâncias admissíveis para os problemas	70
11	Resultado com 1 variável de estado e 6 estações	71
12	Resultado com 1 variável de estado e 7 estações	71
13	Resultado com 1 variável de estado e 8 estações	72
14	Resultado com 1 variável de estado e 9 estações	72
15	Resultado com 2 variável de estado e 6 estações	73
16	Resultado com 2 variável de estado e 7 estações	73
17	Resultado com 2 variável de estado e 8 estações	74
18	Resultado com 2 variável de estado e 9 estações	74

NOTAÇÕES

A) Índices

Símbolo **significado**

<i>i</i>	estágio
<i>g</i>	descarga
<i>s</i>	sucção
<i>b</i>	base
<i>l</i>	mínimo
<i>u</i>	máximo

B) Constantes

Símbolo	significado	unidade
<i>E</i>	fator de eficiência do duto	(0,7 ...0,92)
<i>L</i>	comprimento total do gasoduto	Km
<i>M</i>	peso molecular do gás	
<i>N</i>	potência cedida ao fluido durante a compressão	W
<i>NE</i>	número de estágios do sistema	
<i>P_u</i>	pressão máxima	kPA
<i>P_l</i>	pressão mínima	kPA
<i>P_b</i>	pressão básica	kPA
<i>Q</i>	vazão máxima	m ³ /d
<i>R</i>	constante do gás	lb mol °R
<i>VP</i>	variação de pressão	kPA
<i>VP_u</i>	variação máxima de pressão	kPA
<i>VP_l</i>	variação mínima de pressão	kPA

T_s	temperatura de sucção	$^{\circ}\text{C}$
Z	fator de compressibilidade	$(z_1 z_2)/z$
η_p	eficiência politrópica	

C) Variáveis

Símbolo	significado	unidade
a	aceleração da gravidade	m/s^2
d_i	diâmetro do duto na estação	mm
k	razão específica entre Head a p./v. constante	
n	expoente obtido em função do tipo de máquina	
l_i	distância entre as estações	Km
r_i	razão de compressão na estação	
p_s	pressão de sucção	kPA
p_g	pressão de descarga	kPA
p_i	pressão no estado	KPA
q	vazão	m^3/d
t_g	temperatura de descarga	$^{\circ}\text{C}$
v	volume armazenado no trecho	m^3
w	potência	W
w_i	potência na estação	W
v_i	volume entre as estações	m^3
$cw(r_i)$	custo da compressão	US\$
$cp(r_i, d_i, l_i)$	custo do duto	US\$
$J(d_i, l_i, T_s)$	perda de carga na estação	

D)Conjuntos

Símbolo	Significado	
D	diâmetros possíveis	{8, 12, 16,20, 24, 28, 30, 36} mm

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho
aos meus pais,
a JU,
e ao BI
meu amigão.

AGRADECIMENTOS

A realização de qualquer trabalho demanda além do esforço despendido, o envolvimento de fatores intrínsecos nem sempre diretamente relacionados com o mesmo, o mais importante deles o relacionamento sadio e amistoso, Por tanto agradeço sinceramente

ao Prof. Paulo pela orientação.

aos colegas do Planejamento pelo convívio e sugestões, em particular a Cristina, Perrela, Mirkos, Madureira, Chan.

aos funcionários do DE, Márcia, Neusa, Rodrigues.

Este trabalho contou com suporte do Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq.

RESUMO

Nos últimos anos o gás natural vem obtendo acréscimos significativos no volume de suas reservas. O desenvolvimento de novas tecnologias e as políticas ambientais tem colaborado para que este energético adquira importância significativa na matriz energética mundial. Este fato também é observado no cenário latino americano.

Quando da sua utilização depara-se com um problema freqüente: via de regra os pontos produtores de gás encontram-se distantes dos centros consumidores. Pode-se então optar por formas diferenciadas de transporte em função da região geográfica a ser transposta, na maioria das vezes verifica-se que seu transporte é feito via gasodutos.

Neste trabalho apresenta-se uma abordagem para o problema de dimensionamento de gasoduto, utilizando programação dinâmica. Faz-se uma discussão dos diversos parâmetros envolvidos bem como durante a evolução do trabalho apresentam-se abordagens diferenciadas relacionadas com o dimensionamento do gasoduto, mas que preservam resultados satisfatórios com relação aos resultados obtidos.

O método apresentado chega a resultado satisfatório quando aplicado aos problemas formulados para o estudo de caso utilizando programação dinâmica para dimensionamento de um gasoduto longo.

ABSTRACT

The development of new technology and environmental policies are a factor of collaboration for the expansion of the natural gas reserves. Today the natural gas has a expressive participation in the energy matrix of the world and in the Latin America also, where its consumption has observed a expressive increase. Often the natural gas need to be transported on large distance by pipelines, from the production field to the consumption markets.

This work studies the optimization problem of natural gas transportation in a long pipeline using a dynamic programming approach. The model is applied to a real transportation system: the pipeline Bolivia-Brazil. The computational results of the case study are discussed, confirming the potential application of this approach.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A programação matemática compõe uma série de metodologias que muito tem colaborado para resolução de problemas reais. Entre estes, problemas relacionados com a questão energética. Segundo Durrer [DUSL], não raro encontramos trabalhos relacionados com planos de produção de gás natural (GN) e petróleo, exploração de reservatórios, otimização da operação de sistema energético, etc..

No trabalho de Dyer et alli [DYLU] encontramos exemplo desta sua aplicabilidade na priorização da exploração de óleo ou gás, onde os autores fazem a opção pela linearização do modelo multiobjetivo.

Duffuaa et alli [DUZA] apresenta um modelo linear para definição de níveis mínimos na produção de óleo e gás para avaliação do impacto da produção de óleo na demanda de GN consumido na indústria. O modelo integra campos de produção de óleo, plantas de separação de gás, plantas de gás, plantas fracionadoras e indústrias petroquímicas, otimizando a alocação dos campos de produção de óleo para diferentes tipos de óleo cru utilizados no suprimento das indústrias possibilitando a avaliação das conseqüências na evolução do consumo de gás. Na mesma linha de modelos relacionados com reservatórios Amit [Amit] apresenta um modelo não linear dinâmico.

Com relação a estratégia de ampliação do suprimento de GN em função dos custos de transmissão e distribuição Avery et alli [AVBR] apresenta um modelo linear com horizonte de planejamento variando de um ano a uma década.

A Programação Dinâmica (PD) é uma técnica robusta para resolver problemas de otimização. Originalmente desenvolvida por Richard Bellman (1957), esta técnica vem sendo aplicada em diversas áreas [POJE], tais como a engenharia aeroespacial, elétrica, mecânica, química, economia

Gunawardane [GUNA] e Laporte et alli [LADE] formulam modelos que utilizam PD para localização de “facilidades” em um horizonte de planejamento pré determinado.

Um problema não linear envolvendo programação inteira-mista e PD é apresentado por Bosch et alli [BOHO]. Neste trabalho procura-se minimizar o custo da geração térmica de energia elétrica em função das usinas candidatas a estarem operando no sistema.

O transporte do Gás Natural (GN) pode ser efetuado de duas maneiras, na forma líquida em compartimentos criogênicos acondicionados, constituindo, segundo Rodrigues et alli [RODR], transporte difícil e menos flexível que o de combustíveis líquidos; e na forma gasosa transportado por gasodutos. O volume de GN comercializado na forma gasosa chega a cerca de 97% da comercialização deste energético. O deslocamento de grandes fluxos por meio de dutos não constitui idéia recente.

Como no caso do Petróleo as jazidas de gás natural encontram-se na maioria das vezes bastante afastadas dos grandes centros consumidores. Em função deste fato faz-se necessário a opção por meios que transportem o gás natural até os pontos consumidores [CNP].

A maneira pela qual transportamos o gás natural é determinada fundamentalmente por condições geográficas, aliado a este fato temos a disponibilidade das reservas caracterizando assim o gás natural como um energético de consumo regional.

Quando optamos em transportar o gás natural por gasodutos podemos identificar dois problemas que podem ter tratamento diferenciado; a primeira questão diz respeito a ligação do centro produtor/centro consumidor; a outra questão diz respeito à distribuição feita por uma rede aos consumidores individuais.

Identificamos então dois momentos distintos; o transporte, feito por gasoduto de diâmetro relativamente grande e a grande distância, e a distribuição, em redes que efetuam a ligação da linha de transporte principal com os consumidores. Estes

dois problemas possuem características comportamentais distintas, tanto no enfoque matemático quanto no enfoque operacional dos sistemas.

O problema de distribuição em redes foi abordado por Fariña [FAGL], onde desenvolveu-se um algoritmo com controle ótimo dinâmico baseado em programação quadrática, aliada à técnica do gradiente reduzido para eliminação de variáveis no problema.

Outra formulação deste problema é apresentada por Osiadcz [OSBE] e Olorunniwo [OLJE] que faz uso de simulação para resolução do modelo. Já [SOMU] faz um acoplamento dos dois problemas, ou seja o dimensionamento do trecho principal e da rede distribuidora.

Como exemplo, podemos citar outros autores que também abordaram a questão da distribuição de GN, tais como Bhaskarm et alli [BHSA], Brooks [BROO], Bickel [BICK], Dougherty [DOLO] e também Roth [ROTH].

Com relação à otimização do trecho principal, Novaes [NOVA] e Ferreira [FEVI] utilizam programação dinâmica. O primeiro adota como variáveis a vazão, o diâmetro e a concentração volumétrica. A função objetiva é formulada englobando os custos anuais dos compressores, motores utilizados, e custos de operação e manutenção. O segundo autor citado adota a vazão fixa para o gasoduto.

Em Peretti [PETO] encontramos uma formulação que também utiliza programação dinâmica, e as variáveis de decisão do sistema são a pressão de descarga, o número de compressores e o número de estações de compressão.

O problema apresenta variáveis com comportamento fortemente não linear. Apesar deste fator [BALA] apresenta um modelo linearizado para o refino e indústrias petroquímicas.

Modelos de simulação também são apresentados para resolução deste problema por [PETO] e [OSBE].

Constata-se a diversidade na abordagem do problema, pretende-se desenvolver um modelo que utilize programação dinâmica na otimização do gasoduto.

Este trabalho tem por objetivo abordar a questão do dimensionamento de gasodutos, usando programação matemática. Especificamente, Programação Dinâmica para avaliação da configuração ótima do sistema de transporte de GN.

No capítulo II apresentamos a caracterização do GN bem como um levantamento das reservas. O levantamento dos parâmetros fundamentais na elaboração do modelo matemático para o dimensionamento do gasoduto são apresentados no capítulo III.

Uma rápida revisão de Programação Dinâmica e um breve histórico da pesquisa operacional é apresentada no capítulo IV.

A seguir, no capítulo V apresenta-se a formulação matemática a ser usada no estudo de caso apresentado no capítulo VI.

CAPÍTULO II

FONTE ENERGÉTICA

2.1 - INTRODUÇÃO

As descobertas de reservas de gás natural ocorreram inicialmente em função da prospecção de Petróleo [CHES], em virtude da participação sempre presente do gás em reservatórios de Petróleo. Após a descoberta da reserva necessita-se efetuar o transporte do gás até o local de consumo. Este transporte pode ser feito sob pressão, à temperatura ambiente; ou à baixa temperatura, à pressão ambiente.

O gás natural possui uma extensa gama de aplicações industriais, dentro e fora da indústria do Petróleo, como matéria prima ou combustível. Sua utilização vai desde aplicações na indústria petroquímica, fertilizantes, químicas, siderúrgica, combustível alternativo, geração de energia elétrica, e também como combustível para veículos, principalmente com motores do ciclo Diesel [GOKO].

O gás natural ocorre segundo a natureza da jazida de duas maneiras, com composição química pouco diferenciável, mas tratados de maneira distinta pela indústria do gás:

- associado - armazenado no reservatório acompanhado de líquido (óleo cru), ou seja dissolvido no líquido e/ou formando uma "capa de gás" sobre a camada de óleo (normalmente necessita de energia externa para ser aproveitado).
- não associado - acumulações de gás natural, que aparentemente não se encontram acompanhadas de hidrocarbonetos em fase líquida, trazendo consigo toda energia necessária para sua produção, condicionamento e transporte.

2.2- GÁS NATURAL

O gás natural produzido atualmente no Brasil, em sua maioria é proveniente de poços de Petróleo, sendo composto por hidrocarbonetos leves e gases inertes com predominância de metano em cerca de 80% (Fig.1). Após sua extração, ele é enviado por gasodutos às unidades de processamento de gás natural, onde as frações condensáveis (gasolina) são retiradas, restando então um gás seco e extremamente leve, de extraordinárias qualidades como energético ou matéria-prima. Dentre estas qualidades poderíamos destacar o fato de que o gás natural é um combustível pouco poluente, de fácil manuseio e competitivo com praticamente todas as formas de energia [APRO].

Seu transporte normalmente pode ser feito por navios metaneiros ou por gasodutos, o transporte por intermédio de navio implica na existência de terminais de exportação com usina para liquefação do gás, navios criogênicos para manter o líquido à temperatura de -160°C , e terminais de importação com usina de gaseificação. Para longas distâncias (6000/6500 km, segundo [POUL]) a cadeia de Gás Natural Liquefeito (GLN) é economicamente preferível à rede de gasodutos.

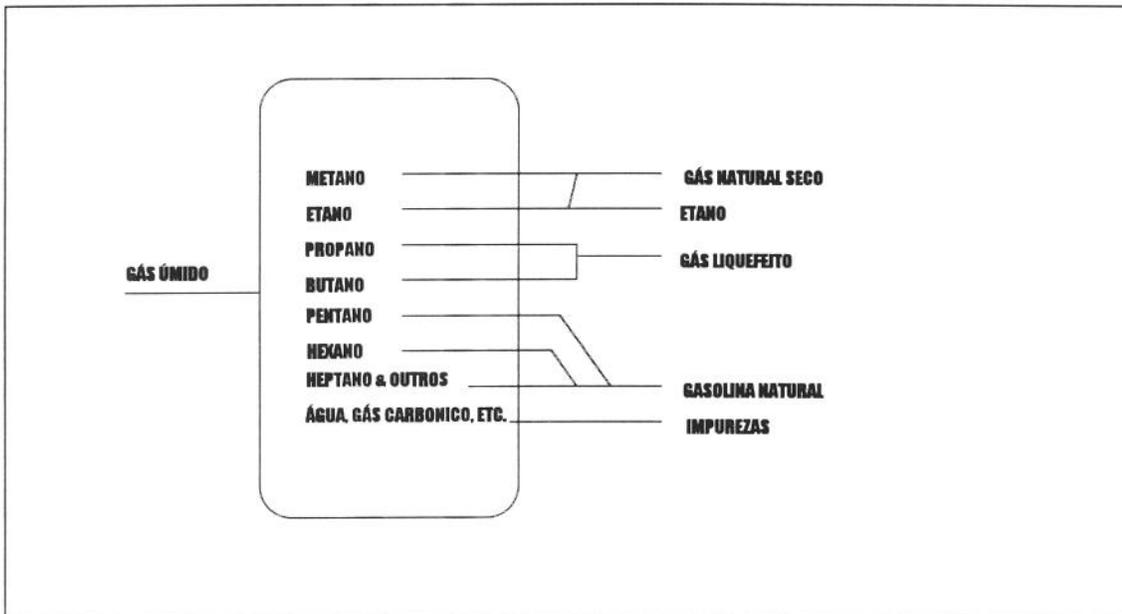


Fig. 1 Composição gás natural

Fonte Comissão Nacional de Energia 1986.

Na boca do poço, são instaladas unidades de processamento de gás natural (UPGN), que possuem a finalidade básica de separar as frações mais pesadas do gás, obtidas no estado líquido e possuindo por constituição hidrocarbonetos de maior peso molecular, enquanto o gás residual é composto basicamente por metano e etano. As extrações de frações líquidas em uma UPGN dependem do tipo de processo utilizado e da riqueza do gás. É feito também o controle do ponto de orvalho do gás, que em função da queda de pressão e temperatura ao longo do gasoduto, pode ocasionar condensação das frações mais pesadas bem como o teor de água de saturação que limita a quantidade de líquido presente.

Existem vários processos de tratamento de gás natural, com finalidades únicas a saber:

- desidratação - o gás produzido associado ou não associado é saturado com vapor de água; o teor de água de saturação do gás é função de três parâmetros, pressão, temperatura, presença de contaminantes. A remoção da água contida em uma corrente gasosa possui como finalidade básica manter a eficiência dos dutos de transporte, uma vez que a água pode causar perda de carga com redução da vazão de gás; outro motivo para remoção da água é a formação de meio ácido corrosivo decorrente da presença de gases ácidos em contato com a água.
- remoção de contaminantes - a remoção do H₂S se faz necessária principalmente por sua toxidez e ação corrosiva, quando dissolvido em água. Para controlar o poder calorífico do gás natural, que é diminuído pela presença de gases inertes e evitar a formação de gelo seco elimina-se também o CO₂ [CHES].

O consumo de gás natural pode variar em função de parâmetros econômicos e de utilização. Para fazer frente às flutuações do consumo, as instalações de produção e de transporte são concebidas para estar sempre saturadas.

2.3 - GÁS NATURAL NO MUNDO

A primeira fonte de obtenção de gás foi o carvão, quando sua utilização limitava-se em suprir as necessidades de iluminação das grandes cidades. Com a descoberta da eletricidade, e seu melhor desempenho na utilização para iluminação, as empresas de gás canalizado foram obrigadas a diversificar suas atividades, inicialmente para o atendimento do mercado residencial na cocção de alimentos, aquecimento, e refrigeração de ambientes; posteriormente para o aquecimento da demanda comercial e industrial [ABHO].

O gás natural, em função de suas vantagens como energético e do volume de reservas crescentes (Tabela 1), vem aumentando paulatinamente sua participação na matriz energética mundial.

Tabela 1 Evolução das reservas provadas de gás natural (10^{12} m^3)

Ano	1950	1980	1990
AMÉRICA DO NORTE	5,3	8,0	7,5
AMÉRICA LATINA	0,7	4,3	5,5
EUROPA OCIDENTAL	0,1	3,9	5,7
EUROPA ORIENTAL & URSS	0,1	26,3	53,4
ORIENTE MÉDIO	1,8	18,1	37,8
ÁSIA & OCEANIA	0,5	4,9	11,2
ÁFRICA	-----	6,1	8,1
TOTAL	8,5	72,2	131,7

Fonte: CEDIGAZ - Natural gás in the word(1991)

As maiores reservas de gás natural encontram-se concentradas basicamente na região do Oriente Médio, Europa Oriental e ex- URRs, conforme observamos na tabela 1.

Por suas inegáveis vantagens comparativas e volumes de reservas crescentes, hoje praticamente iguais às de Petróleo, o gás natural é atualmente combustível de maior crescimento na matriz energética mundial [CHRO].

Somente o desenvolvimento tecnológico da indústria do Petróleo e as descobertas de gás natural, possibilitaram o início da produção de gás manufacturado e a penetração em larga escala do gás natural no mercado industrial. Conseqüentemente este energético passou a ter sua importância reconhecida e as reservas de gás natural já estão praticamente equivalentes às do petróleo (Gráfico 1).

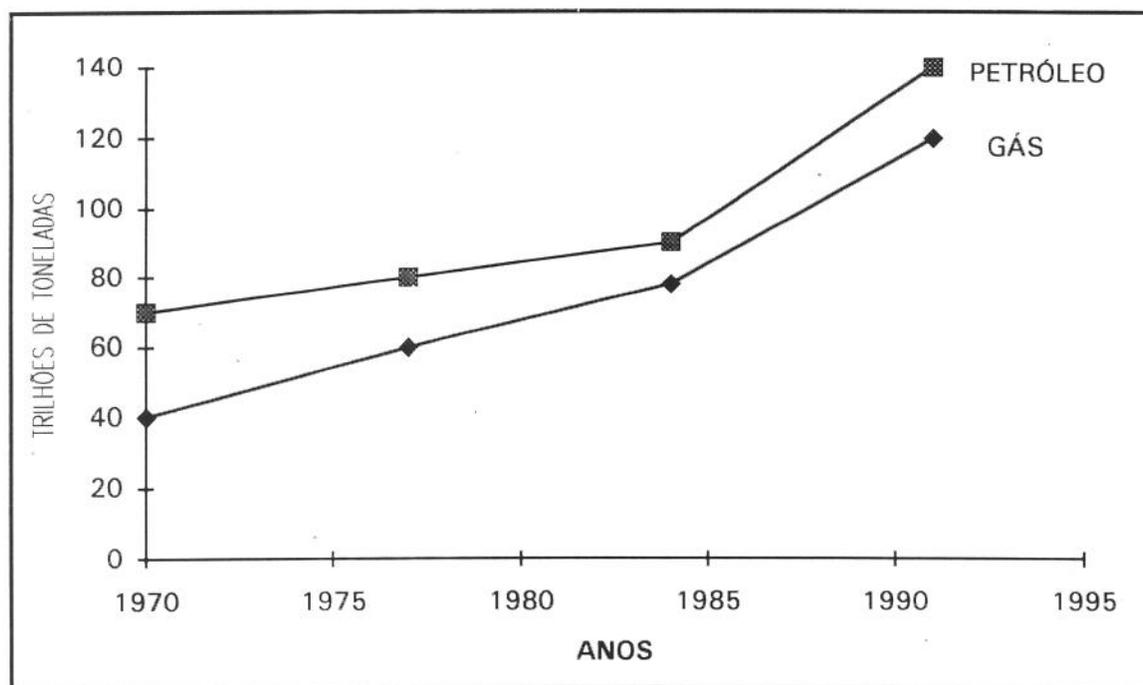


Gráfico 1 Evolução das reservas mundiais de petróleo e gás natural

Fonte: [GOME]

Verifica-se que nos países desenvolvidos (Tabela 2) cerca de 40% do gás natural é consumido nos setores domiciliares e comercial. A grande penetração do Gás natural nesses países deve-se a:

- necessidade de energético não poluente;
- ser o uso do gás natural, nas residências e no comércio, para aquecimento e cocção, mais econômico que a eletricidade;
- preços compatíveis e oferta firme

Tabela 2 Distribuição percentual do consumo de GN por setor

Setor País	RESIDENCIAL COMERCIAL	GERAÇÃO ENERG. ELÉTRICA	INDUSTRIAL	ENERGÉTICO	ANO
EUA	39,6	17,4	30,9	12,1	1984
CANADÁ	43,2	3,3	41,5	12,0	1984
JAPÃO	15,3	74,6	8,5	1,6	1984
ALEMANHA	39,9	18,4	40,0	1,7	1984
FRANÇA	50,5	2,9	46,4	0,2	1984
ITÁLIA	40,5	20,2	38,4	0,9	1984
REINO UNIDO	58,7	1,6	30,6	9,1	1984
PAÍSES BAIXOS	44,5	25,8	28,4	1,3	1984
BÉLGICA	49,3	10,2	37,6	2,9	1984
ESPANHA	14,0	39,3	45,3	1,4	1983
ARGENTINA	19,4	15,5	32,2	31,9	1983
BRASIL	3,6	-----	41,6	54,8	1986

Fonte: [CONG]

2.4 - GÁS NATURAL NO BRASIL

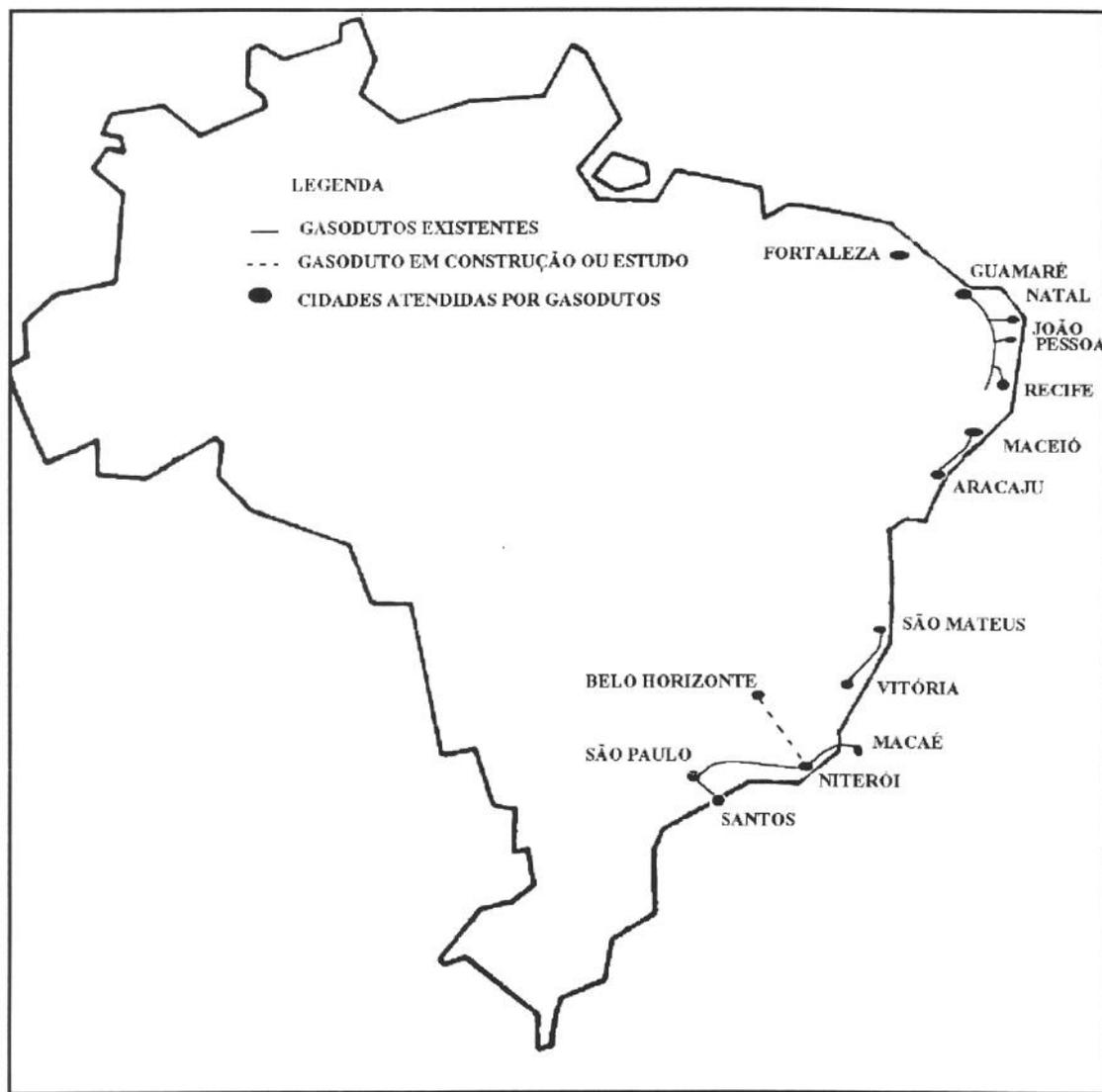
A primeira descoberta de gás natural no Brasil ocorreu no campo de Candeias, Bahia no ano de 1941 [CHES]. Este fato contribuiu para o desenvolvimento da indústria petroquímica. As principais utilizações encontradas na época para o gás foram:

- geração de energia elétrica
- energético para fábrica de cimento

Em função dos baixos preços do Petróleo, nos primórdios de seu consumo, não existia qualquer interesse em incentivar o consumo de gás natural.

Em nosso país a distribuição de gás canalizado teve seu desenvolvimento prejudicado, no que diz respeito ao uso residencial, comercial e institucional. Isto ocorreu em virtude de que as antigas concessionárias estrangeiras não se desenvolveram (em São Paulo e Rio de Janeiro) e conseqüentemente foram sucedidas por empresas municipais ou se extinguiram. Este quadro caótico de limitações econômicas institucionais fez com que o gás canalizado perdesse lugar para a energia elétrica no aquecimento e para o gás liquefeito de Petróleo na cocção de alimentos, nos setores domiciliar e comercial.

No começo do século haviam empresas distribuidoras de gás operando em diversos pontos do país; predominantemente, sua utilização era voltada para fins domésticos. Somente no Rio de Janeiro e em São Paulo não houve a desativação destas empresas.



Mapa 1 Sistema de gasodutos

Fonte: [PETROBRÁS

Em função dos baixos preços praticados anteriormente ao primeiro choque do petróleo, não existia qualquer interesse em incentivar o consumo de gás natural.

Inicialmente produzido associado ao Petróleo e posteriormente a partir de campos exclusivos, vem sendo entregue em diversos centros consumidores através de uma rede de gasodutos (Mapa1).

As reservas Brasileiras conhecidas, apresentam em uma participação maciça de gás associado, conseqüência de uma política voltada para obtenção e desenvolvimento de campos petrolíferos, com tendências a expansão em águas profundas.

Os números das reservas mundiais ($131,7 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$), apontam para uma concentração, em termos de volume das reservas de gás natural.

As reservas mundiais que não são uniformes quantitativamente, estão dispersas de tal forma que este fato torna-se favorável à utilização deste energético, possibilitando com freqüência o comércio entre países fronteiriços, onde o transporte do gás é feito por gasodutos [MIGU].

O Brasil, ao contrário da grande maioria das nações, tem seu consumo de energia centralizado na base hidráulica (Tabela 3).

Tabela 3 Consumo de energia primária matriz (1992)

FONTES ENERGÉTICAS	BRASIL %	MUNDO %
Petróleo	29,20	39,0
Gás natural	1,8	20,0
Carvão mineral/lenha	16,8	-----
Carvão	5,6	28,0
Hidráulica	35,5	7,0
Produtos de cana	9,8	-----
Outras fontes renováveis	1,3	6,0

Fonte: Petro&Gas 09/92

O gás natural é um combustível fóssil de alto poder calorífico e baixa emissão de poluentes, sua participação na matriz energética mundial [APRO] atinge 20%, enquanto no Brasil a participação no começo dos anos 70 foi de 0,2% passando posteriormente, isto já no começo dos anos 90, para 2,0%.

Sua produção no ano de 1993 (da ordem de 17,8 milhões de m³/dia) 9,9 milhões/dia foram vendidos, 7,6 milhões de m³/dia foram reinjetados para recuperação da pressão dos reservatórios e consumo da própria PETROBRÁS, 1,2 milhões m³/dia foram destinados à liquefação (gasolina, nafta, GLP) e 2,0 milhões/dia não foram utilizados

Tabela 4 Utilização do gás na América
Latina 1991

Combustível	35%
Matéria-prima	7%
Fertilizantes	24%
Uso doméstico	13%
Redutor siderúrgico	21%

Fonte: [SESA]

As maiores reservas de gás natural em território nacional estão localizadas no estado do Rio de Janeiro (tabela 5), sendo que a maioria de sua produção advém das plataformas marítimas. A primeira descoberta de gás em seus domínios, ocorreu no início dos anos 70 [CNP], com a produção iniciando em 1980. O aproveitamento deu-se inicialmente com combustível nas plataformas de extração.

Hoje em dia já verifica-se um mercado com consumo consistente, e um mercado potencial que segundo os especialistas justifica o acordo firmado entre Brasil e Bolívia para importação de gás natural por parte do Brasil.

Dentre os novos projetos de utilização do gás poderíamos citar o uso como combustível veicular sobretudo como substituto do óleo Diesel, geração térmica de energia elétrica, cogeração de energia elétrica, substituição do carvão mineral [CONG].

Tabela 5 Reservas e produção de gás natural no Brasil

REGIÃO	RESERVAS (10 ⁹ m ³ /dia)	PRODUÇÃO (10 ⁶ m ³ /dia)
AMAZÔNIA	19	0,9
CEARÁ/RN	12	2,2
SE/AL	17	3,5
BA/ES	30	5,2
RJ	51	8,0
SUL	7	-----
TOTAL	136	17,8

Fonte: RELATÓRIO AEPET/93

2.5- COMENTÁRIOS

As negociações Bolívia/Brasil, com propósitos de integração energética, vêm se desenvolvendo desde 1930 [ABWE], com um acordo que previa a participação Brasileira na exploração petrolífera Boliviana, e culmina com a assinatura do contrato definitivo de compra e venda de gás natural Boliviano contrato este firmado entre a PETROBRÁS e a YACIMIENTOS PETROLIFEROS FISCALES BOLIVIANOS (YPFB).

Gerou-se grande expectativa em torno dos prováveis benefícios que o gás poderá trazer, até o aumento de eficiência, qualidade e níveis de produção nos diferentes setores de utilização, favorecimento do desenvolvimento tecnológico do setor energético, aumento da produção, melhora no meio ambiente nos grandes

centros, aumento da preservação das florestas naturais com a substituição da madeira como fonte de energia dentre outros [LODI].

Tabela 6 Reservas de gás

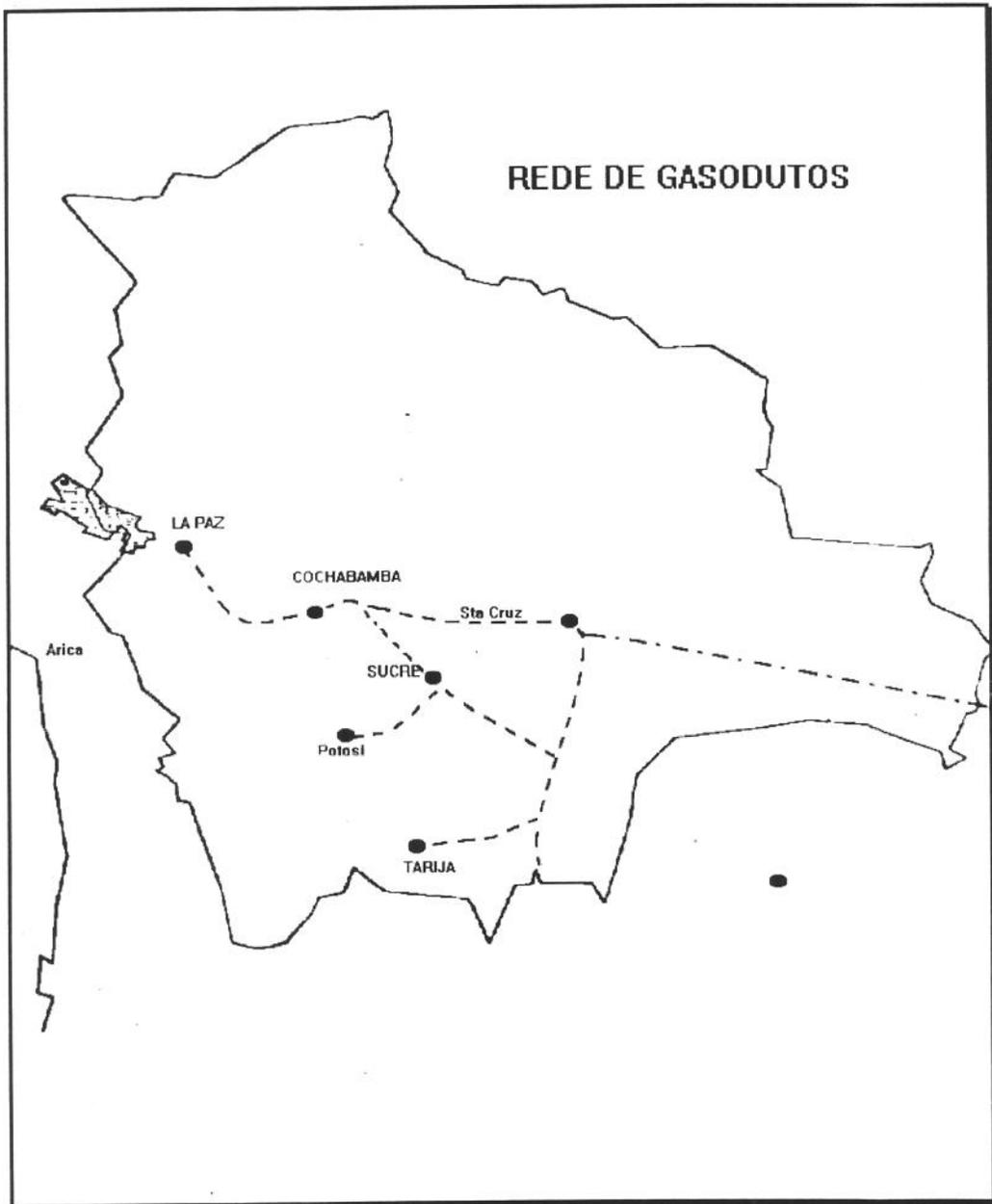
PAÍSES	RESERVAS
	10 ¹² m ³
Venezuela	0,350
Argentina	0,643
Peru	0,338
Colômbia	0,203
Bolívia	0,114
Chile	0,110
Equador	0,110
Brasil	0,124
Total	5,240

Fonte: CEDIGAZ 1992

Além da importação do gás Boliviano (Mapa2), e pensando na garantia de abastecimento para o mercado futuro [NOPE], cogita-se outro acordo para importação de gás junto à Argentina (as reservas Bolivianas representam cerca de 15% das reservas Argentinas), que desde fevereiro de 1993 fornece através do mercado *spot*, 10% dos então 400 mil barris diários importados pelo Brasil, negociação estabelecida entre a PETROBRÁS e a privatizada YACIMENTOS PETROLÍFEROS FISCALES (YPF).

Analisando o quadro de reservas conhecidas (Tabela 5), observamos que em termos quantitativos existem potencialmente mais de um provável exportador de GN. Atualmente muitos países são produtores de gás natural, e nos processos de importação amplamente utilizados, principalmente, nos países da Europa, onde

extensa rede de gasodutos transporta o energético, e no Japão que importa gás natural liquêfeito, de diversos países, através de navios metaneiros [ABG].



Mapa 2 Rede de gasodutos Bolivianos

Fonte: [BOBR]

A situação geográfica do Brasil, cercado por países com jazidas representativas de gás natural, como a Argentina, Bolívia, Venezuela proporciona aspecto favorável à importação, auxiliando também como fator de integração entre os países latinos [DEMA].

CAPÍTULO III

TRANSPORTE DE GÁS NATURAL

INTRODUÇÃO

Dimensionar equipamentos e/ou sistemas requer o conhecimento prévio da maneira matemática pela qual as variáveis relacionadas com a questão se comportam. Em um gasoduto os parâmetros principais a serem controlados são a pressão, razão de compressão, diâmetro escolhido. Estas variáveis influenciam diretamente no dimensionamento do gasoduto e, por conseguinte, nos custos relacionados com o sistema.

Este capítulo oferece uma visão geral do sistema de transporte de gás natural via gasodutos, destacando-se os elementos principais e a interdependência dos diversos parâmetros. Com este objetivo, apresenta-se as equações que governam as variáveis envolvidas quando o sistema encontra-se em operação.

3.2 - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

3.2.1 - COMPRESSORES

As máquinas utilizadas na indústria com finalidade de comprimir gases, possuem características construtivas diversificadas, devido ao fato de que trabalham em pressões diferentes (Tabela 7).

Tabela 7 Classificação em função da pressão (psi)

MÁQUINA	SUCÇÃO	DESCARGA	ΔP
compressor	\neq ambiente	$>$ ambiente	$>3,5$
ventilador	\neq ambiente	\neq ambiente	<1 a 2
soprador	$=$ ambiente	$>$ ambiente	2 a 35
bomba de vácuo	$<$ ambiente	\geq ambiente	≤ 15

Fonte: [COST]

Os compressores de maneira geral efetuam a compressão de um gás segundo o procedimento volumétrico (o aumento de pressão da massa de gás é obtido pela redução do volume), ou dinâmico [BARB].

Na classe dos compressores volumétricos encontramos:

- Alternativos: compressores de êmbolo (de pistão),
- Rotativos: compressores de lóbulos, compressores de palhetas, compressores de parafusos, compressores anel líquido.

Nas máquinas dinâmicas é cedido ao gás trabalho mecânico, que adquire energia cinética transformada em energia de pressão pela passagem do gás em canais cuja área transversal aumenta progressivamente no sentido do fluxo, fazendo com que o gás perca velocidade, aumentando a pressão. Dependendo da maneira como o fluxo de gás adquire energia cinética, podemos agrupar estes compressores em Axiais e Centrífugos [GUED].

Um compressor centrífugo proporciona o aumento da pressão do gás, acelerando-o enquanto escoar radialmente através do impelidor, transformando posteriormente essa energia cinética em pressão pela passagem do gás em um difusor.

Este tipo de compressor assemelha-se a uma bomba centrífuga (a única diferença fundamental é o estado do produto deslocado).

Os limites do nível de pressão em operação dizem respeito principalmente [KRUT]:

- sistema de selagem do eixo
- velocidade máxima do gás, que possui como limitantes velocidades iguais ou superiores à velocidade do som
- estrutura mecânica do impelidor

Então o *head* H o trabalho cedido a cada unidade de peso do fluido no processo de compressão (3.1):

$$H = \frac{N}{aw} \quad (3.1)$$

Existe uma capacidade mínima para compressor, a cada rotação, abaixo da qual a operação do compressor torna-se instável. E instabilidade é acompanhada por um ruído característico denominado *surging* ou *pumping*. O fenômeno traz conseqüências desastrosas quando ocorre por tempo prolongado, tais como vibrações que podem causar empeno do rotor, destruição do sistema de selagem, destruição das tubulações, destruição do impelidor e também aquecimento anormal do gás.

O limite superior de capacidade é definido pelo fenômeno denominado *stnewall* ou *stall*. Este fenômeno manifesta-se quando a velocidade do gás aproxima-se da velocidade do som no gás, ocorrendo geralmente na entrada do impelidor no 1^o estágio. Ondas de choque ocasionam um efeito de bloqueio, com queda rápida de pressão de descarga para um mínimo aumento na vazão. Em geral, o *stall* não é problema na compressão de ar e gases mais leves. Contudo, para gases de maior peso molecular ele pode ser um fator limitante.

Ao contrário dos compressores volumétricos os dinâmicos efetuam a compressão de maneira contínua, sendo por isto a representação do processo em um diagrama da pressão em função do volume, com uma curva contínua (Gráfico 2).

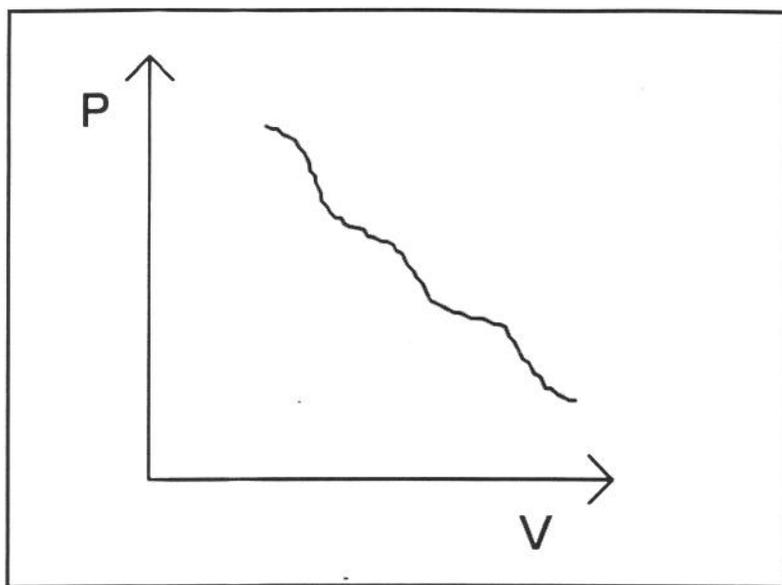


Gráfico 2 Comportamento Pressão/Volume

Fonte [BARB]

O problema principal para definição do tipo de compressor a ser empregado, centrífugo ou recíproco, concentra-se na definição da capacidade e determinação da potência requerida.

Existem basicamente três métodos para definição:

- utilização de expressões analíticas
- diagramas de Mollier
- processo estimativo

As alternativas existentes em função da exatidão dos resultados que a situação necessite.

Os ciclos de compressão isotérmica ocorrem quando a temperatura permanece constante e a pressão varia.

Isto requer contínua mudança no *head* da máquina (equação 3.2).

$$P_1 v_1 = P_2 v_2 = \text{constante} \quad (3.2)$$

Comercialmente isto não é possível em função do tempo para efetuar tal mudança física na máquina.

A compressão adiabática é obtida quando não existe a alteração do *head* durante o processo de compressão do gás, (equação 3.3).

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \quad (3.3)$$

O fator *k* é a Razão específica entre o *head* a pressão constante e o *head* a volume constante.

A definição das grandezas baseadas no ciclo politrópico são definidas com base na equação abaixo 3.4.

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \quad (3.4)$$

Onde o expoente *n* é obtido experimentalmente em função do tipo de máquina.

Termodinamicamente, os processos isotrópicos e adiabáticos são reversíveis, enquanto o processo politrópico é irreversível.

Freqüentemente é necessário a quantificação de $(n-1)/n$. Este valor pode ser obtido a partir da equação (3.5) que utiliza a eficiência politrópica (η_p), obtida por testes antecedentes. O valor de *k* é obtido em função do gás ou mistura de gases.

$$\frac{n-1}{n} = \frac{k-1}{k \eta_p} \quad (3.5)$$

A performance dos compressores centrífugos, usualmente, é estimada baseando-se no processo politrópico, utilizando a equação (3.5).

Os valores de *n* ou $(n-1)/n$ são experimentalmente calculados para os dados de entrada, pressão de descarga, temperatura de descarga como (3.6):

$$\frac{t_g}{T_s} = \frac{P_s^{(n-1)/n}}{P_g} \quad (3.6)$$

As limitações gerais para os diversos tipos de compressores são:

- temperatura de descarga
- diferença de pressão
- razão de compressão
- relação entre potência desejável e custos

Os compressores recíprocos usualmente requerem cilindros separados por estágios e resfriadores intermediários para o gás. As unidades recíprocas são combinadas formando um conjunto único.

É importante notar que o ciclo isotérmico é a mais econômica fonte de potência, a redução da temperatura feita pelo resfriador intermediário diminui a potência requerida para o segundo estágio.

O conceito politrópico freqüentemente é utilizado para na definição de máquinas centrífugas desde que o *head* desenvolvido é independente do fluido movimentado, o *head* politrópico é o trabalho em energia por unidade de massa do gás, que é calculado por (3.7):

$$w = \frac{RT_s n Z}{M(n-1)} \left[r^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad 3.7$$

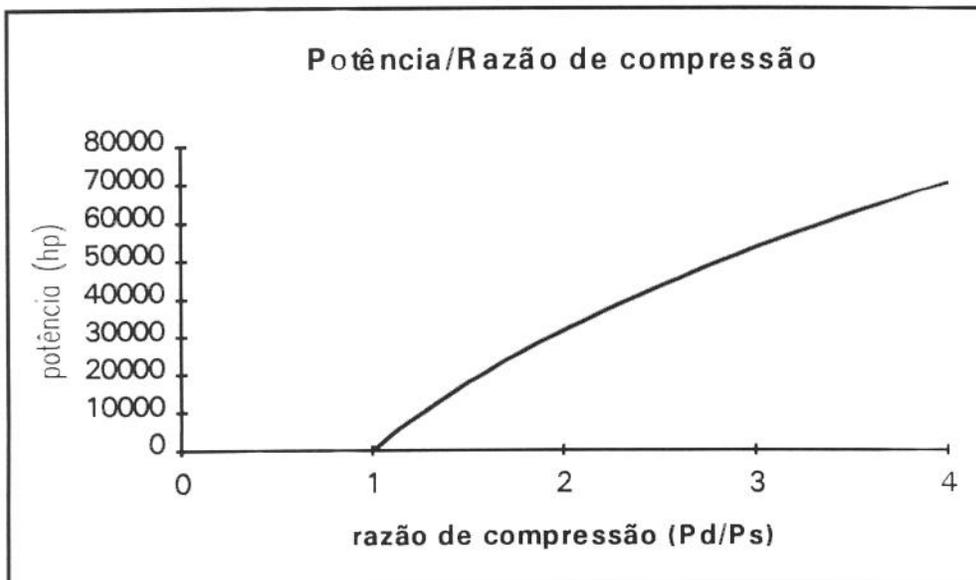


Gráfico 3 Relação Potência/Razão de compressão

A potência requerida (Gráfico 3) depende do montante de gás movimentado, ou da vazão q . Em termos de potência, temos (3.8):

$$w_i = \frac{wq}{33000w} \quad 3.8$$

3.2.2 - TURBINAS A GÁS

As turbinas a gás são equipamentos rotativos que transformam energia química de combustíveis gasosos ou líquidos em energia mecânica. Consiste de elementos para compressão do comburente (ar) até uma determinada pressão, na qual existe a mistura com o combustível e queima através de um ignitor, havendo a captação da energia da mistura em expansão por uma ou mais turbinas de expansão posicionadas a jusante do fluxo dos gases de exaustão [FER1].

Basicamente as turbinas são compostas por [BOYC]:

- compressor de ar - As turbinas a gás possuem compressores de ar do tipo axial ou centrífugo, garantindo uma relação de compressão de até cerca de 15:1, o que assegura altas temperaturas de queima e elevadas eficiências globais. Algumas das mais modernas turbinas a gás equipadas com compressores axiais possuem os estatores de alguns estágios de compressão com geometria variável, de forma a permitir um adequado controle da vazão de ar. Isto contribui para a aquisição de uma eficiência constante na gama de potência demandada pelo equipamento acionado.
- sistema de combustão - O sistema de combustão pode ser com fluxo direto ou reverso. O ar comprimido pelo compressor é conduzido até o interior da câmara de combustão através de rasgos em sua periferia e desloca-se ao longo da camisa, mantendo-a resfriada. Em seguida existe a adição do combustível, que se inflama por meio de ignitores. Detetores de chama são instalados no sistema de combustão, fazendo atuar o alarme no caso de ausência de chama.

- turbina de alta pressão - As turbinas de alta pressão são diretamente acopladas ao compressor de ar. São projetadas de forma a assegurar uma eficiência de expansão bastante elevada.
- turbina de potência - De acordo com o projeto, são utilizadas de uma a três turbinas de potência, dimensionadas visando à máxima eficiência. Os bocais da turbina do 1^o estágio apresentam, em turbinas de alta eficiência, um ângulo de incidência variável, que assegura basicamente:
 - elevada eficiência em condições de operação com carga parcial
 - potência de partida reduzida
 - sobre velocidade limitada, em caso de redução repentina de carga da turbina

Do ponto de vista de concepção, existem dois tipos básicos de turbinas a gás, a saber:

- aeroderivativas - Possuem o gerador de gás concebido originalmente para uso aeronáutico, no qual prioriza-se o baixo peso e o pequeno tamanho.

Nestas turbinas, convive-se normalmente com um menor intervalo entre as operações de manutenção, com a substituição freqüente de alguns módulos, especialmente das regiões "quentes" do equipamento.

- industriais - Possuem o gerador de gás concebido para uso industrial, no qual prioriza-se a robustez e a adequação a ambiente extremamente agressivo.

Nestas turbinas, as operações de manutenção são realizadas intervalos maiores que nas aeroderivativas, e consistem em operações realizadas no próprio local de instalação do equipamento, sem a necessidade de substituição de módulos.

Quanto ao número de eixos, as turbinas a gás podem ser divididas em [LENO]:

- com um eixo - são utilizadas predominantemente para acionamento de geradores elétricos e apresentam uma pequena flexibilidade de funcionamento, uma vez que todo conjunto gira na mesma velocidade.
- com dois eixos - são utilizadas principalmente para acionamento mecânico em geral (compressores, bombas, etc.). Apresentam elevada flexibilidade de funcionamento, uma vez que o eixo compressor/turbina de alta pressão gira na rotação ótima para cada condição ambiental específica, enquanto que o eixo das turbinas de potência mantém a rotação requerida pelo equipamento acionado.

Quanto ao ciclo de funcionamento, as turbinas a gás podem ser classificadas em três grupos:

- ciclo simples - os gases de exaustão são descartados diretamente na atmosfera, sem qualquer aproveitamento de sua energia térmica.
- ciclo regenerativo - os gases de exaustão são utilizados para aquecer o ar comprimido pelo compressor. As turbinas a gás operando neste ciclo tem sua eficiência otimizada, especialmente em regimes de operação com carga parcial.
- ciclo combinado - os gases de exaustão são utilizados para aquecer água e gerar vapor, que por sua vez é utilizado para acionamento de turbinas a vapor ou para o processo. Este ciclo de funcionamento assegura a máxima eficiência global ao processo e vem sendo utilizado a cada dia em maior escala em todos os países do mundo.

3.2.3 - CARACTERIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE GÁS NATURAL

A necessidade de ligação entre o local de produção de energia (eletricidade, Petróleo, gás carvão, álcool etc.) e os centros consumidores de energia, nos remetem a um problema relacionado com o transporte de determinado energético. Por trás deste conceito elementar, encontram-se fatores mais complexos e determinantes do tipo de transporte a ser adotado.

O gás natural apresenta em seu transporte certas peculiaridades, por tratar-se de uma fonte de energia tanto primária (quando utilizado como matéria prima para indústria petroquímica ou de fertilizantes ou ainda como redutor siderúrgico, por exemplo), quanto secundária (quando empregado como combustível).

Atualmente o transporte de gás natural em sua maioria é feito por gasodutos, cuja técnica é mais antiga de que a dos oleodutos. Nos países industrializados, onde constituem importante veículo condutor de energia, os gasodutos podem ser terrestres ou submarinos, existindo ainda a possibilidade de transportes criogênicos, que estrategicamente apresenta-se como solução viável economicamente quando trata-se do transporte de grandes volumes de gás entre centros de produção e de consumo separados por mar.

A determinação da melhor maneira de efetivação do transporte, depende de diversos fatores:

- distância a percorrer
- características geográficas e geológicas do terreno
- características do sistema de distribuição
- fatores ambientais
- características físicas do produto a transportar
- flexibilidade desejada e economicidade

O estudo prévio das potencialidades de mercado consumidor, além do reconhecimento exato das reservas de gás, é fundamental para evitar investimentos ociosos. Internacionalmente, a construção de um gasoduto requer garantias de mercado em um horizonte, em média, de 20 anos [POLL].

A definição da rota é feita a partir do levantamento aerofotométrico, onde os fatores como obstáculos naturais (lagos, rios e pântanos) e artificiais (propriedades, cidades, rodovias e ferrovias) são avaliadas a partir da foto-interpretção. Após a definição da rota do gasoduto, iniciam-se os procedimentos legais visando assegurar o uso da faixa de terra necessária. Para tanto é necessário

negociar a compra, arrendamento, desapropriação ou outras modalidades de procedimentos cabíveis para viabilizar o uso da faixa de terra.

As formulações apresentadas a seguir foram basicamente obtidas de Beggs [BEGG], para uma linha horizontal podemos considerar (3.9):

$$\frac{d_p}{d_x} = \frac{frv^2}{2g_c d} = \frac{Mfrv^2}{ZRT2g_c d} \quad 3.9$$

A diferença entre os muitos métodos de resolução, advém da metodologia para obtenção do fator de fricção, f , e também do fator de compressibilidade do gás. Em muitos casos a temperatura é assumida como constante e Z evolui até a pressão média da linha, o que requer uma solução iterativa. Integrando (3.9) sobre a distância (L), entre a pressão inicial (P_g) e pressão final do trecho (P_s), obtemos:

$$P_g - P_s = \frac{25lg_c T_s Zfl}{d^3} \quad 3.10$$

A equação anterior é derivada utilizando-se condições básicas (14,7 psia, 60° F). Normalmente, esta equação é expressa como (3.11):

$$q = \frac{CT_b}{P_b} \left[\frac{P_s - P_g}{\gamma_g f T_s ZL} \right] d^{0,5} \quad 3.11$$

O valor de C depende das unidades utilizadas na equação. A tabela 8 fornece alguns destes valores:

Tabela 8 Índices para equação da vazão

p	T	d	q	L	C
psia	°R	in	scfd	mi	77,54
psia	°R	in	scfd	ft	5634
psia	°R	in	MMscfd	ft	5,634.10 ⁻³
psia	°R	in	m ³ /d	m	1,149.10 ⁶

Fonte :[BEGG]

Utilizando-se a relação do fator de fricção na equação (3.12), obtemos a equação geral para vazão em duto:

$$q = a_1 E \left(\frac{T_b}{p_b} \right)^{a_2} \left[\frac{p_g^2 - p_s^2}{TZL} \right]^{a_3} \left(\frac{1}{\gamma_g} \right)^{a_4} d^{a_5} \quad 3.12$$

Os demais coeficientes são listados abaixo:

Tabela 9 Índices para as equações vazão

Equação	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
Panhandle A	435,87	1,0788	0,5394	0,4604	2,618
Panhandle B	737,00	1,0200	0,5100	0,4900	2,530
IGT	337,90	1,1110	0,5560	0,4000	2,667
Weymouth	433,50	1,0000	0,5000	0,5000	2,667

Fonte [BEGG]

As unidades utilizadas na equação (3.12) são:

q	ft/d
t	°R
p	psia
L	milhas
d	pol.

Utilizando-se a equação (3.12), com índices da tabela e considerando-se a vazão constante, obtemos a função da perda de carga (3.13) no trecho, em função da distância, diâmetro, e temperatura de sucção, considerada constante.

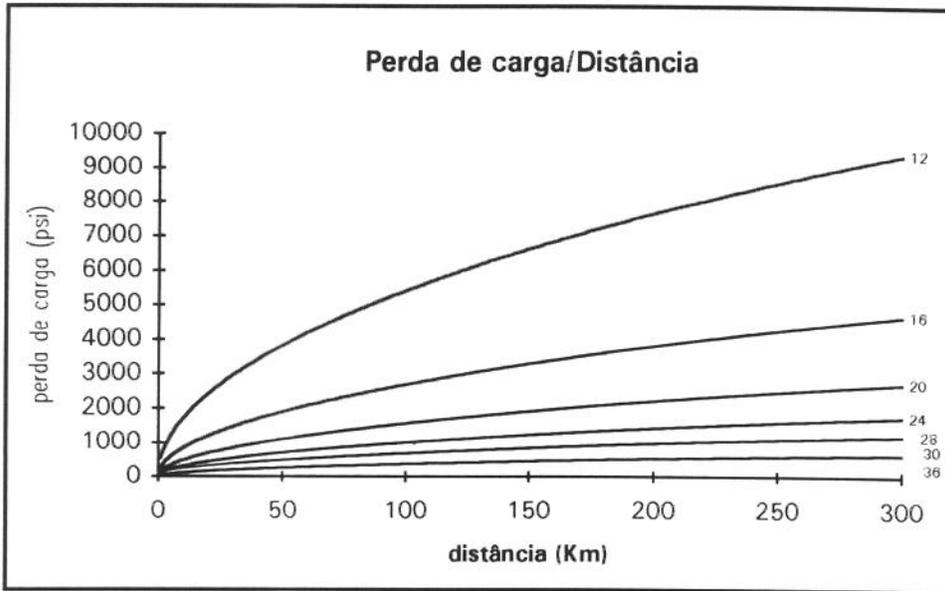


Gráfico 3

$$J(d_i, l_i, T_s) = \frac{9875,49 (l_i, T_s)^{0,5}}{d^{2,4266}} \quad 3.13$$

Durante o período em que a demanda é baixa, a tendência do sistema é a elevação da pressão operacional. Então, a linha passa a desenvolver uma segunda função não menos importante, que é estocar o gás. Adota-se que o sistema é compatível quando a vazão for mínima e a pressão de descarga o mais perto possível da máxima, e não compatível quando a vazão for máxima e a pressão mínima.

Utilizando-se a definição de armazenamento para uma linha de gás natural em condições isotérmicas [IKOK], teremos (3.14):

$$V = \frac{19,20d^2T_bL}{P_bT} \left[P_g + P_s \frac{P_g P_u}{P_g + P_s} \right] \quad 3.14$$

3.3 - COMENTÁRIOS

Este capítulo procura caracterizar a questão do transporte de GN via gasodutos identificando os diversos equipamentos que fazem parte do sistema.

Faz-se a apresentação dos diversos tipos de equipamentos com possibilidade de utilização, também apresenta-se a formulação utilizada visando sua aplicação futura nos modelos do estudo de caso.

O sistema planejado para o estudo de caso, dado sua particularidade utiliza rá compressores centrífugos e turbinas a gás como acionadores

CAPÍTULO IV

TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

4.1 - INTRODUÇÃO

Após a constatação da possibilidade de resolução de um problema através de técnicas de otimização devemos construir um modelo que procure representar o mais próximo possível o problema real e ao mesmo tempo possua o maior grau de simplicidade que se possa alcançar. Podemos então tentar promover mudanças no modelo, de maneira a torna-lo mais simples que o problema original a resolver. Esta transformação deve ser invariante, ou seja os problemas devem possuir o mesmo conjunto de soluções.

Finalmente, devemos escolher um método de otimização compatível com a estrutura do modelo.

A programação dinâmica (PD) é a técnica de conceituação simplificada no bojo da programação matemática. No entanto, sua aplicação exige adaptações a cada problema.

4.2 - CARACTERIZAÇÃO METODOLÓGICA

O tratamento de problemas relacionado com otimização, data do século XVIII, com o cálculo de funções (Lagrange, Newton, Hamilton) com variáveis contínuas. A pesquisa operacional surgiu em virtude dos problemas com origens militares durante a segunda guerra mundial.

O primeiro método para resolução dos problemas relacionados com a pesquisa operacional (problemas relativos de programação linear) foi desenvolvido por George Dantzig que deu o passo inicial para a sistematização da programação matemática (1947), com o método SIMPLEX. No período pós-guerra as técnicas da programação matemática continuam desenvolvendo-se em função dos avanços tecnológicos e ganhando particular impulso quando do surgimento e desenvolvimento dos computadores digitais eletrônicos, conseguindo-se resolver problemas até então sem solução com os métodos clássicos de cálculo.

A programação dinâmica surge pouco depois (1950), com Richard E. Bellman [BEDR].

Problemas de otimização podem ser classificados em dois grandes grupos: um constituído por formulações e modelos em que a configuração ótima é representada por um ponto ou um vetor; e no outro grupo enquadram-se os problemas em que se deseja determinar uma ou mais funções ótimas. Para esta classe de problemas, a ferramenta de solução adequada é a programação dinâmica fundamentada no princípio de otimalidade de Bellman [BEDR].

Todo problema que pode ser resolvidos por PD determinística pode ser representado como um problema de caminho mínimo em uma rede acíclica (Fig.2).

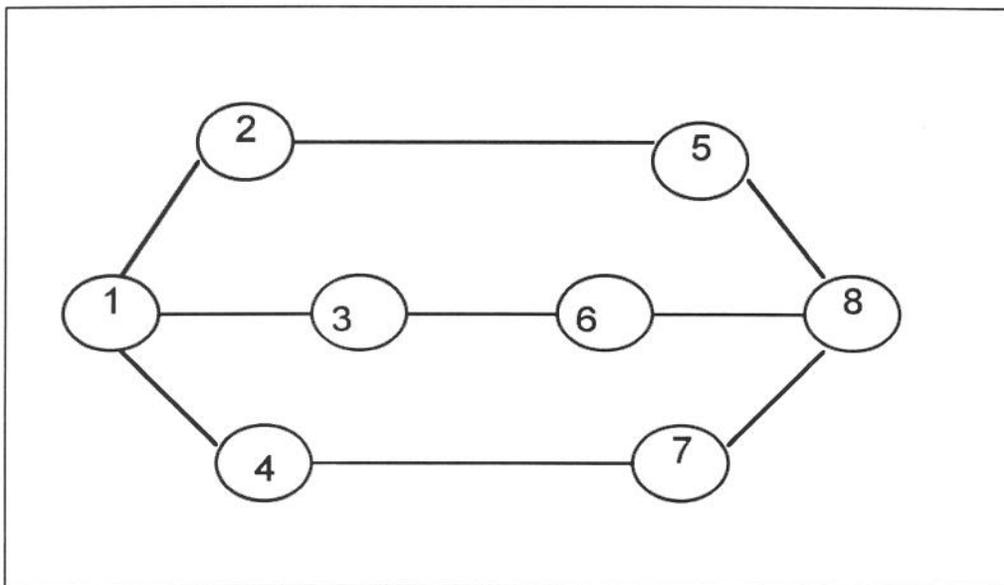


Fig. 2 Representação do problema de redes

O estudo do problema de transporte de GN nos conduz a uma formulação com característica seqüencial (Fig. 3), propriedade principal dos problemas resolvidos por PD.

O sistema básico de transporte via gasoduto pode ser representado segundo a figura abaixo:

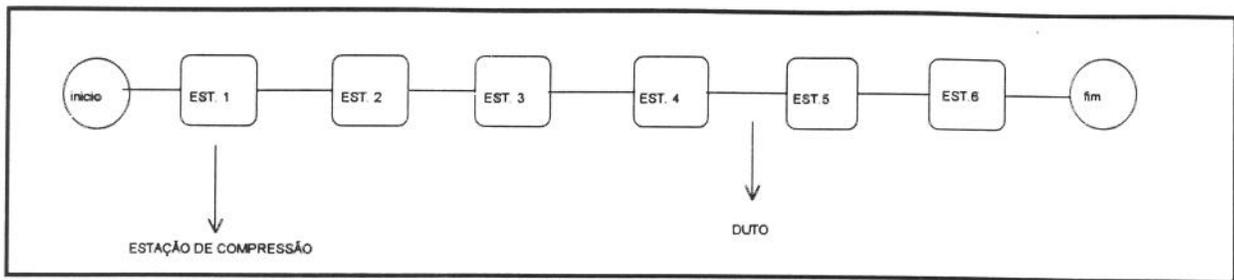


Fig. 3 Representação sistema gasoduto

O sistema de transporte de GN é formado por estações de compressão, onde pretendemos instalar a potência necessária para manutenção dos níveis de pressão no gasoduto e pelos troços de interligação entre as estações, que devem ser dimensionados, desejamos controlar a pressão no gasoduto, taxa de compressão, potência instalada nas estações de compressão e o fator econômico relativo ao custo do dimensionamento deste sistema.

4.3 - PROGRAMAÇÃO DINÂMICA: PROCESSO DE DECISÕES SEQÜENCIAIS

A programação dinâmica caracteriza-se por ser uma técnica de decisões seqüenciais. Este procedimento sistemático é aplicado para determinar a combinação ótima das decisões. Ao contrário da programação linear, não existe formulação matemática preestabelecida para problemas resolvidos por intermédio da programação dinâmica [ARME].

A programação dinâmica é baseada no princípio de otimalidade de Bellman [LACA]:

“Uma política ótima possui a propriedade de que, quaisquer que sejam o estado inicial e a decisão inicial, as decisões restantes devem constituir uma política ótima a partir do estado que resulta da primeira decisão.”

Possuímos então um sistema com diversos níveis de decisões, onde cada decisão tomada implica obrigatoriamente em uma situação factível qualquer no próximo nível de decisão [ARME]. O objetivo é otimizar a seqüência de decisões ver (fig. 4).

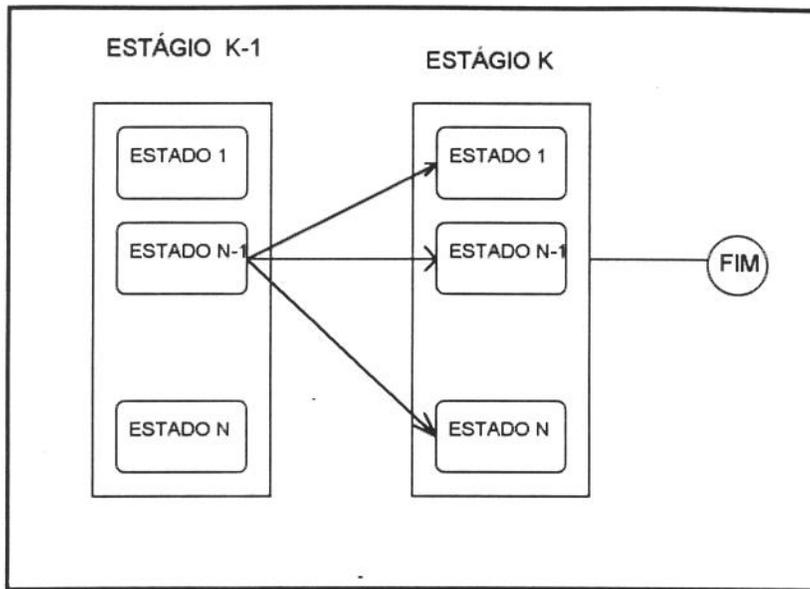


Fig. 4 Representação sequencial das decisões

Uma política ótima compõem-se de subpolíticas ótimas. Na realidade possuímos um sistema com diversos níveis de decisões, onde a cada decisão tomada (em cada estado) implica obrigatoriamente em uma situação qualquer no próximo nível de decisão (próximo estágio), tendo por objetivo otimizar a seqüência de decisões. Naturalmente observamos que cada nível é composto por diversas decisões possíveis, que relacionado-se com as demais decisões dos outros níveis compõem uma política admissível ver (fig. 5). Especificamente poderíamos denotar este fato da seguinte maneira:

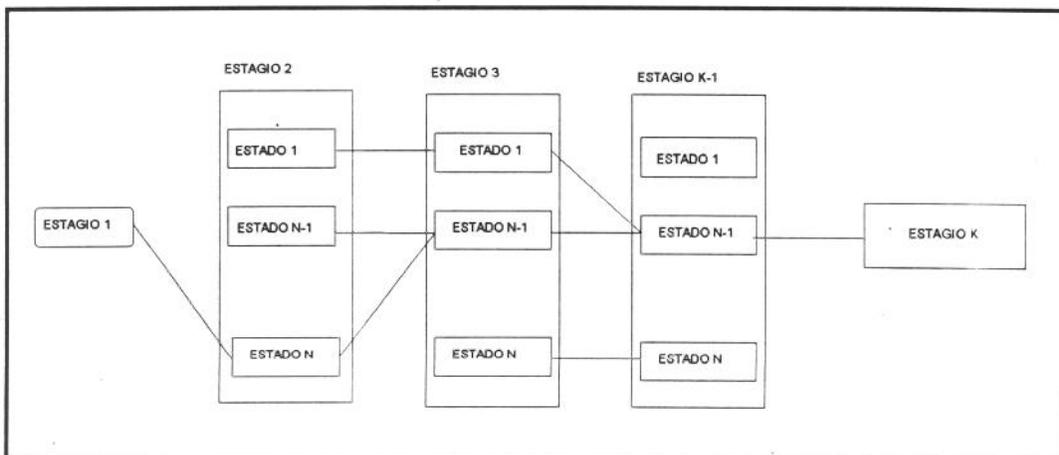


Fig. 5 Representação das trajetórias

Seja um sistema caracterizado por seu vetor de estado X_n no estágio n e seja uma transformação do tipo $f(X_n, U_n, n)$ onde U_n representa o vetor de decisão ou de controle no estágio n . Saindo de um estágio inicial X_0 desejamos, com uma série de controles U_0, U_1, \dots, U_{n-1} , levar o sistema ao estado X_n no estágio n . O conjunto $U = \{U_0, U_1, \dots, U_{n-1}\}$ é uma política admissível quando os controles U_n e os estados resultantes X_n satisfazem restrições eventualmente impostas em cada estágio.

A resolução por PD transforma um problema inicial de n variáveis em n subproblemas de otimização em relação a uma única variável. A resolução dos n subproblemas dá a solução do problema inicial.

Para poder escrever a equação de otimalidade a partir de um estágio qualquer, devemos decompor o critério global em critérios elementares relativos aos subproblemas de otimização, basicamente isto é possível quando a função objetivo satisfaz o critério de separabilidade.

Toda decisão tomada em determinado estado implica em um estado correspondente no estágio seguinte, com valores pré-determinados. Em cada estágio, devemos garantir que os estados estejam enquadrados em valores mínimos e máximos admissíveis, estabelecendo uma faixa de variação o menor possível para redução do volume de cálculos.

Em função do critério global, podemos efetuar a otimização com relação ao estágio inicial ou estágio final.

4.4 - PERFIL DO PROBLEMA DE TRANSPORTE VIA GASODUTOS

O gás, ao se deslocar pelos trechos de duto que interligam em série as estações de compressão, sofre uma perda de pressão que é função das condições do duto, bem como de seu diâmetro e comprimento (fig 3). Precisamos controlar variáveis operacionais que influenciam diretamente no sistema, variáveis tais como pressão, razão de compressão, temperatura. Este controle deve fazer-se presente em cada estação de compressão seqüencialmente.

As variáveis envolvidas no problema dependem das condições de operação das estações anteriores, esta característica é própria de problemas resolvidos com eficácia através da programação dinâmica, onde as decisões tomadas a cada estágio podem compor uma solução.

Devemos então, em cada estágio (estação de compressão), encontrar a melhor combinação entre as duas variáveis de estado (pressão do gás, distância entre as estações), que minimize a função custo.

4.5 - COMENTÁRIOS

Neste capítulo procurou-se fazer uma rápida apresentação da técnica a ser utilizada na resolução do problema, bem como citar abordagens alternativas da questão.

A utilização da programação dinâmica vem de encontro à característica seqüencial do problema e ao comportamento fortemente não linear das variáveis envolvidas.

Na abordagem do problema os estágios representam as estações de compressão, os estados representam as pressões de sucção no problema com uma variável de estado, no problema com duas variáveis de estado os estados representam além da pressão de sucção a localização das estações de compressão.

CAPÍTULO V

OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE GÁS NATURAL

5.1 - INTRODUÇÃO

Os modelos apresentados consideram um gasoduto longo e de grande capacidade de transporte. Decide-se pela capacidade de compressão instalada considerando restrições associadas ao comportamento do gás nas estações de compressão e seu escoamento nos trechos da linha de transporte.

São apresentados dois modelos, o primeiro deles foi formulado com uma variável de estado, a pressão de sucção na estação de compressão; o segundo modelo além da pressão de sucção possui como segunda variável de estado a distância entre as estações de compressão. Apresenta-se os pontos fundamentais do algoritmo computacional utilizado na codificação dos modelos

5.2 - FORMULAÇÃO

5.2.1 - FUNÇÃO OBJETIVO

Na fase de construção de um gasoduto os custos apresentam-se distribuídos em material (45%), mão de obra (40%), desapropriação (5%), outros (10%) [CROC].

Ao longo do gasoduto temos que computar os custos relativos à compressão e ao trecho de linha instalado a cada estação de compressão.

Devemos minimizar o custo do dimensionamento do sistema expresso na equação (5.1).

$$\text{Min}_{r_i, d_i} \sum_{i=0}^{i=n} cw(r_i) + cp(r_i, d_i, l_i) \quad 5.1$$

5.2.2 - RESTRIÇÕES

As restrições do modelo dizem respeito basicamente a condições operacionais do sistema e a limites matemáticos relacionados com número elevado de soluções geradas que tornam possível a resolução do modelo utilizando-se programação dinâmica.

$$dis_{i+1} = g(l_i, L) \quad 5.2$$

Em função da localização equação (5.2), calcula-se a perda de carga no trecho e a potência requerida para obter-se pressões de sucção admissíveis em cada estação

$$p_{i+1} = g(p_i, VP, j(d_i, l_i, T_s), l_i, T_s) \quad 5.3$$

A formulação da equação que expressa a perda de carga no trecho equação (5.3), é obtida utilizando-se a equação (3.12), juntamente com a tabela 9. Esta variável é função da localização e pressão de sucção, do diâmetro, da temperatura de sucção.

$$j(d_i, l_i, T_s) = \frac{9875,49(l_i, T_s)^{0,5}}{d^{2,4266}} \quad 5.4$$

Em cada estação devemos decidir sobre a potência a ser instalada em função da razão de compressão baseado na equação (3.8), temos:

$$w_i = 11384,07(r_i^{0,3076} - 1) \quad 5.5$$

No modelo são admitidos oito diâmetros, expressos em polegadas.

$$d_i \in D \quad 5.6$$

Os limites de pressão operacional são garantidos pela equação:

$$P_l \leq p_{i+1} \leq P_u \quad 5.7$$

As variações de pressão possíveis em cada estado são definidas por:

$$VP_l \leq VP \leq VP_u \quad 5.8$$

A pressão de descarga é obtida por:

$$p_g = p_s + VP \quad 5.9$$

Sendo o seu valor máximo limitado como segue:

$$p_g \leq VP_u \quad 5.10$$

5.3 - MODELO MATEMÁTICO COM UMA VARIÁVEL DE ESTADO

No modelo com uma variável de estado, consideramos fixa a distância total do gasoduto, a localização das estações, a temperatura de sucção e vazão de gás no duto. Neste modelo consideramos a pressão de descarga como variável de estado, a formulação é apresentada a seguir:

$$\text{Min}_{r_i, d_i} \sum_{i=0}^{i=n} cw(r_i) + cp(r_i, d_i, l_i) \quad 5.11$$

s.a

$$p_{i+1} = g(p_i, VP, j(d_i, l_i, T_s), l_i, T_s) \quad 5.12$$

$$j(d_i, l_i, T_s) = \frac{9875,49(l_i, T_s)^{0,5}}{d^{2,4266}} \quad 5.13$$

$$w_i = 11384,07(r_i^{0,3076} - 1) \quad 5.14$$

$$d_i \in D \quad 5.15$$

$$P_l \leq p_{i+1} \leq P_u \quad 5.16$$

$$VP_l \leq VP \leq VP_u \quad 5.17$$

$$p_g = p_s + VP \quad 5.18$$

$$p_g \leq VP_u \quad 5.19$$

O modelo apresenta uma variável de estado que expressa os níveis possíveis de pressão para o sistema. Poderíamos representar o comportamento da variável de estado como mostra a fig. 6.

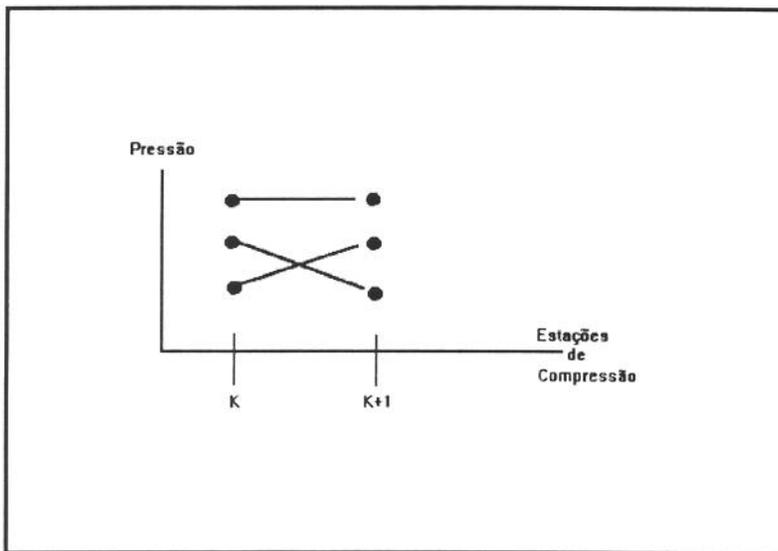


Fig. 6 Representação do problema com uma variável

Na primeira estação de compressão temos fixo o valor da pressão de sucção, possuímos então neste estágio somente um estado Fig 7.

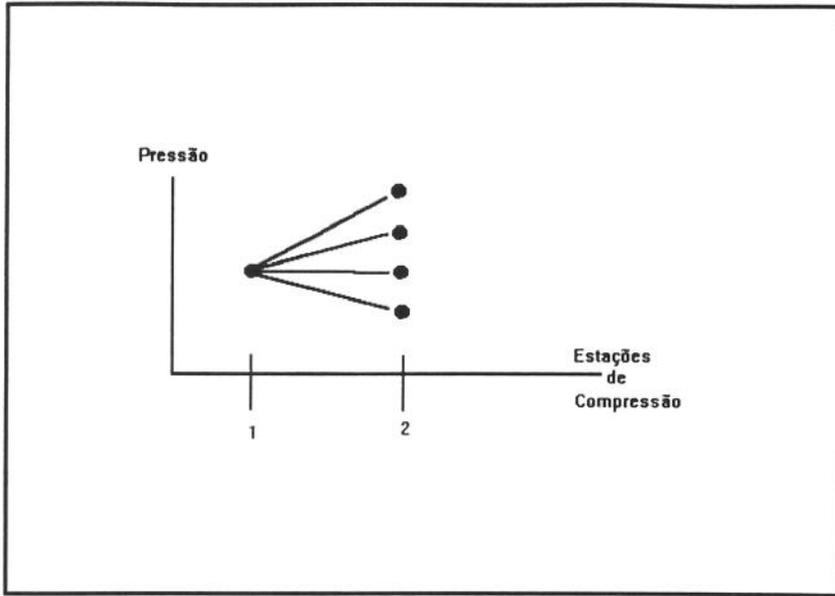


Fig. 7 Pressão de sucção na primeira estação

5.4 - MODELO MATEMÁTICO COM DUAS VARIÁVEIS DE ESTADO

Neste modelo também temos como fixa a distância total do gasoduto, a temperatura de sucção e vazão de gás, a localização de cada estação deixa de ser variável.

A formulação do modelo que considera a pressão de descarga e a localização das estações como variáveis de estado é apresentado a seguir:

$$\text{Min}_{r_i, d_i} \sum_{i=0}^{i=n} cw(r_i) + cp(r_i, d_i, l_i) \quad 5.20$$

s.a

$$dis_{i+1} = g(l_i, L) \quad 5.21$$

$$p_{i+1} = g(p_i, VP, j(d_i, l_i, T_s), l_i, T_s) \quad 5.22$$

$$j(d_i, l_i, T_s) = \frac{9875,49(l_i, T_s)^{0,5}}{d^{2,4266}} \quad 5.23$$

$$w_i = 11384,07(r_i^{0,3076} - 1) \quad 5.24$$

$$d_i \in D \quad 5.25$$

$$P_l \leq p_{i+1} \leq P_u \quad 5.26$$

$$VP_l \leq VP \leq VP_u \quad 5.27$$

$$p_g = p_s + VP \quad 5.28$$

$$p_g \leq VP_u \quad 5.29$$

São duas as equações de estado, a primeira diz respeito à localização das estações de compressão, a segunda expressa os níveis possíveis de pressão para o sistema. Individualmente poderíamos representar o comportamento das variáveis de estado como mostra a fig. 6. Observe que as variáveis de estado (estação de compressão e distância) compõem pares ordenados que mapeiam os endereços em cada estágio permitindo ou não permitindo a evolução do sistema.

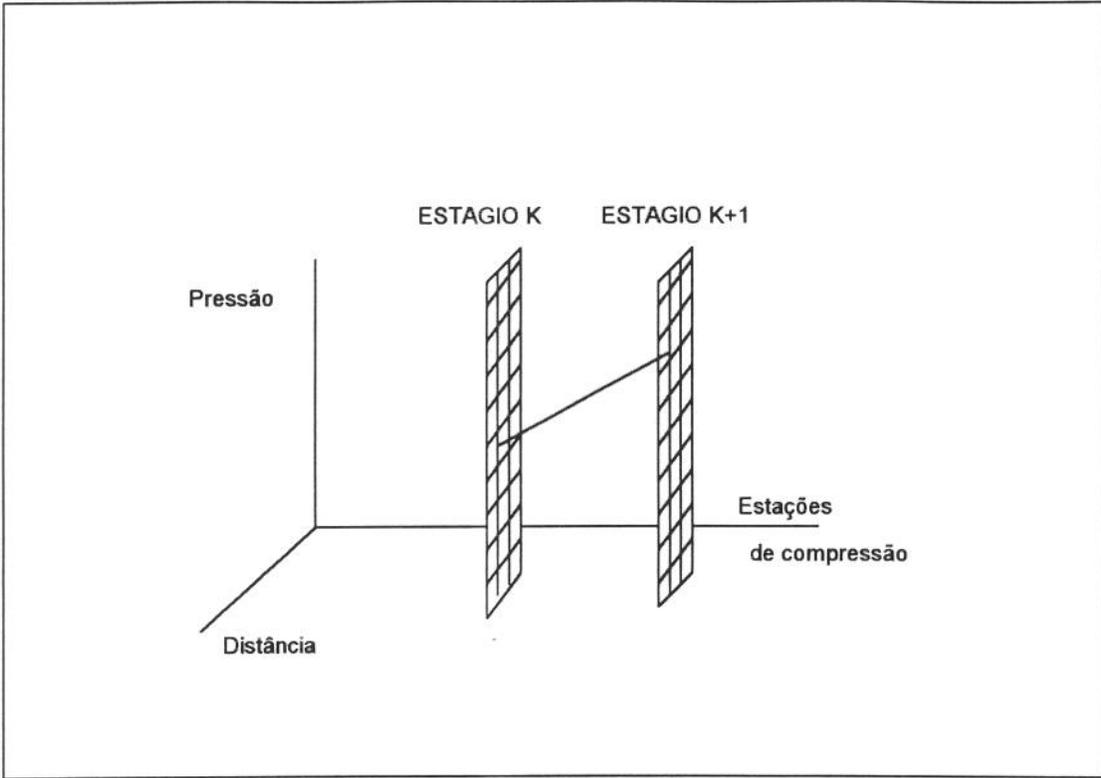


Fig. 8 Representação do problema com duas variáveis

Na primeira estação uma vez que o comprimento do duto é fixo não se admite variação em sua localização conforme observamos na Fig.8.

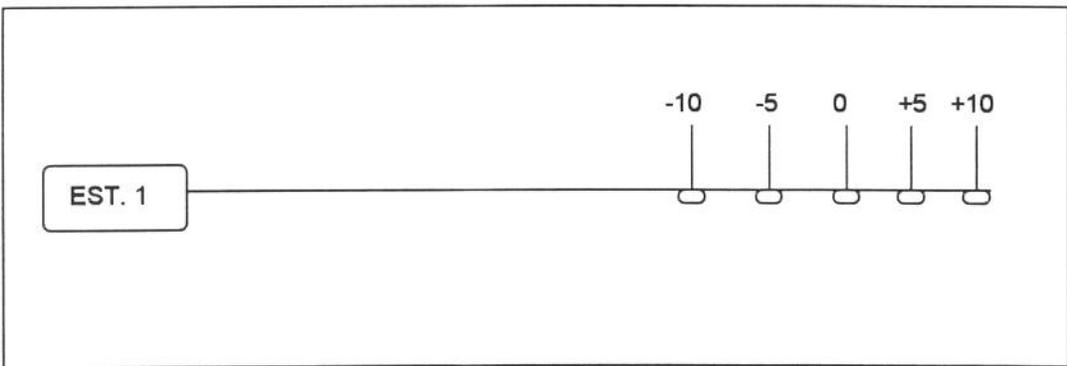


Fig. 9 Variações possíveis

Na equação (5.2) que gera as localizações possíveis das estações são consideradas cinco posições factíveis (Fig. 8), com variação da ordem de, -10, -5, 0,

5, 10 milhas. Estas variações são válidas inclusive para ultima estação de compressão.

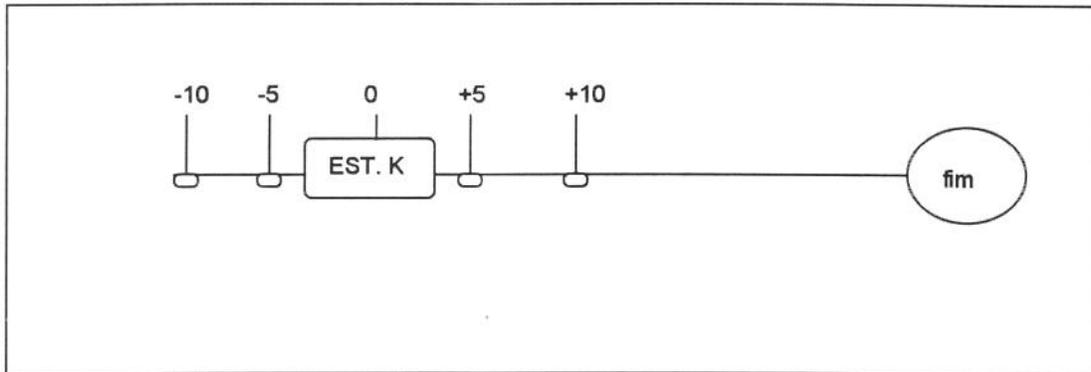


Fig. 10 Variações possíveis para última estação

5.6 - ALGORITMO COMPUTACIONAL

A série de rotinas codificadas em PASCAL [COLL] que compõem o algoritmo tem por objetivo pesquisar e garantir os níveis operacionais de cada componente obedecendo limites estabelecidos a priori. O código computacional produzido foi particionado em subrotinas gerando blocos simples de codificação.

No programa com uma variável de estado temos os estágios sendo o número de estações. Os estados definidos como sendo 50 possibilidades para a pressão de sucção em cada estação de compressão.

O programa com duas variáveis de estado é definido com os estágios sendo o número de estações. O número de estados formados por um conjunto composto por 50 possibilidades de valores para pressão, 5 valores para alocação, este programa básico é composto por sete procedimentos:

```

begin

procedure dim;

procedure zerar;

procedure ler;

procedure calculo_dos_caminhos;

procedure recuperação_da_trajetória;

procedure impressão_dos_resultados;

end.

```

O dimensionamento que exige mais da memória utilizada e/ou reservada do problema é feito no primeiro procedimento que também (*procedure dim*) dimensiona as demais variáveis e constantes, principalmente em função das seguintes constantes:

```

N_STGIO = 6; (Número de estágios)

N_STDO = 50; (Número de estados, pressão)

N_ULMAX = 5; (Número de estados, localização)

```

Os estágios são definidos como elementos de uma matriz linha, onde cada elemento é a combinação das três variáveis (pressão, localização, volume), que armazenam valores das variáveis de controle e dos retornos ótimos calculados em cada estado tridimensional como segue:

```

type

n_estado = array [0..N_STDO,1..N_ULMAX] of record

```

```

ud_otm, c_acumulado, c_otm, w_otm, pla_otm,
pipe_otm, comp_otm, dist_otm, dis_acumulado,
v_acumulado,                : real;
up_otm, p_prox, l_prox, p_otm, local,        : integer;
                                                    end;

```

```

estagio: array [1..N_STGIO]   of   record
                                estado : n_estado;
                                end;

```

No segundo procedimento (*procedure zerar*) zera-se as variáveis utilizadas no problema. O terceiro procedimento (*procedure ler*) que efetua a leitura da vazão de gás, distância entre as estações, diâmetros admissíveis, temperatura de sucção, custo do pipe, custo da potência:

```

procedure ler;
begin
    q:= 565000000;
    l_est[1]:= 159.49;
    l_est[2]:= 159.49;
    l_est[3]:= 171.33;

```

l_est[4]:= 171.33;

l_est[5]:= 171.33;

l_est[6]:= 171.33;

temp_suc := 522;

dia[1] :=8;

dia[2] :=12;

dia[3] :=16;

dia[4] :=20;

dia[5] :=24;

dia[6] :=28;

dia[7] :=30;

dia[8] :=36;

c_d[1] := 166504.8;

c_d[2] := 265458;

c_d[3] := 247345.3;

c_d[4] := 324318.9;

c_d[5] := 351829.2;

c_d[6] := 450617;

c_d[7] := 549404.8;

c_d[8] := 770303.6;

```

c_pot := 1588;

c_milha:= 14245.75;

end;

```

Neste procedimento são estabelecidos também o range de variação das demais variáveis de controle, tais como limites máximos e mínimos para pressão, para variação de pressão na estação de compressão (ΔP_u).

No procedimento *calculo_dos_caminhos* estão aninhadas subrotinas que proporcionam a verificação da evolução do sistema. Os três primeiros laços dizem respeito as variáveis de estado

```

procedure calculo_dos_caminhos;

begin

for stgo := N_STGIO downto 1 do with estagio[stgo] do    {laço estágios, estacoes}

for stdo:= 0 to N_STDO do                                {laço das pressões, vertical}

for stdl := 1 to N_ULMAX do                             {laço das distâncias, horizontal}

with estado[stdo, stdl, stdv] do                        {estado[stdo, stdl]}

begin

writeln(stgo, ' ', stdo, ' ', stdl, ' ', stdv);

```

```

DISTANCIA; { posicao da estacao }

COLUNA; {pressao no estado}

begin

custo_max := INF;

for dis := 1 to N_ULMAX do {indices das possíveis localizações da estação
anterior}

begin

LOCALIZAÇÃO; {posições possíveis da estação anterior}

begin

for up := 0 to UPMAX do {laco delta de pressão}

POTENCIA;

for ud := 1 to UDMAX do {laco dos diâmetros}

begin

PERDA_CARGA;

if (j>0) then

begin

p_la: = p_est[stdo]+(up* VAR_UP )-j; {pressão no próximo estagio}

if (p_la>=P_MIN) and (p_la<=P_MAX) then

begin

```

```

COLUNA_LA;

CUSTOS;

case stgo of

1:

begin

custo_la := estagio[stgo+1].estado[indice,dis,iii_vol].c_acumulado;

dis_la := estagio[stgo+1].estado[indice,dis,iii_vol].dis_acumulado;

variacao := estagio[stgo+1].estado[indice,dis,iii_vol].local;

var_soma := variacao +var_aqui;

dis_soma := dis_loc+dis_la;

custo := c_estado + custo_la;

if (custo < custo_max) then

begin

custo_max := custo;

c_acumulado := custo;

ud_otm := dia[ud];

up_otm := up*VAR_UP;

p_prox := indice;

l_prox := dis;

p_otm := p_est[stdo];

```

```
c_otm      := c_estado;  
w_otm      := w;  
pla_otm    := p_la;  
pipe_otm   := c_pipe;  
comp_otm   := c_comp;  
dist_otm   := dis_loc;  
dis_acumulado := dis_soma;  
local      := var_aqui;  
dis_final  := dis;
```

end

end;

2,3,4,5:

begin

```
custo_la := estagio[stgo+1].estado[indice,dis,iii_vol].c_acumulado;
```

```
dis_la := estagio[stgo+1].estado[indice,dis,iii_vol].dis_acumulado;
```

```
dis_soma := dis_loc+dis_la;
```

```
custo := c_estado + custo_la;
```

```
if (custo < custo_max) then
```

```
begin

custo_max := custo;

c_acumulado := custo;

ud_otm := dia[ud];

up_otm := up*VAR_UP;

p_prox := indice;

l_prox := dis;

v_prox := iii_vol;

p_otm := p_est[stdo];

c_otm := c_estado;

w_otm := w;

pla_otm := p_la;

pipe_otm := c_pipe;

comp_otm := c_comp;

dist_otm := dis_loc;

dis_acumulado := dis_soma;

local := var_aqui;

end

end;
```

6:

begin

custo := c_estado;

volume := v;

dis_soma := dis_loc;

if (custo < custo_max) then

begin

custo_max := custo;

c_acumulado := custo;

ud_otm := dia[ud];

up_otm := up*VAR_UP;

p_prox := indice;

l_prox := dis;

v_prox := vol;

p_otm := p_est[stdo];

c_otm := c_estado;

w_otm := w;

pla_otm := p_la;

pipe_otm := c_pipe;

comp_otm := c_comp;

dist_otm := dis_loc;

```
        dis_acumulado := dis_soma;

    end

end;

end;

end;

end;

end;

end;

end;

end;

end;

end;
```

No procedimento *recuperação_da_trajetória* efetua-se o levantamento do estado no último estágio que possui a solução ótima. A partir deste levanta-se a trajetória de retorno ótima, que é impressa pelo procedure *impressão_dos_resultados*.

O problema desenvolve-se em um espaço tridimensional onde os eixos geradores são as variáveis de estado:

- Pressão

- Distância

A evolução do sistema gerenciado por estas variáveis de estado possui ainda as variáveis de controle que são:

- diâmetros admissíveis
- variação de pressão na estação
- pressão máxima do sistema
- pressão mínima dos sistema

Os modelos apresentados diferem em sua composição quanto ao número de variáveis de estado. Esta particularidade implica na mudança dimensional do problema.

A apresentação sumária de alguns trechos da codificação computacional ressalta a diferenciação entre os dois modelos.

CAPÍTULO VI

ESTUDO DE CASO

6.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o problema real de otimização do transporte de gás natural via gasodutos, utilizando-se a técnica de programação dinâmica. O modelo considera um gasoduto longo e de grande capacidade de transporte. Decide-se pela capacidade de compressão instalada considerando restrições associadas ao comportamento do gás nas estações de compressão e seu escoamento nos trechos da linha de transporte.

Este mesmo fato reflete-se nos volumes das reservas Latino Americanas. Recentemente o Brasil efetivou um contrato para importação de gás Boliviano (mapa 3). O gasoduto com início em Puerto Soarez (Bolívia) entrará em território Brasileiro por Mato Grosso do Sul. Esta linha chegará até o estado de São Paulo, o trecho Brasileiro Corumbá/Campinas possuirá 1803 km. O contrato é para um horizonte de vinte anos a partir de 1997, com volumes da ordem de $16 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ dia.

Mapa 3



Fonte: PETROBRÁS/Gasb

O equacionamento de um problema que possui como finalidade básica minimizar os custos de um sistema de transporte de gás natural via gasodutos (Fig. 2), pode ser abordado por metodologias diferenciadas. Neste tipo de problema aparecem variáveis com comportamento fortemente não linear, isto implica na impossibilidade de aplicação direta de programação linear, e os métodos não lineares exigem funções contínuas diferenciáveis, além de outras exigências para aplicação e convergência deste método.

Para esta segunda classe de problemas a ferramenta adequada é a programação dinâmica, na realidade constitui-se como um método lógico aplicável a um grande número de problemas dos mais variados tipos. Os métodos de resolução utilizando programação dinâmica; neste trabalho utilizamos o método indireto por decomposição.

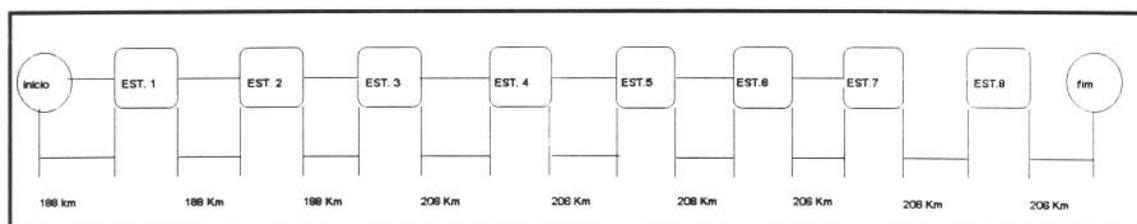


Fig. 11 Representação do sistema de pressurização para oito estações

6.2 - APLICAÇÃO DO MODELO

O modelo divide-se em etapas (estágios), e consiste em determinar a melhor decisão a cada etapa de acordo com a situação (estado) em que se encontrar o sistema. A otimalidade de cada decisão é baseada no conhecimento prévio de todas as possibilidades futuras e suas conseqüências. Assim, basta que se recupere a trajetória ótima no último estágio otimizado. Este modelo foi aplicado ao sistema futuro de transporte de gás natural Boliviano para o Brasil. O gasoduto em seu trecho principal constará de 1803 km, e 8 estações de compressão de Puerto

Soarez na Bolívia até Campinas já em território Brasileiro, com vazão final da ordem de $16 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}$.

A implementação computacional foi executada utilizando-se linguagem PASCAL, rodado em SUN-Sparcstation, com significativa eficiência na convergência do modelo. Os índices de custos foram obtidos em [TRUE].

Os modelos descritos abordam um gasoduto com distância total igual. O ESTUDO I possui somente uma variável de estado, a pressão de sucção das estações. O ESTUDO II duas variáveis, além da pressão, possui também a distância entre as estações como uma de estado. Foram implementadas quatro versões computacionais para $n = 6, 7, 8, 9$, correspondentes a problemas com número de estações diferenciados.

Tabela 10 Distâncias admissíveis p/ os problemas

Número estações / estações	6	7	8	9
1	159,49	135,01	116,66	111,59
2	159,49	135,01	116,66	111,59
3	171,33	146,85	128,50	111,59
4	171,33	146,85	128,50	111,59
5	171,33	146,85	128,50	111,59
6	171,33	146,85	128,50	111,59
7		146,85	128,50	111,59
8			128,50	111,59
9				111,59

6.3 - RESULTADOS DO MODELO COM UMA VARIÁVEL DE ESTADO

O resultado do modelo que considera a pressão como variável de estado é apresentado nas tabelas abaixo :

ESTUDO 1, com 6 estações:

Tabela 11 Problema com 1 variável e 6 estações de compressão

<i>Estação</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>P. Sucção</i>	<i>P. Descarga</i>	<i>Varição Pressão</i>	<i>Potência</i>	<i>Custo</i>
	<i>polegada</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>w</i>	<i>US\$</i>
1	36	1000	2200	1200	36387	182910461
2	30	1580	2780	1200	25164	129858572
3	28	1840	3040	1200	22140	114804444
4	28	1880	3080	1200	21739	114167880
5	28	1920	3120	1200	21353	113554327
6	24	1960	2680	720	13392	83987486
total					140179	739283173

ESTUDO 2, com 7 estações:

Tabela 12 Problema com 1 variável e 7 estações de compressão

<i>Estação</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>P. Sucção</i>	<i>P. Descarga</i>	<i>Varição Pressão</i>	<i>Potência</i>	<i>Custo</i>
	<i>polegada</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>w</i>	<i>US\$</i>
1	36	1000	2200	1200	36387	163704693
2	28	1640	2840	1200	24394	101499562
3	28	1820	3020	1200	22346	103751929
4	28	1940	3060	1120	19949	99945543
5	28	1980	3060	1080	18995	98429793
6	28	1980	3060	1080	18995	98429793
7	24	1980	2560	580	10991	71070054
total					151970	736831386

ESTUDO 3, com 8 estações:

Tabela 13 Problema com 1 variável e 8 estações de compressão

<i>Estação</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>P. Sucção</i>	<i>P. Descarga</i>	<i>Varição Pressão</i>	<i>Potência</i>	<i>Custo</i>
	<i>polegada</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>w</i>	<i>US\$</i>
1	30	1000	2200	1200	36387	123538158
2	28	1680	2880	1200	23907	98912116
3	28	1920	2980	1060	19195	98872552
4	28	1980	2980	1000	17765	94214771
5	28	1980	2980	1000	17765	87946189
6	28	1980	2980	1000	17765	87946189
7	28	1980	2980	1000	17765	87946189
8	28	1980	2000	20	410	60386706
total					150960	743891592

ESTUDO 4, com 9 estações:

Tabela 11 Problema com 1 variável e 9 estações de compressão

<i>Estação</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>P. Sucção</i>	<i>P. Descarga</i>	<i>Varição Pressão</i>	<i>Potência</i>	<i>Custo</i>
	<i>polegada</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>w</i>	<i>US\$</i>
1	30	1000	2200	1200	36387	123498702
2	28	1380	2580	1200	28136	98879576
3	28	1620	2820	1200	24645	93336036
4	28	1860	2940	1080	20048	86035760
5	28	1980	2940	960	17141	81419348
6	28	1980	2940	960	17141	81419348
7	28	1980	2940	960	17141	81419348
8	28	1980	2940	940	16827	80920683
9	28	1960	1960	0	0	54198348
total					177471	781127153

6.4 - RESULTADOS DO MODELO COM DUAS VARIÁVEIS DE ESTADO

Os valores básicos das distâncias aqui consideradas são os mesmos fornecidos na tabela de entrada do PROBLEMA COM UMA VARIÁVEL, na estrutura do algoritmo estes valores básicos sofrem uma variação de +/-10, +/- 5 e 0.

ESTUDO 1, com 6 estações:

Tabela 15 Problema com 2 variáveis e 6 estações de compressão

<i>Estação</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>P. Sucção</i>	<i>P. Descarga</i>	<i>Variação Pressão</i>	<i>Potência</i>	<i>Distância</i>	<i>Custo</i>
	<i>polegada</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>w</i>	<i>milhas</i>	<i>US\$</i>
1	36	1000	2200	1200	36387	169,49	190755954
2	30	1580	2780	1200	25164	149,49	109454278
3	28	1700	2900	1200	23670	186,33	124206931
4	28	1700	2900	1200	23670	156,33	110261048
5	28	1800	3000	1200	22556	171,33	115465359
6	24	1840	2680	840	16257	171,33	88536175
total					147707		738679748

ESTUDO 2, com 7 estações:

Tabela 16 Problema com 2 variáveis e 7 estações de compressão

<i>Estação</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>P. Sucção</i>	<i>P. Descarga</i>	<i>Variação Pressão</i>	<i>Potência</i>	<i>Distâncias</i>	<i>Custo</i>
	<i>polegada</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>w</i>	<i>milhas</i>	<i>US\$</i>
1	36	1000	2200	1200	36387	135,01	163704693
2	28	1640	2840	1200	24394	135,01	101499562
3	28	1820	3020	1200	22346	156,85	108400557
4	28	1920	3020	1100	19818	136,85	95088748
5	28	1980	3100	1120	19602	156,85	104041867
6	28	2000	3100	1100	19132	156,85	103295952
7	28	2000	2000	0	0	126,85	58967839
total					141681		734999221

ESTUDO 3, com 8 estações:

Tabela 17 Problema com 2 variáveis e 8 estações de compressão

<i>Estação</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>P. Sucção</i>	<i>P. Descarga</i>	<i>Variação Pressão</i>	<i>Potência</i>	<i>Distância</i>	<i>Custo</i>
	<i>polegada</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>w</i>	<i>milhas</i>	<i>US\$</i>
1	30	1000	2200	1200	36387	121,66	126356411
2	28	1380	2580	1200	28136	111,66	96587803
3	28	1640	2840	1200	24394	128,50	98473305
4	28	1840	3020	1180	21826	138,50	99044674
5	28	1980	2980	1000	17765	123,50	85621876
6	28	2000	2980	980	17301	123,50	84884964
7	28	2000	3000	1000	17609	143,50	94672416
8	28	1940	1940	0	0	113,50	52761922
<i>total</i>					163421		738403374

ESTUDO 4, com 9 estações:

Tabela 18 Problema com 2 variáveis e 9 estações de compressão

<i>Estação</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>P. Sucção</i>	<i>P. Descarga</i>	<i>Variação Pressão</i>	<i>Potência</i>	<i>Distâncias</i>	<i>Custo</i>
	<i>polegada</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>pa</i>	<i>w</i>	<i>milhas</i>	<i>US\$</i>
1	30	1000	2200	1200	36387	111,59	120680450
2	28	1400	2600	1200	27807	111,59	96032453
3	28	1660	2860	1200	24148	111,59	90221458
4	28	1920	3000	1080	19507	131,59	92149465
5	28	1980	2840	860	15556	91,59	67280470
6	28	2000	3000	1000	17609	131,59	89135901
7	28	1980	2840	860	15556	91,59	67280470
8	24	2000	3200	1200	20621	126,59	79087864
9	28	1760	1780	120	2717	96,59	49215999
<i>total</i>					179911		751084533

6.5 - CONCLUSÕES

Observa-se que o problema possui caracteristicamente decisões seqüenciais. Problemas com este perfil são resolvidos com eficiência por Programação Dinâmica.

A programação dinâmica caracteriza-se por ser uma técnica de mapeamento de decisões seqüenciais. Este procedimento sistemático é aplicado para determinar a combinação ótima das decisões. Ao contrário da programação linear, não existe formulação matemática preestabelecida para problemas resolvidos por intermédio da programação dinâmica. O método utilizado em Programação Dinâmica, procuram explorar a separabilidade da função objetivo, efetuando decomposição temporal do problema original

Em cada estágio, devemos garantir que os estados estejam enquadrados em valores mínimos (P_{min}) e máximos (P_{max}) admissíveis, estabelecendo uma faixa de variação a menor possível para redução dos cálculos. Com a discretização dos estados e controles, considerando-se a faixa de variação admissível dos estados (P_i pressão de sucção mínima e máxima nas estações), devemos escolher a variação dos estados de tal modo que o intervalo seja constituído por um número inteiro de pontos.

Efetuando a análise dos resultados, nota-se que o modelo decide elevar a pressão de descarga logo na primeira estação proporcionando uma diminuição dos futuros acréscimos de pressão, mantendo este nível em todas as estações de compressão. Esta trajetória é um sintoma do desequilíbrio dos custos de compressão e do duto utilizados nos modelos.

O desempenho do sistema de GN é afetado economicamente por fatores que compõem um conjunto complexo. Após a determinação do ponto inicial e do ponto final executa-se a avaliação das potencialidades econômicas de consumo. A pressão máxima de operação do sistema limita a vazão de gás transportado. Quando assumimos que as outras condições estão fixas, esta pressão é limitada por propriedades físicas relativas ao duto de gás. O número de estações de compressão dependem do comprimento do duto.

As variáveis que influenciam no comportamento são o comprimento da linha, diâmetro, pressão de operação, após a definição do espaço entre as estações, a redução da potência é obtida utilizando-se grande diâmetros.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O modelo formulado resolve satisfatoriamente o problema de dimensionamento de um gasoduto apresentando no estudo de caso resultados compatíveis com a configuração apresentado pela PETROBRÁS.

Inicialmente concebido com uma variável de estado (pressão), o modelo evoluiu para uma formulação com duas variáveis de estado (pressão, localização), esta formulação apresentou melhora nos resultados da ordem de milhares de US\$. Esta melhora na configuração do sistema, ocorre devido a maior flexibilidade proporcionada ao modelo com o acréscimo da segunda variável de estado.

Em função dos resultados obtidos, que indicam eficiência do método aplicado para resolução do problema, visualizamos alguns pontos potenciais para o desenvolvimento futuro da questão, são eles:

- os índices utilizados para os modelos demandam constante atualização em função do desenvolvimento de novas tecnologias.
- comparação entre a tecnologia proposta e as demais técnicas utilizadas para resolução do problema

O volume armazenado na linha poderia compor a terceira variável de estado. Esta variável teria a função de garantir a confiabilidade do sistema. A inclusão de uma terceira variável de estado não constitui tarefa simples, o volume armazenado em cada trecho do duto acrescentaria um eixo gerador ao problema. Teríamos então um problema com três variáveis de estado pressão; localização; volume.

BIBLIOGRAFIA

- [ABHO] - Abrantes, Dayse ; Howard, Peter - III Congresso de gás - Petro&gás 10/92.
- [APRO] - APROGÁS - O gás natural e o Rio de Janeiro - Relatório 1993 AEPET.
- [ABG] - ABG - O gasoduto e a criogênia-casal 2000. 12/04/93.
- [ARME] - Armentano, V. A. - Programação Linear Dinâmica - Tese de Mestrado UNICAMP.
- [AVBR] - Avery, W. ;Brown, G.G. et alli - optimization of purchase, storage and transmission contracts for natural gas utilities - Op. Res. V. 40 N. 3 1992.
- [BEDR].- Bellman, Richard E. ; Stuart E. Dreyfus - Applied dynamic programming. Princeton University Press, Princeton, NY, 1962.
- [BEGG] - Beggs, H. Dale - Gas production operations - OGCI Publications - Oil&Gas Consultants International inc, Tulsa, 1991.
- [BIHI] - Bickel, T. C. ; D. M. Himmelblau ; T. F. Edgar - Optimal design of gastransmission net works - Society of Petroleum Engineers Journal pp 96-104, Abril (1978).
- [BHSA] - Bhaskaram, S. ; F. J. M. Salzbom - Opyimal diameter assignment for gas pipeline networks - J. Australian Mathematical Society 21(serieb) pp 129-144 1979.
- [BOHO] - Bosh, P. P. J. V. Den; Honderd, G. ; et alli - A hierarchial approach to dynamic optimization of power systems - Automatica v. 20 n. 2 PP201-203, 1984.
- [BOYC] - Boyce, Meherwan P. - Gas turbine engineering handbook, Houston: Gulf, 1987.

- [BRIT] - British, Petroleum - Gas making and natural gas - Ben Johnson&Co. Itda, York 1972.
- [BROO] - Brooks, Robert E. - Using generalized networks to forecast natural gas distribution and allocation during periods of shortage - Mathematical programming study pp 23-42 n.15 1981.
- [CHES] - GÁS NATURAL - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco-1987
- [CHRO] - Chagas, Nilo Koscheck Das; Rodrigues, Manuel G. - Com gás, rumo ao futuro - Ciência Hoje Vol. 15/ n.86.
- [COLL] - Collins, Willan J. - Intermediate Pascal Programming.
- [CONG] - Congás & Sociedade privada de gás-SPG - Bolívia-Brazil integrated gas project: Prespects for the participation of the private setor - São Paulo, july 1993.
- [COST] - Costa, Ennio Cruz da - Compressores - Edgard Blucher Ltda 1978.
- [CROC] - Crocker & King - Piping handbook New York: MCGRAW-HILL, 1967.
- [DELL] - Dell, R. C. - Preplanning pays off for huge U.S.S.R. compressor project - Oil&Gas journal v77, May, 14/1979
- [DEMAU] - Deffarges, Etienne H.; Maurer, Luiz T. A. - Growing Brazilian demand to spur gas network in South America. - Oil&Gas Journal. Jan/18/1993.
- [DOLO] - Dougherty, E. L.; Lombardino, E.; Hutichinson, P.; Goode, P. A. - Use of mathematical decomposition to optimize investments in gas production and distribution - Journal of petroleum, january 1986.
- [DYLU] - Dyer, James S.; Juna, Richard N.; Kuman, V.; Leone, Robert P. - A decision support system for priotzing oil and gas exploration activies - Operations research, v38, 3, may-june 1990

- [DUAL] - Duffuar, S.O. ; Al-Zayer, J. A.; AL-Marhow, M. A. ;Al-Saleh, M. A. - A linear programming model to evaluate gas availability for vital industries in Saudi Arabia - J. Op. Res. Soc. 1992 v43, n11, pp 1035-1045.
- [DUSL] - Durrer, E. J.; Slater, G. E. - Optimization of petroleum and natural gas production - A survey Management science 24,35/43.
- [FAGL] - Fariña, Ronald F.; Glower, Ferd W. - The application of generalized networks to chace of raw materials for fuels and petrochemicals - Energy models and studies 1983.
- [FEVI] - Ferrereira, José A. Soeiro; Vidal, René Vicor Valqui - Optimization of a pump-pipe system by dynamic programming - Engineering optimization, 1984 Vol 7, pp 241-151.]
- [FER1] - Ferreira, Ilton - Turbinas a gás - Petro&Gás 12/89.
- [GOME] - Gomes, Iêda C. - Programa para distribuição de gás natural Boliviano no Estado de São Paulo - COMGÁS.
- [GOKO] - Gomes, Iêda C.; Kondo, Sohata - Seminário sobre qualidade e uso de combustíveis para veículos pesados . Gás automotivo- A experiência de São Paulo - IBP.
- [GUED] - Guedes, Marcos A. - Comprar compressores. Petro&Gas 06/88.
- [GUNA] - Gunawardane, Gamini - Dynamic versions of set covering type public facility location problems. European journal of operation research 10 (1982) 190-195.
- [IKOK] - Ikoku, Chi U. - Natural gas reservoir engineering - John Wiley&SONs, 1984.
- [KACO] - Katz, D. L.; Cornell, David et alli - Handbook of Natural Gas - Engineering - Mc Graw Hill 1959.
- [KRUT] - Karassik, J. Igor; William, C. Krutzsch; Warren, H. Frases; Messma, Joseph P. - Pump handbook - Mc Graw-Hill 1985.

- [LADE] - Laporte, G. ;Dejax, P. J. - Dynamic Location-routeing Problems - J. OP. RES. SOC. V. 40 N. 5 pp 471-482, 1989.
- [LENO] - Levantino, Antonio; Noda, José Takahiro - Turbinas. Petro&Gás 11/93.
- [LODI] - Lodi, Carlos F. G. - Subsídios e preços de derivados de petróleo e de álcool no Brasil. - Petro&Gás 05/93 -93/51.
- [MIGU] - Miguel, Geide - Importar gás natural da Bolívia, preços a pagar.SINDIPETRO-CAMPINAS, informativo 06/92.
- [LACA] - Larson, Robert E.; Casti, John L. - Principles of dynamic programming - Part I, II, III, - Marcel Dekker, INC, NEW YORK 1978.
- [NOLT] - Nolte, Claude B. - Optimum pipe size selection - Trans Tech-Publications 1978.
- [NOVA] - Novaes, Antonio Galvão - Métodos de otimização aplicações aos transportes.
- [OLJE] - Olorunniwo, Festus O.; Jensen, Paul A. - Optimal capacity expansion policy for natural gas transmission networks-a decomposition approach - Engineering optimization, 1982, v2 pp13-30.
- [OSBE] - Osiadacz, A. J.; Bell, D.J. - A simplified algorithm for optimization of large-scale gas networks - Optimal control applications & methods, v7, 95 - 104 1986.
- [PETO] - Peretti, A.; Toth, P. - Optimization of a pipe-line for the natural gas transportation - European journal of op. research 247-254 n.11, 1982.
- [PALL] - Pallerosi, Carlos A. - Análise econômica da confiabilidade em sistema energéticos - Anais do I Congresso Brasileiro - UNICAMP, v4, 12/05/89.
- [POJE] - Poch, Leslie A.; Jenkins, R.T. - Dynamic Programming Models - Energy vol. 15, n° 7/8, pp 573-581, 1990.

- [POUL] - Poulallion, Paul - O sucesso da conversão da Central Nuclear de Midland- Petro&Gás 12/92.
- [POUL] - Poulallion, Paul - Manual de gás - CNI, 1986.
- [POUL] - Poulallion, Paul - Transportar o gás por dutos: uma arte. Petro&Gás 09/93.
- [POMD] - Poulallion, Paul; Moreira; L. A.; Domingues, J. L. R. - Protect the forest with LGN. SPE 26162 /1993.
- [PRYA] - Propoi, A. I.; Yadykin, A. B. - A parametric iterative method for the solution of linear dynamic programming problems - Automation and remote control 12/12/1975.
- [ROCH] - Rodrigues, Manuel Gonçalves; Chagas, Nilo Koscheck das, Com gás, rumo ao futuro - CIÊNCIA HOJE, Vol. 15/n. 86 1992.
- [RODR] - Rodrigues, Manuel G. - The use of pipelined fuel gas in Rio de Janeiro - Energy v17, 11, pp 1105-1107, 1992.
- [ROTH] - Rothfarb, R. - Optimal design of offshore natural gas pipeline systems - Operations Research nov/dez 1970.
- [SANT] - Santana, E. - Preço do gás natural-Um problema de otimização - Anais do I Congresso Brasileiro de Planejamento Energético - Campinas, SP, v.2 pp 289-300, 1989.
- [SILJ] - Siljak, D. D. - Complex dynamic systems: dimensionality, structure, and uncertainty. North-Holland publishing company, large scale systems 4(1983) 279-294.
- [SMDJ] - Smati, A.; Djelloul, A. - Optimisation des régimes de fonctionnement d'un oléoduc sur la base d'un modèle lineáire de régression. Revue de L'institut français du pétrole. v49, 1, Janvier-Février 1994.
- [SOMU] - Soliman, F. I.; Murtagh, B.A. - The solution of large-scale gas pipeline design problems - Engineering Optimization 1982 v6, pp 77-83.

- [TOMB] - Tombi, Ricardo L. - Mercado de gás natural automotivo no Brasil - Petro&Gás 6/91.
- [TRUE] - True, Warren R. - U. S. interstate pipelines begin 1993 on upbeat - Oil&Gsa journal 22/11/1993.
- [SALA] - Satia, Jay K.; Jr.; Ray E. Lave - Markovian decision processes with uncertain transaction probabilities. Naval research logistics quarterly. January 16, 1970.
- [SHKI] - Shenali, Hanif D.; Kim, Seong-in; Panish, Edna L. - Probabilistic set covering problems. Naval research logistics. v38,pp41-51(1991).
- [SOMU] - Soliman, F. I.; Murthag, B. A. - The solution of large-scale gas pipeline design problems - Engineering optimization, 1982 v6 pp77-83.
- [SZID] - Szidarovsk, Ferenc; Duckstein, Lucien - Dynamic multiobjective optimization: A framework with application to regional water and mining management.
- [WILL] - Will, Robert K. - Thermodynamics for engineering technologists - Marcel Dekker, Inc. 1979.
- [WISTM] - Wismer, D. A. - Optimization methods for large scale systems.
- [VILA] - Villarreal, Bernardo; Karwan, Mark H. - Multicriteria integer programming: A (hybrid) dynamic programming recursive approach. Mathematical programming 21(1981).
- [ZAMI]- Zampieri, Giuliano; Micheli, Francisco - Transmed compressor stations posed design challenges. Oil&gas journal, nov 7, 1988.