

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Paulo
Moreira de Carvalho e aprovada
pela comissão julgadora em 06.12.1993

Eugênio Spanó
ORIENTADOR

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

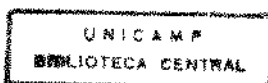
MODELAGEM DE PROCESSO EM UM SISTEMA
DE SEPARAÇÃO SUBMARINA DE PETRÓLEO.

Autor: Paulo Moreira de Carvalho 253

Orientador: Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa t

62/93

dezembro de 1993

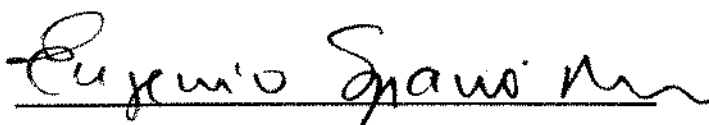


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

A dissertação " Modelagem de Processo em Um Sistema de Separação Submarina de Petróleo ", elaborada por Paulo Moreira de Carvalho foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 6 de Dezembro 1993.

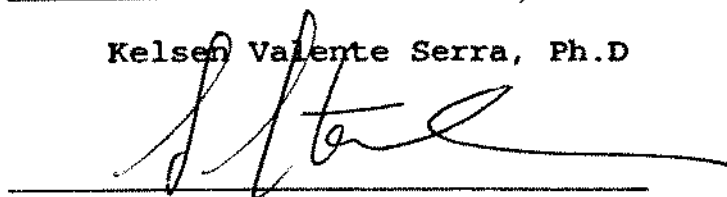
Banca Examinadora



Eugênio Spanó Rosa, Ph.D



Kelsen Valente Serra, Ph.D



Sidney Stuckenbruck, Ph.D

" Se a miséria de nossos pobres não é causada pelas leis da
natureza, mas por nossas instituições,
grande é a nossa culpa."

Charles Darwin

" O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é
o dicionário."

Albert Einstein

Frases do tipo " Dedico à Eliana e Mariana, esposa e filha, Paulo e Maria, pai e mãe "; " Agradeço aos Professores Dr. Eugênio, Dr. Iberê, Dr. Kelsen e outros, pelo incentivo, amizade e dedicação ", são encontradas nas primeiras páginas de toda dissertação que tive oportunidade de consultar. Estas palavras escrevi, em uma primeira versão, ao começar esta parte final de minha tese. Considero que este procedimento, padronizado, passou a ser encarado como uma parte obrigatória da dissertação. Não sou contra isto. Gostaria, entretanto, de fazer outro uso desta parte inicial pois meu amor, carinho e respeito a estas pessoas procuro demonstrar no cotidiano e não vejo sentido em passar a você leitor.

Quero lhe passar algo para pensar. Se está lendo este trabalho, certamente você pertence a uma parcela muito pequena de nosso povo. Uma parcela muito pequena, porém muitíssimo importante. Creio, fortemente, que o destino de nossa pátria depende muito da nossa iniciativa.

Com certeza você percebe o estado de pobreza de grande parte do povo brasileiro, hoje. Se você se sente impotente para modificar este quadro saiba que isto não é motivo para acomodar-se. Se cada um de nós procurar, iremos encontrar a nossa forma de contribuir, dentro de nossa atividade. Veja bem, muito já me cobrei sobre o que poderia um engenheiro de petróleo fazer para ajudar. Hoje percebo que, não só o engenheiro como o estudante, a

doméstica, o agricultor e todos enfim, ajudam individualmente fazendo bem o seu trabalho. Se cada uma destas pessoas se ocupar de não apenas fazer bem o seu trabalho mas, além disto, conscientizar outras pessoas a também fazê-lo e a conscientizar a outras, já teremos dado um primeiro passo. Isto pode parecer óbvio mas lhe pergunto: Já se preocupou em fazer algo parecido? Com quantas pessoas conversou a respeito de melhorar as condições de vida da parcela pobre do nosso povo?

Quando, hoje, termino este trabalho, espero estar contribuindo de duas formas distintas: a primeira como engenheiro de petróleo ao apresentar um simulador computacional que, caso devidamente validado, poderá vir a ser útil em eventuais estudos de viabilidade técnica, econômica e de controle de processo; a segunda como cidadão ao lhe levar a refletir sobre a importância não só de seu trabalho, como também de sua atitude e papel de conscientização em nossa sociedade.

NOMENCLATURA

A	Área da Seção do Gasoduto.	m^2
A_{Cam}	Área da Câmara de Separação.	m^2
A_o	Área da Seção do Óleoduto.	m^2
a	Velocidade da onda acústica no Líquido.	m/s
B	Velocidade da onda acústica no Gás.	m/s
D	Diâmetro do Gasoduto.	m
D_o	Diâmetro do Óleoduto.	m
e	Espessura da Parede do Oleoduto	m
E	Módulo de Elasticidade de Young	-
f	Fator de Atrito de Darcy p/Gasoduto	-
f_o	Fator de Atrito de Darcy p/Oleoduto	-
g	Aceleração da Gravidade.	m/s^2
H	Altura Manométrica (<i>Head</i>)	m
h	Altura de Líquido na Câmara	m
K	Módulo de Elasticidade	-
K1	Const. 1 Características dos Gasodutos	$1/ms$
K2	Const. 2 Características dos Gasodutos	kg/ms^4
K3	Const. 3 Características dos Oleodutos	s/m^2
K4	Const. 4 Características dos Oleodutos	s^2/m^6
L	Comprimento do Oleoduto.	m
L_{Cam}	Altura Total da Câmara	m
LG	Comprimento do Gasoduto.	m
M	Vazão Mássica de Gás.	kg/s
n	Normal à Superfície de Controle	-
NTR	Número de Trechos do Gasoduto	-
NTO	Número de Trechos do Oleoduto	-

p	Pressão.	MPa
Q	Vazão Volumétrica de Líquido.	m ³ /s
R	Constante Universal dos Gases.	kgm ² /s ² Kmol
R _{GN}	Constante para Gás Natural (R/mol).	m ² /s ² K
RGL	Razão Gás Líquido da Formação.	m ³ /m ³
T	Temperatura Absoluta.	K
t	Tempo.	s
u	Componente da Velocidade Direção x.	m/s
v _b	Velocidade de Superfície de Controle	m/s
v _r	Velocidade de Entrada do Gás no VC.	m/s
$\vec{V}$	Vetor Velocidade	m/s
x	Posição.	m
Z	Fator de Compressibilidade	-
Δx	Diferença de Posição	m
Δt	Intervalo de Tempo	s
γ	Razão de Calores Específicos Cp/Cv.	-
μ	Razão de Poisson	-
ρ	Massa Específica do Gás.	kg/m ³
ρ_o	Massa Específica do Óleo.	kg/m ³
τ_w	Tensão de Cisalhamento	N/m ²

SUBSCRITOS

A	Ponto A
B	Ponto B
P	Ponto P
o	Óleo
g	Gás
Cam	Câmara
i	Intervalo Tempo Anterior

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
Breves Fundamentos da Produção de Petróleo.....	1
O Problema.....	3
As Vantagens da Separação Submarina de Petróleo.....	3
Descrição do Sistema Físico do PETROBOOST.....	5
Seqüência de Operação do PETROBOOST.....	8
O Objetivo.....	9
Abordagem do Problema.....	9
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
CAPÍTULO 3 MODELAGEM DO ESCOAMENTO NOS GASODUTOS.....	16
Balanço de Massa - Equação da Continuidade.....	16
Balanço de Quantidade de Movimento.....	17
Método das Características.....	18
Discretização das Equações Características.....	24
CAPÍTULO 4 MODELAGEM DO ESCOAMENTO NO OLEODUTO.....	27
Balanço de Quantidade de Movimento.....	27
Balanço de Massa - Equação da Continuidade	28
Método das Características.....	31
Discretização das Equações.....	32
CAPÍTULO 5 CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	35
Câmara de Alta Pressão.....	36
Considerações Sobre os Comprimentos dos Trechos dos	
Dutos Acoplados.....	43
Câmara de Baixa Pressão.....	45
CAPITULO 6 O ALGORITMO DE CÁLCULO.....	49
Cálculo dos Dutos Independentemente.....	49
Validação dos Cálculos para os Gasodutos.....	51

Cálculo do Sistema Acoplado.....	53
CAPÍTULO 7 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	56
CAPÍTULO 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	73
CONCLUSÕES.....	73
RECOMENDAÇÕES.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
ANEXOS.....	81
ANEXO A - Fluxogramas.....	81
ANEXO B - Desenvolvimento Algébrico do Sistema dos Gasodutos.....	83
ANEXO C - Desenvolvimento do Sistema Algébrico do Acoplamento.....	89

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Breves Fundamentos da Produção de Petróleo.

A produção de petróleo, do reservatório para o poço, se dá pelo diferencial de pressão que se promove entre ambos ($P_{res} - P_{poço}$). Na figura 1.1 abaixo, este comportamento está ilustrado pela curva 1, denominada IPR (do inglês *Inflow Performance Relationship*), e representa a pressão disponível na cabeça do poço devida ao reservatório. Por outro lado, a vazão da cabeça do poço para o separador na facilidade de produção, de forma genérica, é função do diferencial de pressão entre ambos. Isto é, a vazão da cabeça do poço para o separador está relacionada à diferença $P_{poço} - P_{sep}$. Este comportamento está representado na figura 1.1 pela curva 2, denominada OPR (do inglês *Outflow Performance Relationship*), e significa a pressão requerida no escoamento multifásico para uma geometria específica. Como podemos observar pelo gráfico, existe uma interseção entre as curvas de pressão disponível e pressão requerida que é o ponto de equilíbrio onde se dá a operação do sistema. A vazão correspondente a este ponto é conhecida como vazão natural ou de surgência.

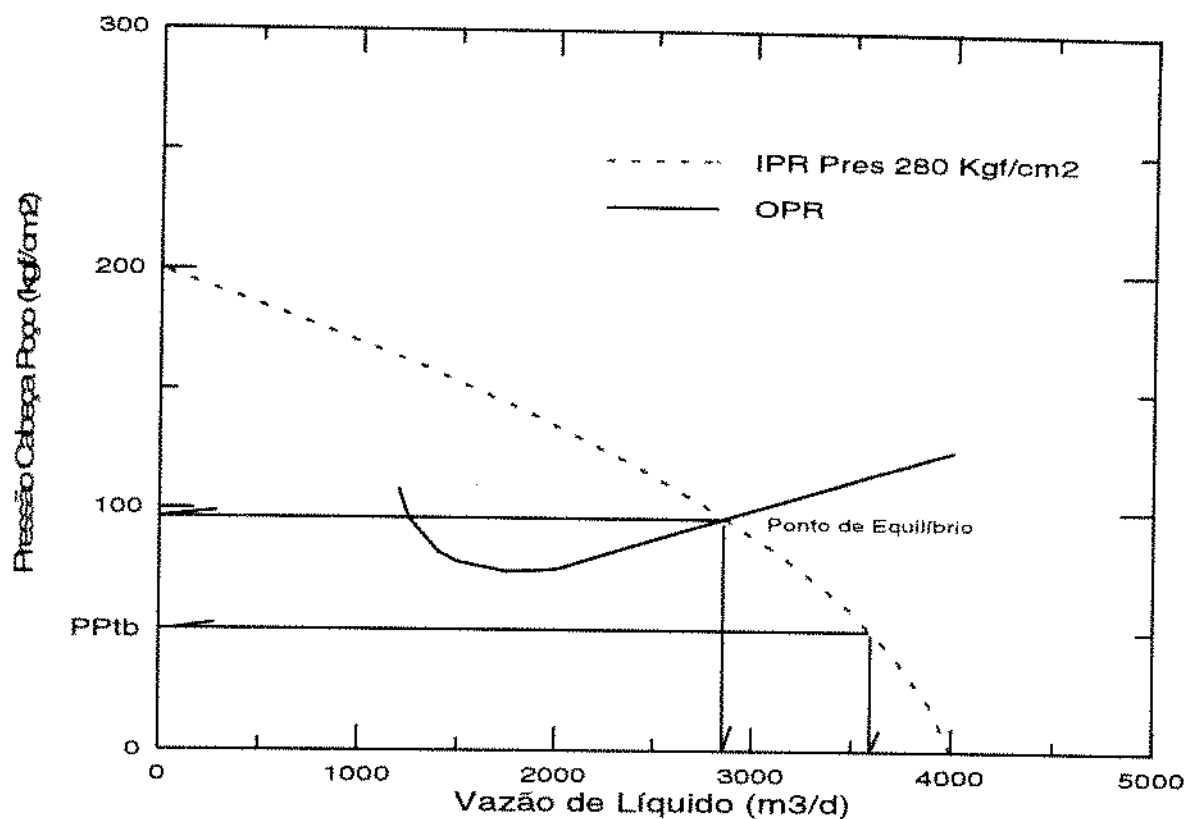


Figura 1.1: Pressões disponível (IPR) e requerida (OPR) versus vazão.

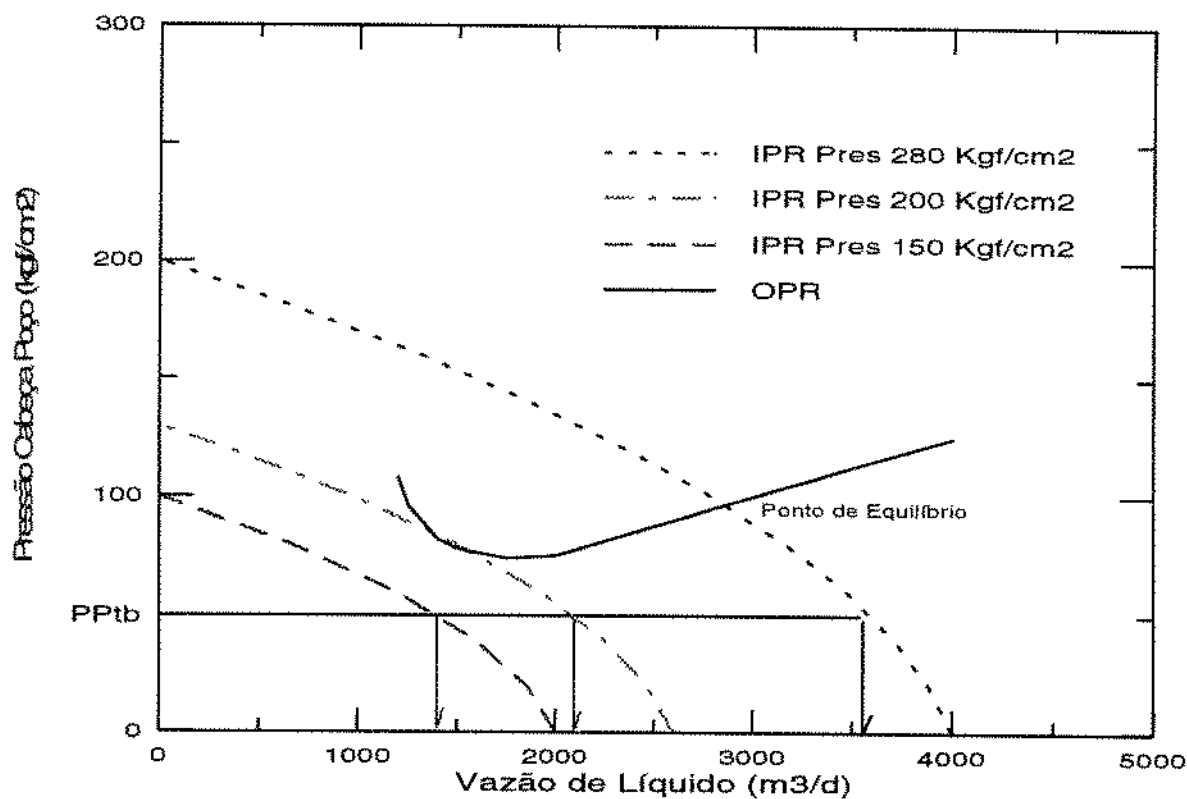


Figura 1.2: IPR's em função da queda da pressão de reservatório

O Problema.

A separação submarina do petróleo, em duas correntes monofásicas distintas de óleo e gás e o fornecimento de energia a estas correntes para o transporte até às plataformas de produção, vem sendo estudada como uma das mais promissoras alternativas para utilização na exploração de reservas de hidrocarbonetos *offshore* em águas profundas. A PETROBRÁS possui a patente de um sistema, conhecido por **PETROBOOST®**[1,2], que explora esta concepção. Este sistema prevê a separação submarina do petróleo e seu transporte por ação de uma corrente de gás a alta pressão fornecida pela plataforma de produção. A Modelagem Transiente deste Sistema ainda não foi realizada e, portanto, ainda não foram feitas simulações, rigorosas e confiáveis, de seus comportamento e desempenho.

As Vantagens da Separação Submarina de Petróleo.

A introdução de um separador de petróleo, no fundo do mar, entre a cabeça do poço e a plataforma de produção colabora para a manutenção de baixas pressões em todo o sistema, diminuindo a contra pressão nos poços e, conseqüentemente, aumentando as vazões de equilíbrio.

As principais vantagens de um sistema de separação submarina de petróleo são a redução da perda de carga dos escoamentos monofásicos quando comparados às dos escoamentos multifásicos e o fato de se poder dispensar a utilização da

energia de pressão dos reservatórios para o escoamento da cabeça do poço até a facilidade de produção pois promoveremos um fornecimento de energia da plataforma. Como não utilizamos a energia de pressão dos reservatórios podemos trabalhar com uma menor pressão na cabeça dos poços, nas figuras 1.1 e 1.2 indicada por P_{ptb} , causando uma menor resistência à produção imposta à fonte. Esta menor contra-pressão sentida pela cabeça do poço de petróleo facilita as condições de produção do mesmo resultando em um aumento de vazão. No exemplo hipotético da figura 1.1, passaríamos de uma vazão inicial de 2800 m³/d para aproximadamente 3600 m³/d.

Além do aumento da vazão, esta redução também irá permitir um aumento das reservas explotáveis. Este volume de óleo adicional que se pode produzir é o resultado do aumento do período de vida útil das formações reservatório. Isto é, um determinado reservatório necessita de uma pressão mínima para conseguir produzir para uma facilidade de produção segundo um arranjo pré-definido, em escoamento multifásico. Quando promovemos a separação submarina na própria cabeça do poço e fornecemos energia para a transferência da fase líquida esta pressão diminui e o reservatório poderá continuar produzindo até que nova pressão seja atingida. Este fato é ilustrado na figura 1.2 onde mostramos, com um exemplo, o ganho obtido com o emprego de um sistema de separação submarina de petróleo, em termos de continuidade de produção com a queda da pressão do reservatório. Neste exemplo, antes de atingir a pressão de 200 kgf/cm² o reservatório já teria perdido condições de produzir com sua

própria energia. Com a utilização do dispositivo ele continuaria produzindo até a pressão cair a nível de pouco mais de 150 kgf/cm².

Descrição do Sistema Físico do PETROBOOST.

O sistema PETROBOOST promove a separação submarina do petróleo e o transporte do óleo e gás separados até a superfície. A energia para o transporte do óleo é fornecida por uma fonte de gás a alta pressão proveniente da plataforma de produção. O gás separado escoar até a plataforma por um gasoduto, pela própria pressão de separação. Em linhas gerais o sistema é composto por (ver figuras 1.3 e 1.4):

- Uma fonte de petróleo. Esta fonte de alimentação poderá ser um único poço isolado ou um conjunto de poços independentes, localizados em *cluster* ou reunidos em *Manifold* Submarino de Produção **MSP**.
- Um conjunto de câmaras ou vasos de separação onde efetivamente ocorre a separação do petróleo produzido em duas correntes distintas de óleo e gás.
- Dois gasodutos, um de alta pressão e outro de baixa pressão. Pelo gasoduto de baixa pressão se dá a exportação, para a plataforma de produção, de todo o gás do sistema liberado à baixa pressão. O gasoduto de alta pressão tem por finalidade conduzir o gás comprimido da plataforma até as câmaras. Este gás irá pressurizar o óleo separado para permitir sua transferência até a plataforma.

- Um oleoduto para o transporte do óleo produzido até a plataforma.
- Dispositivo de controle para enviar os sinais de comandos para a necessária comutação das válvulas de bloqueio que possibilitam alterar o alinhamento das câmaras aos dutos. Não pretendemos, neste trabalho, entrar no detalhamento do dispositivo de controle.

A figura 1.4 ilustra o conjunto de válvulas de bloqueio e as ligações das câmaras com os diversos dutos. Nesta figura, as válvulas 1, 4, 5 e 8 se encontram abertas enquanto que as válvulas 2, 3, 6 e 7 se encontram fechadas. Portanto, a câmara 1 está alinhada à fonte e ao gasoduto de baixa pressão. Já a câmara 2 está alinhada com o gasoduto de alta pressão e o oleoduto. Daqui para frente, a título de simplificação, denominaremos câmara de alta ou baixa pressão àquela que estiver alinhada, respectivamente, ao gasoduto de alta ou baixa pressão. O alinhamento das câmaras aos gasodutos é alternado, de modo cíclico, durante toda a operação do sistema.

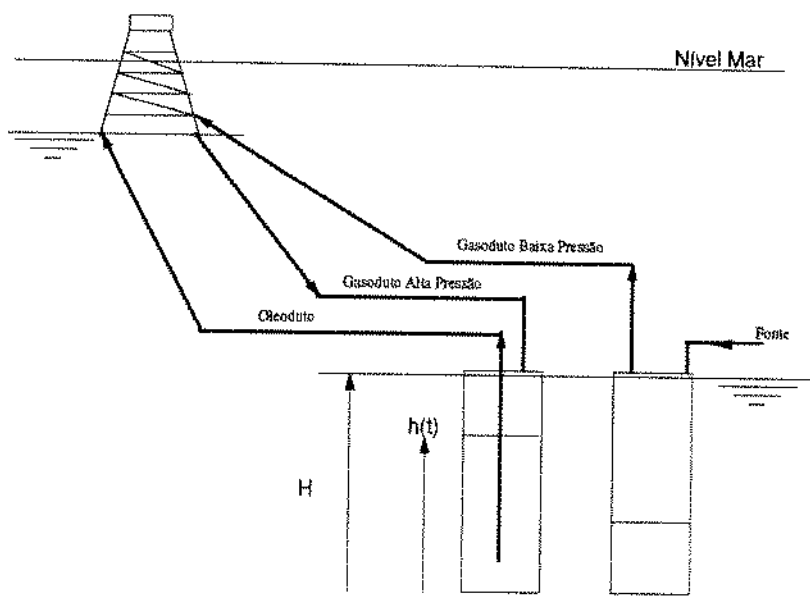


Figura 1.3: Diagrama Esquemático do Sistema PETROBOOST

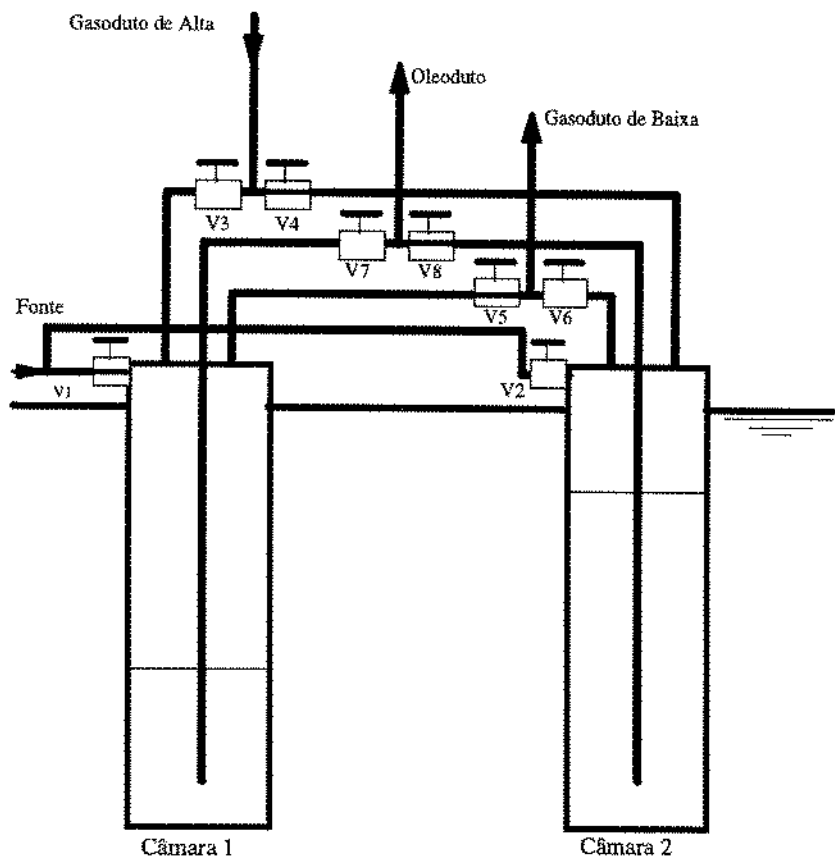


Figura 1.4: Diagrama Esquemático das Câmaras de Separação e Válvulas de Controle

Seqüência de Operação do PETROBOOST.

Um ciclo completo de operação do sistema é composto de duas etapas consecutivas que denominaremos etapa de abastecimento do petróleo, Etapa A, e etapa de transferência do óleo, Etapa T .

Na etapa A, a câmara de baixa pressão está alinhada com a fonte de petróleo e com gasoduto de baixa pressão (câmara 1 da figura 1.4). Nesta etapa o petróleo flui da fonte alimentando a câmara de baixa e o gás total produzido é escoado pelo gasoduto de baixa pressão até a plataforma de produção. As válvulas que ligam esta câmara à fonte e ao gasoduto de baixa pressão (V1 e V5) estão abertas enquanto as válvulas que ligam esta câmara ao oleoduto e ao gasoduto de alta pressão (V3 e V7) estão fechadas.

A etapa T, se inicia quando a câmara que acaba de ser abastecida com o petróleo, é transformada em câmara de alta, por seu alinhamento com o gasoduto de alta pressão, e simultâneamente alinhada ao oleoduto. Ela passará a transferir o óleo até a plataforma de produção. O dispositivo de controle modifica as posições de abertura e fechamento das válvulas da câmara. As válvulas que a ligam ao oleoduto e ao gasoduto de alta pressão (V4 e V8) estão abertas e as válvulas que ligam esta câmara à fonte e ao gasoduto de baixa pressão (V2 e V6) estão fechadas.

Concluído o ciclo inicial, a operação do sistema continua de forma que a todo tempo teremos as duas etapas do ciclo acontecendo simultâneamente nas câmaras 1 e 2 da figura

1.4. A câmara de baixa estará sempre na etapa de abastecimento e a de alta na etapa de transferência. A tabela abaixo mostra as posições de cada válvula do sistema em cada uma das etapas do ciclo.

	Etapa			
	Abastecimento		Transferência	
	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada
Câmara 1	V1 V5	V3 V7		
Câmara 2			V4 V8	V2 V6
Câmara 2	V2 V6	V4 V8		
Câmara 1			V3 V7	V1 V5

Tabela (1.1): Posição das Válvulas nas Etapas do Ciclo.

O Objetivo.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo que represente o comportamento dinâmico do sistema PETROBOOST. O modelo deve ser capaz de prever:

- As vazões, de óleo e gás, nos dutos em função do tempo;
- As pressões nos dutos, compressor e câmaras de separação em função do tempo;
- Pressão e vazão necessárias do compressor de alta pressão.

Abordagem do Problema.

Tratamos este sistema como um conjunto de quatro sub-

sistemas acoplados: Gasoduto de Alta Pressão, Gasoduto de Baixa Pressão, Oleoduto e Câmaras de Separação. Estudamos os sub-sistemas isoladamente e depois tratamos do acoplamento dos mesmos para obter a simulação do funcionamento do sistema como um todo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido a originalidade do PETROBOOST, sistema inventado e patenteado [1,2] pela PETROBRÁS em 1987, não encontramos na literatura qualquer trabalho técnico ou científico que estude o seu comportamento ou modele o seu funcionamento como um sistema único. Já os sub-sistemas que o compõe são bastante conhecidos e estudados na literatura.

Streeter e Wylie [3, 4, 5, 6] são considerados uns dos principais responsáveis pelos estudos e modelagens numéricas dos fenômenos transientes no escoamento de fluidos monofásicos. Eles iniciaram seu trabalho [3] pelo estudo de transientes hidráulicos interessados pelo fenômeno golpe de Ariete (*Waterhammer*), principalmente. Stoner [7], orientado por Streeter e Wylie, conduziu estudos da análise transiente de gasodutos e sistemas de gasodutos em seu trabalho de tese de doutorado.

Streeter [8], em 1972, fez um breve resumo histórico do tratamento de escoamentos transientes de líquidos em tubulações e realizou uma avaliação comparativa entre os métodos explícito, representado pelo método das características, e implícito de solução do problema. Neste trabalho ele apresentou as principais vantagens do método explícito sobre o implícito e exemplificou com o resultado do emprego do método das características a diversas condições de contorno complexas.

O texto básico no qual nos baseamos para o estudo do comportamento transiente dos dutos foi Wylie e Streeter [9]. Trata-se de um volume dedicado exclusivamente ao estudo de transientes em fluidos monofásicos. Em seu capítulo introdutório ele apresenta a metodologia geral para a análise dos escoamentos transientes em dutos e os diversos métodos possíveis de serem empregados para a solução.

Wylie e Streeter [9], quando do tratamento dos transientes em dutos para gás natural se utilizaram dos resultados obtidos por Yow [10,11]. Em seu trabalho, Yow fez uma avaliação de diferentes métodos de solução do problema comparando os métodos numéricos de diferenças finitas, explícito e implícito, e o método das características. Ele concluiu que o método das características foi o melhor com excelente concordância entre resultados previstos e observados experimentalmente. Yow observou, em seu trabalho, que a única desvantagem do método das características é o seu longo tempo de computação, devido à exigência do incremento de tempo não ser maior que o tamanho do trecho dividido pela velocidade isotérmica da onda acústica no meio. Esta relação se faz necessária para garantir a estabilidade da solução. Para superar esta desvantagem, Yow propôs a utilização de um artifício para contornar o problema. Sua idéia baseava-se na suposição de que as componentes inerciais no gás são desprezíveis quando comparadas à outras e, portanto, o aumento dos efeitos inerciais dentro de certos limites deveria causar uma influência muito pequena no equilíbrio dinâmico ou na conservação da massa do sistema. Ele propôs,

então, a utilização de um fator multiplicador por ele denominado Multiplicador Inercial. Com este tratamento, Yow conseguiu a utilização de um maior intervalo de tempo na simulação numérica com o método das características, reduzindo o tempo de computação. A utilização deste artifício implicava em inserir um erro na resposta do sistema. Para quantificar este erro, Yow fez uma comparação da resposta do sistema ao resultado obtido com o emprego de uma solução semi-analítica, conhecida para uma condição específica. Com este procedimento Yow conseguiu estabelecer uma faixa de aplicabilidade de seu multiplicador inercial assim como um critério para definir o comprimento permitido do trecho para cada problema de análise de escoamento transiente.

Brekke [14], em 1990, apresentou um trabalho em que desenvolveu um sistema de separação e transferência de óleo. A principal característica deste sistema era a utilização da energia do próprio reservatório para promover o transporte das correntes separadas desde o local de produção até as estações de coleta. Seria, portanto, a princípio, um sistema que dispensaria a utilização de bombas ou compressores. O processo se baseava na separação do petróleo a alta pressão em um primeiro estágio. O gás a alta pressão liberado neste estágio de separação seria empregado para promover o transporte do óleo estabilizado em um segundo estágio de separação. Neste trabalho foi construído um simulador computacional para o sistema. A modelagem de todo o sistema foi feita admitindo-se regime permanente, isto é, não foram considerados os efeitos transientes no escoamento dos fluidos

nem na dinâmica de separação das fases. Por outro lado Brekke adotou um rigoroso método composicional nos cálculos termodinâmicos e de balanço de massa. Ao final de seu trabalho Brekke concluiu, baseado nos resultados apurados com o simulador construído, que o sistema apresentava uma vantagem de 25% com relação à capacidade de transporte de óleo quando comparado com um sistema de separação de um único estágio. Ao comparar à um sistema de transporte multifásico ele apresentava uma vantagem de 100% se se considerar o duto multifásico de mesmo diâmetro do duto monofásico. Já considerando o diâmetro do duto multifásico o equivalente aos dois dutos monofásicos necessários à operação do sistema o resultado foi uma desvantagem do sistema de 12%. Ele concluiu sobre a conveniência de utilização de um compressor para o gás a fim de se obter uma operação suave do sistema. Duas outras conclusões que julgamos muito importantes foram: a espessura da camada de superfície do óleo que recebe gás em solução quando da pressurização é muito pequena; e que o comprimento mínimo do gasoduto de baixa pressão para permitir a formação de golfada (*slug*) é muito maior que qualquer comprimento prático para gasodutos de baixa pressão.

Abbott[15], em 1966, escreveu um volume em que apresentou o método das características de forma bem clara, elegante e abrangente. Ele relatou que os primeiros estudos sobre propagação de ondas resolvidos com o emprego do método das características foram conduzidos por D'Alambert e Euler em meados do século 18. Este trabalho, desenvolvido originalmente, em estudos de comportamento linear de cordas

vibrantes, foi estendido ao estudo não linear de ondas pneumáticas por Poisson, que demonstrou as propriedades da região de ondas. Quase que simultâneamente, Monge apresentou um trabalho no qual as propriedades das características foram demonstradas em termos da geometria cinemática e subsequentemente utilizadas, explicitamente, para obtenção da solução da equação da onda linear. O estudo das características tem continuidade e foi estendido por matemáticos franceses principalmente Goursat. Entretanto deve-se a Earnshaw e a Riemann, trabalhando independentemente um do outro, a primeira aplicação do método das características aos problemas de dinâmica dos gases. Hadamard[16], baseado parcialmente no trabalho de Riemann, apresentou uma visão mais fundamental do problema utilizando avançados conceitos físicos e matemáticos conjugados. Courant[17,18] resumiu os principais progressos conseguidos na teoria das características, suas aplicações e sua relação com as modernas teorias de funções ideais ou distribuições.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM DO ESCOAMENTO NOS GASODUTOS

As equações básicas que utilizamos no desenvolvimento do modelo de nosso sistema são as leis de conservação para sistemas físicos sem reações químicas ou nucleares. Estas leis são as de conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia.

Com o objetivo de limitar o escopo deste trabalho vamos admitir a hipótese de escoamento isotérmico. Neste caso podemos dispensar a equação de balanço de energia para o sistema.

Balanço de Massa - Equação da Continuidade.

A equação de conservação da massa é expressa pela equação 3.1 abaixo.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (3.1)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, t o tempo, $\nabla \cdot$ o operador divergente e $\vec{V}$ o vetor velocidade.

Admitindo propriedades uniformes podemos integrar a equação (3.1) em um volume de controle arbitrário $dV = A dx$ onde A é a área da seção transversal suposta constante e dx é o comprimento infinitesimal na direção do escoamento.

$$\int_{V_c} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{V_c} \nabla \cdot (\rho \vec{V}) dV = 0 \quad (3.2)$$

Aplicando o teorema de divergência de Gauss-Ostrogradskii segundo Bird [19] teremos:

$$\int_{V_c} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{S_c} \vec{n} \cdot (\rho \vec{V}) dS = 0, \quad (3.3)$$

onde $\vec{n}$ é o vetor normal à superfície de controle.

Admitindo, por hipótese, o escoamento unidimensional na direção x , teremos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} A \Delta x + \left[\left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \Delta x \right) \left(u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x \right) - \rho u \right] A = 0 \quad (3.4)$$

onde u é a componente do vetor velocidade na direção x .

Desenvolvendo a equação (3.4), desprezando o termo de infinitésimo de segunda ordem e dividindo por $A \Delta x$ chegamos a forma final da equação de conservação da massa para o escoamento unidimensional na direção x .

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3.5)$$

Balanco de Quantidade de Movimento.

O balanço de quantidade de movimento realizado sobre um elemento infinitesimal de volume resulta na seguinte relação ,conforme apresentado em Bird [19]:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p - \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g}, \quad (3.6)$$

onde $\frac{D}{Dt}$ representa a derivada substantiva, $\bar{\tau}$ o tensor das tensões e $\bar{g}$ o vetor das forças de campo (no nosso caso somente a força gravitacional g).

Admitindo a hipótese de escoamento unidimensional na direção x , integrando no volume de controle $dV = A dx$ e aplicando-se o teorema de divergência de Gauss teremos:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{4}{D} \tau_w - \rho g \sin \theta, \quad (3.7)$$

onde θ é o ângulo do tubo com a horizontal considerado positivo para elevação crescente com o eixo x e τ_w é a tensão na parede do tubo.

Método das Características

A modelagem para os gasodutos nos conduziu a um sistema de duas equações diferenciais parciais, as equações 3.5 e 3.7. Para a solução deste sistema vamos, inicialmente, transformar estas equações em um sistema de equações diferenciais ordinárias. Para tanto vamos utilizar o Método das Características.

Identificando L_1 à equação da continuidade e L_2 à equação do momento como a seguir:

$$L_1 = \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (3.8)$$

$$L_2 = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{4}{\rho D} \tau_w + g \sin \theta = 0 \quad (3.9)$$

e combinando estas duas equações linearmente através um multiplicador λ desconhecido temos:

$$L = \lambda \cdot L_1 + L_2 = 0. \quad (3.10)$$

A velocidade do som no fluido, B , é um parâmetro muito importante no estudo dos escoamentos compressíveis. Slattery [20], apresenta uma dedução rigorosa do cálculo desta velocidade a partir da equação da continuidade, da primeira lei de Cauchy e de um balanço diferencial de energia. Para um gás real podemos escrever:

$$B^2 = \frac{p}{\rho} , \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{B^2} \frac{\partial p}{\partial t} , \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = B^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} . \quad (3.13)$$

Para o cálculo do valor de B vamos utilizar a equação de estado para gás real

$$p = \rho Z R_{GN} T , \quad (3.14)$$

onde a compressibilidade Z do Gás Natural é admitida constante no intervalo de pressão de operação e a constante

dos gases para um gás natural cujo peso molecular médio é conhecido é dada por $R_{GN} = \frac{R}{mol_{GN}}$, onde R é a constante universal dos gases e mol_{GN} é o peso molecular médio do gás.

Assim sendo temos B é constante em todos os trechos dos gasodutos e seu valor é dado por:

$$B = \sqrt{\gamma Z R_{GN} T} \quad , \quad (3.15)$$

onde γ é a razão entre os calores específicos do gás.

Substituindo as equações 3.8, 3.9, 3.12 e 3.12 na equação 3.10 e reagrupando temos:

$$\lambda \left[\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} \left(u + \frac{B^2}{\lambda \rho} \right) \right] + \left[\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} (u + \lambda p) \right] + \frac{4\tau_w}{\rho D} + g \sin \theta = 0 \quad . \quad (3.16)$$

Considerando que

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial p}{\partial t} \quad , \quad (3.17)$$

e comparando com o primeiro termo entre parênteses na equação 3.16 obtemos

$$\frac{dx}{dt} = u + \frac{B^2}{\lambda \rho} \quad . \quad (3.18)$$

Da mesma forma considerando

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial u}{\partial t} \quad , \quad (3.19)$$

e comparando com segundo termo entre parênteses na equação 3.16 obtemos

$$\frac{dx}{dt} = u + \lambda \rho \quad (3.20)$$

Igualando as equações 3.18 e 3.20 obtemos o valor do multiplicador λ

$$\frac{dx}{dt} = u + \frac{B^2}{\lambda \rho} = u + \lambda \rho \Rightarrow \lambda = \pm \frac{B}{\rho} \quad . \quad (3.21)$$

Substituindo na equação 3.10 de definição de L , teremos:

$$\frac{du}{dt} \pm \frac{1}{B\rho} \frac{dp}{dt} + \frac{4\tau_w}{\rho D} + g \sin\theta = 0 \quad , \quad (3.22)$$

desde que

$$\frac{dx}{dt} = u \pm B \quad (3.23)$$

As equações 3.22, chamadas de Equações de Compatibilização, são válidas para cada uma das Direções Características definidas pelas equações 3.23.

Para o nosso problema é conveniente trabalharmos com a vazão mássica M em lugar da velocidade u . Estas variáveis estão relacionadas da seguinte forma:

$$M = \rho u A \Rightarrow u = \frac{M}{\rho A} \quad (3.24)$$

Neste sentido a equação 3.22 é manipulada de maneira que a equação resultante seja dependente de M e P .

$$\frac{du}{dt} = \frac{B^2}{A} \frac{d\left(\frac{M}{p}\right)}{dt} = \frac{B^2}{A} \left(\frac{1}{p} \frac{dM}{dt} - \frac{M}{p^2} \frac{dp}{dt} \right) \quad (3.25)$$

$$\frac{B^2}{A} \left(\frac{1}{p} \frac{dM}{dt} - \frac{M}{p^2} \frac{dp}{dt} \right) \pm \frac{1}{B\rho} \frac{dp}{dt} + \frac{4\tau_w}{\rho D} + g \sin \theta = 0 \quad (3.26)$$

$$\frac{B^2}{A p} \frac{dM}{dt} + \left(\pm \frac{1}{B\rho} - \frac{B^2}{A} \frac{M}{p^2} \right) \frac{dp}{dt} + \frac{4\tau_w}{\rho D} + g \sin \theta = 0 \quad (3.27)$$

multiplicando por ρ a equação 3.27 temos:

$$\frac{1}{A} \frac{dM}{dt} + \frac{1}{B} \left(\pm 1 - \frac{M B^3 \rho}{A p^2} \right) \frac{dp}{dt} + \frac{4\tau_w}{D} + \rho g \sin \theta = 0 \quad (3.28)$$

considerando que

$$\frac{M B^3 \rho}{A p^2} = \frac{\rho u A \rho B^3}{A p^2} = \frac{u \rho^2 B^3}{p^2} = \frac{u}{B} \quad (3.29)$$

$$\frac{1}{A} \frac{dM}{dt} + \frac{1}{B} \left(\pm 1 - \frac{u}{B} \right) \frac{dp}{dt} + \frac{4\tau_w}{D} + \rho g \sin \theta = 0 \quad (3.30)$$

Como para o nosso problema a velocidade do som é muito maior que a velocidade do fluido podemos fazer as seguintes aproximações:

$$\pm 1 - \frac{u}{B} \equiv \pm 1 \quad \frac{dx}{dt} = u \pm B \equiv \pm B \quad (3.31, 32)$$

A tensão na parede do tubo é modelada utilizando o fator de atrito de Darcy-Weisbach para regime permanente.

$$\tau_w = \frac{\rho f u^2}{8} = \frac{\rho f M^2 B^4}{8 p^2 A^2} = \frac{f M^2 B^2}{8 p A^2} \quad (3.33)$$

Utilizando a aproximação da equação 3.31 e a equação 3.2 para a tensão podemos reescrever a equação 3.30:

$$\frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \pm \frac{1}{B} \frac{dp}{dt} + \frac{p g \sin \theta}{B^2} + \frac{f B^2 M^2}{2 D A^2 p} = 0 \quad (3.34)$$

A aplicação do Método das Características transformou um sistema de duas equações diferenciais parciais em um sistema de quatro equações diferenciais ordinárias.

Característica Positiva.

$$\frac{1}{A} \frac{dM}{dt} + \frac{1}{B} \frac{dp}{dt} + \frac{p g \sin \theta}{B^2} + \frac{f B^2 M^2}{2 D A^2 p} = 0 \quad (3.35)$$

$$\frac{dx}{dt} = B \Rightarrow dx = B dt \quad (3.36)$$

Característica Negativa.

$$\frac{1}{A} \frac{dM}{dt} - \frac{1}{B} \frac{dp}{dt} + \frac{p g \sin \theta}{B^2} + \frac{f B^2 M^2}{2 D A^2 p} = 0 \quad (3.37)$$

$$\frac{dx}{dt} = -B \Rightarrow dx = -B dt \quad (3.38)$$

Discretização das Equações Características

Multiplicando as equações 3.35 e 3.37 por suas respectivas direções características teremos:

Característica Positiva

$$\frac{B}{A} dM + dp + \left(\frac{p g \sin \theta}{B^2} + \frac{f B^2 M^2}{2 D A^2 p} \right) dx = 0 \quad (3.39)$$

Integrando de A até P segundo o esquema da figura 3.1 abaixo:

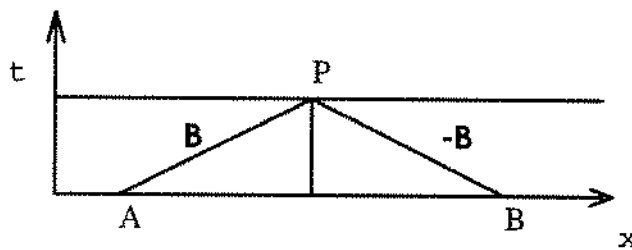


Figura 3.1: Esquema de Discretização das Equações no Plano Espaço Tempo

$$\frac{B}{A} (M_P - M_A) + (p_P - p_A) + \int_A^P \left(\frac{p g \sin \theta}{B^2} + \frac{f B^2 M^2}{2 D A^2 p} \right) dx = 0 \quad (3.40)$$

A integral da equação 3.40 é obtida por meio da solução para o regime permanente segundo Streeter[9]. No anexo B apresentamos o desenvolvimento para a obtenção do valor da integral. Substituindo o resultado encontrado na equação 3.40 chegamos a forma final da equação característica positiva

conforme apresentada abaixo.

$$\frac{B}{A}(M_P - M_A) + (p_P - p_A) + \frac{\frac{f B^2 M^2 (x_P - x_A) (\exp S - 1)}{D A^2} + p_P^2 (\exp S - 1)}{p_A + p_P} = 0 \quad (3.41)$$

onde

$$S = \frac{2 g \sin \theta \Delta x}{B^2} \quad (3.42)$$

Característica Negativa.

$$-\frac{B}{A} dM + dp + \left(\frac{p g \sin \theta}{B^2} + \frac{f B^2 M^2}{2 D A^2 p} \right) dx = 0 \quad (3.43)$$

Integrando de P até B segundo o esquema da figura 3.1:

$$-\frac{B}{A}(M_B - M_P) + (p_B - p_P) + \int_P^B \left(\frac{p g \sin \theta}{B^2} + \frac{f B^2 M^2}{2 D A^2 p} \right) dx = 0 \quad (3.44)$$

da mesma forma substituindo a integral pela solução do regime permanente conforme o anexo B teremos:

$$\frac{B}{A}(M_P - M_B) - (p_P - p_B) + \frac{\frac{f B^2 M^2 (x_B - x_P) (\exp S - 1)}{D A^2} + p_B^2 (\exp S - 1)}{p_B + p_P} = 0 \quad (3.45)$$

Definindo:

$$E = \frac{\exp(S) - 1}{S} \quad (3.46)$$

$$K1 = \frac{B}{A} \quad K2 = \frac{f B^2 E}{D A^2} \quad (3.47, 48)$$

Substituindo as equações 3.46 a 3.48 nas equações 3.41 e 3.45 teremos as equações de compatibilização discretizadas de forma mais compacta. Em resumo

$$F1 = K1(M_P - M_A) + (p_P - p_A) + \frac{K2 M |M| (x_P - x_A) + p_P^2 (\exp S - 1)}{p_A + p_P} = 0 \quad (3.49)$$

$$F2 = (x_P - x_A) - B(t_P - t_A) = 0 \quad (3.50)$$

$$F3 = K1(M_P - M_B) - (p_P - p_B) + \frac{K2 M |M| (x_B - x_P) + p_B^2 (\exp S - 1)}{p_B + p_P} = 0 \quad (3.51)$$

$$F4 = (x_P - x_B) + B(t_P - t_B) = 0 \quad (3.52)$$

As equações 3.49 a 3.52 formam, portanto, um sistema não linear de quatro equações e quatro incógnitas. As incógnitas são as variáveis, posição x , tempo t , pressão p e vazão mássica M no ponto P . Estas variáveis são identificadas com o subscrito P . Para a variável M utilizamos uma aproximação de segunda ordem. Esta aproximação é a média aritmética entre o valor procurado no tempo Δt adiante e o valor conhecido no tempo atual. Para a solução deste sistema empregamos o método Iterativo de Newton, conforme apresentado no Anexo B.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DO ESCOAMENTO NO OLEODUTO

As equações que governam o escoamento no oleoduto são similares às do gasoduto. O procedimento de modelagem segue a mesma metodologia, i.e., a partir dos balanços de massa e de quantidade de movimento chegamos ao conjunto de equações diferenciais parciais que governam o fenômeno.

Balanço de Quantidade de Movimento.

O balanço de quantidade de movimento é o mesmo apresentado pela equação 3.6 do capítulo anterior:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p - \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} \quad (3.6)$$

Admitindo a hipótese de escoamento unidimensional na direção x , integrando no volume de controle $dV = A dx$ e aplicando o teorema de divergência de Gauss teremos:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{4}{D} \tau_w + \rho g \sin \theta \quad (4.1)$$

A tensão de atrito na parede do tubo é admitida igual à do regime permanente. Nós a modelamos utilizando o fator de atrito de Darcy-Weisbach conforme sua equação apresentada a seguir

$$\tau_w = \rho f \frac{u|u|}{8} \quad (4.2)$$

Substituindo a equação 4.2 na equação 4.1 e dividindo a equação resultante por ρ obtemos:

$$\frac{Du}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f u|u|}{2D} - g \sin \theta = 0 \quad (4.3)$$

Substituindo a pressão pela altura manométrica H como definida pela seguinte equação:

$$p = \rho g (H - l) \quad , \quad (4.4)$$

onde l é a altura relativa a um determinado referencial. No presente trabalho o referencial está localizado no fundo da câmara de separação.

$$p = \rho g (H - l) \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial l}{\partial x} \right) = \rho g \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \sin \theta \right) \quad (4.5)$$

substituindo na equação 4.3 teremos:

$$\frac{Du}{Dt} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f u|u|}{2D} = 0 \quad (4.6)$$

Balanco de Massa - Equação da Continuidade .

Na figura 4.1 mostramos um volume de controle de comprimento infinitesimal δx e área de seção transversal A .

Nesta figura v representa a velocidade da parede do tubo. Conforme Propson [12], consideramos que ele está fixo com relação às paredes do tubo, i.e, ele só se move e/ou se estende se as paredes do tubo assim se comportarem. A lei de conservação da massa estabelece que o fluxo líquido de massa (massa que entra menos massa que sai) do volume de controle deve ser igual à taxa de aumento da massa dentro do mesmo ou seja

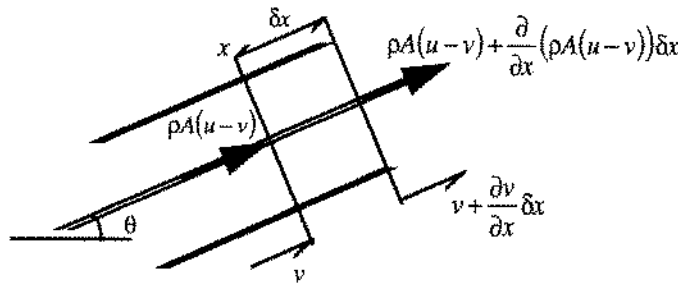


Figura 4.1: Volume de Controle para a Equação da Continuidade

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho A u)}{\partial x} = 0 \quad (4.7)$$

Expandindo o termo da derivada em relação a posição e dividindo o resultado por ρA teremos:

$$\frac{1}{\rho A} \frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho A} u \frac{\partial(\rho A)}{\partial x} = 0 \quad (4.8)$$

$$\frac{1}{\rho A} \left[\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho A)}{\partial x} \right] + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4.9)$$

ou

$$\frac{1}{\rho A} \frac{D}{Dt} (\rho A) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4.10)$$

Expandindo o termo da derivada substantiva obtemos

$$\frac{1}{A} \frac{DA}{Dt} + \frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4.11)$$

Esta equação é válida tanto para tubos cilíndricos como para tubos convergentes (*chokes*) ou divergentes (difusores). Transformamos esta relação com a consideração dos efeitos de alongamento e dilatação das paredes do tubo pela ação da força devida a pressão. Estes efeitos são previstos pelas equações de definição dos módulo de elasticidade *Bulk* e razão de Poisson. De acordo com Streeter[9], a equação 4.11 pode ser expressa em função da altura manométrica *H* e da velocidade de propagação da onda acústica *a* como:

$$u \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4.12)$$

onde a^2 é uma constante que incorpora as propriedades do fluido, do tubo e do meio de suporte do mesmo. Ela é calculada pela seguinte equação, ainda segundo Streeter[9]:

$$a^2 = \frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left[\left(\frac{K}{E} \right) \left(\frac{D}{e} \right) \right] c_1} \quad (4.13)$$

onde *K* é o módulo de elasticidade total, *E* é o módulo de

elasticidade de Young, D é o diâmetro interno do tubo, e é a espessura da parede do mesmo e c_1 é uma constante função de μ razão de Poisson, a da forma de ancoragem do tubo.

Método das Características

As equações 4.6 e 4.12 constituem o sistema de equações diferenciais parciais a serem resolvidas. Para transforma-las em um conjunto de equações diferenciais ordinárias utilizamos o Método das Características.

Identificando L_1 à equação 4.6 do momento e L_2 à equação da continuidade 4.12 como a seguir:

$$L1 = g \frac{\partial H}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{f u |u|}{2D} = 0 \quad , \quad (4.14)$$

$$L2 = u \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4.15)$$

e combinando estas duas equações linearmente através um multiplicador λ desconhecido temos:

$$L = L1 + \lambda L2 = 0 \quad . \quad (4.16)$$

Reagrupando temos:

$$\lambda \left[\frac{\partial H}{\partial x} \left(\frac{g}{\lambda} + u \right) + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \left[\frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\lambda a^2}{g} + u \right) + \frac{\partial u}{\partial t} \right] + \frac{f u |u|}{2D} = 0 \quad (4.17)$$

Para que a equação 4.17 torne-se uma equação diferencial

ordinária é necessário que:

$$\frac{dx}{dt} = u + \frac{g}{\lambda} = u + \frac{\lambda a^2}{g} , \quad (4.18)$$

ou seja, que λ assuma o valor:

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} . \quad (4.19)$$

Substituindo estes valores de λ na equação 4.17 obtemos as duas equações de compatibilidade para o oleoduto:

$$\pm \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{du}{dt} + \frac{f u |u|}{2D} = 0 \quad (4.20, 21)$$

válidas para as respectivas direções características:

$$\frac{dx}{dt} = u \pm a , \quad (4.22, 23)$$

sobre as quais se propagam as informações.

Para a aplicação ao nosso problema as velocidades, u , esperadas são muito menores que os valores de a . Assim sendo vamos aproximar as direções características por

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (4.24, 25)$$

Discretização das Equações.

As equações 4.20, 4.21, 4.24 e 4.25 formam um sistema de

quatro equações diferenciais ordinárias. Elas são resolvidas para um esquema de discretização conforme ilustrado na figura abaixo.

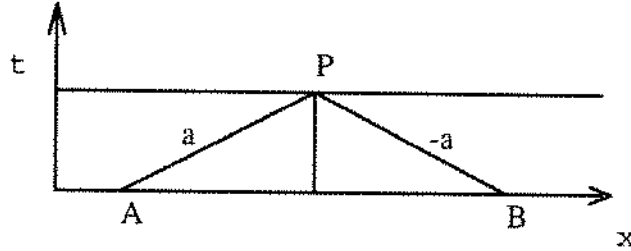


Figura 4.2: Esquema de Discretização das Equações no Plano Espaço Tempo

Neste esquema as variáveis dos pontos A e B são conhecidas e queremos encontrar os valores das variáveis no ponto P.

Substituindo a velocidade u pela vazão volumétrica $Q = uA_o$, onde A_o é a área do oleoduto admitida constante, as equações discretizadas resultam em:

Característica Positiva

$$(H_p - H_A) + \frac{a}{g A_o} (Q_p - Q_A) + \frac{f_o Q |Q| (X_p - X_A)}{2 g D_o A_o^2} = 0 \quad (4.26)$$

$$(x_p - x_A) - a(t_p - t_A) = 0 \quad (4.27)$$

Característica Negativa

$$(H_p - H_B) - \frac{a}{g A_o} (Q_p - Q_B) - \frac{f_o Q |Q| (X_B - X_p)}{2 g D_o A_o^2} = 0 \quad (4.28)$$

$$(x_p - x_B) + a(t_p - t_B) = 0 \quad (4.29)$$

onde o subscrito o significa variável relativa ao oleoduto.

Para o nosso caso de dutos longos ou de pequeno diâmetro, vamos utilizar uma aproximação de segunda ordem para a variável Q .

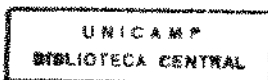
$$Q = \frac{Q_A + Q_P}{2} \quad ou \quad Q = \frac{Q_B + Q_P}{2} \quad (4.30)$$

CAPÍTULO 5

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a resolução dos modelos desenvolvidos para os gasodutos e o oleoduto são necessárias condições iniciais e de contorno. Estas condições são conhecidas para o sistema como um todo. Admitimos que conhecemos as pressões de descarga do compressor que abastece o gasoduto de alta pressão, e de operação dos vasos de recebimento (chegada) do oleoduto e do gasoduto de baixa pressão. Sabemos, portanto, as condições de contorno de montante do gasoduto de alta pressão e de jusante dos oleoduto e gasoduto de baixa pressão, e elas são independentes. As condições de contorno de jusante do gasoduto de alta pressão e montante do oleoduto estão interligadas pois partilham um mesmo ponto do sistema, que é a câmara de alta pressão, durante a etapa de transferência. Já a condição de contorno de montante do gasoduto de baixa pressão está interligada à fonte de alimentação de petróleo do sistema pois ambas partilham as condições da câmara de baixa pressão na etapa de abastecimento. Para o nosso sistema admitimos que a vazão volumétrica de petróleo da fonte é constante.

Para obter estas condições de contorno para os dutos, mas internas ao sistema, é preciso modelar o funcionamento das câmaras de alta e de baixa pressão. A isto chamamos de Acoplamento do Sistema.



Câmara de Alta Pressão.

Na etapa de transferência, a câmara de alta pressão comunica o gasoduto de alta pressão e o oleoduto. As condições de equilíbrio dinâmico, pressões e vazões dos dutos e da câmara devem ser satisfeitas simultaneamente. Neste sentido desenvolvemos:

i) Um balanço de massa para o gás que relaciona a quantidade de massa fornecida pelo gasoduto de alta pressão com a variação do volume de gás da câmara;

ii) Variação da pressão e vazão mássica a jusante do gasoduto de alta satisfazendo a equação característica positiva do mesmo;

iii) Variação da altura manométrica e vazão volumétrica a montante do oleoduto satisfazendo à característica negativa do mesmo;

iv) Um balanço de massa para o líquido que relaciona a vazão de óleo transferida com o nível da câmara.

Passamos agora a descrever cada um dos itens acima relacionados.

i) Balanço de Massa Para o Gás.

Fazendo-se um balanço de massa de gás no volume de controle com uma superfície de controle deformável, como apresentado na figura 5.1:

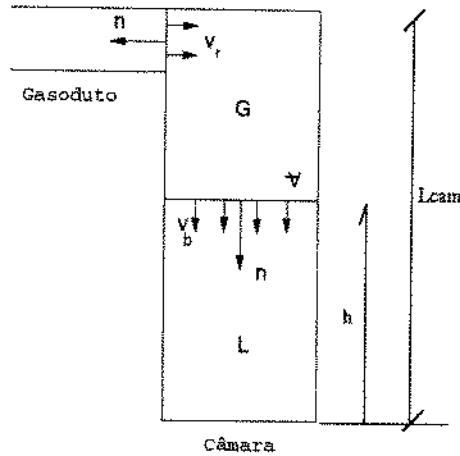


Figura 5.1. Volume de Controle com Superfície de Controle Deformável.

$$\frac{d(\rho V)}{dt} - M = 0 \quad , \quad (5.1)$$

onde L_{Cam} e A_{Cam} são comprimento total e a área da seção transversal da câmara de separação, respectivamente, h o nível de líquido, V o volume ocupado pelo gás e M a vazão mássica.

Expandindo o termo da derivada em relação ao tempo da equação 5.1 temos:

$$\rho \frac{dV}{dt} + V \frac{d\rho}{dt} - M = 0 \quad . \quad (5.2)$$

Admitindo a área da câmara constante podemos associar à variação do volume com o tempo e a variação da altura de líquido com o tempo. Substituindo temos:

$$\frac{d\rho}{dt} V - \rho A_{Cam} \frac{dh}{dt} - M = 0 \quad . \quad (5.3)$$

O volume do gás na câmara é dado por:

$$V = A_{cam} \cdot (L_{cam} - h) \quad (5.4)$$

Destacamos que a equação 5.3 expressa o balanço de massa para o gás e a equação 5.4 relaciona o volume ocupado pelo gás com o nível de óleo na câmara.

Sendo a densidade ρ uma propriedade termodinâmica função da pressão P e da temperatura absoluta T temos:

$$\rho = \rho(p, T) \quad (5.5)$$

e

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{dT}{dt} \quad (5.6)$$

Admitindo a hipótese de sistema isotérmico $\frac{dT}{dt} = 0$ logo:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial p} \frac{dp}{dt} \quad (5.7)$$

Utilizando a equação de estado para um gás real podemos escrever:

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} = \frac{1}{z R_{GN} T} = \frac{\rho}{p} \quad (5.8)$$

Logo

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho}{p} \frac{dp}{dt} \quad (5.9)$$

substituindo as equações 5.4 e 5.9 na equação 5.2 resulta na

expressão de conservação da massa expressa em termos da pressão a jusante do gasoduto de alta (assumida igual a pressão do gás na câmara) e do nível de líquido da câmara.

$$\frac{\rho}{p} \frac{dp}{dt} A_{Cam} (L_{Cam} - h) - \rho A_{Cam} \frac{dh}{dt} - M = 0$$

multiplicando por $\frac{p dt}{\rho A_{Cam}}$ temos:

$$(L_{Cam} - h) dp - p dh - M \frac{p dt}{\rho A_{Cam}} = 0 \quad (5.10)$$

A equação 5.10 discretizada conduz a:

$$J1 = (L_{Cam} - h)(p_p - p_i) - p(h_p - h_i) - \frac{M z R_{GN} T \Delta t}{A_{Cam}} = 0 \quad (5.11)$$

onde o subscrito i refere-se ao valor da variável no tempo anterior ao tempo calculado.

ii) Característica Positiva do Gasoduto.

A variação da massa e da quantidade de movimento a jusante do gasoduto de alta pressão é avaliada através da equação característica positiva do gasoduto, equação 3.41

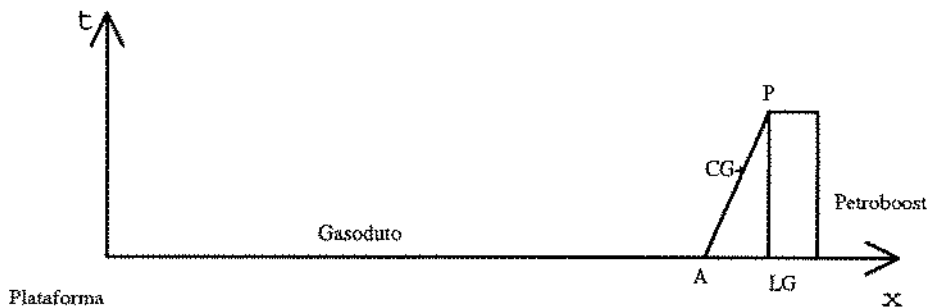


Figura 5. 2. Condição de Contorno de Jusante do Gasoduto de Alta Pressão.

$$K1(M_p - M_A) + (p_p - p_A) + \frac{K2 M |M| (x_p - x_A) + p_p^2 (\exp S - 1)}{p_A + p_p} = 0 \quad (5.12)$$

onde

$$K1 = \frac{B}{A} \quad K2 = \frac{f B^2 E}{D A^2} \quad (5.13, 5.14)$$

Considerando que o trecho do gasoduto de chegada ao PETROBOOST é horizontal $S=0 \Rightarrow E=1$ e portanto a equação 5.12 se reduz a:

$$J2 = K1(M_p - M_A)(p_p + p_A) + (p_p^2 - p_A^2) + K2(LG - X_A)M|M| = 0 \quad (5.15)$$

iii) Característica Negativa do Oleoduto.

A variação da massa e da quantidade de movimento a montante do oleoduto é avaliada através da equação característica negativa do mesmo, equação 4.27

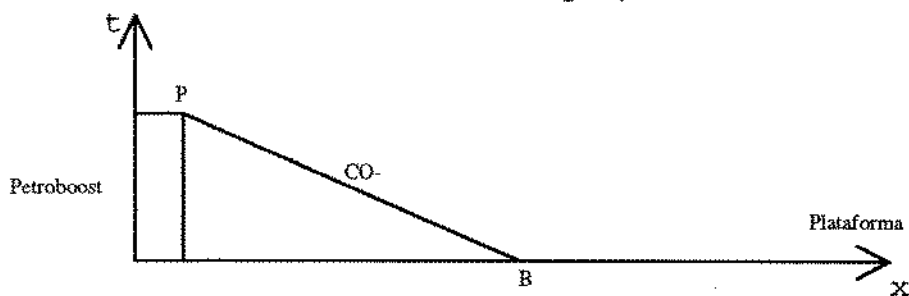


Figura 5. 3. Condição de Contorno de Montante do Oleoduto.

$$(H_p - H_B) - K3(Q_p - Q_B) - K4Q|Q|(X_B - X_p) = 0 \quad (5.16)$$

onde

$$K3 = \frac{a}{gA_o} \quad K4 = \frac{f_b}{2gD_o A_o^2} \quad (5.17, 5.18)$$

A pressão de montante do oleoduto, P_{trans} , é igual a pressão do gás na câmara mais a coluna hidrostática de líquido dentro da mesma, ou seja:

$$P_{trans} = p + \rho_o g h \quad (5.19)$$

Usando a definição de altura manométrica podemos substituir P_{trans} por H_p , lembrando que, como já descrito no capítulo 4, o nosso nível de referência está no fundo da câmara e, portanto, l aqui é zero.

$$\frac{P_{trans}}{\rho_o g} = H_p = \frac{p_p}{\rho_o g} + h_p \quad (5.20)$$

Substituindo a equação 5.20 na equação 5.16 temos:

$$J3 = \left(\frac{p_p}{\rho_o g} + h_p - H_B \right) - K3(Q_p - Q_B) + K4 Q |Q| X_B = 0 \quad (5.21)$$

iv) Balanço de Massa Para o Líquido.

O balanço de massa para o oleoduto é realizado considerando que a variação de nível da câmara é igual a vazão de líquido.

$$Q = -A_{cam} \frac{dh}{dt} \quad (5.22)$$

ou na sua forma discretizada:

$$J4 = A_{Cam} (h_p - h_i) - Q \Delta t = 0 \quad (5.23)$$

Se a vazão volumétrica Q_p de equilíbrio do oleoduto for menor ou igual a zero não há fluxo pois a câmara de separação terá uma válvula de retenção para prevenir que uma câmara transfira diretamente para a outra. Portanto o sistema deverá ser resolvido apenas para o gasoduto.

Em resumo temos um sistema de 4 equações e 4 incógnitas:

P_p, M_p, Q_p, h_p

$$J1 = (L_{Cam} - h)(p_p - p_i) - p(h_p - h_i) - \frac{M z R_{GN} T \Delta t}{A_{Cam}} = 0 \quad (5.11)$$

$$J2 = K1(M_p - M_A)(p_p + p_A) + (p_p^2 - p_A^2) + K2(LG - X_A)M|M| = 0 \quad (5.23)$$

$$J3 = \left(\frac{p_p}{\rho_o g} + h_p - H_B \right) - K3(Q_p - Q_B) + K4Q|Q|X_B = 0 \quad (5.23)$$

$$J4 = A_{Cam} (h_p - h_i) - Q \Delta t = 0 \quad (5.23)$$

Se adotarmos uma aproximação de segunda ordem para os valores de M , Q , p e h teremos outras quatro relações a serem atendidas simultaneamente quais sejam:

$$J5 = M_p + M_i - 2M = 0 \quad (5.24)$$

$$J6 = Q_p + Q_i - 2Q = 0 \quad , \quad (5.25)$$

$$J7 = P_p + P_i - 2P = 0 \quad (5.26)$$

$$e \quad J8 = h_p + h_i - 2h = 0 \quad , \quad (5.27)$$

onde a variável de índice i é a obtida no tempo imediatamente anterior ao do cálculo.

Para a resolução deste sistema vamos empregar o Método Iterativo de Newton. O desenvolvimento da matriz Jacobiana está mostrado no anexo C.

Considerações Sobre os Comprimentos dos Trechos dos Dutos Acoplados.

As velocidades características nos gasoduto de alta pressão e oleoduto são muito diferentes. São elas:

$$\frac{dx_o}{dt_o} = \pm a \quad (5.28)$$

$$\frac{dx}{dt} = \pm B \quad (5.29)$$

dividindo uma equação pela outra e estabelecendo que os intervalos de tempo de cálculo serão os mesmos para os dois dutos teremos:

$$\frac{dx_o}{dx} = \frac{a}{B} \quad . \quad (5.30)$$

Mas

$$dx_o = \frac{L}{NTO} \text{ e } dx = \frac{L}{NTR} , \quad (5.31, 32)$$

onde NTO é o número de trechos do oleoduto e NTR o número de trechos do gasoduto de alta pressão. Assim, para que os intervalos de tempo de cálculo sejam os mesmos, é necessário que a seguinte relação seja satisfeita:

$$NTR = \frac{a}{B} NTO . \quad (5.33)$$

Como não podemos ter um número fracionário de trechos e não podemos garantir que a razão das velocidades características seja inteira vamos adotar que o número de trechos do gasoduto NTR' será igual ao número inteiro mais próximo da razão a/B vezes o número de trechos do oleoduto. Com esta consideração e admitindo o valor de dx originalmente obtido teremos que o novo comprimento do gasoduto será:

$$LG = NTR' dx \quad (5.34)$$

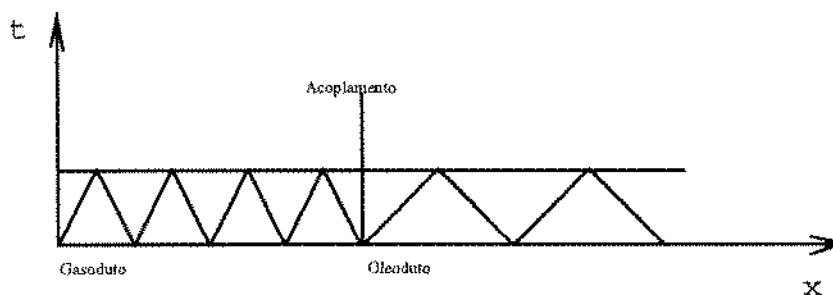


Figura 5. 4. Esquema de Discretização do Gasoduto de Alta e Oleoduto Acoplados.

Câmara de Baixa Pressão.

O procedimento adotado para a câmara de baixa pressão é semelhante ao da câmara de alta pressão. A principal diferença é que, a câmara de baixa pressão, por hipótese, é abastecida pela fonte em regime permanente com vazões de óleo e gás constantes e conhecidas, independente das pressões.

Na etapa de abastecimento, a câmara de baixa pressão comunica o gasoduto de baixa pressão e fonte de petróleo. As condições de equilíbrio dinâmico, pressões e vazões do gasoduto e da câmara devem ser satisfeitas simultaneamente. Neste sentido desenvolvemos:

i) Um balanço de massa para o líquido que relaciona a quantidade de massa fornecida pela fonte com a variação do volume de líquido da câmara;

ii) Um balanço de massa para o gás que relaciona a variação da massa de gás dentro da câmara com a variação do nível da mesma e com a produção de gás da fonte;

iii) Variação da pressão e vazão a montante do gasoduto de baixa pressão satisfazendo a equação característica negativa do mesmo.

Passamos agora a descrever cada um dos itens acima relacionados.

i) Balanço de Massa para o Líquido.

$$\frac{d(\rho_l V_l)}{dt} = M_l \quad (5.35)$$

admitindo fluido incompressível com vazão volumétrica constante:

$$\frac{dV_l}{dt} = \frac{M_l}{\rho_l} = Q_l = \text{const} \quad . \quad (5.36)$$

Admitindo área da câmara constante podemos escrever:

$$A_{cam} \frac{dh}{dt} = Q_l \quad . \quad (5.37)$$

Discretizando teremos:

$$(h_p - h_i) = \Delta h = \frac{Q_l}{A_{cam}} \Delta t \quad , \quad (5.38)$$

onde Δh é a variação de nível de líquido na câmara de baixa pressão no intervalo de tempo Δt devido à alimentação pela fonte com vazão constante Q_l .

ii) Balanço de Massa para o Gás.

$$\frac{d(\rho_g V_g)}{dt} = Q_g \rho_g - M \quad , \quad (5.39)$$

onde Q_g é a vazão volumétrica de gás devida a fonte.

$$\frac{Q_g}{B_g} = \frac{Q_l}{B_l} RGL \quad , \quad (5.40)$$

onde B_G e B_L são fatores de volume da formação para o gás e o líquido, respectivamente, e RGL é a Razão Gás Líquido da formação medida nas condições padrão, ou seja, 1 atmosfera e 60°F. Para o nosso caso consideramos:

$$B_L \cong 1 \quad e \quad B_G = \frac{p_0}{p} , \quad (5.41, 42)$$

pois admitimos, por hipótese, que z e T são constantes.

Substituindo as equações 5.41 e 5.42 na equação 5.43 temos:

$$Q_G = Q_L RGL \frac{p_0}{p} \quad (5.43)$$

Desenvolvendo a equação 5.39 e substituindo a equação 5.43 teremos:

$$\rho_G \frac{dV_G}{dt} + V_G \frac{d\rho_G}{dt} = Q_L RGL \frac{p_0}{p} \rho_G - M \quad (5.44)$$

O volume da câmara é totalmente ocupado pelo gás e pelo líquido. Portanto, podemos escrever:

$$V_{Cam} = V_l + V_G \Rightarrow \frac{dV_{Cam}}{dt} = \frac{dV_l}{dt} + \frac{dV_G}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{dV_G}{dt} = -\frac{dV_l}{dt} = -Q_l \quad (5.45)$$

Substituindo 5.45 e 5.4 em 5.44 temos:

$$-\rho_G Q_L + A_{Cam} (L_{Cam} - h) \frac{d\rho_G}{dt} = Q_L RGL \frac{p_0}{p} \rho_G - M \quad (5.46)$$

Substituindo $\frac{dp_G}{dt} = \frac{1}{zR_{GN}T} \frac{dp}{dt}$ e multiplicando por $\frac{p}{\rho_G} = zR_{GN}T$

temos:

$$A_{Cam}(L_{Cam} - h) \frac{dp}{dt} + M Z R_{GN} T - Q_L (p + p_0 RGL) = 0 \quad (5.47)$$

iii) **Característica Negativa do Gasoduto de Baixa.**

$$K1(M_P - M_B)(p_P + p_B) - (p_P^2 - p_B^2) + K2 X_B M |M| = 0 \quad (5.48)$$

Temos três equações 5.38, 5.47 e 5.48 e três incógnitas M_P , p_P e h_P . Considerando aproximação de segunda ordem para as variáveis M , p e h teremos um sistema de seis equações e seis incógnitas para ser resolvido simultaneamente. Para a solução do sistema empregamos o método iterativo de Newton.

CAPITULO 6

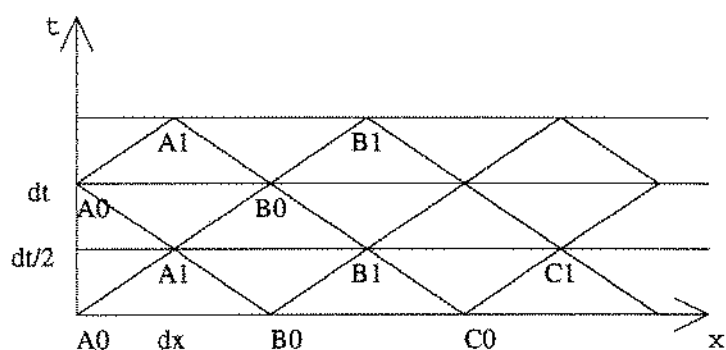
O ALGORITMO DE CÁLCULO

Para o desenvolvimento do simulador computacional do sistema PETROBOOST adotamos uma estrutura modular. Temos um programa principal que chama módulos para: entrada de dados, solução dos gasodutos, solução do oleoduto, solução do acoplamento e impressão dos resultados. O módulo de solução do acoplamento chama um outro módulo para a solução do método de Newton. Este último chama duas rotinas para a resolução da equação matricial por decomposição LU. A linguagem de programação adotada foi o C ANSI.

Cálculo dos Dutos Independentemente.

A figura A.1(Anexo A) apresenta um fluxograma típico de cálculo para um destes módulos dos gasodutos e oleoduto. Após a leitura dos dados de entrada e os cálculos preliminares, o programa calcula as condições iniciais dos dutos, ou seja, ele obtém, para cada um dos nós dos dutos, o valor das duas variáveis de interesse do sistema, a saber , pressão e vazão mássica para os gasodutos e altura manométrica e vazão volumétrica para o oleoduto, no tempo zero.

Apresentamos abaixo um diagrama espaço versus tempo para ilustrar a metodologia adotada na resolução pelo método das características, dos gasodutos e oleoduto.



Neste diagrama temos a posição como abcissa e o tempo como ordenada. Às linhas horizontais de índice zero correspondem a tempos múltiplos inteiros do intervalo de tempo, dt , da simulação. Chamamos estas linhas de linhas pares. Às linhas com índice 1 correspondem tempos defasados $dt/2$ dos tempos anteriores. Chamamos estas linhas de linhas ímpares. Os dutos são divididos em trechos de comprimento dx . Denominamos nó à posição do início de cada trecho e no diagrama acima chamamos de A, B, C etc.

Com os valores das variáveis em um par de pontos adjacentes de uma linha e com as características positiva do nó esquerdo e negativa do nó direito, temos condições de resolver o sistema de equações não lineares resultantes e obter o valor das variáveis da próxima linha, i.e., no tempo $dt/2$ avante. Com o primeiro e o último pontos da linha ímpar, suas características negativa e positiva, respectivamente, e com as condições de contorno, calculamos o primeiro e o último ponto da próxima linha par. Os pontos interiores desta linha par são calculados da mesma forma que os pontos interiores da linha ímpar. Este procedimento se repete, avançando no tempo, até que tenhamos atingido o tempo de

simulação desejado. Para cada ponto, o sistema de equações não lineares é resolvido pelo método iterativo de Newton. A metodologia consiste em calcular, com as velocidades características, as variáveis posição e tempo. As variáveis pressão e vazão são obtidas por intermédio da solução pelo método de Newton das equações 3.49 e 3.51 para os gasodutos e 4.26 e 4.28 para o oleoduto. Nestas equações já conhecemos a posição e utilizamos para M e Q uma aproximação de segunda ordem.

Validação dos Cálculos para os Gasodutos.

Os programas desenvolvidos foram testados comparando-se os resultados a dados disponíveis na literatura[9].

A figura 6.1 apresenta os resultados obtidos para um gasoduto horizontal de 15240 m de comprimento e 0,1524 m de diâmetro, transportando um gás com peso molecular de 28,84 g inicialmente com uma vazão mássica de 4 lb/s e uma pressão de 75000 psf, admitida constante a montante. Este caso corresponde ao exemplo 15.1 de Streeter[9]. Neste exemplo o gasoduto está em operação normal e a partir do tempo $t=0$ começa a sentir um aumento linear da demanda de jusante. Este comportamento é conhecido e continua até atingir uma vazão mássica de jusante de 10 lb/s no tempo de 7200 s. A partir deste instante a demanda começa a diminuir até se estabilizar em novo patamar de 7 lb/s no tempo 28000 s. Podemos observar que as pressões de jusante do gasoduto calculadas pelo programa foram praticamente as mesmas obtidas por

Streeter[9].

Além desta comparação efetuamos a simulação do início de operação do gasoduto. Os resultados estão mostrados na figura 6.2. Neste caso, simulamos o início de operação do gasoduto imaginando um aumento instantâneo da vazão de jusante de 0 até 4 lb/s no tempo 200 s. Observamos que a fonte a montante só irá receber esta informação após cerca de 45 s e a partir de então aumentará a sua vazão mássica. Podemos comprovar que, quando o gasoduto atinge o regime permanente, a vazão mássica de montante atinge o valor de 4 lb/s e que a pressão de jusante é a esperada para o regime permanente, neste nível de vazão. Nos dois casos simulados as condições de contorno foram de pressão constante a montante do gasoduto e vazão mássica conhecida a jusante.

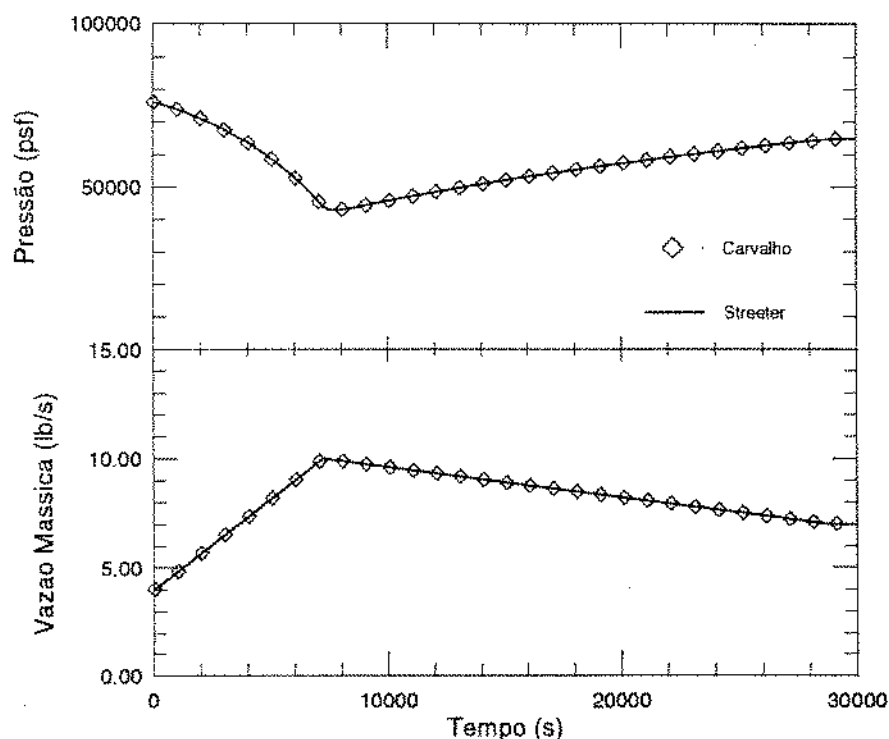


Figura 6.1: Comparação entre Resultados do Programa dos Gasodutos com STREETER[9].

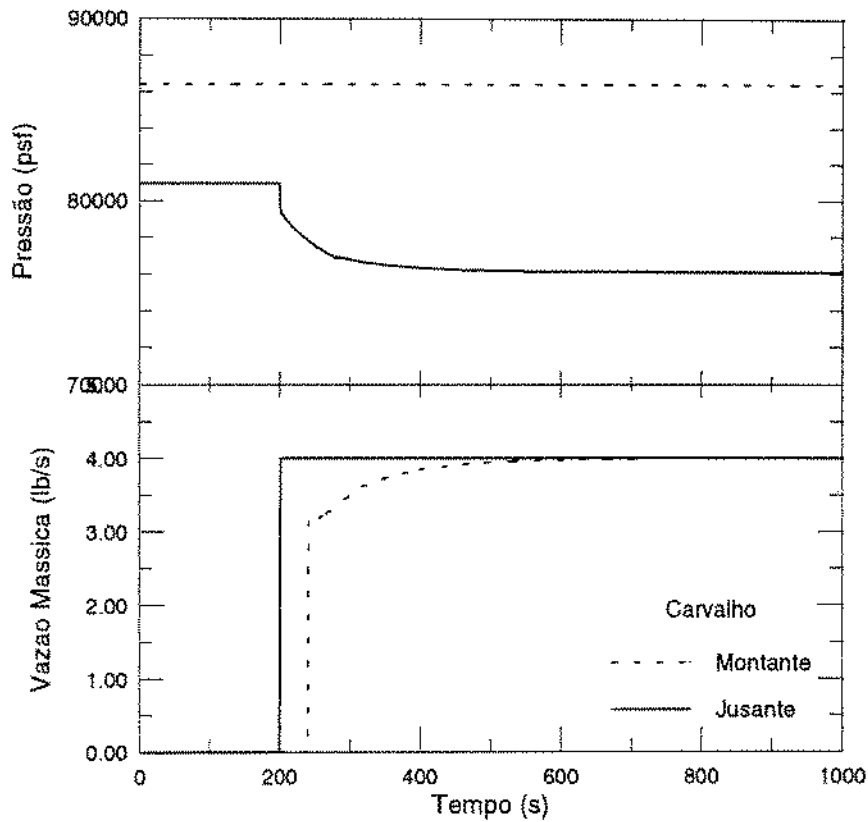


Figura 6.2: Resultados da Simulação de Início de Operação de Gasoduto.

Cálculo do Sistema Acoplado.

A figura A.2, do Anexo A, apresenta o fluxograma do programa principal do simulador para o sistema PETROBOOST como um todo. Iniciamos o programa principal com a leitura dos dados de entrada. Estes dados estabelecem, para o sistema a ser simulado, a geometria, as propriedades dos fluidos, as características dos dutos, as condições de contorno globais, i.e, as pressões do compressor e dos vasos receptores do gás de baixa pressão e do óleo na plataforma de produção e o comportamento esperado para a produção de fluidos pela fonte.

Após a leitura dos dados do arquivo de entrada são realizados os cálculos preliminares. Inicialmente calculamos todas as áreas dos dutos e câmaras. As velocidades, os números de Reynolds e os fatores de atrito são então calculados supondo regime permanente com a vazão igual a de projeto. Para o cálculo do fator de atrito do oleoduto utilizamos uma equação explícita proposta por Chen[21].

O fator de compressibilidade do gás foi admitido constante e é calculado à pressão média de operação dos gasodutos. Para este cálculo foi utilizada a metodologia proposta por Yarborough & Hall [22,23]. Como dados de entrada pressão, temperatura absoluta e composição do gás natural, são informados ao sistema. Este método admite que as propriedades críticas (pressão e temperatura) do gás natural são obtidas por média ponderada na composição molar das propriedades críticas de seus componentes. Da mesma forma é obtido o peso molecular médio. Segundo Katz & Lee [24] esta metodologia é bem aceita e, embora não seja rigorosa conduz a resultados considerados satisfatórios. Com o peso molecular médio do gás calculamos o valor de R_{GN} . Em seguida são calculados o valor da velocidade da onda acústica B e o valor das variáveis S e E , conforme as equações (3.46), (3.39) e (3.47), respectivamente.

Findos os cálculos preliminares vamos estabelecer as condições iniciais do sistema. Para nossa simulação consideramos que o sistema está inicialmente em equilíbrio estático tanto nos gasodutos como no oleoduto. Calculadas as condições iniciais para todos os dutos o procedimento é o

mesmo que aquele que utilizamos para um único duto. A principal diferença, em relação ao cálculo dos dutos independentes, é com relação às condições de contorno. Como os dutos estão acoplados, para obtermos estas condições deveremos resolver o sistema de equações conforme apresentado no capítulo 5. Este conjunto de equações também é não linear e, por isto, também utilizamos o método iterativo de Newton. Mais detalhes deste cálculo são apresentados no Anexo C.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE DE RESULTADOS

Para aplicação do modelo e análise de resultados escolheu-se um cenário de produção no campo de Albacora da Bacia de Campos, plataforma continental do estado do Rio de Janeiro.

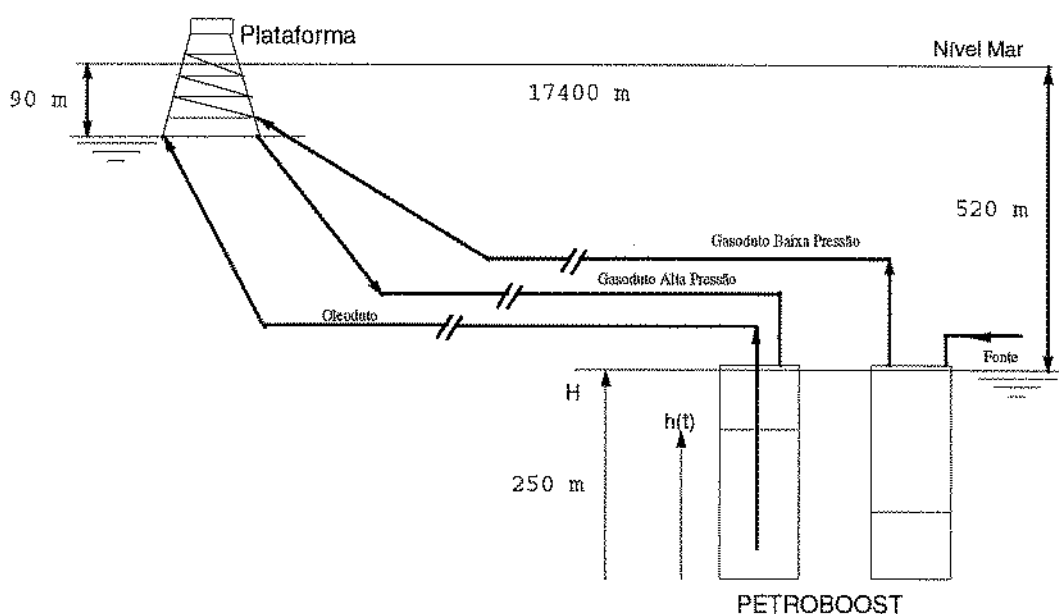


Figura 7: Diagrama Esquemático da Proposta para Aplicação do PETROBOOST.

Na concepção proposta apresentada na figura 7, a plataforma de produção fica distante 17400 m do conjunto de câmaras de separação submarinas do PETROBOOST. As lâminas d'água da plataforma e do PETROBOOST são de 90 e 520 metros, respectivamente. Este relevo submarino é considerado como sendo único, i.e, o ângulo de inclinação dos dutos com a horizontal é constante

Os gasodutos de alta e baixa pressão, assim como o oleoduto são constituídos de linhas flexíveis com diâmetros de 10, 10 e 14 polegadas, respectivamente. Vale ressaltar que os diâmetros nominais citados anteriormente são iguais aos diâmetros internos, para o caso de linhas flexíveis. Como não dispomos de dados precisos sobre os módulos de elasticidade de Young e razão de Poisson para as linhas flexíveis, vamos estimar, em nossas simulações, uma velocidade de propagação de onda acústica da ordem de 1200 m/s para o oleoduto.

As câmaras de separação do sistema serão poços falsos, revestidos com tubos de aço de 30 polegadas de diâmetro, com uma profundidade de 250 metros abaixo do leito marinho, os tubos são descidos e cimentados inteiramente no interior dos poços. A câmara resultante terá uma capacidade total de 114 metros cúbicos, aproximadamente.

Como valores representativos para este cenário, consideramos um óleo com grau API de 27,2 (densidade de 891 kg/m³) e viscosidade de 23 cP @ 37,8°C e 20 cP @ 40,0°C. A temperatura utilizada foi a do fundo do mar a profundidades maiores que 100 m, da ordem de 5°C. A composição do gás utilizada é uma média de amostragens realizadas nas descargas dos compressores em operação nas plataformas da Bacia de Campos(tabela 7.1). Usaremos esta mesma composição para a simulação dos dois gasodutos.

Componente	Fração Molar
Metano (C1)	0,8089
Etano (C2)	0,1011
Propano (C3)	0,0504
Isobutano (iC4)	0,0070
Butano (C4)	0,0119
Isopentano (iC5)	0,0021
Pentano (C5)	0,0025
Hexano e maiores (C6+)	0,0016
Nitrogênio (N ₂)	0,0102
Dióxido Carbono (CO ₂)	0,0044

Tabela 7.1: Composição típica para gás natural da Bacia de Campos após descarga do compressor.

Como condição inicial do sistema, consideramos que a câmara 1 está cheia até o nível máximo, enquanto que a câmara 2 está no nível mínimo. Os níveis máximo e mínimo são arbitrários e na simulação foram fixados em 80% e 20% da altura total das câmaras, respectivamente, i.e, 200m e 50m. O início da operação do sistema se dá pela transferência do fluido da câmara 1 até que seja atingido o nível mínimo, veja figura 1.4. Terminada a transferência inicial da câmara 1, i.e, atingido o nível mínimo, o dispositivo de controle atua e promove a comutação das válvulas do gasoduto de alta pressão alinhando-o para a câmara 2 para iniciar a sua primeira transferência. Simultaneamente irá atuar nas válvulas da fonte e do gasoduto de baixa pressão alinhando-as para a câmara 1 para permitir sua despressurização e a

produção da fonte. Iniciada a operação do sistema, o dispositivo de controle irá atuar, automaticamente, fazendo a comutação das válvulas (tabela 1.1), sempre que a câmara de transferência atingir o nível mínimo.

As figuras 7.1 a 7.3 mostram, ao longo do tempo, os valores simulados das vazões e pressões, a montante e a jusante, para, respectivamente, o gasoduto de alta pressão, o gasoduto de baixa pressão e o oleoduto. Como condições de contorno para este caso simulado usamos: pressão constante a montante do gasoduto de alta pressão no valor de 7,10 MPa (≈ 1030 psi), pressão constante a jusante dos gasoduto de baixa pressão e do oleoduto nos valores de 0,78 e 0,89 MPa (≈ 110 e 130 psi), respectivamente. A fonte considerada apresenta as seguintes capacidades: vazão de óleo $4,44\text{E-}2$ m³/s (≈ 3839 m³/d), razão gás óleo-RGO 80 m³/m³ e fração de água e sedimentos-BSW de 0%

A figura 7.1 indica o comportamento da pressão e da vazão mássica ao longo do tempo, para o gasoduto de alta pressão.

A análise do gráfico 7.1B nos revela que a pressão a jusante do gasoduto de alta pressão sofre, periodicamente, quedas bruscas, acentuadas e instantâneas de 7,2 MPa a 1,4 MPa, aproximadamente. Da mesma forma que cai instantâneamente, esta pressão se recupera muito rapidamente. Este comportamento está correto e é causado pela mudança imediata do alinhamento desses gasodutos para as diferentes câmaras ao término de cada ciclo. Este efeito é consequência da utilização de válvulas *on-off*, para a simulação. Quando

terminamos a transferência de uma câmara, ao ter atingido o nível mínimo, o dispositivo de controle atua alinhando a gasoduto de alta pressão para a outra câmara que estava recebendo a produção. Esta câmara, porém, estava a baixa pressão e portanto a pressão de jusante do gasoduto de alta pressão cai instantaneamente. A justificativa para a rápida recuperação da pressão do gasoduto é que o volume ocupado pelo gás na câmara ainda cheia de óleo é pelo menos 10 vezes menor que o volume de gás do gasoduto, funcionando este como um enorme reservatório. Ainda no gráfico 7.1B observamos que a pressão a montante do gasoduto de alta pressão, linha cheia, está constante e igual a 7,10 MPa, como estabelecido pela condição de contorno do sistema. Ao analisarmos os pontos mínimos da curva pontilhada do gráfico 7.1B observamos que o sistema não atinge um regime onde temos ao início de cada ciclo as mesmas condições nas câmaras de alta e baixa pressão.

A análise do gráfico 7.1A por sua vez, nos mostra elevações periódicas, bruscas, acentuadas e instantâneas, nos mesmos tempos das quedas da pressão, para a vazão mássica de jusante. Estes crescimentos vão de 0,1 a 17,0 kg/s, aproximadamente. Este comportamento é consequência do grande diferencial de pressão entre o gasoduto e a câmara, no instante da comutação. A medida que a pressão na câmara sobe rapidamente a vazão mássica diminui, também rapidamente. A vazão mássica a montante também sofre elevações quase que instantâneas porém não tão acentuadas de 0,08 a 0,50 kg/s, aproximadamente. Este comportamento é resultante da

compressibilidade do gás e do grande volume do gasoduto. Vale ressaltar que a escala da curva de montante está a esquerda do gráfico e é vinte vezes menor que a escala da curva de jusante que está a direita. Outro aspecto importante a observar é que embora com o mesmo período da curva de jusante, a curva de montante está defasada desta. Este tempo de defasagem é o tempo que leva a informação para ir, pelo gasoduto, do PETROBOOST até a plataforma, com a velocidade da onda acústica. Este tempo é de aproximadamente 48 s para nossa simulação.

Na figura 7.2, apresentamos os mesmos gráficos da figura 7.1, porém, para o gasoduto de baixa pressão. Notamos que as pressões e vazões revelam comportamento oposto ao do gasoduto de alta pressão, como era de se esperar. Isto porque ao mesmo tempo que alinhamos o gasoduto de alta pressão para a câmara de baixa ocorre o alinhamento do gasoduto de baixa pressão para a câmara de alta. Teremos, portanto, quase que uma imagem especular do gráfico da pressão do gasoduto de alta, gráfico 7.1B com o gráfico da pressão do gasoduto de baixa, gráfico 7.2B. Isto já não acontece para o gráfico da vazão mássica pois, durante a fase de abastecimento existe uma parcela de produção de gás da fonte que não existe na etapa de transferência.

A figura 7.3 apresenta a vazão volumétrica e a altura manométrica do oleoduto, gráficos 7.3A e 7.3B, respectivamente. O gráfico 7.3B mostra um comportamento para a altura manométrica a montante, que é o resultado da soma da pressão do gás na câmara mais a pressão hidrostática devida

ao nível de líquido dentro da mesma, semelhante ao da pressão do gasoduto de alta, gráfico 7.1B. Notamos, todavia, que a altura manométrica a montante do oleoduto apresenta uma queda mais acentuada pois a medida que se dá a transferência, o nível na câmara vai diminuindo e, conseqüentemente, a sua contribuição na altura manométrica. Por sua vez a vazão volumétrica, gráfico 7.3A, que é função da diferença entre as alturas manométricas de montante e jusante do oleoduto, também diminui. Destacamos que, pelo fato do óleo ser pouco compressível, a vazão a montante é igual a jusante, porém, com uma defasagem no tempo. Observamos também que, pelo fato da velocidade da onda acústica no oleoduto ser cerca de quatro vezes maior que a do gasoduto, a defasagem entre as curvas de montante e jusante, não aparece na escala do gráfico.

Nas figuras 7.4 e 7.5 apresentamos os gráficos de vazão e pressão do gasoduto de alta para o mesmo caso simulado, a excessão da pressão do compressor que passou de 7,10 MPa para 7,5842 e 8,9631 MPa, respectivamente. Observamos o mesmo comportamento das pressões e vazões a menos do período de ciclo, que diminuiu passando de 874 s para 465 s e 233 s, respectivamente. Esta diminuição deve ser esperada pois a medida que aumentamos a pressão do compressor aumentamos, também, a vazão média de transferência. Como a vazão aumenta, o tempo para se esgotar a câmara diminui, diminuindo, portando, o período de operação do sistema. A influência da pressão do compressor na freqüência e no período de ciclo é apresentada nas figuras 7.6 e 7.7. Elas mostram que há um

aumento do tempo de ciclo sempre que há uma diminuição na pressão do compressor. O limite inferior para esta pressão é o valor que resulta em um período de ciclo igual ao tempo necessário para a fonte alimentar a câmara de baixa do nível mínimo ao nível máximo. Na nossa simulação este tempo é da ordem de 1540s.

As figuras 7.6, 7.7 e 7.9 nos mostram que não há alteração significativa no comportamento do sistema quando alteramos o peso molecular do gás de alta pressão ao usarmos um gás mais pobre, i.e, um gás com a concentração de metano e etano maior que 98%.

Devido a que o período de ciclo diminui com o aumento da pressão do compressor e a vazão da fonte é admitida constante, o nível final na câmara de abastecimento deve se comportar da mesma forma que o período, i.e., apresentar uma diminuição. A figura 7.8 apresenta a variação do nível final da etapa de abastecimento em função da pressão do compressor. Este fato nos permitirá diminuir a altura das câmaras para uma mesma vazão simplesmente aumentando a pressão do compressor. Neste caso o período de ciclo será menor podendo comprometer a vida útil das válvulas.

A figura 7.9 apresenta o volume transferido por ciclo em função da pressão do compressor. Este volume é igual a diferença entre os níveis mínimo e de equilíbrio vezes a área da câmara de separação.

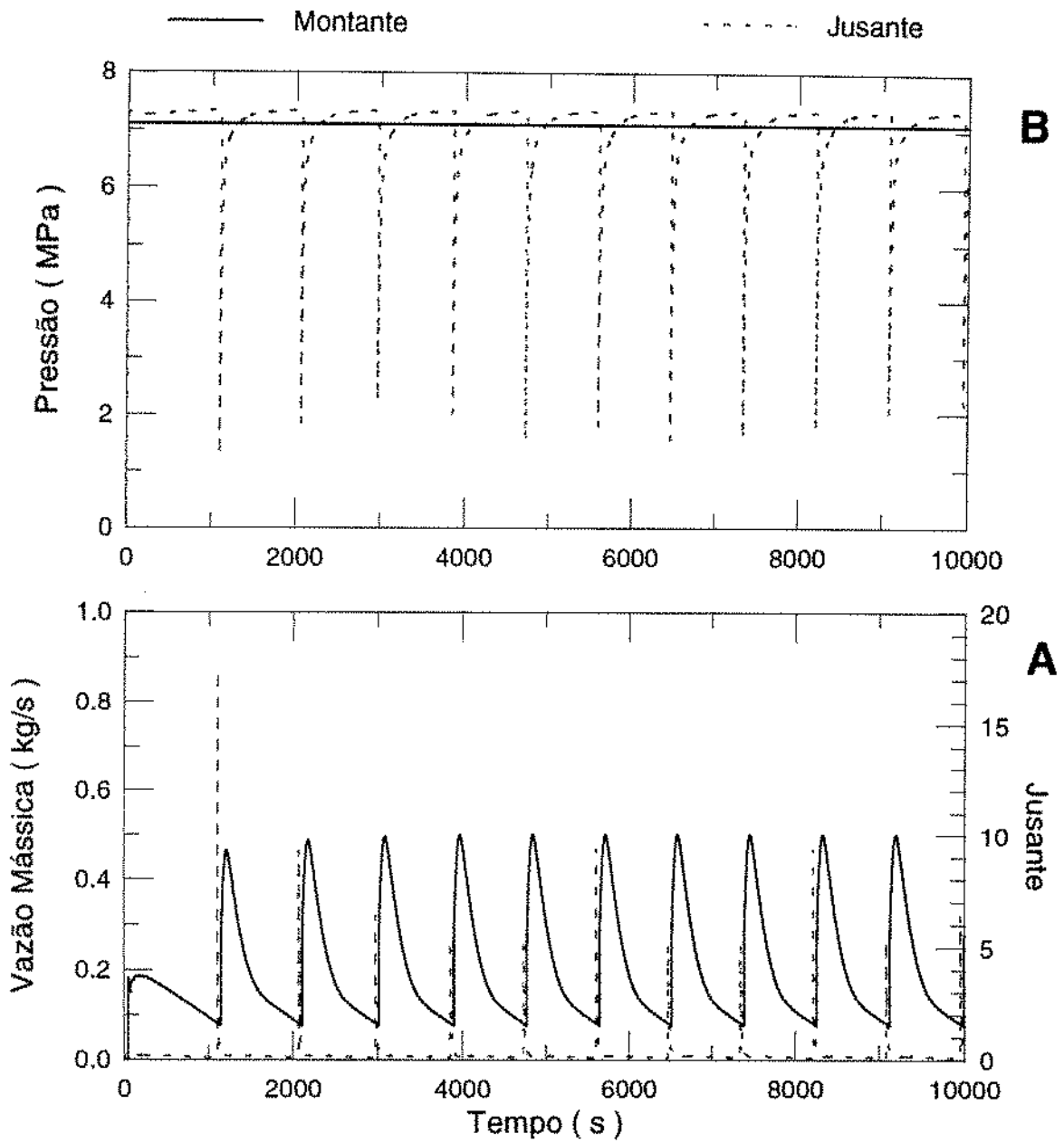


Figura 7.1: Gasoduto de Alta Pressão - Pressão Compressor 7.1016 MPa (1030 psi).

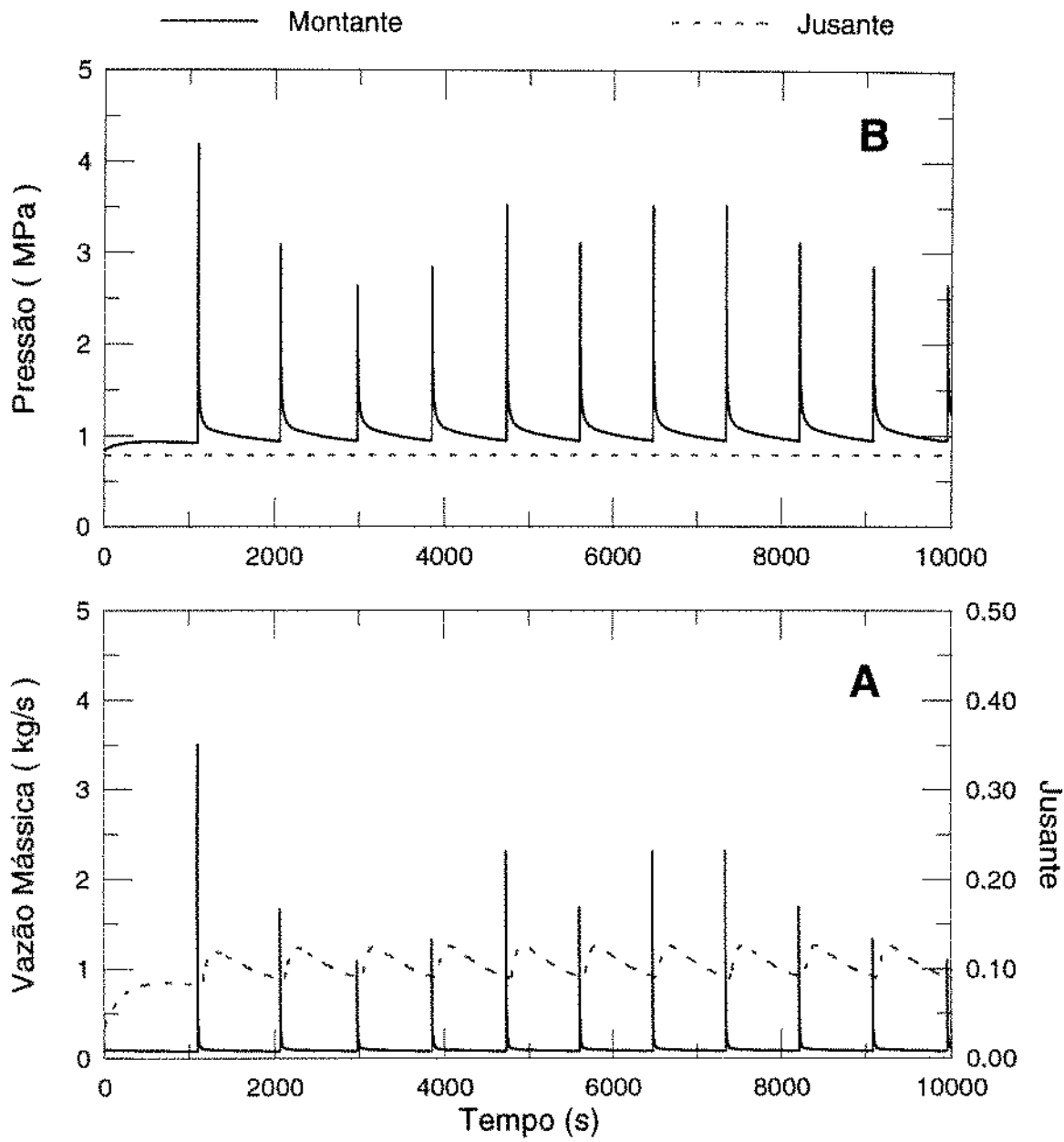


Figura 7.2: Gasoduto de Baixa Pressão - Pressão Compressor 7.1016 MPa (1030 psi).

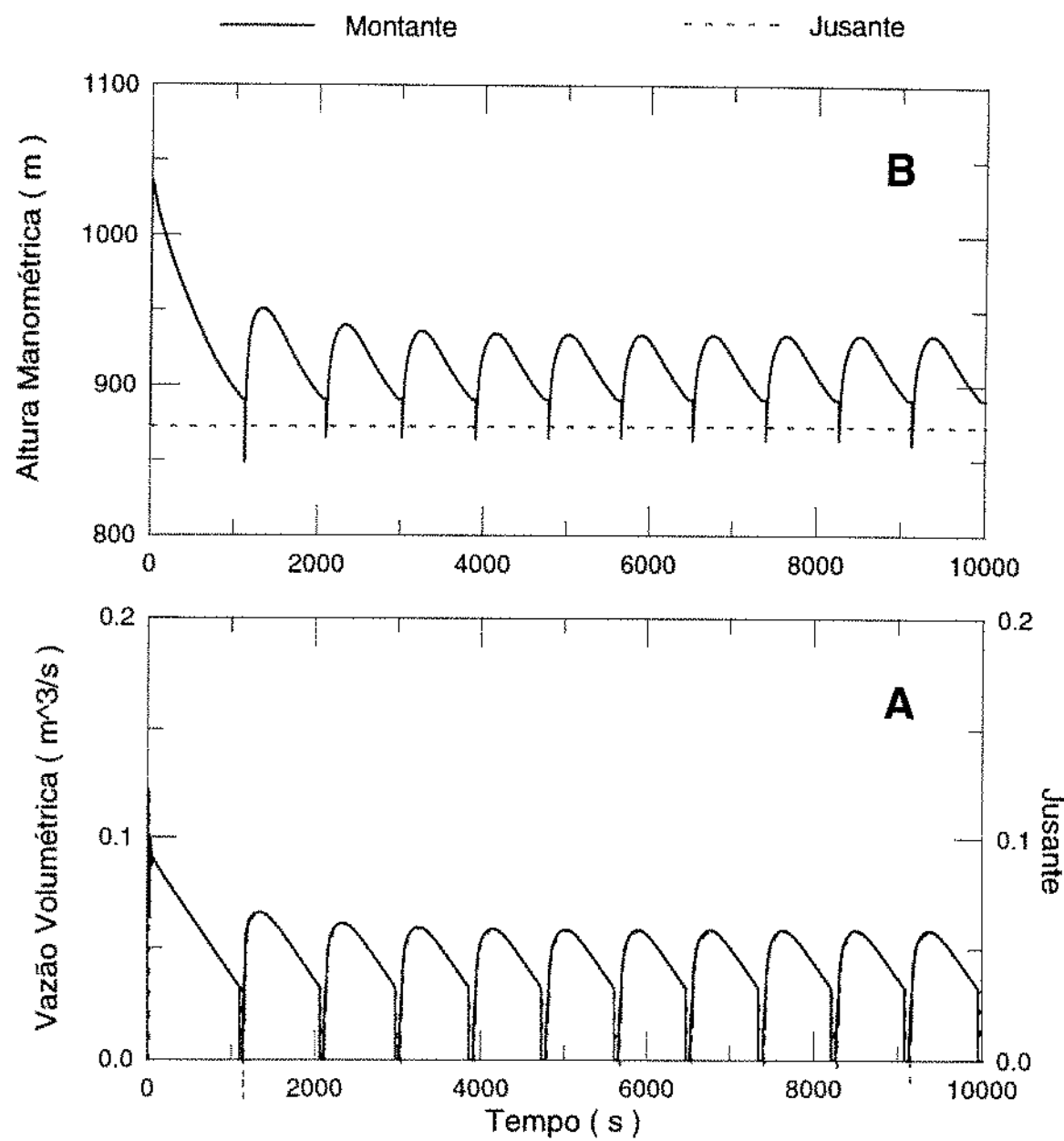


Figura 7.3: Oleoduto para Pressão Compressor 7.1016 MPa (1030psi).

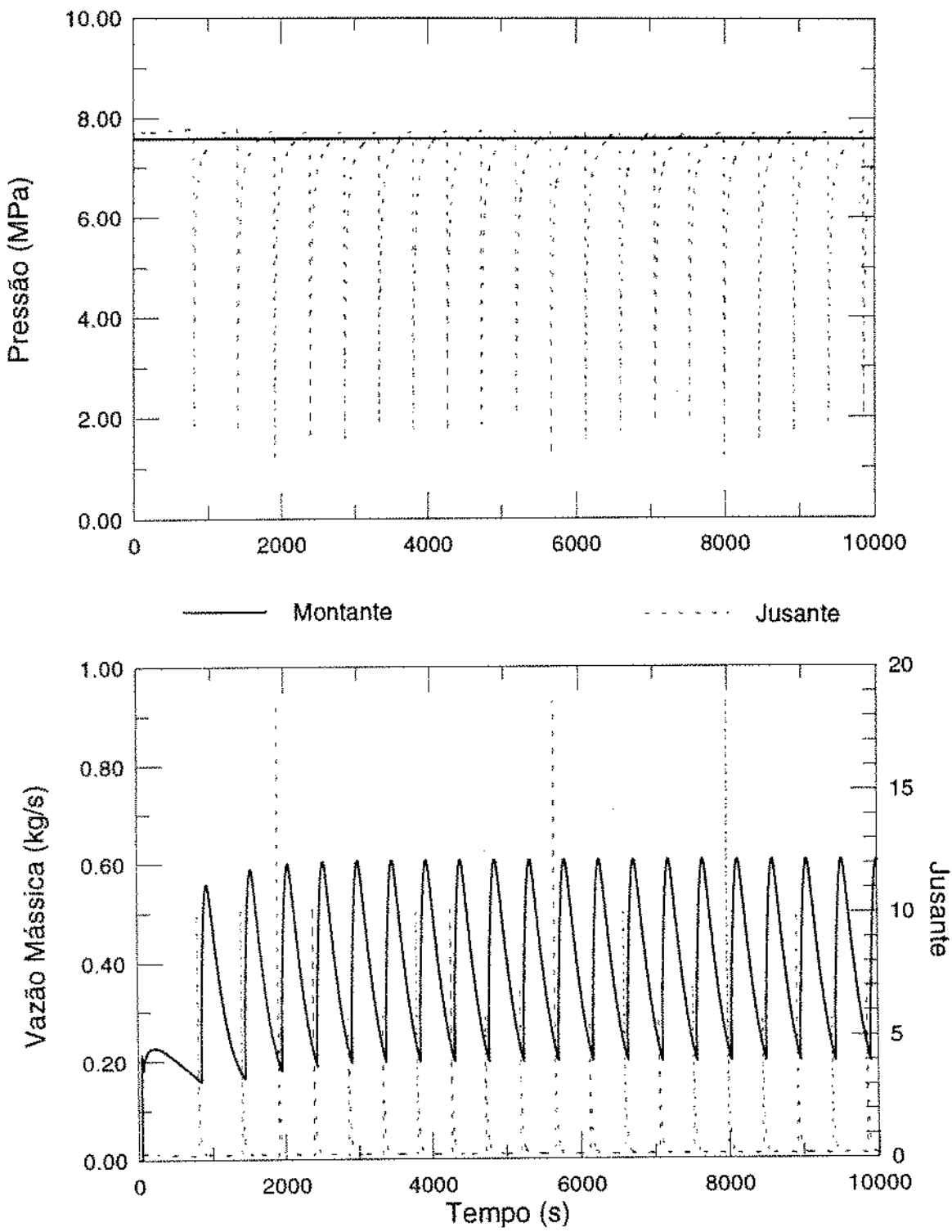


Figura 7.4: Gasoduto de Alta Pressão - Pressão Compressor 7.5841 MPa (1100 psi.)

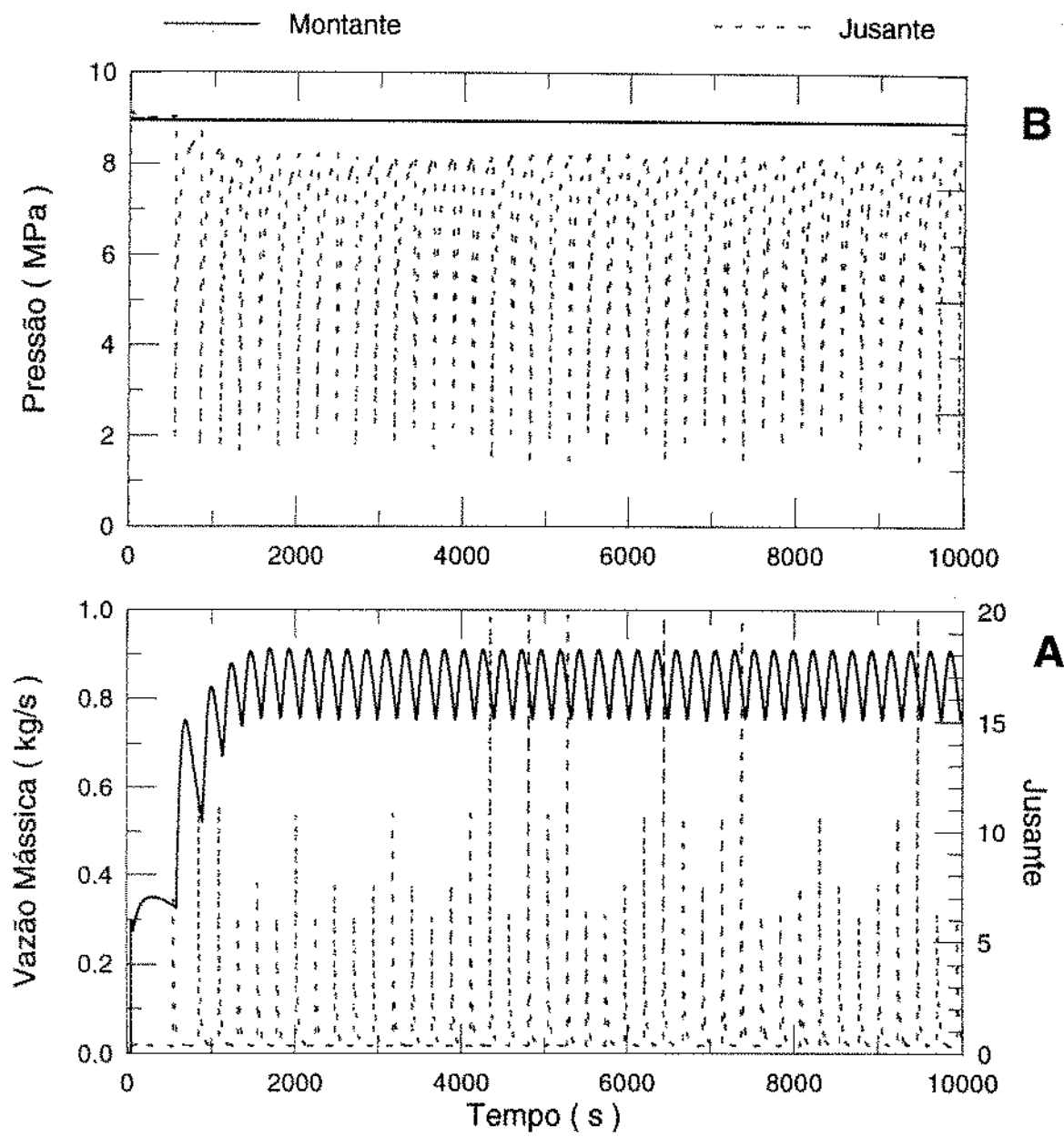


Figura 7.5: Gasoduto de Alta Pressão - Pressão Compressor 8.9631 MPa (1300 psi.)

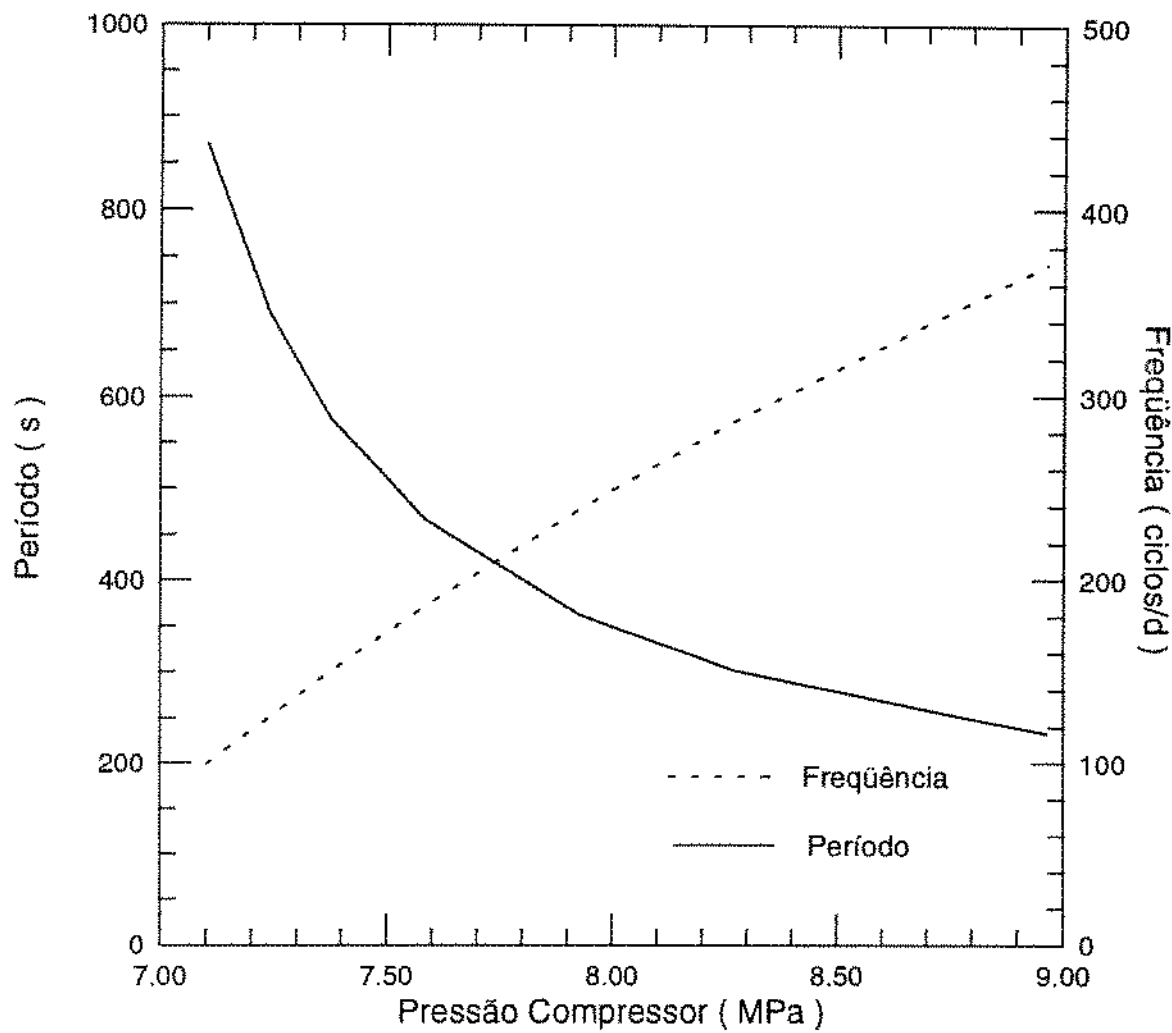


Figura 7.6: Período e Frequência em Função da Pressão do Compressor - Gás Rico.

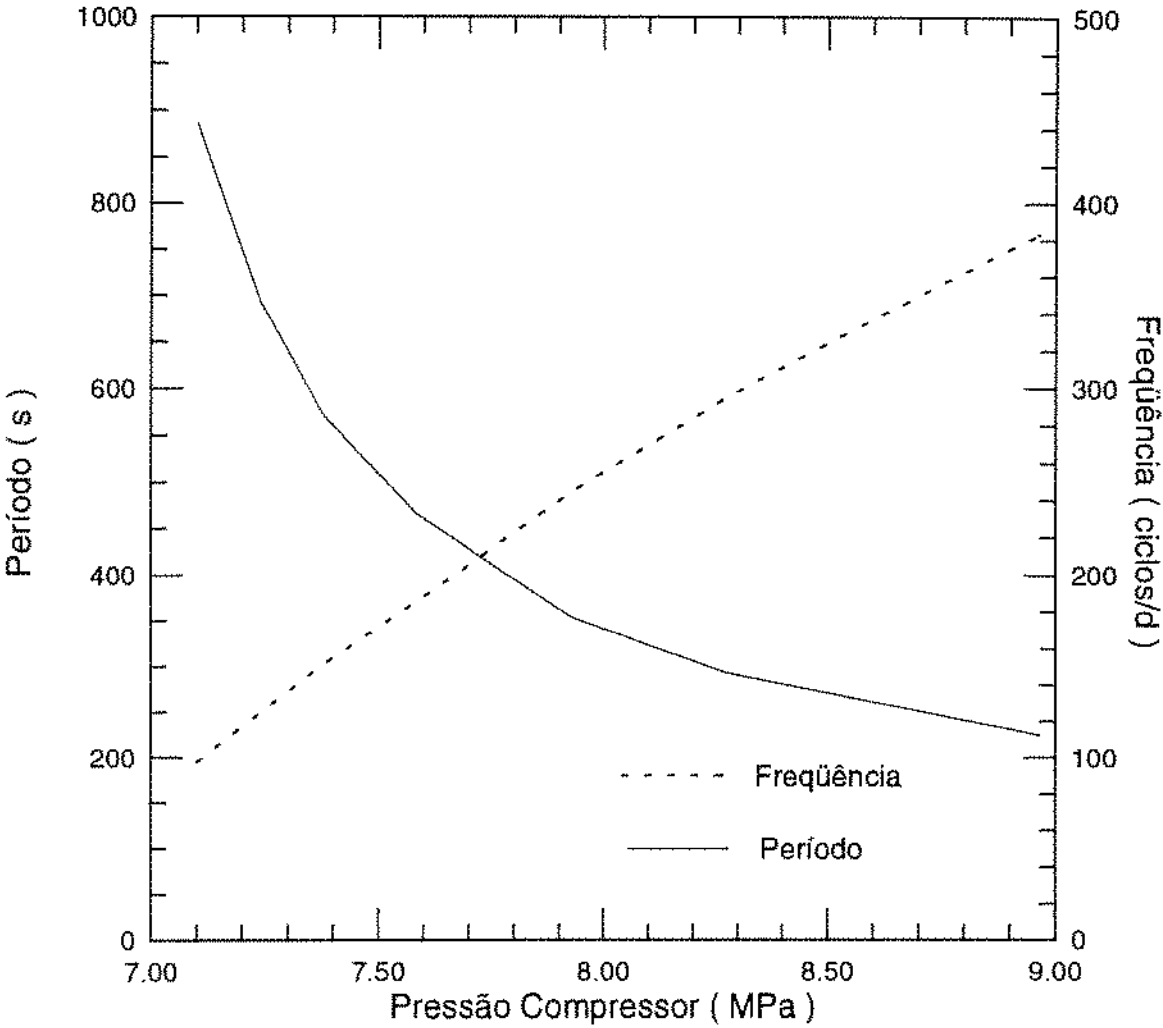


Figura 7.7: Período e Frequência em Função da Pressão do Compressor - Gás Pobre.

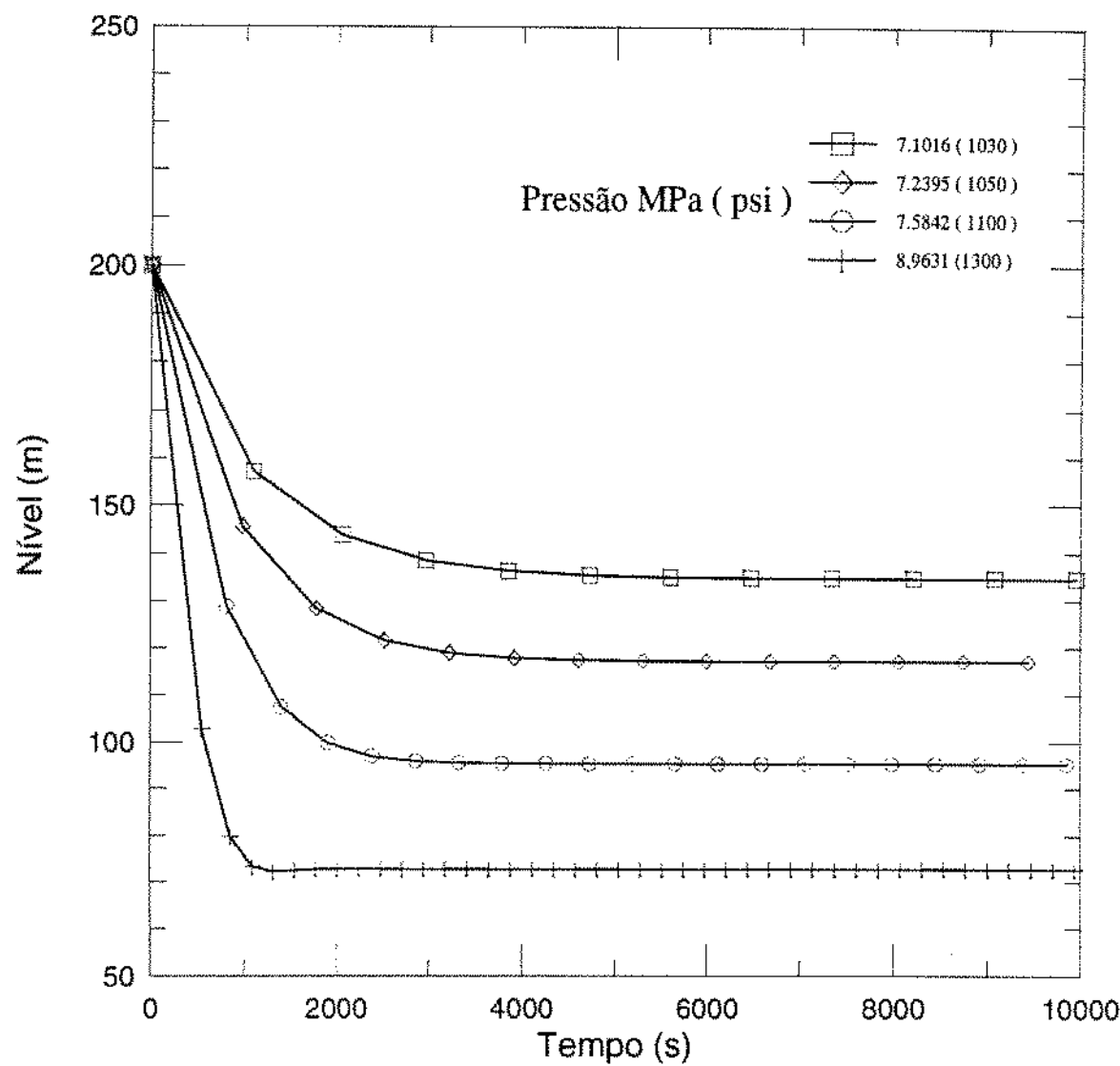


Figura 7.8: Nível da Câmara de Baixa Pressão versus Pressão do Compressor

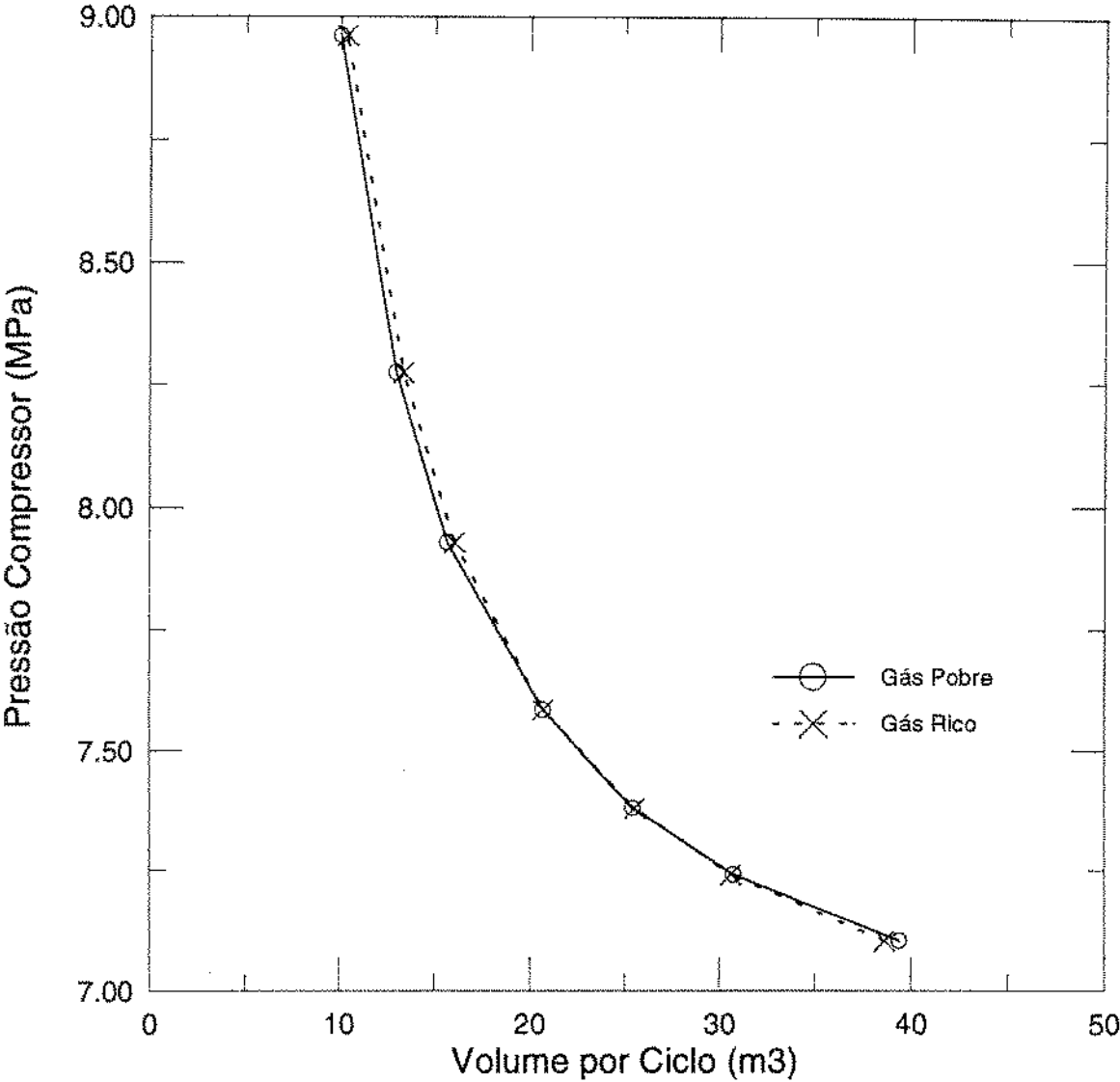


Figura 7.9: Volume por Ciclo em Função da Pressão do Compressor .

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo deste trabalho, qual seja, a modelagem transiente do dispositivo de separação submarina denominado PETROBOOST, foi alcançado. O modelo físico do sistema baseia-se nas equações de conservação da massa e da quantidade de movimento para o gás e o óleo juntamente com condições de contorno apropriadas que permitem o acoplamento dos gasodutos e do oleoduto. Foi desenvolvido um código computacional para a solução do sistema de equações gerado que permitiu simular o comportamento do sistema.

CONCLUSÕES.

A análise dos resultados das simulações realizadas nos conduziu as seguintes conclusões:

1. O modelo desenvolvido representa adequadamente o comportamento imaginado do sistema simulado;
2. O sistema é sensível à pressão de operação de montante do gasoduto de alta pressão. Quanto menor for esta pressão maior será o período de ciclo e, conseqüentemente, menor a freqüência de operação, veja figuras 7.6 e 7.7. Este fato, embora vantajoso sob o aspecto de aumento do tempo de vida útil das válvulas submarinas, possui um limite;
3. Existe uma pressão mínima limite de operação estável do

sistema. Esta pressão é a hidrostática mais o somatório das perdas de carga localizadas e distribuída do oleoduto, para uma vazão de óleo pelo menos igual a da fonte. Qualquer pressão inferior a esta conduzirá a uma vazão da fonte maior que a vazão de transferência. Em isto acontecendo, o sistema tenderia a aumentar o nível a cada ciclo e as câmaras passariam a ciclar por uma condição de nível máximo da câmara de baixa. O simulador identifica esta condição e alerta o operador para aumentar a pressão do compressor;

4. O sistema se auto regula para qualquer que seja a pressão do compressor maior que a pressão mínima de operação. Iniciando a operação do sistema com uma câmara cheia, o nível inicial da etapa de transferência cai a cada ciclo até atingir um valor constante. O nível final de operação é aquele que conduz a uma condição de vazão média de transferência igual a vazão de alimentação da fonte. Como mostrado no capítulo 7, figura 7.6, este nível é função inversa da pressão do compressor;
5. O sistema não atinge um regime cíclico onde temos ao início de cada ciclo as mesmas condições nas câmaras de alta e baixa pressão. Isto só acontecerá se a pressão de compressor nos conduzir a um período de ciclo que seja igual a um múltiplo inteiro do tempo que leva a onda acústica para percorrer o gasoduto de baixa pressão nos dois sentidos. Neste caso encontraríamos sempre a mesma pressão nas câmaras no momento da comutação;
6. Para o cenário estudado descrito no capítulo 7, o

compressor da plataforma de produção deverá ser capaz de responder a uma solicitação de aumento de vazão mássica da ordem de 0,0760 kg/s para 0,2507 kg/s em 2,4 s para uma pressão de descarga de 7,1016 MPa. Esta solicitação se repetirá a cada período de 874 s;

7. O sistema foi pouco sensível a alteração da composição do gás de alta pressão. Ver figura 7.9;

8. As condições simuladas com válvulas tipo *on-off* são as mais desfavoráveis possíveis para a operação do sistema. Em um sistema real as válvulas possuem tempos característicos, de abertura e fechamento. Estes tempos devem conduzir a condições mais suaves nos momentos de ciclagem

RECOMENDAÇÕES.

Devido ao objetivo do trabalho, o escopo do mesmo foi limitado. Achamos pertinente fazer as seguintes recomendações para sequência do mesmo:

1. Construir uma unidade piloto para testes a fim de verificar a validade do modelo ora proposto;
2. Considerar os tempos característicos de abertura e fechamento de válvulas comerciais e estudar seu efeito no comportamento do sistema;
3. Avaliar a conveniência de se utilizar uma outra equação de estado para o gás natural;
4. Obter dos fabricantes de linhas flexíveis especificações

- técnicas completas das linhas. Em particular os Módulos de Elasticidade de Young e a razão de Poisson, necessários ao cálculo da velocidade da onda acústica no oleoduto;
5. Estudar o efeito da liberação parcial de gás dentro do oleoduto na velocidade da onda acústica e na redução da altura manométrica necessária a montante do mesmo;
 6. Incluir no simulador uma rotina para cálculo do fator de atrito para o gás. Esta rotina deverá considerar todas as propriedades do mesmo;
 7. Avaliar a conveniência de se considerar o escoamento não isotérmico no desenvolvimento do modelo. Salientamos que neste caso deveremos não só incluir a equação de conservação da energia como também verificar o efeito da temperatura no cálculo do fator de compressibilidade do gás e, portanto, no cálculo da velocidade da onda acústica nos gasodutos;
 8. Verificar o comportamento do sistema com a utilização de $\frac{dx}{dt}=u \pm B$ e $\frac{dx}{dt}=u \pm a$ como direções características para os gasodutos e oleoduto, respectivamente. Atentar para a possibilidade de ocorrência de choque devido às direções características positiva e negativa serem diferentes.
 9. Estudar o resfriamento causado por despressurizações súbitas visando eventual possibilidade de congelamento das válvulas devido a expansão do gás durante a comutação das câmaras e verificar alternativas.
 10. Efetuar um balanço de energia para o sistema a fim de levantar a eficiência global do mesmo. Consideramos muito

importante avaliar adequadamente a contribuição das componentes inerciais transientes do sistema;

11. Por fim, recomendamos efetuar uma criteriosa análise de sensibilidade de parâmetros a fim de identificar a condição ótima de projeto e operação do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Minami K.: " Sistema Submerso Para Produção e Transporte de Hidrocarbonetos.", Patente Brasileira PI 870528, 1987.
- [2] Minami K.: " Sistema e Processo Para Transporte de Hidrocarbonetos a Longas Distâncias.", Patente Brasileira PI 9205026, 1992.
- [3] Streeter V.L., Wylie E.B.: " Hidraulics Transients " Mac Graw Hill, New York, 1967.
- [4] Streeter V.L., Wylie E.B.: " Natural Gas Pipeline Transients ", SPE 2555, SPE Journal Dec 1970, pp 357-364.
- [5] Streeter V.L., Wylie E.B., Stoner M.A.: " Network System Transient Calculations By Implicit Method", SPE 2963, SEP Journal Dec 1971, pp 356-362.
- [6] Streeter V.L., Wylie E.B., Stoner M.A.: " Unsteady State Natural Gas Calculations In Complex Pipe Systems ", SPE 4004, SPE Journal Fev 1974, pp 35-43.
- [7] Stoner M.A.: " Analysis And Control Of Unsteady Flows In Natural Gas Piping Systems ", Ph.D Thesis, The Univ. of Michigan, Ann Arbor 1968.
- [8] Streeter, V.L.: " Unsteady Flow Calculations By Numerical Methods ", Journal of Basic Engineering Transactions ASME Jun 1972, pp 457-466.
- [9] Streeter V.L., Wylie E.B.: " Fluid Transients ", FEB Press, Ann Arbor, Michigan, 1983.

- [10] Yow W: " Analysis And Control Of Transient Flow In Natural Gas Piping Systems ", Ph.D Dissertation, The Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1971.
- [11] Yow W: " Numerical Errors In Natural Gas Transient Calculations ", Paper 72-FE-26, Journal of Basic Engineering Transactions ASME Jun 1972., pp 422-428.
- [12] Propson T.P., " Unsteady Flow Calculations By Numerical Methods ", Journal of Basic Engineering Transactions ASME Jun 1972, pp. 465-466.
- [13] Dias S.G.: " Modelo Não Isotérmico De Um Sistema Poço Reservatório Operando Com Fluido Pseudo-Homogêneo.", Tese de Mestrado, UNICAMP 1990.
- [14] Brekke K.: " Gas And Liquid Three Stroke Separation Transportation System ", MSc Thesis, The Univ. of Tulsa, Tulsa, 1990.
- [15] Abbott M.B.: " An Introduction To The Method Of Characteristics ", American Elsevier, New York 1966.
- [16] Hadamard J.: "Lectures On Cauchy's Problem In Linear Partial Differential Equations ", Dover, New York, 1952.
- [17] Courant R., Friedrichs K.O.: " Supersonic Flow And Shock Waves ", Interscience, New York, 1948.
- [18] Courant R.: " Methods Of Mathematical Physics ", Vol-II Partial Differential Equations, Interscience, New York, 1962.
- [19] Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N: " Transport Phenomena ", John Wiley & Sons, New York, 1960.
- [20] Slattery J.C.: " Momentum, Energy, And Mass Transfer

- In Continua ", McGraw-Hill Kogakusha, Tokio, 1972.
- [21] Chen N.H.: " An Explicit Equation For Friction Factor In Pipe. ", Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol 18, N° 3, 1979, pp 296- 297.
- [22] Yarborough L., Hall K.R.: " A New Equation Of State For Z Factor Calculations. ", The Oil and Gas Journal, Jun 18, 1973, pp 82-92.
- [23] Yarborough L., Hall K.R.: " How To Solve Equation Of State For Z Factor. ", The Oil and Gas Journal, Feb 18, 1974, pp 86-88.
- [24] Katz D.L., Lee R.L.: " Natural Gas Engineering. ", McGraw-Hill, New York, 1990.
- [25] Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., " Numerical Recipes In C ", Cambridge University Press, Cambridge, 1988.

ANEXOS

ANEXO A - Fluxogramas

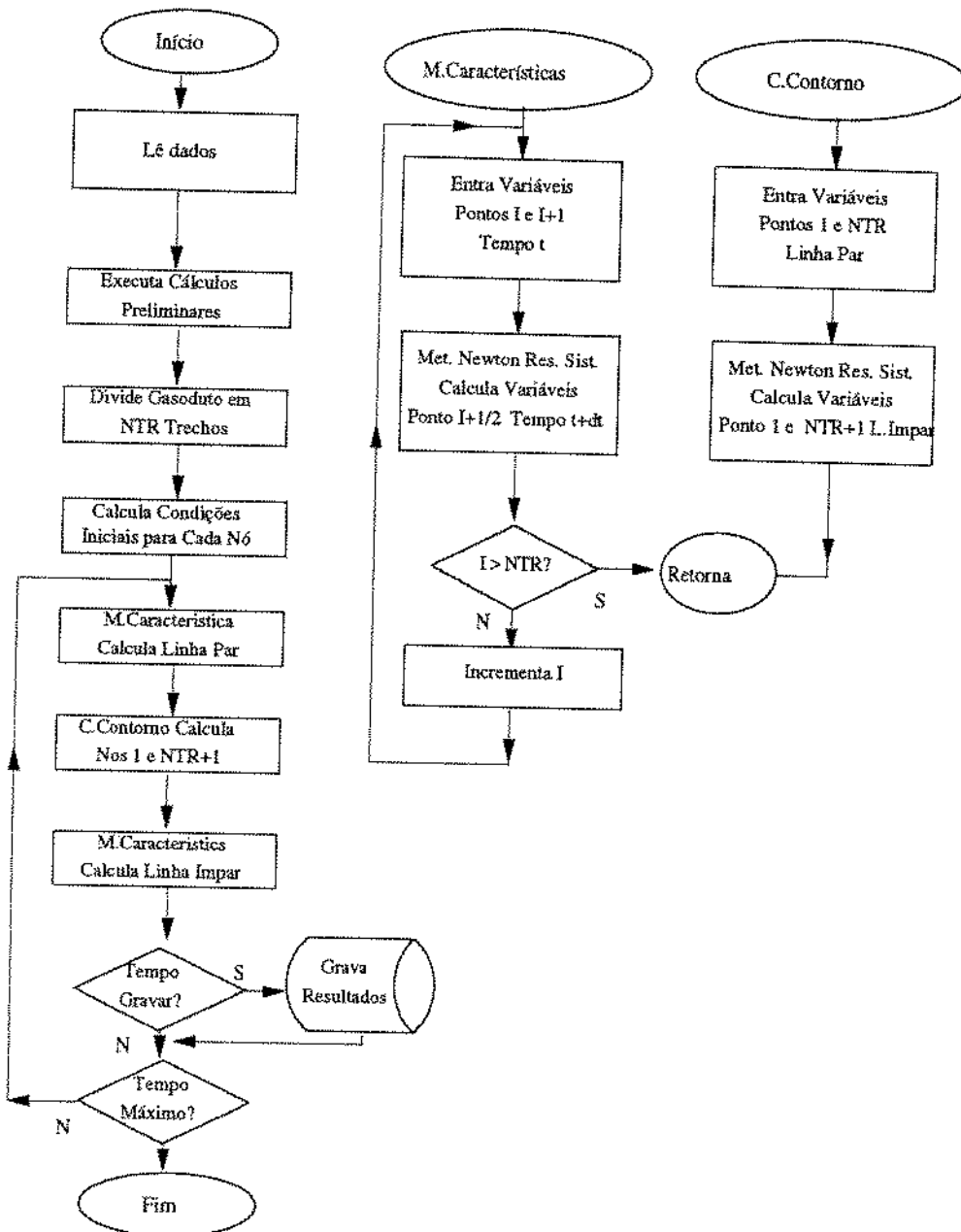


Figura A.1: Fluxograma para o programa dos gasodutos.

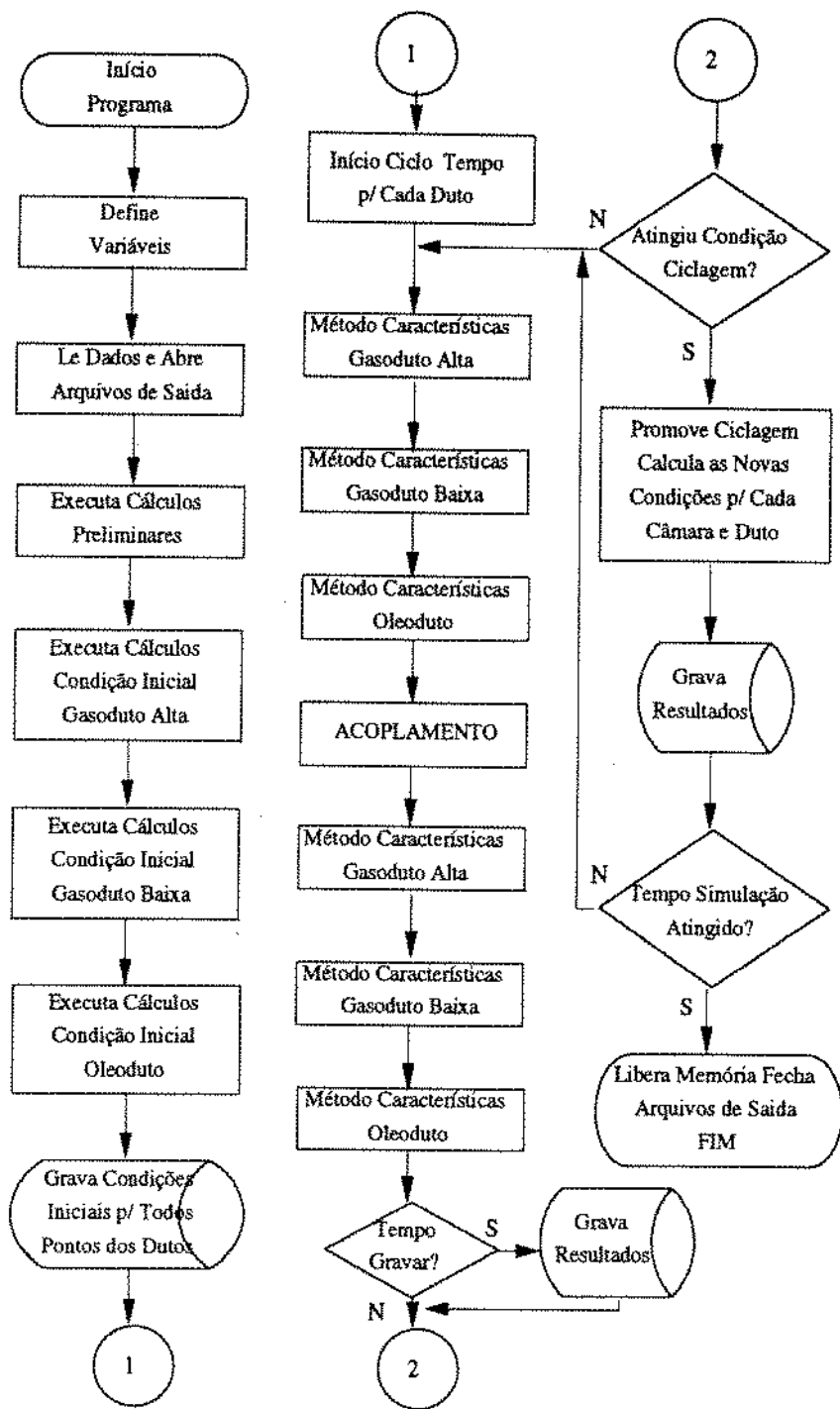


Figura A.2: Fluxograma do Programa principal do Simulador.

ANEXO B - Desenvolvimento Algébrico do Sistema dos Gasodutos.

Partindo da equação

$$\frac{B}{A}(M_P - M_A) + (p_P - p_A) + \int_A^P \left(\frac{p g \sin \theta}{B^2} + \frac{f B^2 M^2}{2 D A^2 p} \right) dx = 0 \quad (3.37)$$

Vamos utilizar a solução para o regime Permanente para obter o valor da integral.

$$dp + \left(\frac{p g \sin \theta}{B^2} + \frac{f B^2 M^2}{2 D A^2 p} \right) dx = 0 \quad (B.1)$$

Racionalizando o termo entre parênteses da equação B.1 e substituindo na mesma obtemos:

$$\frac{p g \sin \theta}{B^2} + \frac{f B^2 M^2}{2 D A^2 p} = \frac{2 D A^2 p^2 g \sin \theta + f B^4 M^2}{2 D A^2 p B^2} \quad (B.2)$$

$$\frac{2 D A^2 p B^2}{2 D A^2 p^2 g \sin \theta + f B^4 M^2} dp + dx = 0 \quad (B.3)$$

Se observarmos que:

$$\frac{d(2 D A^2 g \sin \theta p^2 + f B^4 M^2)}{dp} = 4 D A^2 g \sin \theta p \quad (B.4)$$

podemos multiplicar a equação B.3 por $\frac{2 g \sin \theta}{B^2}$ e obter:

$$\int_A^P \frac{4 D A^2 g \sin \theta p}{2 D A^2 p^2 g \sin \theta + f B^4 M^2} dp + 2 g \sin \theta \int_A^P dx = 0 \quad (B.5)$$

resolvendo a integral em x e substituindo o resultado por uma variável S definida como:

$$S = \frac{2 g \sin \theta \Delta x}{B^2} \quad (\text{B.6})$$

obtemos:

$$\int_A^P \frac{4 D A^2 g \sin \theta p}{2 D A^2 p^2 g \sin \theta + f B^4 M^2} dp + S = 0 \quad (\text{B.7})$$

definindo

$$U = (2 D A^2 p^2 g \sin \theta + f B^4 M^2) \quad (\text{B.8})$$

$$\int_A^P \frac{dU}{U} + S = 0 \quad (\text{B.9})$$

$$[\ln(U)]_A^P + S = 0 \quad (\text{B.10})$$

$$\frac{U_P}{U_A} = \exp(-S) \Rightarrow \frac{2 D A^2 g \sin \theta p_A^2 + f B^4 M^2}{2 D A^2 g \sin \theta p_P^2 + f B^4 M^2} = \exp(S) \quad (\text{B.11})$$

dividindo por $2 D A^2 g \sin \theta$

$$\frac{p_A^2 + \frac{f B^4 M^2}{2 D A^2 g \sin \theta}}{p_P^2 + \frac{f B^4 M^2}{2 D A^2 g \sin \theta}} = \exp(S) \quad (\text{B.12})$$

desenvolvendo a equação B.12 temos:

$$p_A^2 + \frac{f B^4 M^2}{2 D A^2 g \sin \theta} = \exp(S) p_P^2 + \exp(S) \frac{f B^4 M^2}{2 D A^2 g \sin \theta} \quad (\text{B.13})$$

$$p_A^2 + \frac{f B^4 M^2}{2 D A^2 g \sin \theta} (1 - \exp(S)) = \exp(S) p_P^2 \quad (\text{B.14})$$

dividindo e multiplicando por

$$S = \frac{2 g \sin \theta \Delta x}{B^2} \quad (\text{B.15})$$

$$p_A^2 - \frac{f B^2 M^2 \Delta x (\exp(S) - 1)}{D A^2 S} = \exp(S) p_P^2 \quad (\text{B.16})$$

$$p_P^2 = \frac{p_A^2 - \frac{f B^2 M^2 \Delta x (\exp(S) - 1)}{D A^2 S}}{\exp(S)} \quad (\text{B.17})$$

ou

$$p_A^2 = \exp(S) p_P^2 + \frac{f B^2 M^2 \Delta x (\exp(S) - 1)}{D A^2 S} \quad (\text{B.18})$$

subtraindo a ambos os lados p_P^2

$$p_A^2 - p_P^2 = p_P^2 (\exp(S) - 1) + \frac{f B^2 M^2 \Delta x (\exp(S) - 1)}{D A^2 S} \quad (\text{B.19})$$

substituindo $p_A^2 - p_P^2 = (p_A - p_P) \cdot (p_A + p_P)$ e dividindo por $(p_A + p_P)$

$$p_A - p_P = \frac{p_P^2 (\exp(S) - 1)}{p_A + p_P} + \frac{1}{p_A + p_P} \frac{f B^2 M^2 \Delta x (\exp(S) - 1)}{D A^2 S} \quad (\text{B.20})$$

substituindo na equação (3.37) juntamente com as seguintes variáveis auxiliares:

$$K1 = \frac{B}{A}, \quad E = \frac{\exp(S)-1}{S}, \quad K2 = \frac{f \cdot B^2 \cdot E}{D \cdot A^2} \quad (\text{B.21, 22, 23})$$

teremos:

$$K1(M_P - M_A) + (p_P - p_A) + \frac{K2 \cdot M \cdot |M| \cdot \Delta x + p_P^2 (\exp S - 1)}{p_A + p_P} = 0 \quad (\text{B.24})$$

que é a forma com a qual trataremos nosso problema.

Solução do Sistema de Equações Algébricas Não Lineares.

A modelagem do sistema dos gasodutos nos conduziu ao seguinte sistema de equações algébricas não lineares (equações B.25 a B.28):

$$F1 = K1(M_P - M_A) + (p_P - p_A) + \frac{K2 M |M| (x_P - x_A) + p_P^2 (\exp S - 1)}{p_A + p_P} = 0 \quad (\text{B.25})$$

$$F2 = (x_P - x_A) - B(t_P - t_A) = 0 \quad (\text{B.26})$$

$$F3 = K1(M_P - M_B) - (p_P - p_B) + \frac{K2 M |M| (x_B - x_P) + p_B^2 (\exp S - 1)}{p_B + p_P} = 0 \quad (\text{B.27})$$

$$F4 = (x_P - x_B) + B(t_P - t_B) = 0 \quad (\text{B.28})$$

Admitindo uma aproximação de segunda ordem para a variável M teremos:

$$F5 = M_p + M_A - 2M = 0 \quad (B.29)$$

Resulta portanto em um Sistema Algébrico Não-Linear com Cinco Equações e Cinco Incógnitas. Para a solução deste sistema é utilizado o Método de Newton . O primeiro passo é a montagem da matriz das derivadas das funções com relação a cada uma das variáveis. Esta matriz recebe o nome de Matriz Jacobiana do sistema.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F1}{\partial M_p} & \frac{\partial F1}{\partial P_p} & \frac{\partial F1}{\partial x_p} & \frac{\partial F1}{\partial t_p} & \frac{\partial F1}{\partial M} \\ \frac{\partial F2}{\partial M_p} & \frac{\partial F2}{\partial P_p} & \frac{\partial F2}{\partial x_p} & \frac{\partial F2}{\partial t_p} & \frac{\partial F2}{\partial M} \\ \frac{\partial F3}{\partial M_p} & \frac{\partial F3}{\partial P_p} & \frac{\partial F3}{\partial x_p} & \frac{\partial F3}{\partial t_p} & \frac{\partial F3}{\partial M} \\ \frac{\partial F4}{\partial M_p} & \frac{\partial F4}{\partial P_p} & \frac{\partial F4}{\partial x_p} & \frac{\partial F4}{\partial t_p} & \frac{\partial F4}{\partial M} \\ \frac{\partial F5}{\partial M_p} & \frac{\partial F5}{\partial P_p} & \frac{\partial F5}{\partial x_p} & \frac{\partial F5}{\partial t_p} & \frac{\partial F5}{\partial M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_p \\ P_p \\ x_p \\ t_p \\ M \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \\ F4 \\ F5 \end{bmatrix}$$

(B.30)

$$\frac{\partial F1}{\partial M_p} = K1(P_p + P_A) \quad (B.31)$$

$$\frac{\partial F1}{\partial P_p} = K1(M_p - M_A) + 2P_p + 2P_p(\exp S - 1) \quad (B.32)$$

$$\frac{\partial F1}{\partial x_p} = K2 M |M| \quad (B.33)$$

$$\frac{\partial F1}{\partial t_p} = \frac{\partial F3}{\partial t_p} = 0 \quad (\text{B.34})$$

$$\frac{\partial F1}{\partial M} = K2 (X_p - X_A) 2|M| \quad (\text{B.35})$$

$$\frac{\partial F2}{\partial X_p} = 1 \quad (\text{B.36})$$

$$\frac{\partial F2}{\partial t_p} = -B \quad (\text{B.37})$$

$$\frac{\partial F2}{\partial M_p} = \frac{\partial F2}{\partial P_p} = \frac{\partial F2}{\partial M} = 0 \quad (\text{B.38})$$

$$\frac{\partial F3}{\partial M_p} = K1 (P_p + P_B) \quad (\text{B.39})$$

$$\frac{\partial F3}{\partial P_p} = K1 (M_p - M_B) + 2P_p \quad (\text{B.40})$$

$$\frac{\partial F3}{\partial x_p} = -K2 M |M| \quad (\text{B.41})$$

$$\frac{\partial F3}{\partial M} = K2 (X_B - X_p) 2|M| \quad (\text{B.42})$$

$$\frac{\partial F4}{\partial X_p} = 1 \quad (\text{B.43})$$

$$\frac{\partial F4}{\partial t_p} = B \quad (\text{B.44})$$

$$\frac{\partial F4}{\partial M_p} = \frac{\partial F4}{\partial P_p} = \frac{\partial F4}{\partial M} = 0 \quad (\text{B.45})$$

ANEXO C - Desenvolvimento do Sistema Algébrico do Acoplamento.

Neste anexo trataremos do sistema de equações algébricas não lineares desenvolvidas no capítulo 5 referentes ao acoplamento do sistema. O conjunto de equações C1 a C8 é resolvido utilizando o método de Newton. A equação 3.9 é a forma matricial do método. A primeira matriz do termo do lado direito é denominada de matriz Jacobiana do sistema e é formada pelas derivadas parciais de cada uma das equações com relação a cada uma das incógnitas do sistema. Estas derivadas são desenvolvidas a seguir.

$$J_1 = (L_{Cam} - h)(P_p - P_i) - P(h_p - h_i) - \frac{M z R_{GN} T}{A_{Cam}} \Delta t = 0 \quad (C.1)$$

$$J_2 = K1(M_p - M_a)(P_p + P_a) + (P_p^2 - P_a^2) + K2(LG - X_a)M|M| = 0 \quad (C.2)$$

$$J_3 = \left(\frac{P_p}{\rho_o \cdot g} + h_p - H_B \right) - K3(Q_p - Q_B) + K4Q|Q|X_B = 0 \quad (C.3)$$

$$J_4 = A_{Cam}(h_p - h_i) - Q \Delta t \quad (C.4)$$

$$J_5 = M_p + M_i - 2M = 0 \quad (C.5)$$

$$J_6 = Q_p + Q_i - 2Q = 0 \quad (C.6)$$

$$J_7 = P_p + P_i - 2P = 0 \quad (C.7)$$

$$J_8 = h_p + h_i - 2h = 0 \quad (C.8)$$

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\partial J_1}{\partial P_p} & \frac{\partial J_1}{\partial M_p} & \frac{\partial J_1}{\partial Q_p} & \frac{\partial J_1}{\partial h_p} & \frac{\partial J_1}{\partial P} & \frac{\partial J_1}{\partial M} & \frac{\partial J_1}{\partial Q} & \frac{\partial J_1}{\partial h} \\
 \frac{\partial J_2}{\partial P_p} & \frac{\partial J_2}{\partial M_p} & \frac{\partial J_2}{\partial Q_p} & \frac{\partial J_2}{\partial h_p} & \frac{\partial J_2}{\partial P} & \frac{\partial J_2}{\partial M} & \frac{\partial J_2}{\partial Q} & \frac{\partial J_2}{\partial h} \\
 \frac{\partial J_3}{\partial P_p} & \frac{\partial J_3}{\partial M_p} & \frac{\partial J_3}{\partial Q_p} & \frac{\partial J_3}{\partial h_p} & \frac{\partial J_3}{\partial P} & \frac{\partial J_3}{\partial M} & \frac{\partial J_3}{\partial Q} & \frac{\partial J_3}{\partial h} \\
 \frac{\partial J_4}{\partial P_p} & \frac{\partial J_4}{\partial M_p} & \frac{\partial J_4}{\partial Q_p} & \frac{\partial J_4}{\partial h_p} & \frac{\partial J_4}{\partial P} & \frac{\partial J_4}{\partial M} & \frac{\partial J_4}{\partial Q} & \frac{\partial J_4}{\partial h} \\
 \frac{\partial J_5}{\partial P_p} & \frac{\partial J_5}{\partial M_p} & \frac{\partial J_5}{\partial Q_p} & \frac{\partial J_5}{\partial h_p} & \frac{\partial J_5}{\partial P} & \frac{\partial J_5}{\partial M} & \frac{\partial J_5}{\partial Q} & \frac{\partial J_5}{\partial h} \\
 \frac{\partial J_6}{\partial P_p} & \frac{\partial J_6}{\partial M_p} & \frac{\partial J_6}{\partial Q_p} & \frac{\partial J_6}{\partial h_p} & \frac{\partial J_6}{\partial P} & \frac{\partial J_6}{\partial M} & \frac{\partial J_6}{\partial Q} & \frac{\partial J_6}{\partial h} \\
 \frac{\partial J_7}{\partial P_p} & \frac{\partial J_7}{\partial M_p} & \frac{\partial J_7}{\partial Q_p} & \frac{\partial J_7}{\partial h_p} & \frac{\partial J_7}{\partial P} & \frac{\partial J_7}{\partial M} & \frac{\partial J_7}{\partial Q} & \frac{\partial J_7}{\partial h} \\
 \frac{\partial J_8}{\partial P_p} & \frac{\partial J_8}{\partial M_p} & \frac{\partial J_8}{\partial Q_p} & \frac{\partial J_8}{\partial h_p} & \frac{\partial J_8}{\partial P} & \frac{\partial J_8}{\partial M} & \frac{\partial J_8}{\partial Q} & \frac{\partial J_8}{\partial h}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 P_p \\
 M_p \\
 Q_p \\
 h_p \\
 P \\
 M \\
 Q \\
 h
 \end{bmatrix}
 = -
 \begin{bmatrix}
 J_1 \\
 J_2 \\
 J_3 \\
 J_4 \\
 J_5 \\
 J_6 \\
 J_7 \\
 J_8
 \end{bmatrix}
 \quad (C.9)$$

$$\frac{\partial J_1}{\partial P_p} = (L_{cam} - h) \quad \frac{\partial J_1}{\partial h_p} = -P \quad (C.10, 11)$$

$$\frac{\partial J_1}{\partial P} = (h_p - h_i) \quad \frac{\partial J_1}{\partial M} = -\left(\frac{zR_{GN}T\Delta t}{A_{cam}} \right) \quad (C.12, 13)$$

$$\frac{\partial J_1}{\partial h} = (P_p - P_i) \quad (C.14)$$

$$\frac{\partial J_1}{\partial M_p} = \frac{\partial J_1}{\partial Q_p} = \frac{\partial J_1}{\partial Q} = 0 \quad (C.15)$$

$$\frac{\partial J_2}{\partial P_p} = K1.(M_p - M_A) + 2.P_p \quad \frac{\partial J_2}{\partial M_p} = K1.(P_p + P_A) \quad (C.16, 17)$$

$$\frac{\partial J_2}{\partial M} = 2.K2.(LG - X_A).|M| \quad (C.18)$$

$$\frac{\partial J_2}{\partial Q_p} = \frac{\partial J_2}{\partial h_p} = \frac{\partial J_2}{\partial P} = \frac{\partial J_2}{\partial Q} = \frac{\partial J_2}{\partial h} = 0 \quad (C.19)$$

$$\frac{\partial J_3}{\partial P_p} = \frac{g_c}{\rho_o \cdot g} \quad \frac{\partial J_3}{\partial Q_p} = -K3 \quad (C.20, 21)$$

$$\frac{\partial J_3}{\partial h_p} = 1 \quad \frac{\partial J_3}{\partial Q} = 2 \cdot K4 \cdot X_{Bo} \cdot |Q| \quad (C.22, 23)$$

$$\frac{\partial J_3}{\partial M_p} = \frac{\partial J_3}{\partial P} = \frac{\partial J_3}{\partial M} = \frac{\partial J_3}{\partial h} = 0 \quad (C.24)$$

$$\frac{\partial J_4}{\partial h_p} = A_{cam} \quad \frac{\partial J_4}{\partial Q} = \Delta t \quad (C.25, 26)$$

$$\frac{\partial J_4}{\partial P_p} = \frac{\partial J_4}{\partial M_p} = \frac{\partial J_4}{\partial Q_p} = \frac{\partial J_4}{\partial P} = \frac{\partial J_4}{\partial M} = \frac{\partial J_4}{\partial h} = 0 \quad (C.27)$$

$$\frac{\partial J_5}{\partial P_p} = 1 \quad \frac{\partial J_5}{\partial P} = -2 \quad (C.28, 29)$$

$$\frac{\partial J_5}{\partial M_p} = \frac{\partial J_5}{\partial Q_p} = \frac{\partial J_5}{\partial h_p} = \frac{\partial J_5}{\partial M} = \frac{\partial J_5}{\partial Q} = \frac{\partial J_5}{\partial h} = 0 \quad (C.30, 31)$$

$$\frac{\partial J_6}{\partial M_p} = 1 \quad \frac{\partial J_6}{\partial M} = -2 \quad (C.32, 33)$$

$$\frac{\partial J_6}{\partial P_p} = \frac{\partial J_6}{\partial Q_p} = \frac{\partial J_6}{\partial h_p} = \frac{\partial J_6}{\partial P} = \frac{\partial J_6}{\partial Q} = \frac{\partial J_6}{\partial h} = 0 \quad (C.34)$$

$$\frac{\partial J_7}{\partial Q_p} = 1 \qquad \frac{\partial J_7}{\partial Q} = -2 \qquad (C.35, 36)$$

$$\frac{\partial J_7}{\partial P_p} = \frac{\partial J_7}{\partial M_p} = \frac{\partial J_7}{\partial h_p} = \frac{\partial J_7}{\partial P} = \frac{\partial J_7}{\partial M} = \frac{\partial J_7}{\partial h} = 0 \qquad (C.37)$$

$$\frac{\partial J_8}{\partial h_p} = 1 \qquad \frac{\partial J_8}{\partial h} = -2 \qquad (C.38, 39)$$

$$\frac{\partial J_8}{\partial P_p} = \frac{\partial J_8}{\partial M_p} = \frac{\partial J_8}{\partial Q_p} = \frac{\partial J_8}{\partial P} = \frac{\partial J_8}{\partial M} = \frac{\partial J_8}{\partial Q} = 0 \qquad (C.40)$$

/* PTBOOST.C

Programa de Simulacao do PETROBOOST.

Paulo Moreira de Carvalho

22 de Setembro 1993 */

```

#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <time.h>
#include "al_dupla.h"
#include "indat.c"
#include "aloc_din.c"
#include "mnewt.c"
#include "acoplfun.c"
#include "lu.c"
#include "zfac.c"

#define PI 3.14159265358979323846

double rr; /* Rugosidade Relativa */
double QL; /* Vazao de Oleo ( m3/d ) */
double RGL; /* Razao Gas/Oleo (m3/m3) */
double BSW; /* Fracao de Agua e Sedimentos (%) */
double QG; /* Vazao de Gas ( m3/d ) */
double dens; /* Densidade do Oleo */
double MIL,MIG; /* Viscosidades de Oleo e Gas ( kg/m.s ) */
double visc; /* Viscosidade Corrigida p/ Temperatura */
double api; /* Grau API do Petroleo. */
double td, te; /* Tempos de Enchimento e Descarga (s) */
double vl,vg; /* Velocidades de Liquido e Gas (m/s) */
double volcam; /* Volume da Camara Separacao (m3) */
double volgd; /* Volume de Gas para Descarga (m3) */
double qgd; /* Vazao Gas Descarga (m3/s) */
double Rel; /* Numero de Reynolds Liquido */
double Reg; /* Numero de Reynolds Gas */
char regime[20];
double S; /*  $2.G.\sin(ANG).deltX/B^2$  */
double E; /*  $[\exp(S) - 1]/S$  */
double S1,E1;
double K1, K2; /* Constantes do Gasoduto. */
double K3, K4; /* Constantes do Oleoduto. */
double DG, DO; /* Diametro dos Dutos . */
double epsilon; /* Rugosidade Absoluta. */
double ag, ao; /* Area da Secao Transversal dos Dutos. */
double fG, fO; /* Coeficientes de Atrito. */
int NTR, NTO; /* Numero de Trechos dos Dutos. */
double H; /* Altura Total Camara Separacao . */
double h; /* Altura de Liquido na Camara. */
double hmax, hmin; /* Alt. Liquido Maxima e Minima Camara. */
double DCAM; /* Diametro da Camara de Separacao (m) */
double acam; /* Area da Secao " */
double ANG; /* Angulo Medio do Trecho c/ Horizontal. */
double G; /* Aceleracao Gravidade. */
double gc; /* lbm.ft / lbf.s^2 */
double Rgn; /* Const. U Gas Natural. */
double GAMA; /* Razao Cp/Cv. */

```

```

double z;          /* Fator Compressibilidade. */
double ROO;        /* Peso Especifico Oleo. */
double ROG;        /* " Gas dens=.75 " */
double PCOMP;      /* Pressao Operacao Compressor. */
double PSURGE;     /* Pressao Operacao Surge-Tank. */
double PSCRUB;     /* Pressao Operacao Gas-Scrubber. */
double T;          /* Temperatura Media ( K ). */
double L, LG;      /* Distancia Total Plat. - PTBOOST */
double B;          /* Velocidade Som Gas Natural. */
double aa;         /* Velocidade Caracter. Oleoduto. " */
double tmin=0.0, tmax; /* Tempos Minimios e Maxima. */
int LAGUA, RISER;  /* Lamina d'agua e Riser. */
int NP;           /* Numero de Variaveis a Calcular. */
int imp;          /* Intervalos Tempo p/ Impressao. */
int LT;           /* Numero de Lacos de Tempo. */
double *s;
double *Pi, *Pp, *Mi, *Mp;
double *Pib, *Ppb, *Mib, *Mpb;
double *Hi, *Hp, *Qi, *Qp;
double *xi, *xp, *xGi, *xGp, arg;
double *ti, *tp;
double R, Q0, H0, M0;

/* Variaveis das Condicoes de Contorno. */
double P, Ps, Pa, Pb, Pab, Pbb, Pt; /* Pressoes. */
double M, Ma, Mb, Mab, Mbb; /* Vazoes Massicas. */
double Q, Qa, Qb; /* Vazoes Volumetricas. */
double Ha, Hb; /* Heads. */
double Xa, Xb, Xao, Xbo; /* Posicoes. */
double Pant, Mant, Qant, hant, Hant; /* Variaveis no Tempo Anterior. */
double ta, tb, deltt; /* Tempos e Intervalo de Tempo. */
double delTX, delXO; /* Comprimento dos Trechos. */
double FCP, FCT; /* Fatores Correcao p/ Kg/cm^2. */
double fcp=47.880258e-6; /* Fatores Conversao psf ==> MPa */
double fcv; /* Fatores Convercao ft^3 ==> m^3 */
double fcc=.3048; /* Fatores Convercao ft ==> m */
double fcm=.45359; /* Fatores Convercao lbm ==> kg */
double hc, hs, ht, t, tt, ts;
double hciclo, tciclo;

FILE *sai, *sai1, *sai2, *saib;

void main()
{
    int i, ii=0, j, k, nn; /* Contadores de Lacos de Repeticao. */
    int il=0, aprint=0; /* Marcador para Impressao. */
    void m_cG(); /* Funcao Metodo Caracteristicas. */
    void m_cO(); /* Funcao " " Oleoduto. */
    void indat(); /* Funcao de Entrada de Dados. */
    void imprime(); /* Funcao Conversao p/ SI e Impressao. */
    void aloc_din(); /* Funcao de Alocacao Dinamica Vet/Mat */
    void acopl(); /* Funcao de Acoplamento dos Dutos. */
    float zfac(); /* Funcao para Calculo do Fator z. */
    float ffric();
    float aliment();

    indat();

```

inicio:

```

/*                      Calculos Preliminares.                      */

fcv=pow(.3048,3);
ag = PI*DG*DG/4.0;
ao = PI*DO*DO/4.0;
acam=PI*DCAM*DCAM/4;
volcam=acam*H;
td=.6*volcam/QL;
volgd=0.8*volcam;
qgd=volgd/td;
dens=ROO/62.4269;
api=(141.5-131.5*dens)/dens;
rr=epsilon/DO;
vl=QL/ao;
Rel=DO*vl*ROO/MIL;
if(Rel>=10000.)
    { fO=ffric(Rel,rr); strcpy(regime,"TURBULENTO"); }
    else if(Rel<=2100.)
    { fO=64./Rel; strcpy(regime,"LAMINAR"); }
    else
    { strcpy(regime,"TRANSICAO");}
fO=ffric(Rel,rr);
z = zfac(PCOMP/FCP,T/FCT);
B = sqrt(GAMA*z*Rgn*T);
if( aa/B - floor(aa/B) > 0.5) NTR = (floor( aa/B )+1) * NTO;
    else NTR = floor( aa/B ) * NTO;
LG=NTR*B*L/(NTO*aa);
deltX = LG/NTR; deltt = delttX/B; /* printf("\n Deltat = %f\n",deltt);*/
deltXO = L/NTO;
S = 2.0*G*sin(ANG)*deltX/(B*B);
if (ANG == 0) E = 1.0;
    else E = (exp(S)-1.0)/S;
S1=S/2;
if (S1 == 0.0) E1=1.0;
    else E1=(exp(S1)-1.0)/S1;

K1 = B/ag;                      K2 = fG*B*B/(DG*ag*ag);
K3 = aa/(G*ao);                 K4 = fO/(2.*DO*ao*ao*G);
R=fO*deltXO/(2.*DO*G*ao*ao);

aloc_din();

/*      Condições Iniciais. Sistema em Equilíbrio Estático.      */

fprintf(sai,"\n\tTempo= 0 seg.\n\n\t Posicao\t Vazao\t Pressao");
fprintf(sai,"\n\t X(ft)\t M(lb/s)\t P(psf)\n");

ts = hc = 0.0;
for (i=1;i<=10000;i++)
{
    t+=deltt;
    hc = aliment(t,hc);
    ts = t; hs = hc;
    if (hc>=hmax) break;
}

```



```

    for (k=1;k<=NTO;k++)
    {
        m_cO(Hi[k],Hi[k+1],Qi[k],Qi[k+1],xi[k],xi[k+1],ti[k],ti[k+1]);
        Hp[k]=s[1];          Qp[k]=s[2];
        xp[k]=s[3];          tp[k]=s[4];
        free_dvector(s,1,NP);
    }

    acopl();

    for (k=2;k<=NTR;k++)
    {
        m_cG(Pp[k-1],Pp[k],Mp[k-1],Mp[k],xGp[k-1],xGp[k],tp[k-1],tp[k]);
        Mi[k]=s[1];          Pi[k]=s[2];
        xGi[k]=s[3];         ti[k]=s[4];
        free_dvector(s,1,NP);
        m_cG(Ppb[k-1],Ppb[k],Mpb[k-1],Mpb[k],xGp[k-1],xGp[k],tp[k-1],tp[k]);
        Mib[k]=s[1];         Pib[k]=s[2];
        xGi[k]=s[3];         ti[k]=s[4];
        free_dvector(s,1,NP);
    }
    for (k=2;k<=NTO;k++)
    {
        m_cO(Hp[k-1],Hp[k],Qp[k-1],Qp[k],xp[k-1],xp[k],tp[k-1],tp[k]);
        Hi[k]=s[1];          Qi[k]=s[2];
        xi[k]=s[3];          ti[k]=s[4];
        free_dvector(s,1,NP);
        if(ti[k]>tmin) tmin=ti[k];
    }
    if( i/imp*imp==i ) imprime();

    t+=delIt;
    hc = aliment(t,hc);
    ts = t; hs = hc;

    if (tmin>=tmax) break;
    if (hc >= hmax)
    {
        ii=2;    /* Nivel Maximo Camara de Baixa. Cicla1. */

        printf("\n\n\t Ciclou por Nivel Maximo !!!");
        break;
    }
    if (hant<=hmin) ii=1;    /* Nivel Minimo Camara de Alta. Cicla2. */
}
if (ii==2)
{
    printf("\n\n\t Pressao de Compressao Anterior %10.2f (psf).",PCOMP);
    printf("\n\n\t Entre com Nova Pressao de Compressao. (psf).");
    scanf("%lf",&PCOMP);
    printf("\n\n\t Nova Pressao de Compressao %10.2f (psf).",PCOMP);
    goto inicio;
}

fprintf(sai,"\n\n\t Tempo de Ciclo   %f\t (min)",tciclo/60);
fprintf(sai,"\n\t Variacao de Nivel   %f\t (m/s)",hciclo*fcc/tciclo);
fprintf(sai,"\n\t Ciclos por Dia   %7.2f",86400/tciclo);
fprintf(sai,"\n\t Volume por Ciclo   %6.2f\t (m3)",acam*hciclo*fcv);
fprintf(sai,"\n\t Volume Diario   %6.2f\t (m3)\n\n",86400*acam*hciclo*fcv/tciclo);

```

```

fprintf(sai2, "\n\n\t Tempo de Ciclo   %f\t (min)", tciclo/60);
fprintf(sai2, "\n\t Variacao de Nivel   %f\t (m/s)", hciclo*fcc/tciclo);
fprintf(sai2, "\n\t Ciclos por Dia   %7.2f", 86400/tciclo);
fprintf(sai2, "\n\t Volume por Ciclo   %6.2f\t (m3)", acam*hciclo*fcv);
fprintf(sai2, "\n\t Volume Diario   %6.2f\t (m3)\n\n", 86400*acam*hciclo*fcv/tciclo);

```

```

printf("\n*****\n");
printf("\tTermino NORMAL do Programa.\n");

```

```

fclose(sai);      fclose(sai1);      fclose(sai2);

```

```

}

```

```

/*      m_cG.c      Funcao Metodo das Caracteristicas do Gasoduto.      */

```

```

void m_cG(PA,PB,MA,MB,XA,XB,TA,TB)

```

```

double PA,PB,MA,MB,XA,XB,TA,TB;

```

```

{
    int l;
    double F1, F1P, F1M, F2, F2P, F2M;
    double MP, PP, XP, TP, DM, DP;
    s=dvector(1,4);          /* vetor solucao do sistema.      */
                                /* s[1]=m(vazao),s[2]=p(pressao) */
                                /* s[3]=x(posicao),s[4]=t(tempo)  */
    TP = (TA+TB)/2. + (XB-XA)/(2.*B);
    XP = (XA+XB)/2.;
    PP = (PA+PB)/2.;
    MP = (MA+MB)/2.;
    for(l=1;l<=5;l++)
    {
        F1 = K1*(MP-MA)*(PP+PA) + PP*PP*exp(S1) - PA*PA +
            .25*K2*E1*(XP-XA)*(MP+MA)*fabs(MP+MA);
        F1P = K1*(MP-MA) + 2.*PP*exp(S1);
        F1M = K1*(PP+PA) + .5*K2*E1*(XP-XA)*fabs(MP+MA);
        F2 = K1*(MP-MB)*(PP+PB) + PB*PB*exp(S1) - PP*PP +
            .25*K2*E1*(XB-XP)*(MP+MB)*fabs(MP+MB);
        F2P = K1*(MP-MB) - 2.*PP;
        F2M = K1*(PP+PB) + .5*K2*E1*(XB-XP)*fabs(MP+MB);
        DP = ( F1/F1M - F2/F2M ) / ( F2P/F2M - F1P/F1M );
        DM = - ( F2 + F2P*DP ) / F2M;
        PP +=DP;
        MP +=DM;
        if( fabs(DP) <= 40. && fabs(DM) <= .001 ) break;
    }
    if (MP<=1.0e-8) MP=0.0;

    s[1] = MP; s[2] = PP; s[3] = XP; s[4] = TP;
}

```

```

/*      m_cO.c      Funcao Metodo das Caracteristicas do Oleoduto.      */

```

```

void m_cO(H1,H2,Q1,Q2,x1,x2,t1,t2)

```

```

double H1,H2,Q1,Q2,x1,x2,t1,t2;

```

```

{
    int l;

```

```

double f, df, dq, QP, HP, xP, tP;

s=dvector(1,4);          /* vetor solucao do sistema.      */
                          /* s[1]=H(AltMan.),s[2]=Q(vazao) */
                          /* s[3]=x(posicao),s[4]=t(tempo)  */

QP = (Q1+Q2)/2.;
for(l=1;l<=5;l++)
{
    f = (H2-H1) + K3*(2.*QP-Q1-Q2) +
        .25*R*((Q1+QP)*fabs(Q1+QP) + (Q2+QP)*fabs(Q2+QP));
    df = 2.*K3 + 0.5*R*( fabs(Q1+QP) + fabs(Q2+QP) );
    dq = -f/df;
    QP += dq;
    if( fabs(dq) <= .00001) break;
}

s[1] = H1 - K3*(QP-Q1) - .25*R*(QP+Q1)*fabs(QP+Q1);    s[2] = QP;
s[3] = (x1+x2)/2.;                                     s[4] = (t1+t2)/2. + (x2-x1)/(2.*aa);
}

```

```
/*          acopl.c
```

Funcao para Determinacao das Condicoes de Contorno dos Dutos.

O Acoplamento do Gasoduto ao Oleoduto Ocorre no PETROBOOST */

```
void acopl()
```

```

{
    void mnewt();
    double *x;
    double TOLX = 1.0e-9, TOLF = 1.0e-9;
    int i, j, l, N=8;

    double xpmg,tpmg,Mpmg,Ppmg;          /* Montante do Gasoduto.      */
    double xpjg,tpjg,Mpjg,Ppjg;          /* Jusante do Gasoduto.      */
    double xpmgb,tpmgb,Mpmgb,Ppmgb;      /* Montante do Gasoduto.      */
    double xpjgb,tpjgb,Mpjgb,Ppjgb;      /* Jusante do Gasoduto.      */
    double xpmo,tpmo,Qpmo,Hpmo;          /* Montante do Oleoduto.      */
    double xpjo,tpjo,Qpjo,Hpjo;          /* Jusante do Oleoduto.      */
    double fmg,dfmg,dm;                  /* Met. Newton Mont. Gas. Alta */
    double fjgb,dfjgb,dmb;               /* Met. Newton Jus. Gas. Baixa */
    double fjo,dfjo,dq;                  /* Met. Newton Jus. Oleoduto.  */
    double F1,F1M,F1P,F2,F2M,F2P,DP,DM;
    double delth=QL*deltt/acam;          /* Delta h Camara de Baixa.    */
    x=dvector(1,N);                      /* Vetor Solucao.             */

    Xb=xGp[1];    tb=tp[1];Mb=Mp[1];    Pb=Pp[1];
    Xa=xGp[NTR];  ta=tp[NTR];    Ma=Mp[NTR];    Pa=Pp[NTR];
                    Mbb=Mpb[1];    Pbb=Ppb[1];
                    Mab=Mpb[NTR];    Pab=Ppb[NTR];
    Xbo=xp[1];    Qb=Qp[1];    Hb=Hp[1];
    Xao=xp[NTO];  Qa=Qp[NTO];    Ha=Hp[NTO];

    x[1]=(Pa+Pant)/2.0;    x[5]=Pant;
    x[2]=(Ma+Mant)/2.0;    x[6]=Mant;
    x[3]=(Qb+Qant)/2.0;    x[7]=Qant;
    x[4]=hant;             x[8]=hant;
}

```

```

mnewt(10,x,N,TOLX,TOLF);

xpjg = LG;          xpmo = 0.0;
tpjg = (LG-Xa)/B + ta;  tpmo = Xbo/aa + ta;
Ppjg = x[1];          Hpmo = x[1]*gc/(ROO*G) + x[4];
Mpjg = x[2];          Qpmo = x[3];
if(x[3]<=1.0E-5) {
    Ppjg = (Pa+Pant)/2;
    Mpjg = (Ma+Mant)/2;
    for(l=1;l<=5;l++)
    {
        F1 = K1*(Mpjg-Ma)*(Ppjg+Pa) + Ppjg*Ppjg - Pa*Pa +
            .25*K2*(LG-Xa)*(Mpjg+Mant)*fabs(Mpjg+Mant);
        F1P = K1*(Mpjg-Ma) + 2.*Ppjg;
        F1M = K1*(Ppjg+Pa) + .5*K2*(LG-Xa)*fabs(Mpjg+Mant);
        F2 = (Ppjg-Pant)*acam*(H-hant) - .5*(Mpjg+Mant)*z*Rgn*T*deitt;
        F2P = acam*(H-hant);
        F2M = -.5*z*Rgn*T*deitt;
        DP = ( F1/F1M - F2/F2M ) / ( F2P/F2M - F1P/F1M );
        DM = - ( F2 + F2P*DP ) / F2M;
        Ppjg +=DP;
        Mpjg +=DM;
        if( fabs(DP) <= 40. && fabs(DM) <= .001 ) break;
    }
    Qpmo=0.0; x[4]=hant; Hpmo=Hant;
}

Pant = Ppjg;
Mant = Mpjg;
Hant = Hpmo;
Qant = Qpmo;
hant = x[4];

free_dvector(x,1,N);

/*          Montante do Gasoduto de Alta Pressao.          */

xpmg = 0.0;
tpmg = Xb/B+tb;
Ppmg = PCOMP;
Mpmg = Mb;
for(i=1;i<=5;i++)
{
    fmg = K1*(Mpmg-Mb)*(Ppmg+Pb) +
        K2*(Mpmg+Mb)*fabs(Mpmg+Mb)*E1*Xb/4.0 +
        Pb*Pb*exp(S1) - Ppmg*Ppmg ;

    dfmg = K1*(Ppmg+Pb) + K2*fabs(Mpmg+Mb)*E1*Xb/2.0;
    dm = -fmg/dfmg;
    Mpmg += dm;
    if(fabs(Mpmg)<=1.0E-9) Mpmg=0.0;
    if( fabs(dm) <= 0.00001) break;
}

/*          Montante do Gasoduto de Baixa Pressao.          */

```

```

xpmgb = 0.0;
tpmgb = Xb/B+tb;
Ppmgb = Pbb;
Mpmgb = Mbb;
for(l=1;l<=5;l++)
{
    F1 = K1*(Mpmgb-Mbb)*(Ppmgb+Pbb) - Ppmgb*Ppmgb + Pbb*Pbb +
        .25*K2*Xb*(Mpmgb+Mbb)*fabs(Mpmgb+Mbb);
    F1P = K1*(Mpmgb-Mbb) - 2.*Ppmgb;
    F1M = K1*(Ppmgb+Pbb) + .5*K2*Xb*fabs(Mpmgb+Mbb);
    F2 = acam*( H-(hant+delth) )*(Ppmgb-Pbb) + deltt*
        ( (Mpmgb+Mbb)*z*Rgn*T/2 - QL*((Ppmgb+Pbb)/2+2116.2166*RGL) );
    F2P = acam*( H-(hant+delth) ) - .5*QL*deltt;
    F2M = .5*z*Rgn*T*deltt;
    DP = ( F1/F1M - F2/F2M ) / ( F2P/F2M - F1P/F1M );
    DM = - ( F2 + F2P*DP ) / F2M;
    Ppmgb +=DP;
    Mpmgb +=DM;
    if( fabs(DP) <= 40. && fabs(DM) <= .001 ) break;
}

/*          Jusante do Gasoduto de Baixa Pressao.          */

xpjgb = LG;
tpjgb = tpmgb;
Ppjgb = PSCRUB;
Mpjgb = Mab;
for(i=1;i<=5;i++)
{
    fjgb = K1*(Mpjgb-Mab)*(Ppjgb+Pab) +
        K2*(Mpjgb+Mab)*fabs(Mpjgb+Mab)*(LG-Xa)/4.0
        - Pab*Pab + Ppjgb*Ppjgb ;

    dfjgb = K1*(Ppjgb+Pab) + K2*fabs(Mpjgb+Mab)*(LG-Xa)/2.0;
    dmb = -fjgb/dfjgb;
    Mpjgb += dmb;
    if( fabs(dmb) <= 0.00001) break;
}

/*          Jusante do Oleoduto.          */

xpjo = L;
tpjo = (L-Xao)/aa + ta;
Hpjo = PSURGE*gc/(ROO*G) + LAGUA + H;
Qpjo = Qa;
for(i=1;i<=5;i++)
{
    fjo = (Hpjo-Ha) + K3*(Qpjo-Qa) + K4*(Qpjo+Qa)*fabs(Qpjo+Qa)*deltXO/4.;
    dfjo = K3 + K4*fabs(Qpjo+Qa)*deltXO/2.;
    dq = -fjo/dfjo;
    Qpjo += dq;
    if( fabs(dq) <= 0.00001) break;
}

xGi[1]=xpmg;          xGi[NTR+1]=xpjg;
ti[1]=tpmg;          ti[NTR+1]=tpjg;
Mi[1]=Mpmg;          Mi[NTR+1]=Mpjg;
Pi[1]=Ppmg;          Pi[NTR+1]=Ppjg;

```

```
        Mib[1]=Mpmgb;        Mib[NTR+1]=Mpjgb;
        Pib[1]=Ppmgb;        Pib[NTR+1]=Ppjgb;
        xi[1]=xpmo;          xi[NTO+1]=xpjo;
        Qi[1]=Qpmo;          Qi[NTO+1]=Qpjo;
        Hi[1]=Hpmpo;         Hi[NTO+1]=Hpjo;
    }

void imprime()
{
    float iti, ihant, ihc;                /* Variaveis Auxiliares SI */
    float m1, p1, mntr, pntr;
    float q1, h1, qnto, hnto;
    float mb1, pb1, mbntr, pbntr;

    iti = ti[1];
    m1 = Mi[1]*fcm;                       p1 = Pi[1]*fcp;
    mntr = Mi[NTR+1]*fcm;                 pntr = Pi[NTR+1]*fcp;
    mb1 = Mib[1]*fcm;                     pb1 = Pib[1]*fcp;
    mbntr = Mib[NTR+1]*fcm;               pbntr = Pib[NTR+1]*fcp;
    q1 = Qi[1]*fcv;                       h1 = Hi[1]*fcc;
    qnto = Qi[NTO+1]*fcv;                  hnto = Hi[NTO+1]*fcc;
    ihant = hant*fcc;                      ihc = hc*fcc;

    fprintf(sai1, "\n %f\t %f\t %f\t %f\t %f", iti, pntr, h1, ihant, ihc);
    fprintf(sai, "\n %8.2f\t %12.6f\t %10.6f\t %12.6f\t %10.6f", iti, m1, p1, mntr, pntr);
    fprintf(sai, "\t %12.6f\t %10.6f\t %12.6f\t %10.6f", q1, h1, qnto, hnto);
    fprintf(saib, "\n %8.2f\t %12.6f\t %10.6f\t %12.6f\t %10.6f", iti, mb1, pb1, mbntr, pbntr);
}
```



```

/*          acoplfun.c

Funcao para Calculo dos Elementos da Matriz de Coeficientes alpha
e Matriz Solucao bet. */

#include <math.h>
#include <stdio.h>

double S;          /* 2.G.sin(ANG).deltX/B^2 */
double E;          /* [exp(S) - 1]/S */
double S1,E1;
double K1, K2;     /* Constantes do Gasoduto. */
double K3, K4;     /* Constantes do Oleoduto. */
double DG, DO;     /* Diametro dos Dutos . */
double ag, ao;     /* Area da Secao Transversal dos Dutos. */
double fG, fO;     /* Coeficientes de Atrito. */
int NTR, NTO;      /* Numero de Trechos dos Dutos. */
double H;          /* Altura Total Camara Separacao . */
double h;          /* Altura de Liquido na Camara. */
double DCAM;       /* Diametro da Camara de Separacao (m) */
double acam;       /* Area da Secao " */
double ANG;        /* Angulo Medio do Trecho c/ Horizontal. */
double G;          /* Aceleracao Gravidade. */
double gc;         /* lbm.ft / lbf.s^2 */
double Rgn;        /* Const. U Gas Natural. */
double GAMA;       /* Razao Cp/Cv. */
double z;          /* Fator Compressibilidade. */
double ROO;        /* Peso Especifico Oleo. */
double T;          /* Temperatura Media ( K ). */
double L, LG;      /* Distancia Total Plat. - PTBOOST */
double B;          /* Velocidade Som Gas Natural. */
double aa;         /* Velocidade Caracter. Oleoduto. " */
double *s;
double *Pl, *Pp, *Mi, *Mp;
double *Pib, *Ppb, *Mib, *Mpb;
double *Hi, *Hp, *Qi, *Qp;
double *xi, *xp, *xGi, *xGp, arg;
double *ti, *tp;
double R, Q0, H0, M0;

/* Variaveis das Condições de Contorno. */
double P,Ps,Pa,Pb,Pab,Pbb,Pt; /* Pressoes. */
double M,Ma,Mb,Mab,Mbb;       /* Vazoes Massicas. */
double Q,Qa,Qb;               /* Vazoes Volumetricas. */
double Ha,Hb;                 /* Heads. */
double deltt;
double Pant, Mant, Qant, hant;
double Xa, Xbo;

void acoplfun(x,alpha,bet)
double *x, **alpha, *bet;
{
double Ppp,Mpp,Qpp,hpp,Xp;
    Ppp = x[1];    P = x[5];
    Mpp = x[2];    M = x[6];
    Qpp = x[3];    Q = x[7];
    hpp = x[4];    h = x[8];

```

```

bet[1] = - ( (H-h)*(Ppp-Pant) - (M*z*Rgn*T/acam)*deltt - P*(hpp-hant) );
alpha[1][1] = (H-h);
alpha[1][4] = - P;
alpha[1][5] = - (hpp-hant);
alpha[1][6] = - (z*Rgn*T/acam)*deltt;
alpha[1][8] = - (Ppp-Pant);
alpha[1][2] = alpha[1][3] = alpha[1][7] = 0.0;

bet[2] = - ( K1*(Mpp-Ma)*(Ppp+Pa) + (Ppp*Ppp-Pa*Pa) +
              K2*(LG-Xa)*M*fabs(M) );
alpha[2][1] = K1*(Mpp-Ma) + 2*Ppp;
alpha[2][2] = K1*(Ppp+Pa);
alpha[2][6] = 2*K2*(LG-Xa)*fabs(M);
alpha[2][3] = alpha[2][4] = alpha[2][5] = alpha[2][7] = alpha[2][8] = 0.0;

bet[3] = - ( (Ppp*gc/(ROO*G)+hpp-Hb) - K3*(Qpp-Qb) + K4*Q*fabs(Q)*Xbo );
alpha[3][1] = gc / (ROO*G);
alpha[3][3] = -K3;
alpha[3][4] = 1.0;
alpha[3][7] = 2.0*K4*Xbo*fabs(Q);
alpha[3][2] = alpha[3][5] = alpha[3][6] = alpha[3][8] = 0.0;

bet[4] = - ( acam*(hpp-hant) + Q*deltt );
alpha[4][4] = acam;
alpha[4][7] = deltt;
alpha[4][1]=alpha[4][2] = alpha[4][3] = alpha[4][5] = alpha[4][6] = alpha[4][8] = 0.0;

bet[5] = - ( Ppp + Pant -2*P );
alpha[5][1] = 1.0;
alpha[5][5] = -2.0;
alpha[5][2]=alpha[5][3]=alpha[5][4]=alpha[5][6]=alpha[5][7]=alpha[5][8] =0.0;

bet[6] = - ( Mpp + Mant -2*M );
alpha[6][2] = 1.0;
alpha[6][6] = -2.0;
alpha[6][1]=alpha[6][3]=alpha[6][4]=alpha[6][5]=alpha[6][7]=alpha[6][8] =0.0;

bet[7] = - ( Qpp + Qant -2*Q );
alpha[7][3] = 1.0;
alpha[7][7] = -2.0;
alpha[7][1]=alpha[7][2]=alpha[7][4]=alpha[7][5]=alpha[7][6]=alpha[7][8] =0.0;

bet[8] = - ( hpp + hant -2*h );
alpha[8][4] = 1.0;
alpha[8][8] = -2.0;
alpha[8][1]=alpha[8][2]=alpha[8][3]=alpha[8][5]=alpha[8][6]=alpha[8][7]=0.0;

```

```

}

```

```
/*      Alocacao Dinamica de Vetores e Matrizes.      */

double *s;
double *Pi, *Pp, *Mi, *Mp;
double *Pib, *Ppb, *Mib, *Mpb;
double *Hi, *Hp, *Qi, *Qp;
double *xi, *xp, *xGi, *xGp, arg ;
double *ti, *tp;
int NTR, NTO;

void alloc_din()
{
    Pi=dvector(1,NTR+1);          /* vetor das pressoes impar. */
    Pp=dvector(1,NTR+1);          /* vetor das pressoes par.   */
    Mi=dvector(1,NTR+1);          /* vetor vaz. massicas impar.*/
    Mp=dvector(1,NTR+1);          /* vetor vaz. massicas par.   */
    Pib=dvector(1,NTR+1);         /* vetor das pressoes impar.*/
    Ppb=dvector(1,NTR+1);         /* vetor das pressoes par.    */
    Mib=dvector(1,NTR+1);         /* vetor vaz. massicas impar.*/
    Mpb=dvector(1,NTR+1);         /* vetor vaz. massicas par.   */
    xGi=dvector(1,NTR+1);         /* vetor pos. Gasoduto impar.*/
    xGp=dvector(1,NTR+1);         /* vetor pos. Gasoduto par.   */

    Hi=dvector(1,NTO+1);          /* vetor dos Heads  impar. */
    Hp=dvector(1,NTO+1);          /* vetor dos Heads  par.    */
    Qi=dvector(1,NTO+1);          /* vetor vaz. volumet. impar.*/
    Qp=dvector(1,NTO+1);          /* vetor vaz. volumet. par.  */
    xi=dvector(1,NTO+1);          /* vetor pos. Oleoduto impar.*/
    xp=dvector(1,NTO+1);          /* vetor pos. Oleoduto par.   */

    ti=dvector(1,NTR+1);          /* vetor dos tempos impar. */
    tp=dvector(1,NTR+1);          /* vetor dos tempos par.    */
}
```

```

/*      indat.c

Funcao para Entrada e Saida de Dados.      */

#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <time.h>

double QL;          /* Vazao de Oleo ( m3/d )      */
double RGL;         /* Razao Gas/Oleo (m3/m3)     */
double BSW;         /* Fracao Agua&Sedimentos (%) */
double QG;          /* Vazao de Gas ( m3/d )      */
double MIL,MIG;     /* Viscosidades Oleo Gas ( kg/m.s )*/
double DG, DO;      /* Diametro dos Dutos .      */
double epsilon;     /* Rugosidade Absoluta.      */
double fG, fO;      /* Coeficientes de Atrito.    */
int NTR, NTO;       /* Numero de Trechos dos Dutos. */
double H;           /* Altura Total Camara Separacao .*/
double hmax, hmin;  /* Alt. Liquido Max e Min Camara. */
double DCAM;        /* Diametro Camara Separacao (m) */
double ANG;         /* Angulo Medio Trecho c/ Horizontal.*/
double G;           /* Aceleracao Gravidade.      */
double gc;          /* lbm.ft / lbf.s^2          */
double Rgn;         /* Const. U Gas Natural.      */
double GAMA;        /* Razao Cp/Cv.              */
double z;           /* Fator Compressibilidade.    */
double ROO;         /* Peso Especifico Oleo.      */
double ROG;         /* "Gas dens=.75 "           */
double PCOMP;       /* Pressao Operacao Compressor. */
double PSURGE;      /* Pressao Operacao Surge-Tank. */
double PSCRUB;      /* Pressao Operacao Gas-Scrubber.*/
double T;           /* Temperatura Media ( K ).    */
double L, LG;       /* Distancia Total Plat. - PTBOOST*/
double B;           /* Velocidade Som Gas Natural .*/
double aa;          /* Velocidade Caracter. Oleoduto. */
double tmax;        /* Tempos Minimios e Maxima.    */
int LAGUA, RISER;   /* Lamina d'agua e Riser.      */
int NP;             /* Numero de Variaveis a Calcular. */
int imp;            /* Intervalos Tempo p/ Impressao. */
int LT;             /* Numero de Lacos de Tempo.    */
double R, QO, HO, MO;
double FCP, FCT;    /* Fatores Correcao p/ Kgf/cm^2. */

FILE *sai,*sai1,*sai2,*saib;
FILE *ent;
void indat()
{
    char dummy[80];
    char buffer[10],buffer1[10],buffer2[10];
    char *arqent,*arqsai,*arqsai1,*arqsai2,*arqsaib;

    struct tm *ptr;
    time_t lt;
    lt = time(NULL);
    ptr = localtime(&lt);

```



```
fscanf(ent, "%lf %lf\n", &hmax, &hmin);
fprintf(sai, "\n\t %s\t %f\t %f\n", dummy, hmax, hmin);
fprintf(sai2, "\n\t %s\t %f\t %f\n", dummy, hmax, hmin);

fgets(dummy, 80, ent);
fscanf(ent, "%lf %lf\n", &G, &T);
fprintf(sai, "\n\t %s\t %f\t %f\n", dummy, G, T);

fgets(dummy, 80, ent);
fscanf(ent, "%lf %lf\n", &Rgn, &GAMA);
fprintf(sai, "\n\t %s\t %f\t %f\n", dummy, Rgn, GAMA);
fprintf(sai2, "\n\t %s\t %f\t %f\n", dummy, Rgn, GAMA);

fgets(dummy, 80, ent);
fscanf(ent, "%lf %lf\n", &ROO, &ROG);
fprintf(sai, "\n\t %s\t %f\t %f\n", dummy, ROO, ROG);
fprintf(sai2, "\n\t %s\t %f\t %f\n", dummy, ROO, ROG);

fgets(dummy, 80, ent);
fscanf(ent, "%lf %lf %lf\n", &PCOMP, &PSURGE, &PSCRUB);
fprintf(sai, "\n\t %s\t %f\t %f\t %f\n", dummy, PCOMP, PSURGE, PSCRUB);
fprintf(sai2, "\n\t %s\t %f\t %f\t %f\n", dummy, PCOMP, PSURGE, PSCRUB);

fgets(dummy, 80, ent);
fscanf(ent, "%lf %lf %lf\n", &gc, &FCP, &FCT);
fprintf(sai, "\n\t %s\t %f\t %f\t %f\n", dummy, gc, FCP, FCT);

fgets(dummy, 80, ent);
fscanf(ent, "%d %d\n", &LAGUA, &RISER);
fprintf(sai, "\n\t %s\t %d\t %d\n", dummy, LAGUA, RISER);
fprintf(sai2, "\n\t %s\t %d\t %d\n", dummy, LAGUA, RISER);

fgets(dummy, 80, ent);
fscanf(ent, "%lf %lf %lf\n", &QL, &RGL, &BSW);
fprintf(sai, "\n\t %-s\t %f\t %f\t %f\n", dummy, QL, RGL, BSW);
fprintf(sai2, "\n\t %-s\t %f\t %f\t %f\n", dummy, QL, RGL, BSW);

fgets(dummy, 80, ent);
fscanf(ent, "%lf %lf\n", &MIL, &MIG);
fprintf(sai, "\n\t %-s\t %f\t %f\n\n", dummy, MIL, MIG);
fclose(ent);
}
```

```

/*          lu.c          */

#define TINY 1.0e-20;

void ludcmp(a,n,indx,d)
int n,*indx;
double **a,*d;

/*
Dada uma matriz n x n a[1..n][1..n], esta funcao a substitui pela sua decomposicao LU (permutacao sobre as
próprias linhas). a e n sao dados de entrada e a eh a saida rearranjada na forma da equacao 2.3.14. indx[1..n]
e um vetor de saida que guarda o efeito da permutacao das linhas pelo pivoteamento parcial. d eh retornado
como +/-1 dependendo se o numero de trocas de linhas foi par ou impar respectivamente. Esta funcao eh
usada em conjunto com lubksb para resolver sistemas de equacoes lineares ou inversao matricial.
*/

{
    int i,imax,j,k;
    double big,dum,sum,temp;
double *vv,*dvector();          /* vv guarda tamanho implicito de cada linha */
void nrrerror(), free_dvector();
    vv=dvector(1,n);
    *d=1.0;                      /* Nenhuma troca de linha ainda . */
    for (i=1;i<=n;i++)
    {
        big=0.0;
        for (j=1;j<=n;j++)
            if ((temp=fabs(a[i][j])) > big) big=temp;
        if (big == 0.0) nrrerror("Matriz Singular na funcao LUDCMP"); vv[i]=1.0/big;
    }
for (j=1;j<=n;j++) /* Ninho sobre colunas Metodo de Crout . */
    {
        for (i=1;i<j;i++)
        {
            sum=a[i][j];
            for (k=1;k<i;k++) sum -= a[i][k] * a[k][j]; a[i][j]=sum;
        }
        big=0.0; /* Procura o maior elemento pivot . */
        for (i=j;i<=n;i++)
        {
            sum=a[i][j];
            for (k=1;k<j;k++) sum -= a[i][k] * a[k][j]; a[i][j]=sum;
        }
        if (((dum=vv[i]*fabs(sum)) >= big)
            {
                big=dum;
                imax=i;
            }
    }
    if (j != imax) /* Troca de linhas e mudanca de d */
    {
        /* troca tambem fator de escala. */
        for (k=1;k<=n;k++)
        {
            dum=a[imax][k];
            a[imax][k]=a[j][k];
            a[j][k]=dum;
        }
    }
}

```

```

        *d = -(*d);
        vv[imax]=vv[j];
    }
    indx[j]=imax;
    if (a[j][j] == 0.0) a[j][j]=TINY;
    if (j != n)
    {
        dum=1.0/(a[j][j]);
        for (i=j+1;i<=n;i++) a[i][j] *= dum;
    }
}
free_dvector(vv,1,n);
}

```

```

void lubksb(a,n,indx,b)
double **a,b[];
int n,*indx;

```

```

/*

```

Resolve um conjunto de n equacoes lineares $A.x = B$. Aqui $a[1..n][1..n]$ entra nao como a matriz a mais como sua decomposta LU resultado da funcao ludcmp. $indx[1..n]$ entra como o vetor de permutacao retornado da ludcmp. $b[1..n]$ entra como o vetor de termos independentes B e retorna como o vetor x solucao. a, n, indx nao sao modificados por esta funcao e podem ser guardados para sucessivas chamadas da funcao com diferentes vetores b de termos independentes. Esta funcao leva em consideracao a possibilidade de b possuir muitos elementos zero, e portanto eficiente para inversao.

```

*/

```

```

{
    int i,ii=0,ip,j;
    double sum;

    for (i=1;i<=n;i++)
    {
        ip=indx[i];
        sum=b[ip];
        b[ip]=b[i];
        if (ii) for (j=ii;j<=i-1;j++) sum -= a[i][j]*b[j];
        else if (sum) ii=i;
        b[i]=sum;
    }
    for (i=n;i>=1;i--)
    {
        sum=b[i];
        for (j=i+1;j<=n;j++) sum -= a[i][j] * b[j];
        b[i]=sum/a[i][i];
    }
}

```



```
/*                      Programa zfac

Calcula o Fator de Compressibilidade para Dada Temperatura e Pressao. */

double hc, ts;

float zfac(p,T)
float p,T;          /* Pressao e Temperatura */

{
float Z;
int i, n;
float pr;           /* Pressao Reduzida */
float rtr;          /* Inverso Temperatura Reduzida */
float y;            /* Densidade Reduzida */
float A,B,C,D;      /* Funcoes Temperatura */
float f,dfdy;
float pseupc,pseutc;
float x[] = { 0., .0044, .0103, .8088, .1010, .0503, .007, .0119, .0021, .0025, .0016, 0. };
float mw[] = { 34.08, 44.01, 28.01, 16.04, 30.07, 44.10, 58.12, 58.12, 72.15, 72.15, 86.18, 128.02 };
float pc[] = { 1306.0, 1073.0, 492.0, 673.1, 708.3, 617.4, 529.1, 550.7, 483.0, 489.5, 431.6, 396.9 };
float tc[] = { 672.4, 547.7, 226.9, 343.3, 549.8, 666.0, 734.7, 765.3, 829.8, 845.6, 913.6, 975.8 };
float pcmm=0., tcmm=0., g=0.;
float awa,cwa;

/* Calcula Densidade do Gas e Propriedades Criticas ( medias molares mm ). */

for(i=0;i<=11;i++){
    g += mw[i] * x[i] / 28.966;
    tcmm += tc[i] * x[i];
    pcmm += pc[i] * x[i];
}
fprintf(sai, "\n\t Peso Molecular do Gas %f", g*28.966);
fprintf(sai, "\n\t Densidade Media do Gas ( Ar = 1.0) %f\n", g);

/* Calculo do Fator de Correcao de WICHERT & AZIZ para Gases Acidos. */
awa = x[0] + x[1];
cwa = 120.*(pow(awa,9)-pow(awa,1.6)) - 15.*(sqrt(x[0])-pow(x[0],4));
pseutc = tcmm -cwa;
pseupc = pcmm*pseutc/(tcmm+x[0]*(1.0-x[0])*cwa);
pr=p/pseupc;
rtr=pseutc/T;
A=0.06125*rtr*exp(-1.2*(1.0-rtr)*(1.0-rtr));
B=rtr*(14.76-9.76*rtr+4.58*rtr*rtr);
C=rtr*(90.7-242.2*rtr+42.4*rtr*rtr);
D=2.18+2.82*rtr;
y=.001;

/* Procedimento de YARBOROUGH & HALL. */
for(n=1;n<=30;n++){
    f= -A*pr + (y+pow(y,2)+pow(y,3)-pow(y,4))/pow((1.0-y),3) - B*y*y + C*pow(y,D);
    if(fabs(f)<=0.00001) { Z=A*pr/y; break; }
    dfdy=(1.0+4.0*y+4.0*pow(y,2)-4.0*pow(y,3)+pow(y,4))/pow((1.0-y),4) -
        2.0*B*y + D*C*pow(y,(D-1.0));
    y -= f/dfdy;
}
/* printf ("\n Fator Z = %f\n",Z); */

return Z;
}
```

/* Calculo do Fator Friccao Turbulento - Metodo Explicito de CHEN 1979. */

float ffric(Rel,rr)

float Rel,rr;

{

float Af,Bf,Cf,f;

Cf=pow(rr,1.1098)/2.8257 + 5.8506/pow(Rel,0.8981);

Bf=rr/3.7065 - 5.0452*log10(Cf)/Rel;

Af=-2*log10(Bf);

f=pow(1/Af,2);

return f;

}

float aliment(t,hs)

float t,hs;

{

hc=QL*(t-ts)/acam + hs;

return hc;

}

```
/*                               mnewt.c
```

```
Funcao Metodo Iterativo de Newton-Raphson
```

```
Resolve um Sistema Nao Linear de n Equacoes com n Incognitas.  */
```

```
#define FREERETURN {free_dmatrix(alpha,1,n,1,n); free_dvector(bet,1,n);\ free_ivector(indx,1,n);return;}
```

```
void mnewt(ntrial,x,n,tolx,tolf)
```

```
int ntrial,n;
```

```
double *x,tolx,tolf;
```

```
/* Dado um chute inicial x[1...n] para a raiz em n dimensoes, toma ntrial Newton-Raphson passos para chegar a raiz. */  
{
```

```
    int i,k,*indx,*ivector();
```

```
    double errx,errf,d,*bet,**alpha,*dvector(),**dmatrix();
```

```
    void acoplfun(),ludcmp(),lubksb();
```

```
    void free_ivector(),free_dvector(),free_dmatrix();
```

```
    indx=ivector(1,n);
```

```
    bet=dvector(1,n);
```

```
    alpha=dmatrix(1,n,1,n);
```

```
    for (k=1;k<=ntrial;k++)
```

```
    {
```

```
        acoplfun(x,alpha,bet);
```

```
        errf=0.0;
```

```
        /* Fornece matriz coeficientes. */
```

```
        /* Verifica convergencia da funcao*/
```

```
        for (i=1;i<=n;i++) errf += fabs(bet[i]);
```

```
        if (errf <= tolf) FREERETURN
```

```
        ludcmp(alpha,n,indx,&d);/* Resolve sistema eq. lineares */
```

```
        lubksb(alpha,n,indx,bet);/* usando decomposicao LU.  */
```

```
        errx=0.0;
```

```
        for (i=1;i<=n;i++)
```

```
        {
```

```
            errx += fabs(bet[i]);
```

```
            x[i] += bet[i];
```

```
        }
```

```
    if (errx <= tolx) FREERETURN
```

```
    }
```

```
    FREERETURN
```

```
}
```

```
/*      Alocação Dinamica de Vetores e Matrizes. */

#include <alloc.h>      /*necessario a alguns compiladores.*/
#include <stdio.h>

void nrerror(error_text)
char error_text[];
/*Sentinela de Erros Padrao */
{
    void exit();
    fprintf(stderr, "Numerical Recipes. ... Erro de Execucao ...\n");
    fprintf(stderr, "%s\n", error_text);
    fprintf(stderr, ".... Saindo para o DOS...\n");
    exit (1);
}

int *ivector(nl,nh)
int nl, nh;
/* Aloca um vetor int [nl...nh] */ {
    int *v;
    v =(int *)malloc((unsigned) (nh-nl+1)*sizeof(int));
    if (!v) nrerror("falha de alocao in ivector ()");
    return v-nl;
}

double *dvector(nl,nh)
int nl, nh;
/*Aloca um vetor dupla precisao [nl...nh] */
{
    double *v;
    v =(double *)malloc((unsigned) (nh-nl+1)*sizeof(double));
    if (!v) nrerror("falha de alocao in dvector ()");
    return v-nl;
}

double **dmatrix(nrl, nrh, ncl, nch)
int nrl, nrh, ncl, nch;
/*Aloca uma matriz dupla precisao [nrl...nrh] [ncl...nch] */
{
    int i;
    double **m;
    /* Allocates pointers to rows. */
    m=(double **) malloc((unsigned) (nrh-nrl+1)*sizeof(double*));
    if (!m) nrerror ("falha de alocao 1 in dmatrix()");
    m -=nrl;
    /*Allocates rows and set pointers to them. */
    for (i=nrl; i <= nrh; i++) {
        m[i] = (double *)malloc((unsigned) (nch-ncl+1)*sizeof(double)); if (!m[i]) nrerror("falha de
        alocao 2 in dmatrix()");
        m[i] -= ncl;
    }
    /*Return pointer to array of pointers to rows. */
    return m;
}

void free_ivector(v, nl, nh)
int *v, nl, nh;
/*Frees an int vector allocated by ivector(). */
{
    free((char*) (v+nl));
}
```

```
void free_dvector(v, nl, nh)
double *v;
int nl, nh;
/*Frees a double vector allocated by dvector().*/
{
    free((char*) (v+nl));
}

void free_dmatrix(m, nrl, nrh, ncl, nch)
double **m;
int nrl, nrh, ncl, nch;
/*Frees a matrix allocated with dmatrix. */
{
    int i;
    for (i=nrh; i>=nrl; i--) free ((char*) (m[i]+ ncl)); free ((char*) (m+nrl));
}
```