

RAFAEL OLIVEIRA DOS SANTOS

**SIMULAÇÃO DO FENÔMENO DE INTERMITÊNCIA
SEVERA GERADA POR TERRENO**

São Paulo

2012

RAFAEL OLIVEIRA DOS SANTOS

**SIMULAÇÃO DO FENÔMENO DE INTERMITÊNCIA
SEVERA GERADA POR TERRENO**

Trabalho de formatura em Engenharia
de Petróleo do curso de graduação do
Departamento de Minas e de Petróleo
da Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo.

Orientador: Prof. Jorge Luis Baliño

São Paulo

2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelos anos de ensinamento, dedicação e postura, além das diversas oportunidades que me foram disponibilizadas para quem pudesse me aperfeiçoar como engenheiro e pessoa.

Agradeço aos Professores por toda dedicação e paciência e, em especial, ao Professor Jorge Luis Baliño, por toda confiança depositada e habilidade em orientação.

Agradeço também ao apoio da Agência Nacional do Petróleo - ANP, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, do Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT e da Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS.

RESUMO

Esse projeto tem como objetivo analisar e implementar um modelo computacional que pode ser aperfeiçoado para posterior uso na indústria de óleo e gás para simulações do fenômeno de intermitência severa (*hilly terrain-induced severe slugging*) gerada por terreno inclinado (*hilly terrain-induced severe slugging*).

O modelo analisado é apresentado, bem como a lógica da elaboração do programa computacional. Dois casos de escoamento bifásico água-ar são avaliados como exemplos de casos em que ocorre e em que não ocorre a intermitência severa.

Posteriormente, são feitas algumas conclusões quanto a melhorias possíveis de se realizar e também acerca de características do fenômeno.

ABSTRACT

This project aims to analyse and implement a computational model that can be further improved and utilized by the oil and gas industry as a tool to simulate hilly terrain-induced severe slugging.

The model as well as the numerical procedure are presented. As examples, two cases of water-air flow are analysed: one of them leads to steady-state behavior and the other leads to intermittent behavior.

Finally, some conclusions are done regarding possible improvements in the model and also about the characteristics of the phenomenon.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Representação dos tipos mais comuns de escoamento	10
(a)	Padrões de escoamento horizontal	10
(b)	Padroes de escoamento vertical	10
1.2	Escoamento permanente através de um riser	11
1.3	O ciclo de intermitência severa	12
(a)	Formação de <i>slug</i>	12
(b)	Entrada no separador	12
(c)	Penetração de gás	12
(d)	Retorno do líquido	12
1.4	Sistema-modelo utilizado e suas variáveis	13
1.5	Caso 2	15
1.6	Caso 3	15
1.7	Caso 4	17
1.8	Caso 5	18
1.9	Análise de estabilidade	18
2.1	Solução do problema em regime estável.	27
2.2	Solução do problema em regime instável.	29

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	8
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E METODOLOGIA	10
1.1 Padrões de escoamento	10
1.2 O ciclo de intermitência severa	11
1.3 O modelo do <i>pipeline</i>	13
1.3.1 Teoria do modelo	13
1.4 Características do modelo	20
1.5 Programa computacional	20
1.5.1 Caso 1	21
1.5.2 Caso 2	21
1.5.3 Caso 3.1	22
1.5.4 Caso 3.2	23
1.5.5 Caso 4.1	23
1.5.6 Caso 4.2	24
1.5.7 Caso 5	25
2 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
2.1 Condição 1: Regime estável	26
2.1.1 Análise dos resultados	26
2.2 Condição 2: Regime instável	28
2.2.1 Análise dos resultados	28
CONCLUSÕES	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

INTRODUÇÃO

Em uma grande variedade de processos naturais e industriais há a ocorrência de escoamentos multifásicos. Torna-se então pertinente buscar compreender melhor como esses fenômenos ocorrem.

A característica fundamental de um escoamento multifásico é a distinção física entre as fases que o compõe. Como cada fase pode diferentes componentes e estar em regimes diferentes de escoamento, sua descrição é complexa.

Quando se analisa do ponto de vista das fases que compõe o escoamento, um tipo de particular interesse é o escoamento gás-líquido. A razão é este ser encontrado com grande frequência na indústria de petróleo, especialmente no transporte através de dutos (*pipelines*).

O conhecimento dos mecanismos de transporte multifásico de gás, óleo e água tem se tornado importante na tecnologia de exploração *offshore* devido ao sempre crescente comprimento dos condutos de transporte que ligam as cabeças de poço às plataformas de produção. Nesses condutos, o padrão de escoamento mais freqüente é o padrão intermitente em “golfada” ou *slug*, caracterizado por uma distribuição axial intermitente de líquido e gás. O gás é transportado como bolhas entre golfadas de líquido.

O padrão em golfadas pode mudar em determinadas condições geométricas e de escoamento e originar um fenômeno indesejável conhecido como intermitência severa (*severe slugging*)[1].

A intermitência severa ocorre geralmente num ponto com uma cota baixa na topografia do conduto; por exemplo, num trecho de tubulação descendente, seguido de um trecho ascendente ou *riser*. Uma situação comum é quando o condutor possui trechos com diferentes inclinações devido ao relevo (*hilly terrain*), onde o comprimento de cada fase alterna-se trecho a trecho devido ao acúmulo de líquido nos pontos mais baixos (vales) e de gás nos pontos mais altos (picos) [2]. Dependendo do comprimento e da quantidade de seções, essa variação de ângulos pode tornar possível que ocorra a geração de intermitência severa. Vazões baixas são também um pré-requisito para que o fenômeno aconteça, pois a baixas vazões, as forças gravitacionais dominam o escoamento, permitindo que o líquido que ocupa o *riser* e o vale bloqueeie completamente a passagem do gás.

A intermitência severa está associada com grandes oscilações de pressão e problemas de dimensionamento nas unidades de separação primária, podendo provocar paradas na produção com consequentes perdas econômicas. Segundo Wordsworth *et al* (1998), a empresa Petrobras tem reportado vários casos de ocorrência de intermitência severa nos sistemas linha-riser, os primeiros deles no período compreendido entre 1984 e 1985.

No presente trabalho, será utilizado um modelo proposto por Y. Taitel, O. Shoham e J. P. Brill (1990) para predizer a ocorrência da intermitência severa em um conduto de geometria

simples. O modelo será explicado, bem como a elaboração do software gerado utilizando-se a ferramenta MatLab [5]. De posse do modelo, serão analisados dois casos-exemplos: um em que o sistema mantém-se estável, decorrendo em escoamento permanente e outro em que ocorre a intermitência severa.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E METODOLOGIA

Para melhor compreender o fenômeno de intermitência severa e para efetuar a escolha de um modelo, foi feita uma pesquisa em relação aos modelos já propostos e também em relação às formas típicas para lidar com escoamentos multifásicos.

A escolha pelo modelo proposto por Taitel (1989), deu-se essencialmente por sua razoável flexibilidade e por exibir resultados de interpretação simples em comparação com outros modelos pesquisados, vide referências [6] e [7] como exemplos.

Ao longo desta etapa, o modelo para análise da geração de intermitência severa será exposto e explicado.

1.1 Padrões de escoamento

Antes de introduzir-se o modelo convém citar as características dos principais padrões de escoamento, pois, como dito anteriormente, em escoamentos multifásicos é comum que modelos de transferência de calor, queda de pressão e transferência de massa sejam definidos a partir do padrão em que o escoamento se encontra.

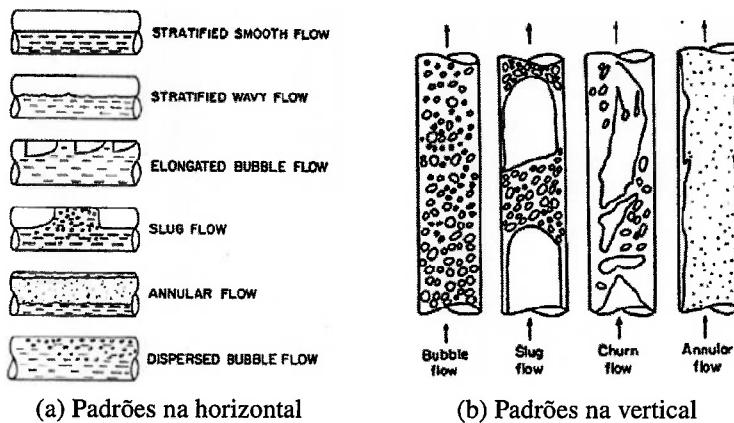


Figura 1.1: Representação dos tipos mais comuns de escoamento, Collier (1972).

As classificação mais comum é [8]:

Bolhas - padrão para baixa vazão de gás em que a fase gasosa mantém-se dispersa em forma de bolhas no interior da fase líquida.

Estratificado - padrão que ocorre para escoamento horizontal e possível para baixas inclinações da tubulação. O líquido, mais denso, mantém-se na parte inferior da tubulação. A interface entre as fases pode ser lisa ou ondulada.

Intermitente - divide-se em dois subtipos, sendo um o de bolhas alongadas e o outro o de golfadas. Esses padrões surgem a partir dos anteriores, quando aumenta-se o fluxo de gás. Em ambos o gás passa a fluir de forma intermitente com a fase líquida. Quando o fluxo é vertical ou quase vertical, há ainda o padrão de transição (*churn*), um padrão de transição entre o padrão de golfadas e o padrão anular.

Anular - quando a vazão de gás torna-se ainda maior em relação à fase líquida, tem-se o padrão anular, em que forma-se um filme de líquido em torno do gás, que escoa pelo centro. Quando o escoamento se dá através de um *riser* pode ocorrer, devido à ação da gravidade, a reversão do fluxo do líquido.

Outra forma mais simples e menos detalhada de classificação é dividir entre padrão separado (estratificado liso, ondulado e anular), intermitente (golfada, bolhas alongadas e transição) e disperso (bolhas).

1.2 O ciclo de intermitência severa

Como já citado, a intermitência severa é um fenômeno fortemente depende da geometria da tubulação pela qual as fases líquida e gasosa escoam e também da relação entre as vazões. De modo geral, o fenômeno ocorre quando se tem uma baixa vazão de líquido e diferenças de cotas entre diferentes trechos de modo que, quando o líquido inicia sua ascenção pelo *riser*, o mesmo acaba bloqueando por completo a passagem de gás. Em determinado momento, a fase gasosa rompe o bloqueio, levando a grandes variações nas quantidade de líquido e de gás.

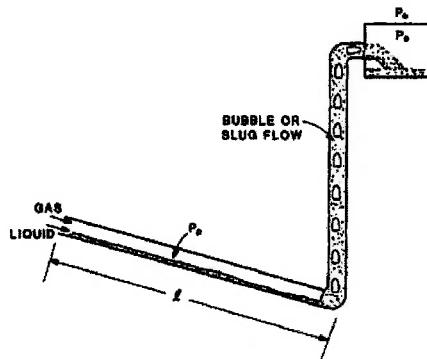


Figura 1.2: Escoamento permanente através de um riser, Taitel (1986).

A figura 1.2 mostra uma situação de escoamento permanente que ocorre quando o gás, ao invés de empurrar o líquido para o trecho seguinte em um curto intervalo de tempo, passa a escoar no padrão de bolhas. As condições para que ocorra esta condição estável ao invés da intermitência severa, descrita a seguir, é tema de discussão em seção posterior.

A figura 1.3 mostra a evolução do ciclo [1].

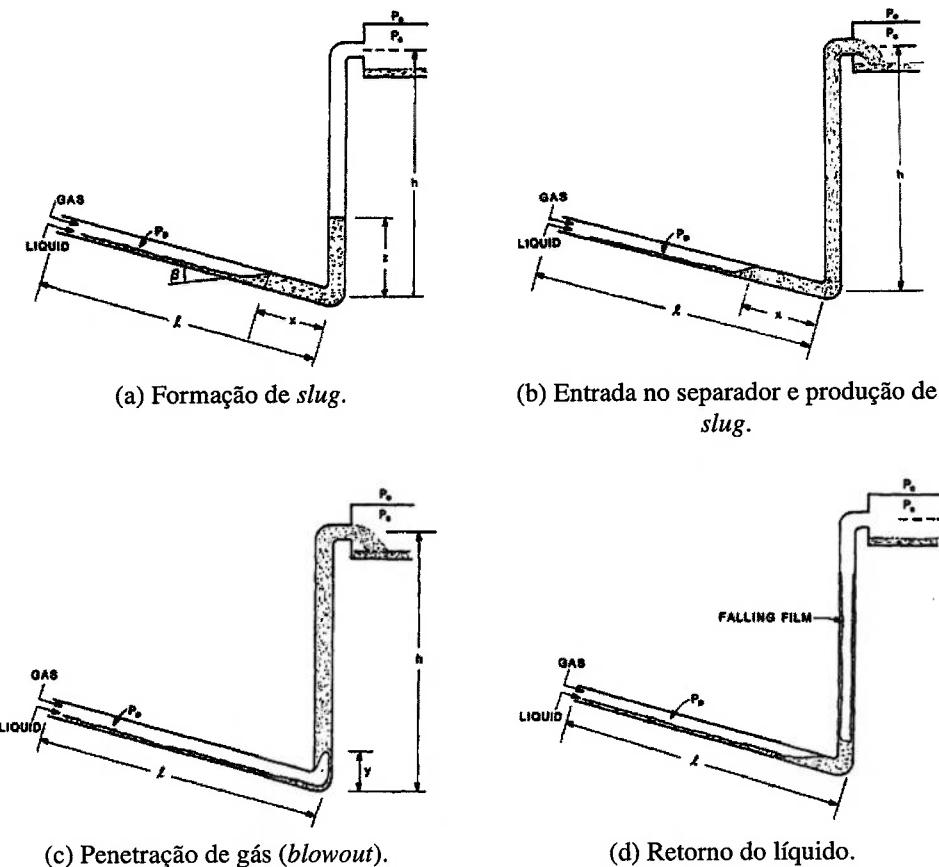


Figura 1.3: O ciclo de intermitênci severa, Taitel (1986).

Inicialmente (fig. 1.3a), devido à ação da gravidade, o líquido acumula-se no vale e bloqueia o fluxo de gás. Conforme o líquido acumula-se na coluna devido à saída do gás presente, a pressão hidrostática sobre a base aumenta comprimindo o gás no *pipeline* e gerando uma região de acumulação de líquido. Tal processo é conhecido como formação de *slug*.

A seguir (fig. 1.3b), conforme o gás da coluna escoa, o líquido alcança o topo e a pressão exercida sobre a base alcança seu máximo. Esse é o processo de produção de *slug*.

A manutenção do fluxo de gás e a saída de líquido pelo topo, levam ao recuo da frente de acumulação de líquido no trecho descendente (fig. 1.3c). Consequentemente, gás passa a penetrar na coluna.

A entrada de gás na coluna leva a uma redução da pressão que, por sua vez, leva a uma expansão do gás. Essa iteração entre o escoamento estratificado no *pipeline* e escoamento intermitente/anular no *riser* leva à violenta expulsão do gás da coluna, seguida de forte descompressão o qual então reinicia o processo de formação de *slug*. Tal processo é conhecido como expulsão de gás (fig. 1.3d).

Na condição de intermitência severa, tal processo repete-se periodicamente.

1.3 O modelo do *pipeline*

O modelo escolhido para o *pipeline* é o proposto por Taitel *et al.* [4], um modelo elaborado para os casos em que o escoamento é dominado pela gravidade e, conseqüentemente, a distribuição do líquido e do gás dentro da tubulação é dominada pelas pressões hidrostáticas.

1.3.1 Teoria do modelo

Para elaboração do modelo, será considerado o sistema descrito pela figura 1.4. Como “seção” será entendido o conjunto formado por uma descida e por um *riser*, nessa ordem.

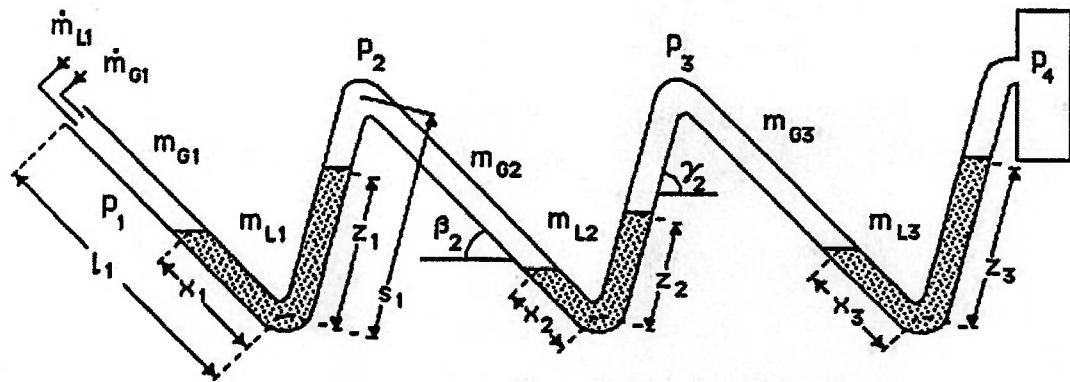


Figura 1.4: Sistema-modelo utilizado e suas variáveis, Taitel (1990).

As variáveis do problema são:

- s_1, s_2, \dots, s_n : comprimentos dos trechos ascendentes.
- l_1, l_2, \dots, l_n : comprimentos dos trechos descendentes.
- x_1, x_2, \dots, x_n : alturas do líquido nos trechos descendentes.
- z_1, z_2, \dots, z_n : alturas do líquido nos trechos ascendentes.
- $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$: inclinações com relação à horizontal dos trechos ascendentes.
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$: inclinações com relação à horizontal dos trechos descendentes.
- p_i : pressão da seção i .
- m_{G_i} : massa de gás na seção i .
- m_{L_i} : massa de líquido na seção i .

- ϵ_i : fração de vazio na seção i .
- $\phi_i := 1 - \epsilon_i$
- A : área da seção da tubulação, suposta constante em todas as deduções que virão.
- R : constante do gás, equivalente à constante universal dos gases dividida pela massa molar do gás.

O modelo parte da hipótese de que as velocidades do líquido e do gás são baixas a ponto de as perdas de pressão por causa do atrito poderem ser negligenciadas. Tal situação ocorre quando, por exemplo, um determinado poço está depletado a ponto de a diferença de pressão entre a saída do BOP e a entrada do separador primário ser pequena, levando a um escoamento lento.

Uma vez que se saiba a quantidade de gás e líquido em cada vale e pico, as equações que descrevem o problema podem ser resolvidas. O ponto é que estas variam conforme o tempo já que ocorre entrada de gás e líquido na primeira seção. Supondo esses fluxos mássicos como conhecidos, bem como a pressão inicial em todo o sistema e a pressão na saída, as equações podem ser divididas em três grupos que representam cinco casos e dois subcasos, os quais serão descritos a seguir.

1.3.1.1 Caso 1

O primeiro caso, considerado o “caso normal” acontece quando a seção encontra-se na situação em que $x_i \neq 0$ e $z_i < s_i$, ou seja, a frente do líquido na seção ainda não alcançou o pico, nem a frente de gás chegou ao vale, como mostrado na figura 1.4. Nesse caso, as equações que regem o sistema são:

$$\frac{p_i}{RT}[(l_i - x_i)A + (s_{i-1} - z_{i-1})A] = m_{Gi} \quad (1.1)$$

$$\rho_L(x_i + z_i)A = m_{Li}, \quad (1.2)$$

$$p_i = p_{i+1} + \rho_L g(z_i \operatorname{sen} \gamma_i - x_i \operatorname{sen} \beta_i) \quad (1.3)$$

As equações (1.1) e (1.2) nada mais são do que balanços de massa para o gás e para o líquido. A hipótese adotada para o cálculo da densidade do gás é que este seja gás ideal, ou seja:

$$\rho_{Gi} = \frac{p_i}{RT} \quad (1.4)$$

A equação (1.3) é resultado do cálculo das pressões hidrostáticas do líquido.

Para a situação do caso normal, têm-se como incógnitas a pressão e as alturas do líquido na descida e na subida, ou seja, p_i , x_i e z_i . No início do problema, para o caso da figura, isso equivale a um sistema não-linear de nove equações e nove incógnitas. O método de solução será descrito, por conveniência, na seção 1.5 “Programa Computacional”.

1.3.1.2 Caso 2

O caso considerado como “Caso 2” ocorre quando, partindo da situação do caso 1, temos que o líquido alcança o pico antes da frente de gás alcançar o vale, como mostrado na figura 1.5. Em termo das variáveis, isso equivale dizer que temos $z_i = s_i$.

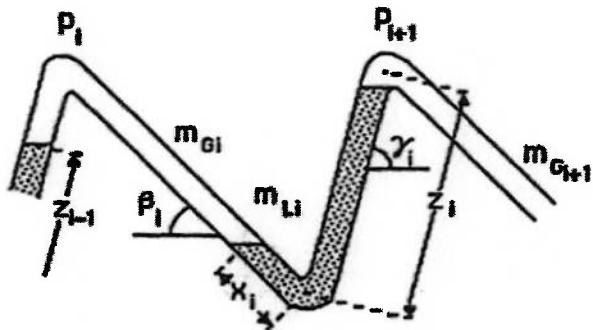


Figura 1.5: Caso 2 - líquido sendo transferido para seção seguinte, Taitel (1990).

As equações a serem resolvidas são as mesmas do caso 1, porém com a alteração de quais são as incógnitas. Nessa seção, conhecemos a altura do líquido na subida (z_i), porém desconhecemos a massa de líquido da seção (m_{L_i}) e, por consequência disso precisamos, ao conhecer m_{L_i} , atualizarmos a massa de líquido da seção seguinte, $m_{L_{i+1}}$. Esta por sua vez também pode passar líquido para a seção $i + 2$ e assim por diante. Tudo isso foi levado em conta na elaboração do modelo computacional (seção 1.5).

1.3.1.3 Caso 3

O caso considerado como “Caso 3” é o que lida com a outra possibilidade de evolução do caso 1. Quando, ao invés de o líquido alcançar o pico antes da frente de gás alcançar o vale (Caso 2), ocorre o oposto, ou seja, o gás passa a penetrar a coluna enquanto a frente de líquido ainda não alcançou o topo, vide figura 1.6. Em termos práticos, temos $x_i = 0$ enquanto z_i permanece desconhecido.

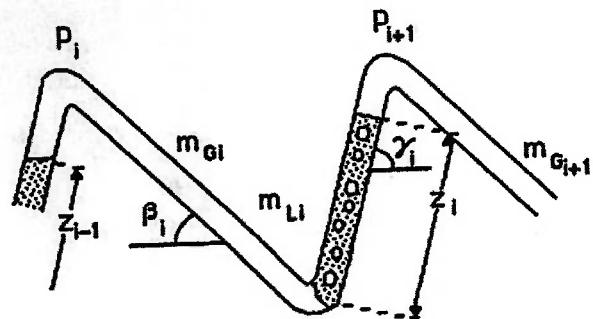


Figura 1.6: Caso 3: gás misturando-se ao líquido na subida, Taitel (1990).

A entrada de gás na seção de subida ainda preenchida com líquido nos leva a dois passos para a evolução dessa situação. Na seção 1.5 esses dois passos estão descritos como casos 3.1 e 3.2.

No caso 3.1, devido ao fluxo de gás que penetra a coluna temos o aumento da fração de vazio ϵ_i dentro do *riser* até que esta atinja seu máximo. Durante esta etapa, não há saída de gás da coluna para a seção seguinte. As equações (1.5), (1.6) e (1.7) regem o que ocorre.

$$\frac{p_i}{RT} [l_i A + (s_{i-1} - z_{i-1}) A] + \frac{p_i + p_{i+1}}{2RT} A z_i \epsilon_i = m_{G_i} \quad (1.5)$$

$$\rho_L \phi_i z_i A = m_{L_i} \quad (1.6)$$

$$p_i - p_{i+1} = z_i \rho_L g \phi_i \operatorname{sen} \gamma_i \quad (1.7)$$

onde $\phi_i = 1 - \epsilon_i$.

A pressão, a altura do líquido no *riser* e a fração de vazio são as incógnitas durante essa etapa. Nominalmente, p_i , z_i e ϵ_i .

Como dito, a evolução desse caso 3.1 dá-se com o aumento do valor de ϵ_i até um valor ϵ_{max} , o qual pode ser um dado empírico ou obtido através de modelos. Taitel [4] sugere para o sistema água-ar o valor médio $\epsilon_{max} = 0.8$ como uma boa aproximação, mas salienta que tal valor varia com a pressão podendo oscilar 0.7 e 0.9.

Após chegar a essa situação teremos as mesmas equações a serem resolvidas, com a simplificação de ϵ_i deixar de ser variável, ou seja, pode-se obter a altura do líquido e a pressão no trecho diretamente das equações.

Usando a equação (1.6) podemos obter z_i ; de posse deste, p_i pode ser obtido através da equação (1.7) e com estes obtermos m_{G_i} usando a equação (1.5). Neste momento, a massa de gás na seção i e na seguinte tornaram-se incógnitas, pois o gás passou a ir para a seção $i + 1$.

1.3.1.4 Caso 4

O caso o qual será tratado como caso 4 é o que ocorre quando temos $z_i = s_i$ e a frente de gás alcança o vale ($x_i = 0$) sendo que o escoamento do gás através do *riser* é estável, vide figura 1.7. Quando essas três condições são alcançadas (o critério de estabilidade será discutido adiante), teremos novamente uma situação que se desenvolve em duas etapas.

Caso 4.1 é a etapa que ocorre enquanto a fração de vazio ainda não atingiu seu valor máximo. Nessa condição, têm-se como incógnitas p_i , m_{L_i} e ϕ_i .

As equações que regem o problema são, novamente, as equações (1.5), (1.6) e (1.7). De forma similar à relação entre os casos 1 e 2, aqui a diferença é o fato de termos $z_i = s_i$ e

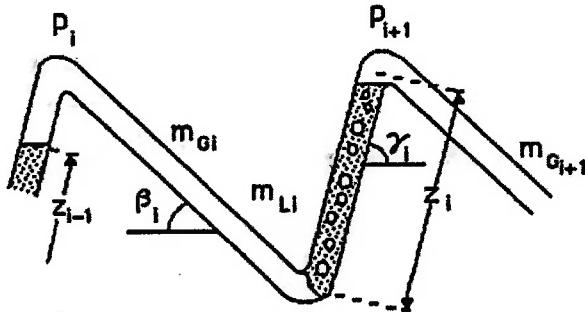


Figura 1.7: Caso 4: fluxo estável na subida, Taitel (1990).

desconhecemos as massas de líquido na seção, bem como o quanto é transferido para a seção seguinte.

A seção sairá do caso passando ao caso 4.2 quando $\epsilon_i = \epsilon_{max}$. Nesse momento, todo o gás e líquido que entram na seção são transferidos para a seção seguinte mantendo assim todos os parâmetros constantes.

1.3.1.5 Caso 5

O caso 5 é o que ocorre quando há um *blowout*, ou seja, uma grande golfada de fluidos para seção seguinte, com uma parcela do líquido retornando. É o estado quando se tem a mesma situação do caso anterior ($z_i = s_i$ e $x_i = 0$), mas o sistema prova-se instável. O modelo considera que se sabe o quanto de líquido retorna após cada golfada, o que normalmente se obtém empiricamente. Uma outra possibilidade é, uma vez conhecendo todos os demais dados, utilizar esse mesmo modelo para se estimar o quanto de líquido está retornando. Uma vez conhecidos todos os parâmetros, as equações que regem o sistema são:

$$\rho_L \phi_i s_i A (1 - \epsilon') = m_{L_i} \quad (1.8)$$

$$x_i = z_i = 0.5 \frac{m_{L_i}}{\rho_L A} \quad (1.9)$$

$$\frac{p_i}{RT} [(l_i - x_i)A + (s_{i-1} - z_{i-1})A] = m_{G_i} \quad (1.1)$$

As equações nada mais representam o estado na seção após o *blowout*. Considera-se que o líquido se distribuirá uniformemente entre a subida e a descida. Tal fato é representado pela equação (1.9). A figura 1.8 mostra a seção após o processo.

1.3.1.6 Análise de estabilidade do sistema

Como dito anteriormente, uma vez que o líquido atinge o topo do *riser* e a frente de gás chega ao fundo do vale ($z_i = s_i$ e $x_i = 0$), faz-se necessário avaliar se o gás irá empurrar uma grande quantidade de líquido para a próxima seção de uma vez ou se penetrará aos poucos na

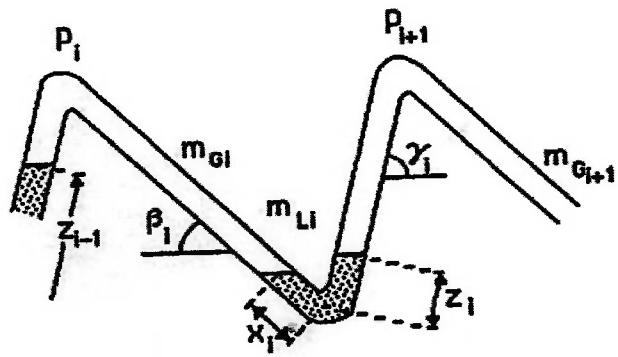


Figura 1.8: Caso 5: Pós-blowout, Taitel (1990).

seção. Nominalmente, se ocorrerá caso 5 ou o caso 4.

Para se iniciar a análise, será considerado o caso em que tanto a seção anterior, como a seção seguinte encontram-se no caso 1, e que a primeira bolha de gás começa a penetrar o *riser*, conforme a figura 1.9.

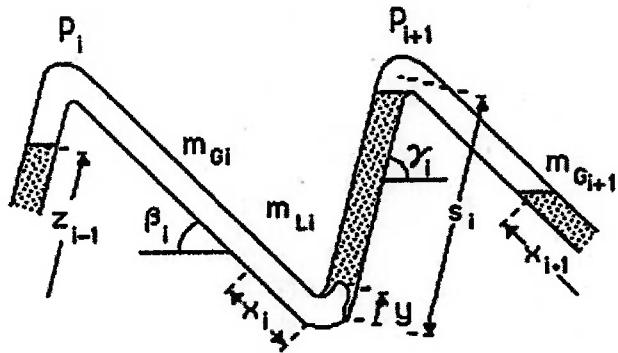


Figura 1.9: Variáveis para a análise de estabilidade, Taitel (1990).

A pressão na base da coluna de líquido é dada por:

$$P = p_i \frac{l_i + s_{i-1} - z_{i-1}}{l_i + s_{i-1} - z_{i-1} + \epsilon'y - \Delta x_{i-1}} - \rho_L g \phi_i \operatorname{sen} \gamma_i (s_i - y) - p_{i+1} \frac{l_{i+1} - x_{i+1}}{l_{i+1} - x_{i+1} - \epsilon'y + \Delta x_{i+1}} \quad (1.10)$$

Na equação, o primeiro termo corresponde à pressão exercida pelo gás que penetra a seção, enquanto o último termo representa a pressão exercida pelo gás da seção seguinte. O termo do meio nada mais é que a pressão da própria coluna de líquido.

A equação (1.9) mostra que, conforme a bolha penetra a coluna (aumento de y) devido à expansão (considerada isotérmica) do gás, P diminui. Por outro lado, P aumenta com o mo-

vimento de z_{i-1} representado por Δx_{i-1} . O oposto ocorre na seção $i + 1$. A pressão por parte da coluna de líquido é diretamente proporcional a y .

A condição de estabilidade para que o sistema seja estável é que a pressão P aumente conforme o gás se expande, em termos matemáticos:

$$\frac{\partial P}{\partial y} > 0 \quad (1.11)$$

Para se chegar ao critério de estabilidade, são utilizadas as seguintes hipóteses:

- a) Todas as seções, com exceção da seção i , estão em equilíbrio hidrostático durante a expansão espontânea do gás.
- b) Para obter uma condição inferior (*lower bound*), assume-se que o líquido à montante e à jusante não se movem.
- c) Para obter uma condição superior (*upper bound*), assume-se que todas as variações à montante são iguais entre si, ou seja, $\Delta x_{i-1} = \Delta x_{i-2} = \dots = \Delta x_1$; a mesma hipótese é utilizada em relação às variações à jusante, ou seja, $\Delta x_{i+1} = \Delta x_{i+2} = \dots = \Delta x_N$.

Utilizando-se essas simplificações e realizando-se os cálculos necessários, obtém-se:

$$\frac{\partial P}{\partial y} = -\frac{p_i \epsilon' (1 - K_{i-1})}{l_i + s_{i-1} - z_{i-1}} + \rho_L g \phi_i \operatorname{sen} \gamma_i - \frac{p_{i+1} \epsilon' (1 - K_{i+1})}{l_{i+1} - x_{i+1}} < 0 \quad (1.12)$$

A equação (1.12) é a condição de estabilidade. A condição inferior é obtida quando se utiliza $K_{i-1} = K_{i+1} = 0$. Para a condição superior, estes termos são calculados do seguinte modo:

$$K_{i-1} = \frac{1}{1 + \frac{l_i + s_{i-1} - z_{i-1}}{\rho_L g (\operatorname{sen} \beta_{i-1} + \operatorname{sen} \gamma_{i-1})}} \quad (1.13)$$

$$K_{i+1} = \frac{1}{1 + \frac{l_{i+1} - x_{i+1}}{\rho_L g (\operatorname{sen} \beta_{i+1} + \operatorname{sen} \gamma_{i+1})}} \quad (1.14)$$

As equações (1.13) e (1.14) consideram que tanto a seção $i - 1$, quando a seção $i + 1$ estão no caso 1. Para o caso 2, basta ignorar os termos que contenham $\operatorname{sen} \gamma$.

Outro ponto a se observar é que para a primeira seção K_{i-1} é sempre nulo, enquanto que K_{i+1} é sempre nulo para a última seção.

1.4 Características do modelo

Antes de discutir-se a solução do problema, convém apontar algumas características do modelo.

O modelo possui como condições de contorno o conhecimento de todas variáveis de todas as seções no instante inicial, além de considerar que, em qualquer instante do tempo, sabe-se o valor da massa de gás e líquido que adentra a primeira seção, bem como o conhecimento da pressão ao final do último trecho.

Para melhor simular um sistema de *pipeline - riser*, o separador e sua pressão podem ser substituídos pelos dados de um simulador específico para risers, como o produzido por Baliño (2010).

O modelo calcula somente condições médias em cada seção, ele não é capaz de classificar e caracterizar localmente cada ponto da tubulação. Se, por exemplo, o modelo aponta que o *riser* está no caso 4, isso significa que o escoamento pode ser anular ou bolhas e, caso haja uma inclinação suficientemente pequena, escoamento estratificado

Trocando-se as densidades do líquido e do gás por valores calculados através de equações de estado, pode-se aumentar fortemente o leque de condições que o programa é capaz de simular. O custo é grande aumento no tempo de simulação e na complexidade da programação.

A possibilidade de se determinar um número qualquer de seções, bem como variar suas características, permite analisar um grande número de situações.

Outro fator necessário, caso se queira utilizar o modelo, é modelar ϵ_{max} , ou seja, a fração de gás máxima para cada trecho do *riser* em função da pressão e também obter o quanto retorna para a seção após a golfada.

1.5 Programa computacional

O método de solução consiste essencialmente em, para cada instante discreto no tempo, avaliar em qual caso cada seção se encontra, gerar um sistema não-linear de até $3 \times N$ equações, onde N é o número de seções, e resolvê-lo.

Para se saber o quanto convergiu, calculou-se a variação da pressão em cada seção ao longo das iterações e estabeleceu-se um valor mínimo.

Um outro método de controle, para saber o erro acumulado ao longo do tempo, é calcular se a massa total do sistema se mantém igual à inicial mais o a diferença entre acrescido na primeira seção e o que foi enviado ao separador pela última seção. Para tanto, é necessário manter-se um controle do quanto o separador recebeu.

1.5.1 Caso 1

Incógnitas: p_i, x_i, z_i

Equações básicas:

$$p_i [l_i + s_{i-1} - x_i - z_{i-1}] = m_{Gi} \cdot \frac{RT}{A} \quad (1.1)$$

$$\rho_L A (x_i + s_i) = m_{Li} \quad (1.2)$$

$$p_i - p_{i+1} = z_i \rho_L g \operatorname{sen} \gamma_i - x_i \rho_L g \operatorname{sen} \beta_i \quad (1.3)$$

Solução

a) Estima-se um chute inicial de p_i e p_{i+1} ;

b) Obtém-se x_i através da relação:

$$x_i = \frac{1}{\operatorname{sen} \gamma_i + \operatorname{sen} \beta_i} \left(\frac{m_{Li} \operatorname{sen} \gamma_i}{\rho_L A} - \frac{p_i - p_{i+1}}{\rho_L g} \right) \quad (1.15)$$

c) Obtém-se z_i através da relação:

$$z_i = \frac{1}{\operatorname{sen} \gamma_i + \operatorname{sen} \beta_i} \left(\frac{m_{Li} \operatorname{sen} \beta_i}{\rho_L A} + \frac{p_i - p_{i+1}}{\rho_L g} \right) \quad (1.16)$$

d) Calcula-se a pressão na seção:

$$p_i = m_{Gi} \cdot \frac{RT}{A} [l_i + s_{i-1} - x_i - z_{i-1}]^{-1} \quad (1.17)$$

1.5.2 Caso 2 ($z_i = s_i$)

Incógnitas: p_i, x_i, m_{Li}

Equações básicas:

$$p_i [l_i + s_{i-1} - x_i - z_{i-1}] = m_{Gi} \cdot \frac{RT}{A} \quad (1.1)$$

$$\rho_L A (x_i + s_i) = m_{Li} \quad (1.2)$$

$$p_i - p_{i+1} = s_i \rho_L g \operatorname{sen} \gamma_i - x_i \rho_L g \operatorname{sen} \beta_i \quad (1.3)$$

Solução

a) Estima-se um chute inicial de p_i e p_{i+1} ;

b) Obtém-se x_i através da relação:

$$x_i = \frac{s_i \rho_L g \operatorname{sen} \gamma_i - p_i + p_{i+1}}{\rho_L g \operatorname{sen} \beta_i} \quad (1.18)$$

c) Obtém-se o quanto do líquido irá para a próxima seção:

$$\Delta m_{L_i} = \rho_L A (x_i + s_i) - m_{L_i} \quad (1.19)$$

d) Calcula-se a nova massa de líquido na seção:

$$m_{L_i} = m_{L_i} + \Delta m_{L_i} \quad (1.20)$$

e) Calcula-se a pressão na seção:

$$p_i = m_{G_i} \cdot \frac{RT}{A} [l_i + s_{i-1} - x_i - z_{i-1}]^{-1} \quad (1.21)$$

f) A massa de líquido da seção seguinte é atualizada:

$$m_{L_{i+1}} = m_{L_{i+1}} - \Delta m_{L_i} \quad (1.22)$$

1.5.3 Caso 3.1 ($x_i = 0$)

Incógnitas: p_i, z_i, ϕ_i

Equações básicas:

$$\frac{p_i}{RT} [l_i A + (s_{i-1} - z_{i-1}) A] + \frac{p_i + p_{i+1}}{2RT} A z_i \epsilon_i = m_{G_i} \quad (1.5)$$

$$\rho_L \phi_i z_i A = m_{L_i} \quad (1.6)$$

$$p_i - p_{i+1} = z_i \rho_L g \phi_i \operatorname{sen} \gamma_i \quad (1.7)$$

Solução

a) Estima-se um chute inicial de p_i e p_{i+1} ;

b) Obtém-se ϕ_i através da relação:

$$\phi_i = \frac{m_{L_i}}{z_i \rho_L A} \quad (1.23)$$

c) Obtém-se z_i através da relação:

$$z_i = \frac{p_i - p_{i+1}}{\phi_i \rho_L g \operatorname{sen} \gamma_i} \quad (1.24)$$

d) Calcula-se a pressão na seção:

$$p_i = \left(\frac{RT}{A} m_{G_i} - \frac{z_i(1 - \phi_i)}{2} p_{i+1} \right) \cdot \left(\frac{z_i(1 - \phi_i)}{2} + l_i + s_{i-1} - z_{i-1} \right)^{-1} \quad (1.25)$$

e) A seção mantém-se nesse caso até $\epsilon_i = \epsilon_{max}$ onde $\epsilon = 1 - \phi$.

1.5.4 Caso 3.2 ($x_i = 0, \epsilon_i = \epsilon_{max}$)

Incógnitas: p_i, z_i, m_{G_i}

Solução

a) Obtém-se z_i através da relação:

$$z_i = \frac{m_{L_i}}{\rho_L A (1 - \epsilon_{max})} \quad (1.26)$$

b) Calcula-se a pressão na seção:

$$p_i = p_{i+1} + z_i (1 - \epsilon_{max}) \rho_L g \operatorname{sen} \gamma_i \quad (1.27)$$

c) Obtém-se o quanto do gás irá para a próxima seção:

$$\Delta m_{G_i} = p_i \frac{A}{RT} (l_i + s_{i-1} - z_{i-1}) + \frac{p_i + p_{i+1}}{2RT} A z_i \epsilon_{max} - m_{G_i} \quad (1.28)$$

d) Obtém-se a nova quantidade de gás na seção atual:

$$m_{G_i} = m_{G_i} + \Delta m_{G_i} \quad (1.29)$$

e) Obtém-se a nova quantidade de gás na seção $i + 1$:

$$m_{G_{i+1}} = m_{G_{i+1}} - \Delta m_{G_i} \quad (1.30)$$

1.5.5 Caso 4.1 ($x_i = 0, z_i = s_i$)

Incógnitas: p_i, m_{L_i}, ϕ_i

Equações básicas:

$$\frac{p_i}{RT} [l_i A + (s_{i-1} - z_{i-1}) A] + \frac{p_i + p_{i+1}}{2RT} A s_i \epsilon_i = m_{G_i} \quad (1.5)$$

$$\rho_L \phi_i s_i A = m_{L_i} \quad (1.6)$$

$$p_i - p_{i+1} = s_i \rho_L g \phi_i \operatorname{sen} \gamma_i \quad (1.7)$$

Solução

a) Estima-se um chute inicial de p_i e p_{i+1} ;

b) Obtém-se ϕ_i através da relação:

$$\phi_i = \frac{p_i - p_{i+1}}{s_i \rho_L g \sin \gamma_i} \quad (1.31)$$

c) Calcula-se a pressão na seção:

$$p_i = \left(\frac{RT}{A} m_{G_i} - \frac{s_i(1 - \phi_i)}{2} p_{i+1} \right) \cdot \left(\frac{s_i(1 - \phi_i)}{2} + l_i + s_{i-1} - z_{i-1} \right)^{-1} \quad (1.32)$$

d) Obtém-se o quanto do líquido irá para a próxima seção:

$$\Delta m_{L_i} = \rho_L A s_i \phi_i - m_{L_i} \quad (1.33)$$

e) Calcula-se a nova massa de líquido na seção:

$$m_{L_i} = m_{L_i} + \Delta m_{L_i} \quad (1.34)$$

f) A massa de líquido da seção seguinte é atualizada:

$$m_{L_{i+1}} = m_{L_{i+1}} - \Delta m_{L_i} \quad (1.35)$$

g) A seção mantém-se nesse caso até $\epsilon_i = \epsilon_{max}$, onde $\epsilon = 1 - \phi$.

1.5.6 Caso 4.2 ($x_i = 0, z_i = s_i, \epsilon = \epsilon_{max}$)

Incógnitas: p_i, m_{L_i}, m_{G_i}

Solução

a) Calcula-se a pressão na seção:

$$p_i = p_{i+1} + s_i(1 - \epsilon_{max}) \rho_L g \sin \gamma_i \quad (1.36)$$

b) Obtém-se o quanto do gás irá para a próxima seção:

$$\Delta m_{G_i} = p_i \frac{A}{RT} (l_i + s_{i-1} - z_{i-1}) + \frac{p_i + p_{i+1}}{2RT} A s_i \epsilon_{max} - m_{G_i} \quad (1.37)$$

c) Obtém-se a nova quantidade de gás na seção $i + 1$:

$$m_{G_{i+1}} = m_{G_{i+1}} - \Delta m_{G_i} \quad (1.38)$$

d) Obtém-se o quanto do líquido irá para a próxima seção:

$$\Delta m_{L_i} = \rho_L A s_i (1 - \epsilon_{max}) - m_{L_i} \quad (1.39)$$

e) A massa de líquido da seção seguinte é atualizada:

$$m_{L_{i+1}} = m_{L_{i+1}} - \Delta m_{L_i} \quad (1.40)$$

1.5.7 Caso 5 ($x_i = z_i$)

Incógnitas: p_i, m_{L_i}, ϕ_i

Equações básicas:

$$\rho_L \phi_i s_i A (1 - \epsilon') = m_{L_i} \quad (1.8)$$

$$x_i = z_i = 0.5 \frac{m_{L_i}}{\rho_L A} \quad (1.9)$$

$$\frac{p_i}{RT} [(l_i - x_i)A + (s_{i-1} - z_{i-1})A] = m_{G_i} \quad (1.1)$$

Solução

- Calculam-se todas as grandezas diretamente das relações.
- Calcula-se o quanto de líquido foi para a seção seguinte. O modelo exige que o próprio usuário defina essa quantidade. Taitel (1990) utilizou o valor de 20% em seus exemplos.

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo deste capítulo, dois casos-exemplos serão analisados. A partir de seus resultados, uma análise acerca do mecanismos gerador de intermitência será feita. Ambos são escoamentos água-ar em tubulações com três seções, cujo diâmetro é 1 polegada.

2.1 Condição 1: Regime estável

As características do problema são:

- Velocidade superficial do líquido $u_{Ls} = 0.1$ m/s.
- Velocidade superficial do gás em condições atmosféricas $u_{Gs_0} = 0.1$ m/s.
- Pressão no separador igual à pressão atmosférica.
- $l = s = 50$ m.
- $\beta = \gamma = 45$ graus.
- $\epsilon_{max} = 0.8$.
- Todas as seções estão inicialmente à pressão atmosférica e preenchidas metade por gás, metade por líquido ($x_i = z_i = 25$).

2.1.1 Análise dos resultados

Inicialmente, todo o sistema se encontra no caso 1; logo, a única seção com aumento nas massas de gás e líquido é a primeira, o que a leva a ter rápida elevação da pressão, bem como a uma subida do líquido em ambas direções. Além disso, há aumento da pressão nas outras seções devido ao gás estar se comprimindo para permitir que o líquido da primeira seção se eleve. Como o gás absorve parte da energia transferida ao aumentar sua densidade, o efeito do aumento da pressão na primeira seção é diluído e tem seu efeito bastante reduzido na seção 3.

Quando $t \approx 300$ s, a seção 1 entra no caso 2 e passa a enviar líquido para a seção seguinte. Logo que isso ocorre, há uma inversão na tendência de queda do líquido na descida da seção 2 (x_2 passa a aumentar), que passa a ver sua pressão elevar-se a uma maior taxa de variação.

Em torno de $t = 600$ s, é a vez do líquido da seção 2 chegar ao topo do *riser* (caso 2) e da seção 3 sofrer um aumento vertiginoso na pressão. Ainda assim, a pressão na primeira seção mantém-se maior, pois é esta a qual recebe continuamente os fluxos mássicos de água e de ar.

Em $t \approx 900$ s (15 min), as três seções passam a estar no caso 2 e, com isso, a frente de gás na primeira seção passa a se aproximar do vale (redução de x_1). A razão disso é que o gás passa a empurrar uma quantidade maior de líquido para a seção 2 que, por sua vez, oferece menos resistência já que esta também está transmitindo líquido para a seção 3, a qual repete o

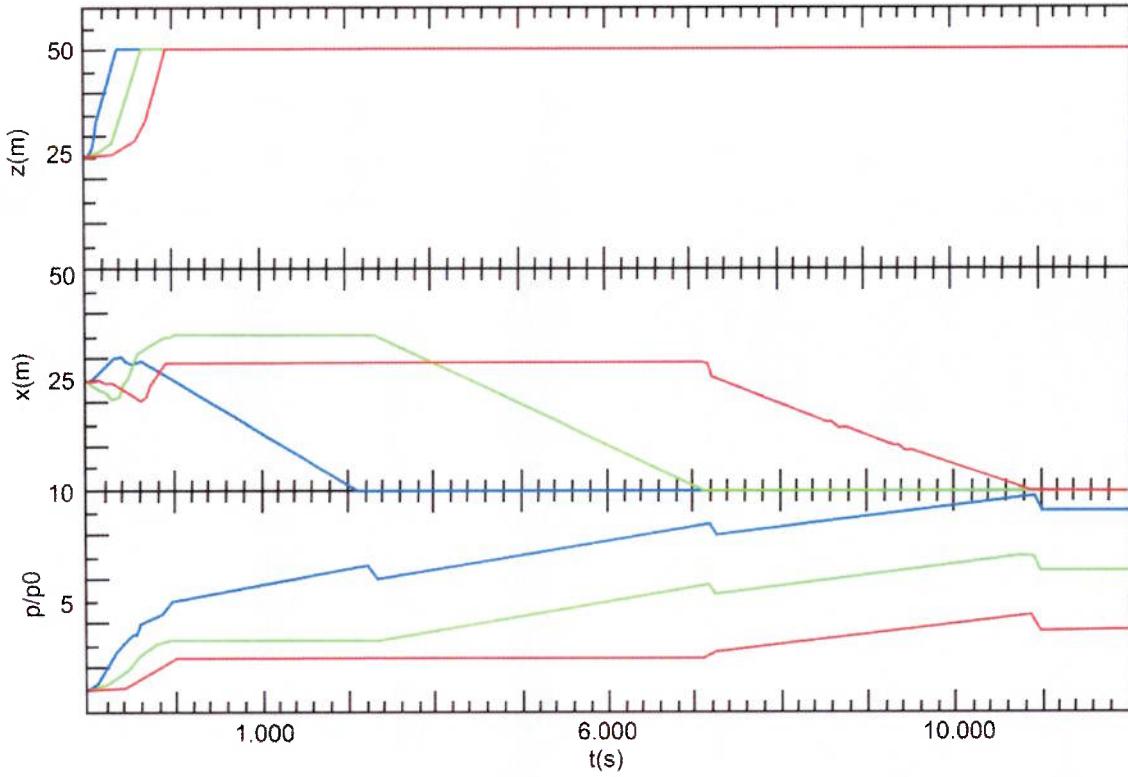


Figura 2.1: Solução do problema em regime estável.

padrão, retransmitindo o líquido para o separador (p_2 e p_3 se mantêm constantes).

Para $t = 3100\text{s}$ ($\approx 52\text{ min}$), a primeira seção entra no caso 4.1 e passa a estocar gás na forma de bolhas, enquanto libera líquido que entra para a seção seguinte. O principal motivo de, nesse caso, o sistema ser estável está no fato de não haver diferença entre l e s , impedindo grandes gradientes de pressões entre as duas fases. Caso houvesse alguma diferença considerável, como veremos na análise seguinte, a força exercida pelo gás da seção seguinte teria efeito desestabilizador suficiente.

O padrão da primeira seção repete-se para as demais que, com a adição de líquido da primeira seção para a segunda e, posteriormente, da segunda para a terceira, passam a também acumular líquido somente no *riser* graças ao aumento da pressão do gás em contato com as sessões anteriores.

Por fim, nota-se que quando $t = 10000\text{s}$ ($\approx 2\text{h}45\text{min}$), todas as seções estão no caso 4.2, ou seja, estão em regime permanente e apenas transmitem ao separador os fluxos mássicos de gás e água que recebem através da entrada da primeira seção.

2.2 Condição 2: Regime instável

As características do problema são:

- Velocidade superficial do líquido $u_{Ls} = 0.1$ m/s.
- Velocidade superficial do gás em condições atmosféricas $u_{Gs_0} = 0.1$ m/s.
- Pressão no separador igual à pressão atmosférica.
- $l = 300$ m, $s = 50$ m.
- $\beta = 6.8$ graus, $\gamma = 45$ graus.
- $\epsilon_{max} = 0.8$.
- 20% é a quantidade de líquido que resta em uma dada seção após a mesma sofrer um *blowout*.
- Todas as seções estão inicialmente à pressão atmosférica e preenchidas metade por gás, metade por líquido ($x_i = 150$, $z_i = 25$).

2.2.1 Análise dos resultados

Inicialmente, temos novamente todas as seções no caso 1 e o comportamento é bastante similar, inclusive para os instantes em que cada seção vê o líquido alcançar o topo do *riser*.

As diferenças começam a se tornar mais claras em relação ao comportamento no gás no trecho de descida. Devido ao valor de l ser seis vezes o de s , demora-se um tempo muito maior para a frente de gás chegar ao vale e, quando isso ocorre em $t \approx 17500$ s (≈ 5 h), o que se vê é um *blowout* na primeira seção. Vale notar que as pressões e alturas do líquido na descida (x) são praticamente as mesmas da análise anterior.

Após a expulsão do líquido, as pressões na seção 1 e em sua jusante se tornam quase iguais, com a primeira decrescendo e a segunda aumentando. Tal fato ocorre porque há uma grande e repentina transferência de líquido e de gás de uma seção para a outra. A seção que fornece a massa (seção 1) perde então pressão. Com o aumento da pressão, x_2 sofre grande retração, mas nota-se que a seção 3 permanece inalterada graças ao fato de haver uma grande quantidade de gás ainda pouco comprimido. Em um caso real, a seção 3 também sofreria algum efeito, mas o modelo não considera tal fato quando modela o *blowout*.

Em $t = 28000$ s (≈ 8 h), a seção 1 novamente tem um *blowout*, aumentando novamente a pressão em 2, que passa a formar um *slug*.

No terceiro *blowout* $t \approx 40000$ s (≈ 11 h), as três seções participam empurrando uma grande quantidade de líquido diretamente para o separador que, em um caso real, o qual poderia ter uma faixa de operação delimitada forçando assim a necessidade de se parar o recebimento

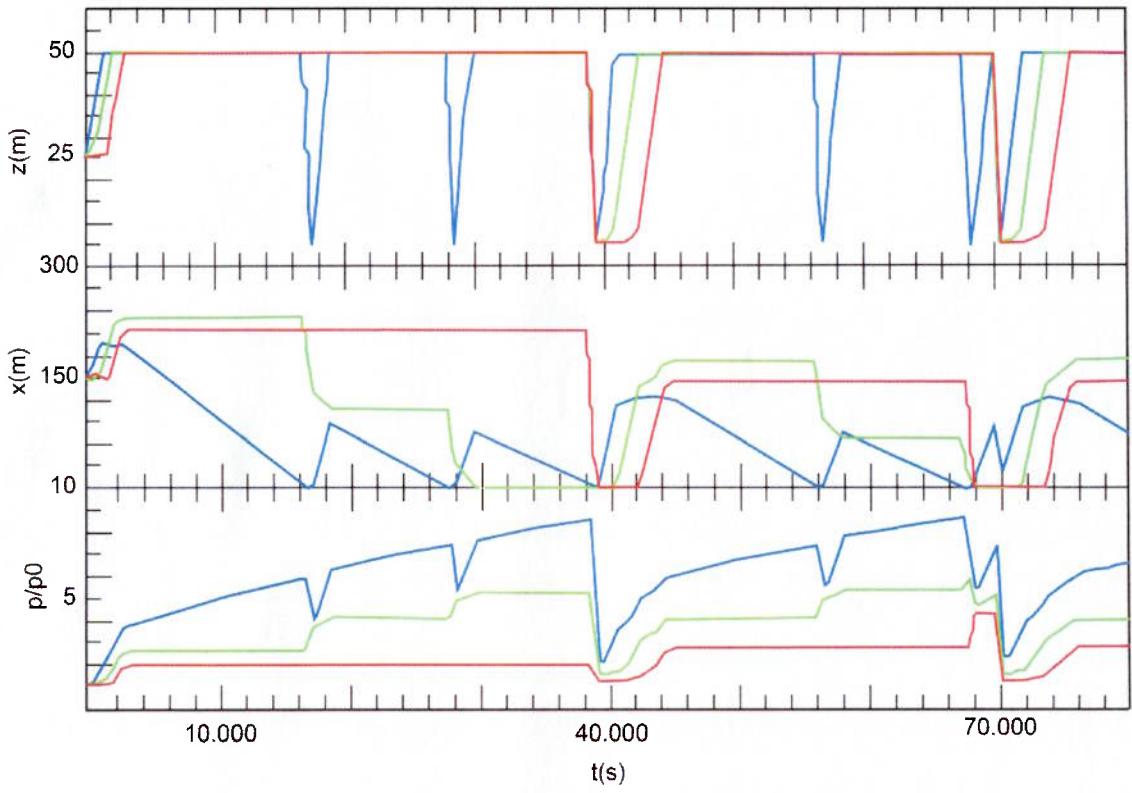


Figura 2.2: Solução do problema em regime instável.

de líquido e gás até o sistema voltar ao estado inicial. A seção 3 é afetada pelo fato de a pressão nas seções anteriores ter aumentado a densidade, que já não varia mais tão facilmente para absorver a energia lançada a frente.

Com o *blowout* das três seções, todas entram novamente no caso 1, mas a situação não é exatamente como a original, o que se nota pelo menor tempo necessário para que ocorra um *blowout* total do sistema pela segunda vez em $t = 70000s$ ($\approx 19h30min$).

CONCLUSÕES E CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

O fenômeno de intermitência severa depende fortemente da geometria do conduto e, como é comum aos processos que envolvem escoamento multifásico, possui solução complexa e só pode ser analisado através da implementação de códigos numéricos.

Através de um modelo não muito complexo foi possível analisar o caso de escoamentos em que a velocidade é baixa o bastante a ponto de poder ser tratado como quase-estático, assim viabilizando-se descrever o escoamento utilizando-se apenas os conceitos de pressão hidrostática e de balanço de massa.

Ao analisarem-se os resultados, pode-se concluir que ao aumentar-se a diferença entre o comprimento do trecho de subida e o de descida, maior é a probabilidade de o regime de escoamento tornar-se instável e ocorrer intermitência severa. A mesma relação de causa-efeito existe quanto ao fluxo de entrada na primeira seção, o que favorece a ocorrência de intermitência conforme é reduzido.

Em relação ao comprimento das seções, nota-se que influenciam os tempos de formação e produção de *slugs*, mas que não afetam de modo geral o comportamento do sistema. Porém convém salientar que isso é verdadeiro em relação ao modelo escolhido, mas em um caso real como os que ocorrem na indústria de petróleo, nos quais o riser da última seção estende-se por um comprimento muito maior que os demais, a hipótese inerente ao modelo de que o valor médio da fração de vazio é uma boa aproximação dessa grandeza em qualquer ponto do riser deixa de ser válida.

Quanto ao número de seções, conclui-se que um aumento do mesmo acarreta em maior tempo necessário até que ocorra expulsão de gás (fig. 1.3d) simultaneamente em todas as seções, com o porém de que a massa de fluidos expelida para o separador também será maior em uma relação de proporcionalidade direta com o número de seções.

De modo geral, há muitas maneiras de se tornar o código mais genérico, sendo que as escolhas mais simples para começar-se são a adição de uma equação de estado que relacione a variação da densidade do gás com a variação da pressão e a utilização de algum modelo para a fração de vazio máxima.

Por fim, tem-se a avaliação de que o presente modelo funciona como uma boa introdução em busca de compreender-se como a intermitência severa pode ser gerada pelo terreno, além de poder ser utilizado para testar modelos mais complexos quando utilizados para prever as características de escoamentos a baixas velocidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Yehuda Taitel. Stability of severe slugging. *International Journal of Multiphase Flow*, 12(2):203 – 217, 1986.
- [2] V. De Henau and G.D. Raithby. A study of terrain-induced slugging in two-phase flow pipelines. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(3):365 – 379, 1995.
- [3] C. Wordsworth, G. McNulty, P.C.Lima, and F.Barbuto. Multiphase flow behaviour in a catenary shaped riser. *CALtec Report No.:CR 6820*, I and II and III, 1998.
- [4] Y. Taitel, O. Shoham, and J.P. Brill. Transient two-phase flow in low velocity hilly terrain pipelines. *International Journal of Multiphase Flow*, 16(1):69 – 77, 1990.
- [5] MathWorks. Site da empresa responsável pelo software matlab. Disponível em: <http://www.mathworks.com/>, Acesso em nov 2012.
- [6] Y. Taitel and D. Barnea. Simplified transient simulation of two phase flow using quasi-equilibrium momentum balances. *International Journal of Multiphase Flow*, 23(3):493 – 501, 1997.
- [7] D. Barnea and Y. Taitel. A model for slug length distribution in gas-liquid slug flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 19(5):829 – 838, 1993.
- [8] P.B. Whalley. *Two-phase flow and heat transfer*. Oxford chemistry primers. Oxford University Press, 1996.
- [9] E. ROSA. *Escoamento Multifásico Isotérmico: modelos de multifluidos e de mistura*. Bookman Companhia ED.
- [10] J.L. Baliño, K.P. Burr, and R.H. Nemoto. Modeling and simulation of severe slugging in air-water pipeline-riser systems. *International Journal of Multiphase Flow*, 36(8):643 – 660, 2010.
- [11] G. Zheng, J.P. Brill, and Y. Taitel. Slug flow behavior in a hilly terrain pipeline. *International Journal of Multiphase Flow*, 20(1):63 – 79, 1994.
- [12] John G. Collier. *Convective boiling and condensation [by] John G. Collier*. McGraw-Hill, London, New York,, 1972.