

Gustavo Hsu Rocha

**Intermitência severa em sistemas água-ar:  
melhorias no modelo do *riser***

São Paulo

Novembro de 2011

Gustavo Hsu Rocha

# Intermitência severa em sistemas água-ar: melhorias no modelo do *riser*

Orientador:  
Jorge Luis Baliño

ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

São Paulo  
Novembro de 2011

## RESUMO

O óleo que sai do poço no fundo do mar precisa passar por dutos, chamados de *pipeline* e *riser* para chegar à superfície. É durante o escoamento dos fluidos por esses dutos que ocorre o fenômeno conhecido por intermitência severa. O fluido passa a escoar em golfadas, causando grandes variações de vazão e pressão, que por sua vez ocasionam perda de produção e danos ao sistema de separação. O entendimento desse fenômeno ainda não é perfeito e seu aprofundamento é essencial para conhecer as causas e maneiras de prevenir esse processo que tanto causa problemas para a indústria do petróleo.

Este trabalho apresentará modificações realizadas no modelo proposto por Baliño (2008) [4] para a simulação da intermitência severa, especificamente no subsistema do *riser*, incorporando ao modelo o termo de inércia no escoamento dos fluidos, válvula reguladora no topo do riser e injeção de gás (*gas lift*). Esses itens são todos observados em poços produtores de petróleo, aproximando assim as simulações realizadas pelo modelo da realidade observada na indústria. Serão expostos resultados de simulações computacionais realizadas utilizando o modelo modificado.

**Palavras - Chave:** intermitência severa, escoamento multifásico, modelagem numérica, *gas lift*, válvula reguladora.

## ABSTRACT

The oil that leaves the well on the seabed must go through ducts, known as pipeline and riser, to reach the surface. It is during the fluids' flow through these ducts that the phenomenon known as severe slugging occurs. The fluid starts to flow in slugs, causing considerable variation in both pressure and flow rate. These variations cause losses in production and damage to the separator. The understanding of this phenomenon isn't perfect yet, and furthering the research on this subject is essential to finding out its causes and developing methods of prevention for this process that causes many problems for the petroleum industry.

This work will present changes made to the model proposed by Baliño (2008) [4] for simulation of severe slugging, specifically in the riser subsystem. The following features will be added: Inertia will be considered in the flow of the fluids, gas lift and a choke valve on top of the riser. These are all observed in oil producing wells, bringing the simulations performed by the model closer to what is observed in the industry. Computer simulation results using the modified model will be presented.

**Key-words:** severe slugging, multiphase flow, numerical modeling, gas lift, choke valve

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, já que tudo que sou hoje é graças a eles. A nossa terra é nossa educação e não vou vendê-la.

Agradeço a todos os professores que tive, não apenas na faculdade, mas em especial o professor Jorge Luis Baliño, que me orientou e apoiou nesse trabalho, sempre disponível para ajudar quando preciso.

Agradeço também a todos os colegas que me acompanharam nesses 5 anos de POLI, em especial a Felipe de Toledo Pinto e Daniel Fitzgibbon Alves Pereira que trabalharam junto comigo na confecção desse modelo.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	p. 7
1.1	Escoamento multifásico . . . . .	p. 7
1.2	Intermitência severa . . . . .	p. 7
1.3	Objetivos e Justificativa da pesquisa . . . . .	p. 9
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	p. 10
2.1	Taitel(1986) . . . . .	p. 10
2.2	Taitel et al.(1990) . . . . .	p. 10
2.3	Sarica & Shoham (1991) . . . . .	p. 10
2.4	Jansen et al. (1996) . . . . .	p. 11
2.5	Chexal et al. (1992) . . . . .	p. 11
2.6	Baliño 2008 . . . . .	p. 11
2.6.1	Pipeline . . . . .	p. 12
2.6.2	Riser . . . . .	p. 13
<b>3</b>	<b>MELHORIAS NO RISER</b>	p. 15
3.1	Equações de conservação . . . . .	p. 15
3.2	<i>Gas lift</i> concentrado . . . . .	p. 17
3.3	Região de gás para $s_u < s_t$ . . . . .	p. 19
3.3.1	Condição $s_u > s_l$ . . . . .	p. 19
3.3.2	Condição $s_u < s_l$ . . . . .	p. 20
3.3.3	Equação de momento linear . . . . .	p. 20
3.4	Válvula reguladora ( <i>choke</i> ) . . . . .	p. 21
3.4.1	Escoamento subcrítico . . . . .	p. 21
3.4.2	Escoamento crítico . . . . .	p. 22

<b>4 DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES</b>	p. 23
4.1 Cálculo do passo temporal . . . . .	p. 23
4.2 Cálculo do <i>riser</i> . . . . .	p. 24
<b>5 SIMULAÇÕES</b>	p. 27
5.1 Parâmetros de entrada e saída do programa . . . . .	p. 27
5.1.1 Parâmetros de entrada . . . . .	p. 27
5.1.2 Parâmetros de saída . . . . .	p. 27
5.2 Lista de Funções . . . . .	p. 28
5.3 Simulações . . . . .	p. 28
5.3.1 Resultados para variação da constante da válvula reguladora . .	p. 29
5.3.2 Resultados para variação da vazão de <i>gás lift</i> . . . . .	p. 30
<b>6 CONCLUSÕES</b>	p. 31
<b>ANEXO A – GRÁFICOS</b>	p. 32
A.1 Resultados das simulações para $K_v = 0$ e $m_{g0GL} = 0$ . . . . .	p. 32
A.2 Resultados das simulações para $K_v = 1$ . . . . .	p. 35
A.3 Resultados das simulações para $K_v = 10$ . . . . .	p. 38
A.4 Resultados das simulações para $K_v = 50$ . . . . .	p. 41
A.5 Resultados das simulações para $K_v = 100$ . . . . .	p. 44
A.6 Resultados das simulações para $m_{g0GL} = 5 * 10^{-5} \frac{kg}{s}$ . . . . .	p. 47
A.7 Resultados das simulações para $m_{g0GL} = 1 * 10^{-4} \frac{kg}{s}$ . . . . .	p. 50
A.8 Resultados das simulações para $m_{g0GL} = 5 * 10^{-4} \frac{kg}{s}$ . . . . .	p. 53
A.9 Resultados das simulações para $m_{g0GL} = 1 * 10^{-3} \frac{kg}{s}$ . . . . .	p. 56
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	p. 59

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Escoamento multifásico

São poucos os escoamentos que podemos observar na natureza que não sejam multifásicos. O petróleo, com sua complexa composição, não é diferente. Os diversos hidrocarbonetos que compõem o petróleo podem se encontrar em estado sólido, líquido ou gasoso dependendo de condições de temperatura e pressão e o mais comum é em um mesmo momento haver componentes em cada um dos 3 diferentes estados, além da água que é produzida junto com o óleo.

Por ser tão presente, o estudo e a melhor compreensão do escoamento multifásico é uma necessidade, mesmo tratando-se de uma tarefa bastante complexa. Cada fase apresenta um comportamento diferente e a interface entre as elas acrescenta mais um elemento de complexidade, pois sua forma e posição é impossível de ser determinada.

Existem na literatura alguns modelos para o escoamento multifásico, podendo ser simples, como o modelo homogêneo, ou bastante complexos, nos quais se modelam os termos de interação entre as diferentes fases.

### 1.2 Intermitência severa

O estudo dos mecanismos de escoamento de gás, óleo e água vem ganhando importância para a produção offshore de petróleo. A necessidade da conexão por meio de dutos entre os poços no fundo do mar e as plataformas, aliada à maior profundidade dos poços gera novos desafios para garantir um escoamento mais estável. O padrão mais frequente de escoamento nesse caso é o padrão "intermitente" ou em "golfada" (*slug*). Esse padrão caracteriza-se por uma distribuição intermitente de líquido e gás, com bolhas de gás entre golfadas de líquido.

Um caso extremo do escoamento em golfadas é conhecido como "intermitência severa" ou "golfada severa" (*severe slugging*). A intermitência severa geralmente ocorre após um trecho descendente de tubulação (*pipeline*), seguido de um trecho ascendente (*riser*). O caso típico ocorre quando o líquido se acumula no final do *pipeline*, impedindo que o gás passe e iniciando um ciclo de golfada, cujo período é da ordem de horas, ou seja, muito maior que o período de um *slug* normal. Esse fenômeno é mais comum em poços de vazões e pressões baixas, geralmente poços em estágio mais avançado de produção.

A Petrobras vem observando o fenômeno de intermitência severa em sistemas *pipeline-riser* já há algum tempo, os primeiros casos sendo reportados em 1984-1985. A intermitência severa gera grandes variações de pressão e composição dos fluidos produzidos, gerando problemas nos separadores das plataformas.

A figura 1 ilustra bem o escoamento em estado permanente. O *pipeline* apresenta escoamento estratificado, enquanto o fluido no *riser* escoar de maneira intermitente.

O ciclo de intermitência severa inicia-se quando o sistema se desestabiliza e o líquido bloqueia a passagem do gás na base do *riser*. O líquido continua entrando no *riser* e o gás saindo, sendo que o nível de líquido pode ficar abaixo do nível do separador. A coluna de líquido no *riser* comprime o gás e gera uma acumulação de líquido no *pipeline*. Essa etapa, visível na figura 2, é conhecida como formação do *slug*.

Quando o nível de líquido atinge o topo do *riser*, sendo que o gás continua preso no *pipeline*, a pressão na base do *riser* atinge o seu valor máximo. Nesse momento há apenas líquido escoando no *riser*, caracterizando a etapa de produção do *slug*, como pode ser visto na figura 3.

A pressão do gás preso no *pipeline* aumenta com o tempo, já que o fluxo de entrada de gás no sistema não é interrompido. Esse aumento de pressão empurra a frente de acumulação de líquido, até que ela atinge a base do *riser*, dando início à etapa de penetração do gás. (Figura 4)

Quando o gás começa a penetrar no *riser*, a coluna passa a ficar gradualmente mais leve, diminuindo a pressão na base do *riser* e aumentando a vazão de gás. Ao atingir o topo, a passagem de gás fica liberada, por meio do escoamento estratificado no *pipeline* e do escoamento intermitente no *riser*. Isso causa uma violenta expulsão e uma rápida descompressão, que por sua vez leva ao reinício do ciclo, ou seja, leva novamente à etapa de formação do *slug*. Essa etapa, conhecida como expulsão de gás, pode ser observada na figura 5.

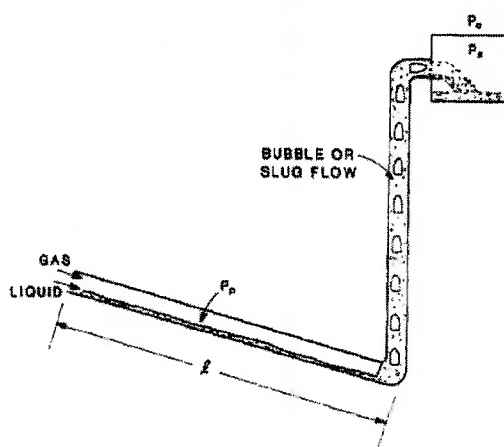


Figura 1: Estado permanente (de Taitel, 1986 [14]).

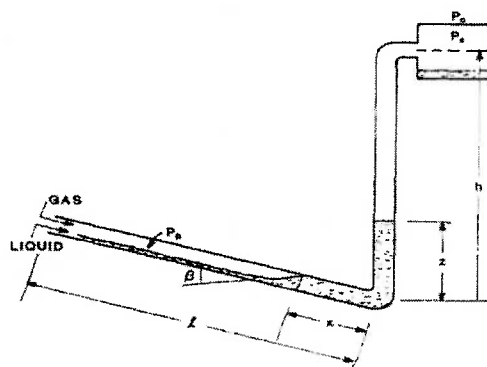


Figura 2: Formação do *Slug* (de Taitel, 1986 [14]).



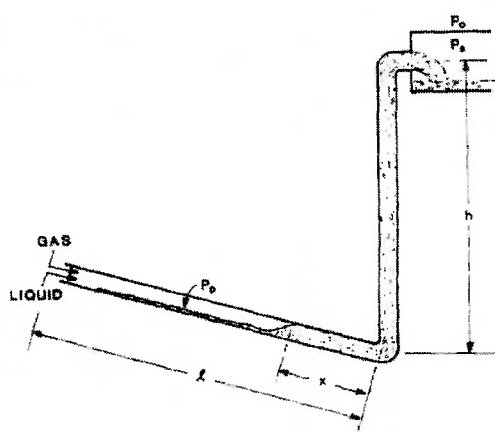


Figura 3: Produção do *Slug* (de Taitel, 1986 [14]).

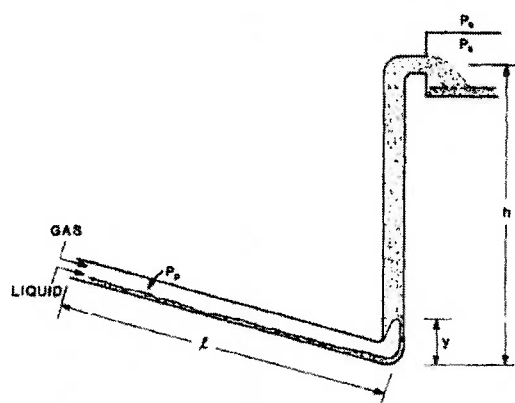


Figura 4: Entrada de gás (de Taitel, 1986 [14]).

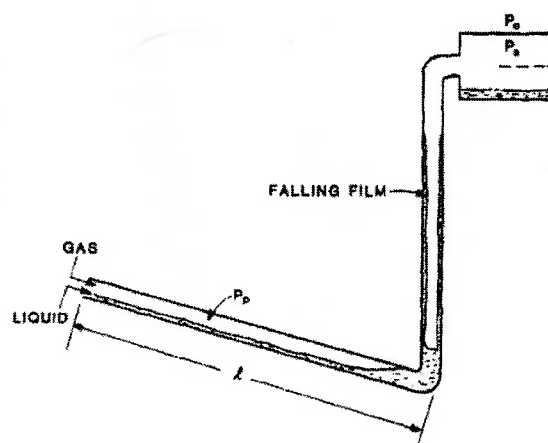


Figura 5: Expulsão de gás (de Taitel, 1986 [14]).

### 1.3 Objetivos e Justificativa da pesquisa

O problema da intermitência severa está presente no dia-a-dia da atividade de produção de petróleo, com inúmeras consequências prejudiciais para os produtores. No entanto é um fenômeno ainda não completamente compreendido. Existem na literatura alguns modelos que buscam simular esse fenômeno, um dos quais sendo o de Baliño (2008) [4], que é capaz de simular uma ampla gama de casos com certa precisão, mas utiliza algumas aproximações e não leva em conta fatores como a inércia no escoamento dos fluidos, possível injeção de gás ou válvula reguladora no topo do riser.

Este trabalho busca complementar o modelo de Baliño (2008)[4], aproximando-o da realidade, realizando modificações apenas no subsistema do *riser*. Com melhores modelos, é possível entender melhor e encontrar as causas da intermitência severa, podendo assim procurar prevenir esse fenômeno, que causa tantos problemas à indústria do petróleo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Taitel(1986)

Em Taitel (1986) [14] é apresentado um critério de estabilidade para sistemas *pipeline-riser* verticais, com base na perturbação por penetração de gás no *riser* da condição de regime permanente. São levados em conta apenas a diminuição de pressão no *riser* devido ao aumento da fração de vazio e a diminuição da pressão no *pipeline* devido à descompressão do gás.

Se a diminuição da pressão no *riser* for menor que a do *pipeline*, o sistema será instável. Segundo esse critério, o sistema será mais estável para maiores pressões no separador, maiores comprimentos do *riser* e menores comprimentos do *pipeline*. O aumento da pressão no separador pode ser atingido por meio de uma válvula reguladora (choke valve).

### 2.2 Taitel et al.(1990)

Em Taitel et al. (1990) [15] foram apresentadas medições de escoamentos intermitentes em sistemas *pipeline-riser* com um ângulo de inclinação de -5 graus. Os transientes foram classificados em 3 categorias, baseadas no que ocorre após a penetração do gás no *riser*, a partir de uma condição inicial onde o *riser* está cheio de líquido.

a) Penetração do gás, seguida de uma oscilação que leva ao estado permanente (steady state flow).

b) Penetração de gás que leva a uma operação cíclica sem queda de líquido (cyclic process without fallback). Neste caso, a vazão de líquido é suficientemente grande para que o nível de líquido mantenha-se no valor máximo.

c) Penetração do gás que leva a uma operação cíclica com queda de líquido (cyclic process with fallback). Neste caso ocorre acúmulo de gás no topo do *riser* e nível de líquido variável no regime transiente.

Foi desenvolvido um modelo para simulação dessa dinâmica.

### 2.3 Sarica & Shoham (1991)

Em Sarica & Shoham (1991) [13] é apresentado um modelo simplificado unidimensional para o sistema *pipeline-riser*. O Sistema considera escoamento dominado por gravidade, desprezando os efeitos da inércia. No *pipeline*, é considerado escoamento estratificado com fração de vazio constante e no *riser* utilizam-se equações de continuidade para as fases líquida e gasosa além da condição da variação de pressão hidrostática. O

modelo utiliza também uma relação de velocidade de deriva (drift flux). Este modelo consegue mostrar característica da intermitência severa, como a descontinuidade no *pipeline* devido à acumulação de líquido, a variação de nível de líquido no *riser* e a determinação da frente de fração de vazio no *riser*.

Foram feitas comparações dos resultados obtidos com dados experimentais para *risers* verticais. Os resultados obtidos mostram um erro sistemático nos períodos do ciclo de intermitência severa e falta de convergência em alguns casos.

## 2.4 Jansen et al. (1996)

Jansen et al. (1996) [9] fez modificações no critério de estabilidade e no modelo de Taitel para poder estudar os efeitos de uma válvula reguladora (choke valve) no topo do *riser* e da injeção de gás (gás lift) na base do *riser* na estabilidade e dinâmica do sistema *pipeline-riser* vertical. Tanto a Injeção de gás quanto a válvula reguladora tem efeito estabilizador, já que a válvula aumenta a pressão no topo do *riser*, enquanto a injeção de gás reduz a pressão da coluna.

Foram realizadas medições utilizando a mesma bancada de Taitel et al. (1990) [15], com um *pipeline* descendente com inclinação de -1 grau, mas modificada para incluir uma válvula reguladora no topo e gás lift na base do *riser*.

## 2.5 Chexal et al. (1992)

O trabalho de Chexal et al. (1992) [6] propõe uma correlação baseada em dados experimentais para a fração de vazio. O objetivo do trabalho é encontrar uma correlação baseada no modelo de deriva que elimine a necessidade de se conhecer o regime de escoamento para que se possa prever a fração de vazio.

A correlação de Chexal-Lellouche se ajusta bem a dados experimentais em uma ampla gama de vazões, pressões, propriedades dos fluidos e diâmetros de tubulações. Os testes realizados no trabalho não são de interesse direto para a indústria do petróleo, mas como a correlação é válida para uma faixa grande de fluidos nada impede que ela possa ser utilizada futuramente com fluidos utilizados nessa indústria.

## 2.6 Baliño 2008

O Modelo de Baliño (2008) [4] tem como base os seguintes subsistemas:

- Tanque pulmão de gás e um *pipeline* descendente, com escoamento estratificado por toda sua extensão ou até a frente de penetração de líquido. O *pipeline* pode se encontrar em dois estados distintos: penetração contínua de gás ou não penetração de gás.
- *Riser* ascendente, considerado como um sistema bifásico de parâmetros distribuídos, desprezando-se a inércia e utilizando um modelo de fluxo de deriva (drift-flux) como lei de fechamento. O nível de líquido é variável e pode haver injeção de gás (*gas lift*).
- Região de gás no topo do *riser*, mas apenas quando o líquido não atinge o topo.

- Válvula de choke no topo do *riser*.

O modelo utiliza um método implícito, sendo que é utilizado o método preditor corretor para lidar com não linearidades. O modelo é capaz de simular casos citados em vários trabalhos anteriores, sempre com convergência. Esse modelo é utilizado como base para o trabalho, e portanto será melhor analisado a seguir.

### 2.6.1 Pipeline

No modelo, o gás no *pipeline* é considerado como uma cavidade de pressão  $P_g(t)$  constante na posição e evoluindo isotérmicamente como um gás perfeito. O Pipeline pode encontrar-se em duas condições distintas: penetração contínua de gás( $x=0$ ) ou não penetração de gás( $x>0$ ), sendo  $x$  o comprimento de penetração do líquido no *riser*.

Para realizar os cálculos, é mais conveniente a utilização das equações em função das velocidades superficiais do líquido e do gás, definidas em Baliño (2008) [4] pelas equações abaixo:

$$\alpha = 1 - \frac{A_l}{A} = \frac{A_g}{A} \quad (2.1)$$

$$j_l = (1 - \alpha) * u_l \quad (2.2)$$

$$j_g = \alpha u_g \quad (2.3)$$

Sendo que  $\alpha$  é a fração de vazio,  $A_l$  a área ocupada por líquido em uma seção do duto,  $A_g$  a área ocupada por gás em uma seção,  $A$  a área total de uma seção do *pipeline*,  $j_l$  a velocidade superficial do líquido,  $j_g$  a velocidade superficial do gás,  $u_l$  a velocidade do líquido e  $u_g$  a velocidade do gás.

Para o caso de  $x > 0$ , ou seja,  $j_{gb} = 0$  as equações para o *pipeline*, como deduzidas em Baliño (2008) [4] são:

$$\frac{d\alpha_p}{dt} = \frac{j_{lb} - \frac{Q_{l0}}{A} + \alpha_p * \frac{dx}{dt}}{L - x} \quad (2.4)$$

$$\frac{dP_g}{dt} = \frac{-P_g(j_{lb} - \frac{Q_{l0}}{A}) + \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{g0}}{(L - x) * \alpha_p + L_e} \quad (2.5)$$

Sendo que  $P_g$  é a pressão do gás no *pipeline*,  $Q_{l0}$  é a vazão volumétrica de líquido entrando no *pipeline*,  $\alpha_p$  a fração de vazio no *pipeline*,  $R_g$  a constante do gás,  $T_g$  a temperatura do gás,  $\dot{m}_{g0}$  a vazão mássica de gás entrando no *pipeline*,  $L$  o comprimento do *pipeline* e  $L_e$  o comprimento buffer equivalente do conduto.

Para a condição  $x=0$ , temos que:

$$\frac{d\alpha_p}{dt} = \frac{1}{L} (j_{lb} - \frac{Q_{l0}}{A}) \quad (2.6)$$

$$\frac{dP_g}{dt} = \frac{-P_g(j_{lb} + j_{gb} - \frac{Q_{l0}}{A}) + \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{g0}}{L * \alpha_p + L_e} \quad (2.7)$$

A comutação entre as condições  $x = 0$  e  $x > 0$  é feita quando é detectada a condição  $x = 0$ , sendo que nesse momento a velocidade superficial de gás apresenta uma descontinuidade, passando de zero a  $j_{gb} = -\alpha_p \frac{dx}{dt}$ . A fração de vazio na base tem também uma descontinuidade, passando de zero a  $\alpha_b = \alpha_p$ .

Como uma maneira de simplificar o cálculo, reduzindo bastante o tempo para a realização de uma simulação, o modelo exposto em [4] utiliza uma fração de vazio constante ao longo do tempo no *pipeline*. Simplificando as equações(1.4),(1.5), (1.6) e (1.7), chegamos às equações abaixo:

Para  $x > 0$  temos que:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\frac{Q_{l0}}{A} - j_{lb}}{\alpha_p} \quad (2.8)$$

$$\frac{dP_g}{dt} = \frac{-P_g(j_{lb} - \frac{Q_{l0}}{A}) + \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{g0}}{(L - x) * \alpha_p + L_e} \quad (2.9)$$

Já para  $x = 0$ , temos que:

$$j_{lb} = \frac{Q_{l0}}{A} \quad (2.10)$$

$$\frac{dP_g}{dt} = \frac{-P_g j_{gb} + \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{g0}}{L * \alpha_p + L_e} \quad (2.11)$$

### 2.6.2 Riser

O *riser* pode estar cheio ou com um nível de líquido inferior a sua altura máxima. O considerando o escoamento unidimensional e supondo que não há transferência de massa por vaporização chega-se nas equações de continuidade abaixo:

$$-\frac{\delta \alpha_r}{\delta t} + \frac{\delta \alpha_l}{\delta s} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\delta}{\delta t}(-g \alpha_r) + \frac{\delta}{\delta s}(\rho_g j_g) = \frac{1}{A} \dot{m}'_{g0} \quad (2.13)$$

Sendo que  $\alpha_r$  é a fração de vazio no *riser*,  $s$  é o parâmetro que indica a fração de vazio no *riser* e  $\dot{m}'_{g0}$  é a vazão mássica de gás por unidade de comprimento introduzida por *gas lift*.

Como simplificação, foi desconsiderado o efeito da inércia e da injeção de gás, e após as deduções explicitadas em Baliño [4] chega-se nas equações abaixo, utilizadas

para o cálculo do *riser*.

$$\frac{D_g P}{Dt} = -\frac{P}{\alpha_r} \frac{\delta j}{\delta s} \quad (2.14)$$

$$\frac{D_g \alpha_r}{Dt} = -\frac{\delta j}{\delta s} - \alpha \frac{\delta}{\delta s} (C_d + U_d) \quad (2.15)$$

$$\frac{\delta P}{\delta s} = -\rho_m g \sin \Theta - \frac{2f_m \rho_m j |j|}{D} \quad (2.16)$$

Sendo que  $\Theta$  é o ângulo de inclinação do *riser*,  $\rho_m$  é a densidade da mistura líquido-gás,  $f_m$  é o fator de atrito e  $C_d$  e  $U_d$  são parâmetros de drift.

### 3 MELHORIAS NO RISER

O modelo do *riser* apresentado em Baliño (2008) [4] apresentava algumas simplificações. O efeito da inércia no escoamento dos fluidos no *riser* era desconsiderado. Elementos presentes no modelo de Jansen, assim como em casos reais de sistemas reais *pipeline-riser*, como injeção de gás e válvula de choke foram desconsiderados. Esse trabalho busca acrescentar ao modelo os três itens acima.

#### 3.1 Equações de conservação

O riser pode se encontrar cheio ou com um nível de líquido inferior ao nível máximo. Considerando escoamento unidimensional e líquido incompressível e supondo que não existe transferência de massa por vaporização entre as fases, as equações de continuidade para o gás e o líquido resultam:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \alpha) + \frac{\partial}{\partial s} (\rho_g j_g) = \frac{1}{A} \dot{m}'_{gl} \quad (3.1)$$

$$-\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial j_l}{\partial s} = 0 \quad (3.2)$$

onde  $\dot{m}'_{gl}$  é a vazão mássica de gás por unidade de comprimento introduzida por *gas lift*,  $\alpha(s, t)$  é a fração de vazio no riser e  $s$  é o parâmetro que indica a distância ao longo do riser de inclinação variável, como mostrado na Figura 82.

Considerando uma evolução isotérmica como gás perfeito:

$$P = \rho_g R_g T_g \quad (3.3)$$

a equação de continuidade do gás resulta:

$$\frac{\partial}{\partial t} (P \alpha) + \frac{\partial}{\partial s} (P j_g) = \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}'_{gl} \quad (3.4)$$

onde  $P(s, t)$  é a pressão no riser.

A experiência em simulação numérica mostra que, na grande maioria dos transientes de interesse na indústria do transporte de petróleo e gás (transientes lentos), as ondas de pressão não têm um efeito importante na iniciação e transporte das ondas de fração de vazio [12]. As ondas acústicas estão relacionadas com os termos de inércia das fases, introduzindo autovalores relacionados com as velocidades de propagação e complicando o esquema numérico de resolução.

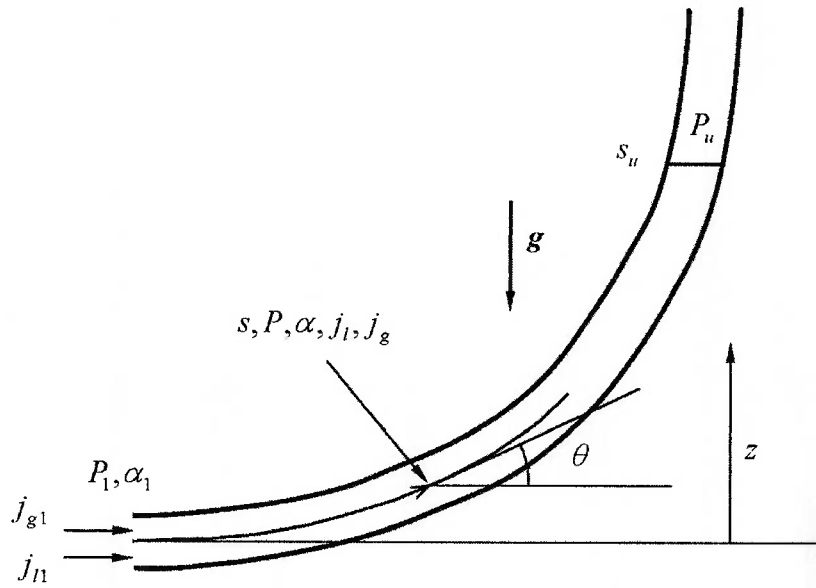


Figura 6: Definição de variáveis no *riser*.

No modelo de riser desenvolvido utiliza-se a equação de momento linear da mistura na direção do escoamento. Desprezando o momento da vazão introduzida por *gas lift*, resulta:

$$\frac{\partial P}{\partial s} = -\frac{\partial}{\partial t} [\alpha \rho_g u_g + (1 - \alpha) \rho_l u_l] - \frac{\partial}{\partial s} [\alpha \rho_g u_g^2 + (1 - \alpha) \rho_l u_l^2] - \rho_m g \sin \theta - \frac{4 \tau_w}{D} \quad (3.5)$$

onde  $u_g$  e  $u_l$  são respectivamente as velocidades da fase gasosa e líquida,  $\rho_m$  é a massa específica da mistura,  $\theta(s)$  é o ângulo de inclinação local do riser e a horizontal e  $\tau_w$  é a tensão de cisalhamento com a parede.

A massa específica da mistura é definida como:

$$\rho_m = \rho_l (1 - \alpha) + \rho_g \alpha = \rho_l (1 - \alpha) + \frac{P}{R_g T_g} \alpha \quad (3.6)$$

Combinando a Eq. (3.7) com as Eq. (3.1) e (3.2), resulta:

$$\frac{\partial P}{\partial s} = -\alpha \rho_g \frac{D_g u_g}{Dt} - (1 - \alpha) \rho_l \frac{D_l u_l}{Dt} - \frac{4 \tau_w}{D} - \rho_m g \sin \theta - u_g \frac{\dot{m}'_{gl}}{A} \quad (3.7)$$

onde:

$$\frac{D_g}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_g \frac{\partial}{\partial s} \quad (3.8)$$



$$\frac{D_l}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_l \frac{\partial}{\partial s} \quad (3.9)$$

Para a tensão de cisalhamento  $\tau_w$  será utilizado um fator de atrito de *Fanning* e um modelo pseudo-homogêneo para o fluido [10], resultando as seguintes relações:

$$\tau_w = \frac{1}{2} f_m \rho_m j |j| \quad (3.10)$$

$$f_m = f_m \left( Re_m, \frac{\epsilon}{D} \right) \quad (3.11)$$

$$Re_m = \frac{\rho_m D |j|}{\mu_m} \quad (3.12)$$

$$\mu_m = \mu_l (1 - \alpha) + \mu_g \alpha \quad (3.13)$$

O gradiente de pressão no riser resulta, finalmente:

$$\frac{\partial P}{\partial s} = -\rho_m \left( g \sin \theta + 2 \frac{f_m}{D} j |j| \right) - \alpha \rho_g \frac{D_g u_g}{Dt} - (1 - \alpha) \rho_l \frac{D_l u_l}{Dt} - u_g \frac{\dot{m}'_{gl}}{A} \quad (3.14)$$

Como lei de fechamento, será utilizada a conhecida relação do modelo de fluxo de deriva (*drift flux model*) [6], suposta válida localmente:

$$u_g = \frac{j_g}{\alpha} = C_d j + U_d \quad (3.15)$$

onde o parâmetro de distribuição  $C_d$  e a velocidade de deriva  $U_d$  são funções das variáveis locais do escoamento. Assim, resulta:

$$j_g = \alpha (C_d j + U_d) \quad (3.16)$$

$$j_l = j - j_g = (1 - \alpha C_d) j - \alpha U_d \quad (3.17)$$

### 3.2 Gas lift concentrado

A elevação por gás (*gas lift*) é um método artificial que utiliza a energia contida num gás comprimido para elevar fluidos (óleo e/ou água) até a superfície [7, 16]. Aumentando-se a quantidade de gás diminui-se a componente gravitacional do gradiente de pressão e, nos limites onde o aumento do gradiente de pressão por atrito resulta menos importante, diminui também o gradiente de pressão total. O *gas lift* é utilizado em operação normal para aumentar a produção na coluna de elevação. Na problemática de

intermitência severa, o *gas lift* é uma das tecnologias utilizadas para estabilização do sistema.

No modelo desenvolvido, é considerada a possibilidade de injeção de *gas lift* concentrada numa posição intermediária no riser  $0 \leq s_l < s_t$ . Neste caso, pode-se escrever:

$$\dot{m}'_{gl} = \dot{m}_{gl} \delta(s - s_l) \quad (3.18)$$

onde  $\dot{m}_{gl}$  é a vazão mássica de gás introduzida e  $\delta(s)$  é a função impulso (delta de Dirac).

Para o caso de injeção concentrada, pode-se considerar que a equação de continuidade para o gás e a equação de momento não tem termo de fonte, e levar em consideração o efeito da injeção deltiforme através de descontinuidades nas variáveis localizadas em  $s_l$ . Integrando as Eq. (3.2) e (3.4) na posição entre  $s_l^- = s_l - \varepsilon$  e  $s_l^+ = s_l + \varepsilon$ , onde  $\varepsilon$  é um infinitésimo, obtém-se:

$$j_l^+ = j_l^- = j_l \quad (3.19)$$

$$P^+ j_g^+ - P^- j_g^- = \frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{gl} \quad (3.20)$$

onde  $j_g^+ = j_g(s_l^+, t)$ ,  $j_g^- = j_g(s_l^-, t)$ ,  $j_l^+ = j_l(s_l^+, t)$ ,  $j_l^- = j_l(s_l^-, t)$ ,  $P^+ = P(s_l^+, t)$  e  $P^- = P(s_l^-, t)$ .

Re-escrevendo a Eq. (3.5) em termos das velocidades superficiais, integrando através da descontinuidade e levando em conta a Eq. (3.3), resulta:

$$\begin{aligned} P^+ - P^- &= \left[ \frac{\rho_g j_g^2}{\alpha} + \frac{\rho_l j_l^2}{1 - \alpha} \right]^+ - \left[ \frac{\rho_g j_g^2}{\alpha} + \frac{\rho_l j_l^2}{1 - \alpha} \right]^- \\ &= \left[ \frac{\rho_g j_g^2}{\alpha} \right]^+ - \left[ \frac{\rho_g j_g^2}{\alpha} \right]^- + \rho_l j_l^2 \left( \frac{1}{1 - \alpha^+} - \frac{1}{1 - \alpha^-} \right) \\ &= \frac{1}{R_g T_g} \left[ \left( \frac{P j_g^2}{\alpha} \right)^+ - \left( \frac{P j_g^2}{\alpha} \right)^- \right] + \rho_l j_l^2 \left( \frac{1}{1 - \alpha^+} - \frac{1}{1 - \alpha^-} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Para determinar as variáveis através das descontinuidades, vamos supor conhecidas  $j_g^-$ ,  $j_l$ ,  $\alpha^-$  e  $P^+$ . O procedimento resulta:

1. Da Eq. (3.20) é calculado  $j_g^+$ :

$$j_g^+ = \frac{\frac{R_g T_g}{A} \dot{m}_{gl} + P^- j_g^-}{P^+} \quad (3.22)$$

2. Da Eq. (3.21) é calculado  $P^-$ :

$$P^- = \frac{P^+ \left[ 1 - \frac{1}{R_g T_g} \left( \frac{j_g^2}{\alpha} \right)^+ \right] - \rho_l j_l^2 \left( \frac{1}{1 - \alpha^+} - \frac{1}{1 - \alpha^-} \right)}{1 - \frac{1}{R_g T_g} \left( \frac{j_g^2}{\alpha} \right)^-} \quad (3.23)$$

3. Da Eq. (3.16) é calculado  $\alpha^+$ :

$$\alpha^+ = \frac{j_g^+}{(C_d j + U_d)^+} \quad (3.24)$$

As descontinuidades na pressão, fração de vazio e velocidade superficial do gás ocorre (além de no ponto de injeção de *gas lift*) na base do riser, onde existe uma descontinuidade na fração de vazio por mudança de padrão de escoamento estratificado a intermitente.

### 3.3 Região de gás para $s_u < s_t$

Nos transientes onde o nível de líquido no riser desce por debaixo do topo ( $s_u < s_t$ ), existe uma região de gás na parte superior do riser, mostrada na Figura 7, que é modelada como uma cavidade de pressão constante na posição  $\bar{P}_{gr}$ . No entanto, outros efeitos serão levados em consideração na equação de momento linear na direção de escoamento.

A pressão média na região de gás é calculada como:

$$\bar{P}_{gr} = \frac{1}{2} (P_t + P_u) \quad (3.25)$$

onde  $P_{ru}$  e  $P_{rt}$  são respectivamente as pressões no nível de líquido e no topo do riser.

#### 3.3.1 Condição $s_u > s_t$

Considerando a situação onde o local de injeção de *gas lift* está fora da região de gás ( $s_u > s_t$ ), a equação de continuidade para o gás no volume de controle deformável em  $s_u$  (com velocidade  $u_{lu}$ ) e fixo em  $s_t$  resulta:

$$\frac{d\bar{P}_{gr}}{dt} = -\frac{\bar{P}_{gr}}{s_t - s_u} (j_{gt} - j_u) \quad (3.26)$$

onde  $j_{gt}$  é a velocidade superficial de gás no topo do riser,  $j_u$  a velocidade superficial total no nível de líquido e  $s_u$  e  $s_t$  respectivamente as posições do nível de líquido e do topo do riser,

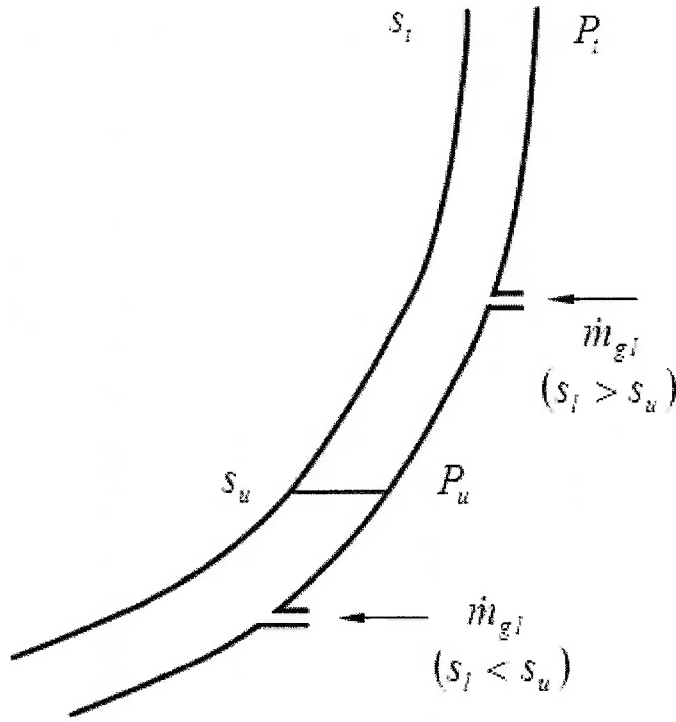


Figura 7: Volume de controle para a região de gás na parte superior do riser.

### 3.3.2 Condição $s_u < s_l$

Considerando a situação onde o local de injeção de *gas lift* está fora da região de gás ( $s_u < s_l$ ) deve ser considerada a vazão de *gas lift* na equação de continuidade para o gás no volume de controle, resultando:

$$\frac{d\bar{P}_{gr}}{dt} = -\frac{\bar{P}_{gr}}{s_t - s_u} \left( j_{gt} - j_u - \frac{R_g T_g}{\bar{P}_{gr} A} \dot{m}_{gl} \right) \quad (3.27)$$

### 3.3.3 Equação de momento linear

Um balanço de momento na região de gás fornece uma relação envolvendo as pressões  $P_u$  e  $P_t$ :

$$P_u = P_t + \bar{\rho}_g \left[ g(z_t - z_u) + \left( \frac{2f_{gg}}{D} \bar{j}_{gr} |\bar{j}_{gr}| - \frac{d\bar{j}_{gr}}{dt} \right) (s_t - s_u) \right] \quad (3.28)$$

$$\bar{j}_{gr} = \frac{1}{2} (j_{gu} + j_{gt}) \quad (3.29)$$

onde  $f_{gg}$  é o fator de atrito de Fanning considerando gás unicamente e  $\bar{j}_{gr}$ ,  $j_{gt}$  e  $j_{gu}$  respectivamente as velocidades superficiais média na região de gás, de gás no topo do

riser e de gás no nível de líquido.

### 3.4 Válvula reguladora (*choke*)

Em operação normal, a válvula reguladora de fluxo tem por finalidade restringir a vazão do fluido, permitindo que se obtenha uma produção compatível com as características do reservatório [16]. Na problemática da intermitência severa, o fechamento da válvula de *choke* funciona como um elemento estabilizador do sistema [14]. Existem basicamente dois tipos de condições de escoamento: escoamento subsônico (ou subcrítico) e escoamento sônico (ou crítico).

#### 3.4.1 Escoamento subcrítico

Para baixas vazões (ou baixas razões de pressões a montante e a jusante) a válvula opera na condição de escoamento subcrítico. Neste caso, a vazão depende das pressões a montante e a jusante da válvula. Para escoamento subcrítico, pode ser utilizada a seguinte relação constitutiva baseada no modelo homogêneo:

$$P_t - P_s = K_v \frac{1}{2} \rho_t j_t |j_t| \quad (3.30)$$

onde o subscrito  $t$  corresponde ao valor no topo do riser (posição  $s_t$ ), como mostrado na Figura 10. Assim,  $P_t = P(s_t, t)$  e  $P_s$  são correspondentemente as pressões no topo do riser e no separador,  $K_v$  é a constante de perda da válvula e  $\rho_t$  a massa específica média da mistura no topo do riser, definida como:

$$\rho_t = \alpha_t \rho_{gt} + (1 - \alpha_t) \rho_l = \alpha_t \frac{P_t}{R_g T_g} + (1 - \alpha_t) \rho_l \quad (3.31)$$

Na equação anterior,  $\alpha_t = \alpha(s_t, t)$  e  $\rho_{gt}$  são respectivamente a fração de vazio e a massa específica do gás no topo do riser, calculada com a aproximação de gás ideal:

$$\rho_{gt} = \frac{P_t}{R_g T_g} \quad (3.32)$$

Outra expressão para a lei de queda de pressão na válvula de *choke* foi utilizada em [9]:

$$P_t - P_s = C j_{lt} |j_{lt}| \quad (3.33)$$

onde  $C$  é uma constante dimensional. Segundo este modelo, é desprezada a queda de pressão devida à vazão de gás.

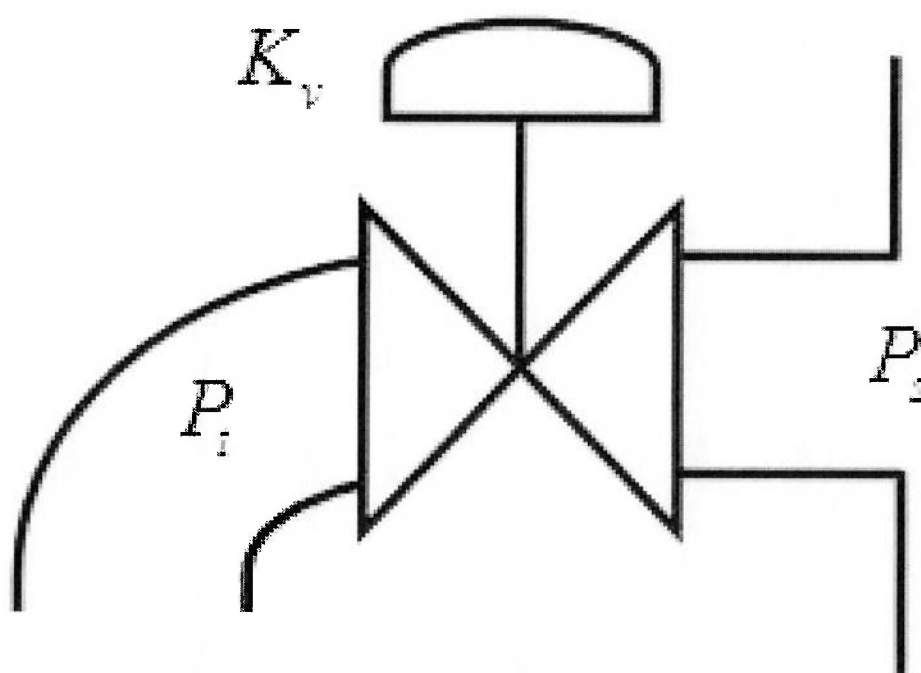


Figura 8: Válvula reguladora (choke).

### 3.4.2 Escoamento crítico

Para grandes vazões (ou razões de pressões a montante e a jusante superiores à razão crítica) a válvula opera na condição de escoamento crítico. Neste caso, a vazão mássica resulta dependente unicamente das pressões a montante. A condição crítica acontece em sistemas de produção de petróleo, sendo desejável para que as variações de pressão no separador não interfiram na produção do poço. Existem na literatura correlações empíricas de aplicabilidade em sistemas de produção [11], ou correlações mais elaboradas baseadas em diferentes modelos de escoamento multifásico [8].

Na grande maioria dos experimentos reportados na literatura não existem válvulas de *choke* ou, naqueles onde existem, as pressões envolvidas são baixas, sendo pouco provável a existência da condição crítica; em consequência, por enquanto não é considerada esta possibilidade no modelo desenvolvido para água e ar.

## 4 DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

São integradas as equações características e o gradiente de pressão utilizando um método implícito, com um esquema preditor corretor para o tratamento de não linearidades. Para um instante  $t^K$  (passo temporal  $K$ ) são conhecidas para cada nó do *riser* as variáveis de estado  $j_I^K$ ,  $\alpha_{rI}^K$  e  $P_I^K$  na posição  $s_I^K$  onde  $I$  é o nó do *riser*, com  $1 \leq I \leq N$  e  $N$  é o número de nós. A coordenada  $s_N^K$  corresponde à posição do nível de líquido no instante  $K$  e a coordenada  $s_1^K$  será sempre zero, pois o nó corresponde à base do *riser*. As variáveis são propagadas de acordo com a velocidade do gás, como é exemplificado na figura 9.

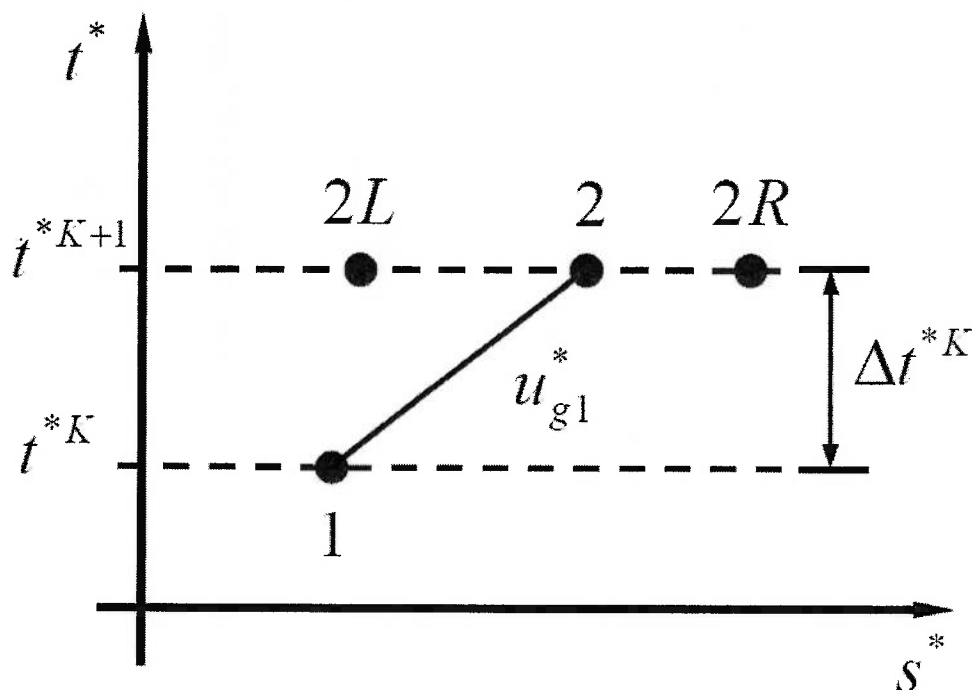


Figura 9: Estado permanente (de Taitel, 1986).

Para o tempo  $t^{K+1} = t^K + \Delta t^K$  são conhecidos apenas os valores de fração de vazio e de pressão no primeiro nó.

### 4.1 Cálculo do passo temporal

As linhas características não podem se cruzar no plano  $s - t$ , mas podem atravessar os extremos 0 e  $s_u$ . Como a integração é realizada ao longo dessas linhas, a posição dos nós muda com o tempo. É importante ressaltar que a cada passo temporal é criado um novo nó na extremidade inferior do *riser*, enquanto o último nó deixa de existir.

O passo temporal  $\Delta t^K$  também é variável e calculado de forma implícita. Ele é dado por um dos valores resultantes das equações abaixo:

$$\Delta t^{K+1} = \frac{s^t - s_{N-1}^K}{u_{gN}^{K+1}} \quad (4.1)$$

A equação acima é válida para quando a linha característica e a superfície de líquido se cruzam em uma posição igual ou maior que a coordenada do topo do *riser*  $s_t$ . Quando esse cruzamento ocorre abaixo da coordenada do topo do *riser*, o passo temporal é calculado pela equação abaixo:

$$\Delta t^{K+1} = \frac{s_N^K - s_{N-1}^K}{u_{gN}^{K+1} - u_{lN}^{K+1}} \quad (4.2)$$

Com o passo temporal em mãos, a posição dos nós do *riser* é calculada com base na velocidade do gás.

## 4.2 Cálculo do *riser*

O valor das variáveis em cada nó do *riser* é calculado da seguinte maneira:

- 1- Integrando a partir da base até o topo os valores das velocidades superficiais nos nós.
- 2- Integrando a fração de vazio também subindo o *riser*.
- 3- Calculando a pressão no topo do *riser*, levando em conta a possibilidade da existência de uma válvula de choke ou região de gás.
- 4 - Integrando as pressões nos nós do *riser*, partindo do último nó e descendo até a base.

Nas equações abaixo, as variáveis denotadas por  $PC$  são variáveis correspondentes à iteração anterior. No caso de ser a primeira iteração para o cálculo de um determinado instante  $t^K$ , é utilizado o valor da variável no instante  $t^{K-1}$ .

O primeiro passo é calcular a velocidade superficial no nó  $i$  no tempo  $K + 1$ , e para isso é utilizada a seguinte equação:

$$j_i^{K+1} = j_{i-1}^{K+1} - \alpha_i^{K+1PC} \Delta s_{i-1}^{K+1} \frac{P_i^{K+1PC} - P_{i-1}^K}{\Delta t P_i^{K+1PC}} \quad (4.3)$$

Sendo que  $\Delta s_i^K$  é dado por:

$$\Delta s_i^K = s_{i+1}^K - s_i^K \quad (4.4)$$

Tendo a velocidade superficial de um determinado nó é possível calcular por meio da relação do modelo de fluxo de deriva a velocidade do gás.



$$u_{gi}^{K+1} = C_{di}^{K+1} * j_{gi}^{K+1} + U_{di}^{K+1} \quad (4.5)$$

Após calcular a velocidade superficial de cada um dos nós do *riser*, é calculada a fração de vazio no nó  $i$  no tempo  $K + 1$  utilizando a seguinte equação:

$$\alpha_i^{K+1} = \frac{\alpha_{i-1}^K}{1 + \Delta t \left( \frac{1}{P_i^{K+1PC}} \frac{P_i^{K+1PC} - P_{i-1}^K}{\Delta t} + \frac{u_{gi}^{K+1} - u_{gi-1}^{K+1}}{\Delta s_{i-1}^{K+1}} \right)} \quad (4.6)$$

Tendo em mãos a fração de vazio e a velocidade superficial para cada um dos nós do *riser*, é possível calcular as velocidades superficiais de gás e líquido para cada um dos nós.

$$j_{gi}^{K+1} = \alpha_i^{K+1} u_{gi}^{K+1} \quad (4.7)$$

$$j_{li}^{K+1} = j_i^{K+1} - j_{gi}^{K+1} \quad (4.8)$$

$$u_{li}^{K+1} = \frac{j_{li}^{K+1}}{1 - \alpha_i^{K+1}} \quad (4.9)$$

O modelo é capaz de simular dois tipos de válvulas reguladoras, o modelo homogêneo e o modelo utilizado em Jansen et al. Para cada tipo de válvula há também duas situações possíveis e distintas. A primeira se trata do caso em que  $s_N = s_t$ , ou seja, as variáveis no topo do *riser* são iguais às variáveis no último nó. A segunda ocorre quando o último nó estiver em uma altura abaixo da válvula.

Para calcular a velocidade superficial no topo do *riser* no caso da existência de região de gás, é utilizada a seguinte fórmula:

$$j_{gt}^{K+1} = j_N^{K+1} - \frac{(P_t^{K+1PC} + P_N^{K+1PC}) - (P_t^K + P_N^K)}{P_t^{K+1PC} + P_N^{K+1PC}} (s_t - s_N^{K+1}) \quad (4.10)$$

Como a vazão de líquido nesse caso é igual a zero, a velocidade superficial total é igual à velocidade superficial do gás.

Tendo a velocidade superficial no topo do *riser*, caso a simulação utilize modelo homogêneo de válvula, tem-se a seguinte equação:

$$P_t^{K+1} = P_s + 0,5 K_v \rho_m j_t^{K+1} |j_t^{K+1}| \quad (4.11)$$

Sendo que  $K_v$  é a constante da válvula e  $\rho_m$  é a densidade da mistura líquido-gás. Já para o modelo apresentado em Jansen et al. é válida a equação abaixo:

$$P_t^{K+1} = P_s + K_v j_{lt}^{K+1} \quad (4.12)$$

O último passo no cálculo das variáveis no *riser* é a integração da pressão descendo o *riser*. A equação utilizada para o cálculo da pressão é a seguinte:

$$P_i^{K+1} = P_{i+1}^{K+1} - \rho_m(g\Delta z + \frac{2f_m}{D}j_{med}^{K+1}|j_{med}^{K+1}|\Delta s) - (\rho_l * (1 - \alpha_{med}^{K+1})\frac{(u_{li+1}^{K+1} - u_{liq}^K)}{\Delta t} + \rho_g\alpha_{med}^{K+1}\frac{u_{gi+1}^{K+1} - u_{gi}^K}{\Delta t})\Delta s \quad (4.13)$$

Sendo que  $u_{liq}^K$  é a velocidade do líquido no tempo anterior no nó propagado pela característica do líquido e  $j_{med}^{K+1}$  e  $\alpha_{med}^{K+1}$  são dados por:

$$j_{med}^{K+1} = \frac{j_{i+1}^{K+1} + j_i^{K+1}}{2} \quad (4.14)$$

e

$$\alpha_{med}^{K+1} = \frac{\alpha_{i+1}^{K+1} + \alpha_i^{K+1}}{2} \quad (4.15)$$

## 5 SIMULAÇÕES

### 5.1 Parâmetros de entrada e saída do programa

#### 5.1.1 Parâmetros de entrada

A lista abaixo inclui todos os parâmetros de entrada do programa que tem relação com o subsistema do *riser*.

$\mu_g$  : Viscosidade dinâmica do gás. ( $\frac{kg}{ms}$ )

$\mu_l$  : Viscosidade dinâmica do líquido. ( $\frac{kg}{ms}$ )

$R_g$  : Constante do gás. ( $\frac{m^2}{s^2K}$ )

$\rho_l$  : Densidade do Líquido. ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$T$  : Temperatura do sistema. ( $K$ )

$g$  : Gravidade. ( $\frac{m}{s^2}$ )

$D$  : Diâmetro do *pipeline* e do *riser*. ( $m$ )

$e$  : Rugosidade do *pipeline* e do *riser*. ( $m$ )

$ivalve$  : Parâmetro que determina o tipo de válvula de choke utilizado. (1 para modelo homogêneo subcrítico e 2 para modelo de Jansen et al.)

$K_v$  : Constante da válvula de choke.

$iggeomriser$  : Parâmetro que define a geometria do *riser*. (1 para ângulo constante e 2 para catenária)

$X$  : Comprimento horizontal do *riser*. ( $m$ )

$Z$  : Altura do *riser*. ( $m$ )

$Q_{l0}$  : Vazão volumétrica de líquido entrando no *pipeline*. ( $\frac{m^3}{s}$ )

$m_{g0}$  : Vazão mássica de gás entrando no *pipeline*. ( $\frac{kg}{s}$ )

$P_s$  : Pressão no separador. ( $Pa$ )

$N$  : Número de nós do *riser*.

$T_{sim}$  : Duração da simulação. ( $s$ )

#### 5.1.2 Parâmetros de saída

A lista abaixo inclui todos os parâmetros de saída do programa que tem relação com o subsistema do *riser*. Para cada instante de tempo é armazenado um valor para

cada uma das variáveis em cada um dos nós.

$s_i$  : Posição do nó. ( $m$ )

$P_i$  : Pressão no nó. ( $Pa$ )

$\alpha_i$  : Fração de vazio no nó.

$j_{gi}$  : Velocidade superficial do gás no nó. ( $\frac{m}{s}$ )

$j_{li}$  : Velocidade superficial do líquido no nó. ( $\frac{m}{s}$ )

## 5.2 Lista de Funções

Para executar a simulação numérica foi utilizado um programa na plataforma MATLAB. As equações descritas e discretizadas nesse trabalho para o *riser* foram incluídas em um programa que simula o sistema completo *pipeline-riser*. O programa computacional é composto por várias funções distintas. As funções criadas ou modificadas para este trabalho estão listadas abaixo, assim como um pequeno resumo de seu funcionamento.

*choke\_valve*: Essa função calcula a pressão no topo do *riser*, a partir das velocidades no topo do *riser*, constante e tipo de válvula, densidades e da pressão no separador.

*dpds\_inertia*: A função *dpds\_inertia* calcula o gradiente de pressão entre dois nós consecutivos. Ela é utilizada no processo de integração da pressão ao longo do *riser*.

*riser\_inertia*: Essa função é a base para o cálculo do *riser*. Nela estão incluídos a maioria dos cálculos, assim como é a partir dela que são chamadas as outras funções utilizadas.

## 5.3 Simulações

O programa computacional funciona por meio da interação entre dois subsistemas, o *riser* e o *pipeline*. a figura fig:programa exemplifica que os dados de saída de um subsistema serve como entrada para o outro e assim por diante.

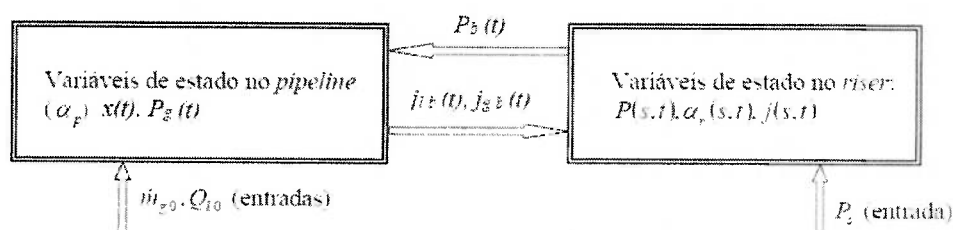


Figura 10: Estado permanente (de Taitel, 1986).

Este trabalho trata apenas de modificações no *riser*, mas o aluno de graduação Felipe de Toledo Pinto em seu trabalho de formatura realizou modificações e aprimoramentos no *pipeline*, sendo que a versão atualizada desse subsistema é utilizada em conjunto com a versão atualizada do subsistema *riser* para realizar as simulações presentes nesse

trabalho. O objetivo das simulações é analisar o efeito da válvula reguladora e do gas lift no sistema. A vazão volumétrica de líquido utilizada foi de  $Q_{l0} = 1,2984 * 10^{-3}$  e a vazão mássica de gás foi de  $m_{g0} = 1 * 10^{-4}$ .

Os outros parâmetros do sistema, mantidos constantes para todas as simulações são os seguintes:

$$\mu_g = 1,8 * 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

$$\mu_l = \mu_g = 1 * 10^{-3} \frac{kg}{m.s}$$

$$R_g = 287 \frac{m^2}{s^2.K}$$

$$\rho_l = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

$$T = 298K$$

$$D = 0,0525018m$$

$$e = 4,6 * 10^{-5}m$$

$$X = 6,435m$$

$$Z = 9,886m$$

$$P_s = 2,01 * 10^5 Pa$$

### 5.3.1 Resultados para variação da constante da válvula reguladora

Foram simulados 5 casos, com as constantes 0, 1, 10, 50 e 100, para verificar o efeito da variação da constante da válvula no sistema. O modelo de válvula utilizado foi o modelo homogêneo para escoamento subcrítico. A tabela 1 mostra o período do sistema e as velocidades superficiais na base do riser para cada um dos casos. Quanto maior o período maior o tamanho da golfada e portanto o sistema se encontra mais distante da estabilidade.

Resultados para diferentes constantes da válvula					
	$K_v = 0$	$K_v = 1$	$K_v = 10$	$K_v = 50$	$K_v = 100$
Período (s)	116,76	112,68	88,93	60	Estado Permanente
$j_{gmax}(\frac{m}{s})$	0,149	0,141	0,098	0,048	Estado Permanente
$j_{gmin}(\frac{m}{s})$	0	0	0	0	Estado Permanente
$j_{lmax}(\frac{m}{s})$	0,648	0,643	0,621	0,612	Estado Permanente
$j_{lmin}(\frac{m}{s})$	0,469	0,474	0,519	0,578	Estado Permanente

Tabela 1: Resultados para diferentes constantes da válvula

A tabela mostra que a presença da válvula de choke, assim como observado em Jansen (1996) [9], age de maneira a estabilizar o sistema, diminuindo o período do ciclo de intermitência severa. Quanto maior o valor da constante mais estável o sistema, sendo que no caso simulado com a válvula de constante  $K_v = 100$  o sistema atingiu o estágio permanente.

A válvula de *choke* aumenta a pressão sobre a coluna na medida em que a

velocidade do fluxo pela válvula aumenta, controlando assim esse aumento de velocidade. Outro resultado observado é a menor diferença entre os valores máximos e mínimos das velocidades superficiais, ou seja, os picos de vazão de líquido e de gás são mais amenos.

A incorporação de inércia ao modelo também pode ser observada nos gráficos no anexo A na forma de ondulações em pontos de aceleração e desaceleração da variação das propriedades. Essas ondulações não estavam presentes nos gráficos do trabalho de Baliño (2008) [4], que não levava em consideração o termo de inércia no fluxo.

### 5.3.2 Resultados para variação da vazão de *gas lift*

Assim como para verificar o efeito da válvula de choke, foram simulados 5 casos, para avaliar a influência do *gas lift* no sistema. Foram simulados casos com as seguintes vazões mássicas (em  $\frac{kg}{s}$ ):  $5 * 10^{-5}$ ,  $1 * 10^{-4}$ ,  $5 * 10^{-4}$  e  $1 * 10^{-3}$ . O *gas lift* simulado nesses casos é injetado na base do riser.

A tabela 2 mostra o período do sistema para cada um dos casos.

Resultados para diferentes vazões de <i>gas lift</i> ( $\frac{kg}{s}$ )					
	0	$5 * 10^{-5}$	$1 * 10^{-4}$	$5 * 10^{-4}$	$1 * 10^{-3}$
Período	116,76	118,95	115,27	91,88	72,15

Tabela 2: Resultados para diferentes vazões de *gas lift*

É possível notar pela tabela que o *gas lift* tem efeito estabilizador no sistema para vazões maiores. O gás injetado diminui o peso da coluna hidroestática, facilitando o fluxo. Além disso, o gás ajuda a carregar o líquido para cima, dificultando sua acumulação.

No caso da vazão de  $5 * 10^{-5} \frac{kg}{s}$  ocorreu uma excessão. O sistema não se estabilizou, pelo contrário, o período foi maior do que no caso sem *gas lift*.

É importante ressaltar também que as vazões de *gas lift* necessárias para estabilizar o sistema são bastante grandes. Uma vazão dez vezes maior que a produzida no poço não é capaz de levar o sistema para o estado permanente. Isso gera ressalvas à utilização do *gas lift* como método de prevenção da intermitência severa.

## 6 CONCLUSÕES

As modificações realizadas no modelo alcançaram seus objetivos. Foi possível verificar a influência estabilizadora tanto da válvula de *choke* quanto da injeção de gás. O efeito da inércia no escoamento dos fluidos também pode ser notado por meio dos gráficos. Esses resultados provam mais uma vez a base teórica do modelo delineada em Baliño (2008) [4].

Se por um lado o modelo vem demonstrando bons resultados, ainda existem melhorias a serem feitas. Apesar do programa computacional conseguir convergência na grande maioria dos casos, existem exceções. Além disso, o modelo simula o fluxo de apenas 2 fluidos, condição diferente da encontrada na enorme maioria dos poços produtores de petróleo, onde o fluxo é trifásico, com transferência de massa entre as fases.

Por último, vale ressaltar a importância do estudo e do aprimoramento do modelo, já que a intermitência severa é um problema que causa perdas para a indústria do petróleo e é ainda pouco compreendido. Um modelo capaz de simular com mais fidelidade o escoamento do petróleo pelo sistema *pipeline-riser* seria de grande valia, não apenas para o entendimento do processo, mas também para o combate e a prevenção desse fenômeno.

## ANEXO A – GRÁFICOS

### A.1 Resultados das simulações para $K_v = 0$ e $m_{g0GL} = 0$

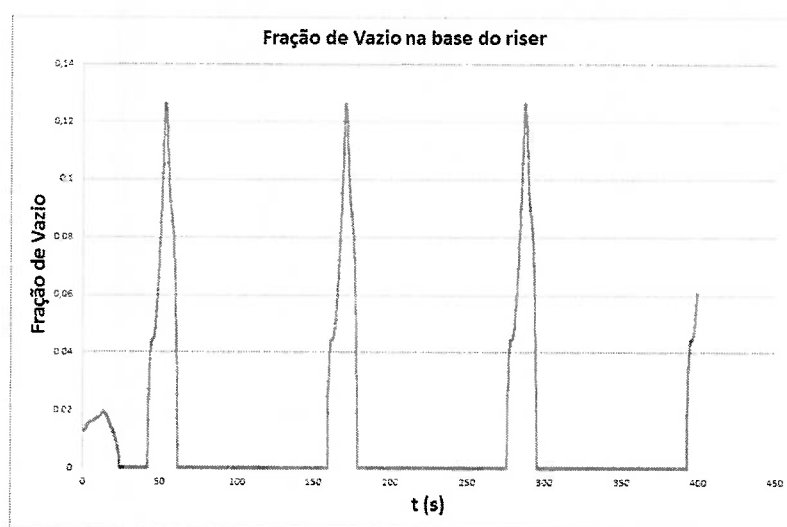


Figura 11: Fração de vazio na base do *riser*.

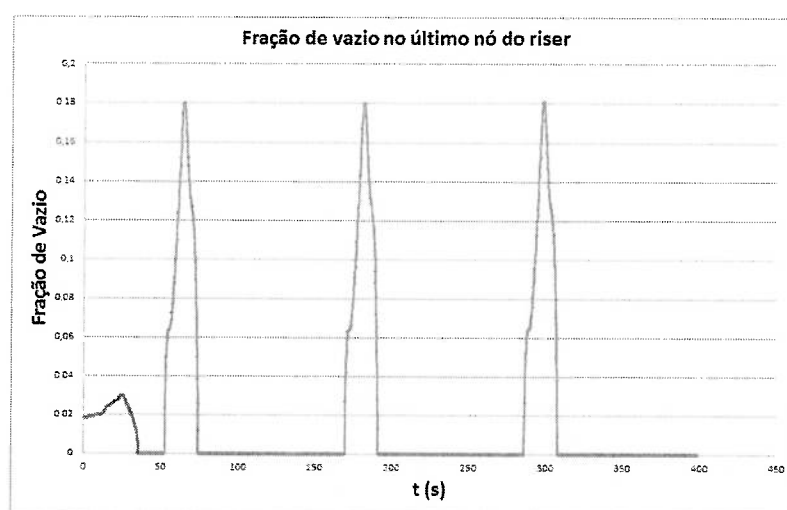


Figura 12: Fração de vazio no topo do *riser*.



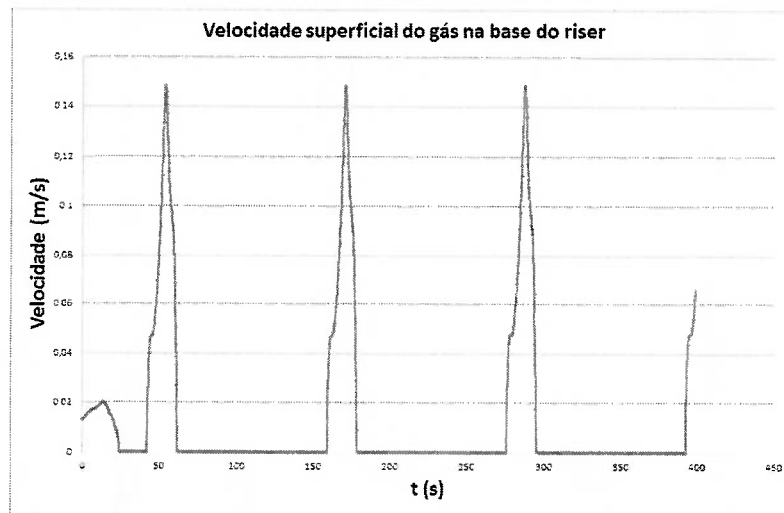


Figura 13: Velocidade superficial do gás na base do *riser*.

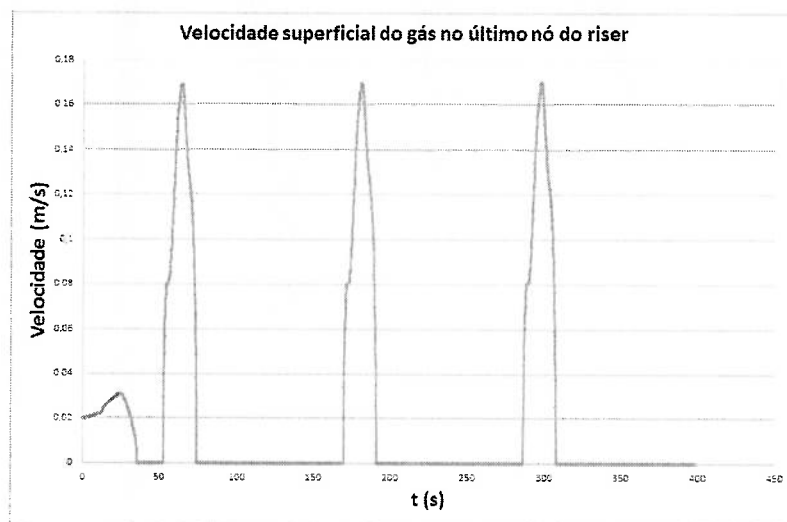


Figura 14: Velocidade superficial do gás no topo do *riser*.

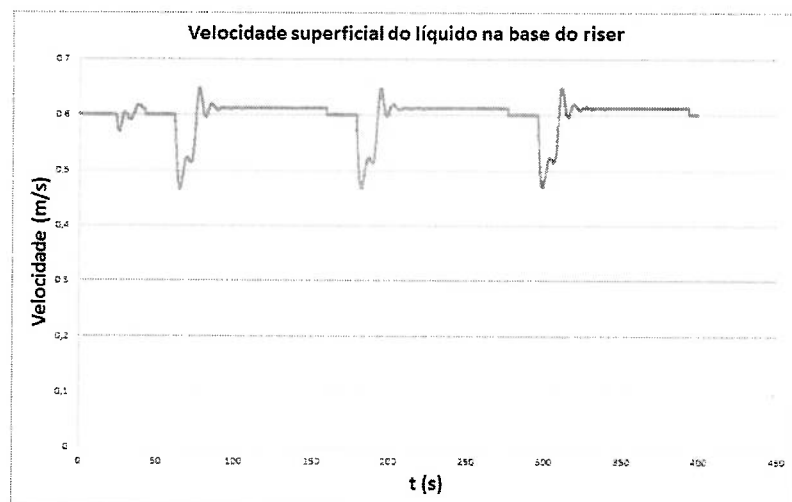


Figura 15: Velocidade superficial do líquido na base do *riser*.

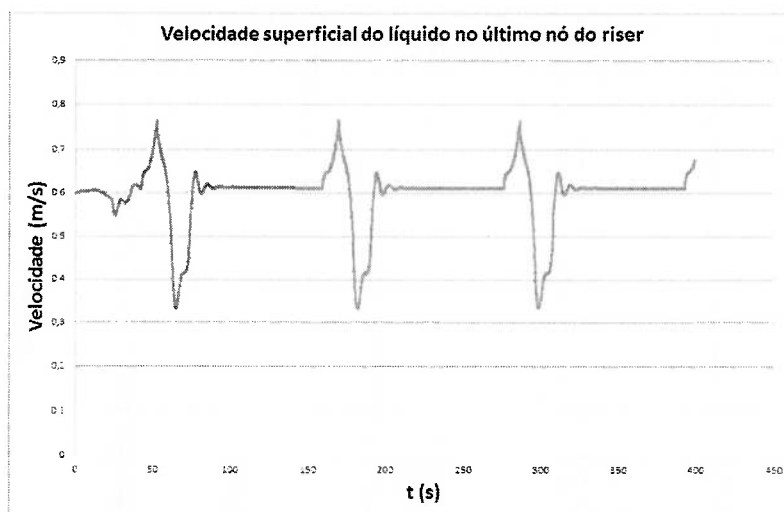


Figura 16: Velocidade superficial do líquido no topo do *riser*.

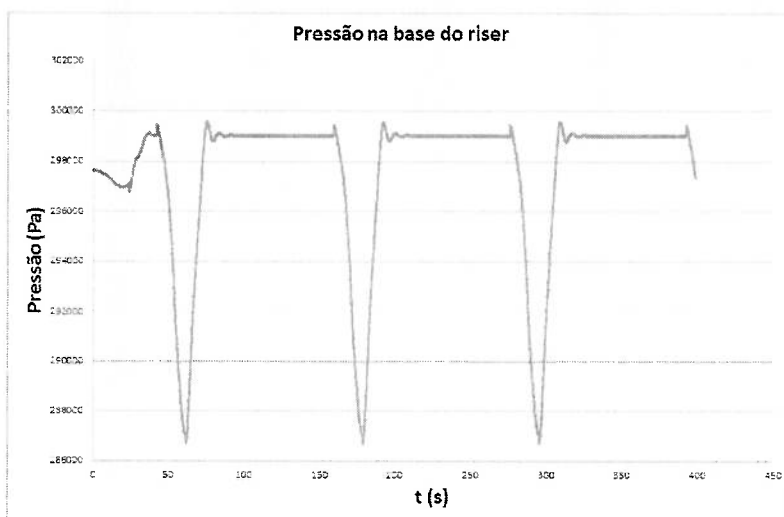


Figura 17: Pressão na base do *riser*.

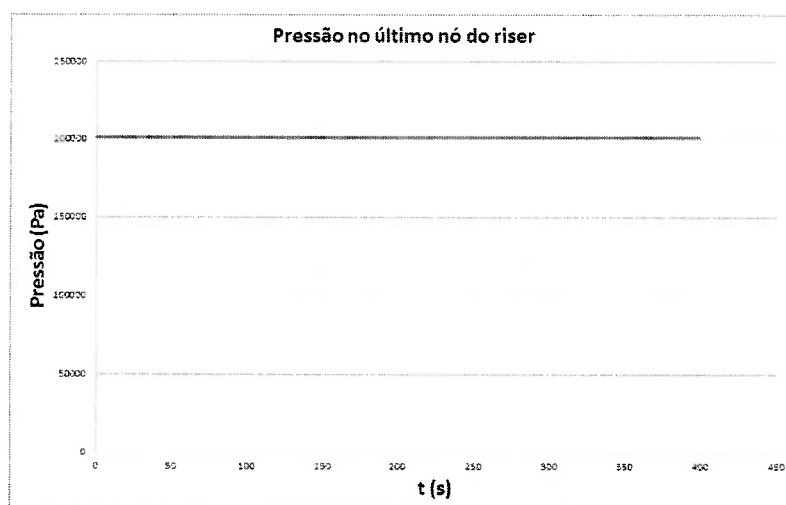


Figura 18: Pressão no topo do *riser*.

## A.2 Resultados das simulações para $K_v = 1$

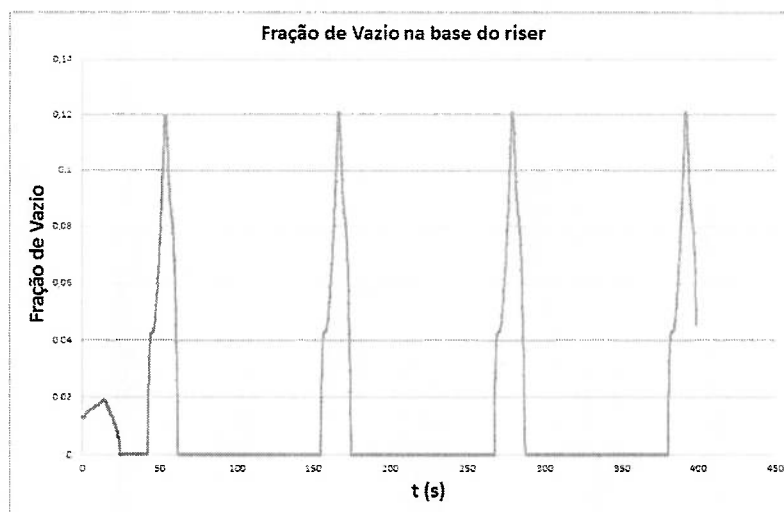


Figura 19: Fração de vazio na base do *riser*.

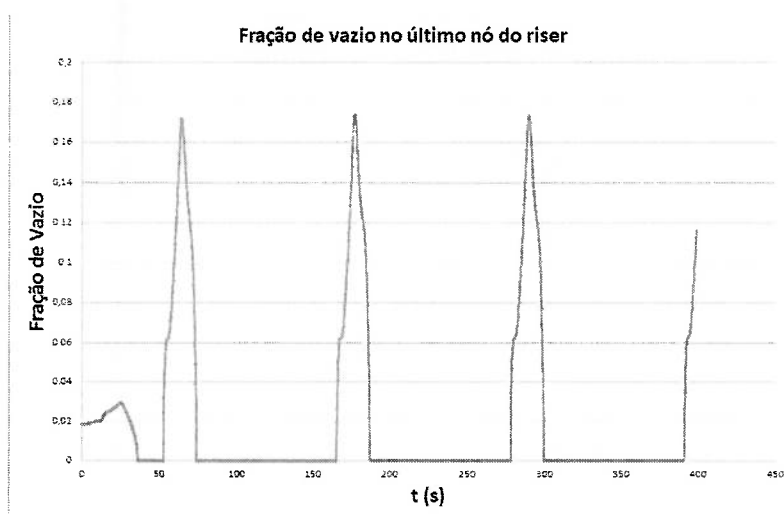


Figura 20: Fração de vazio no topo do *riser*.

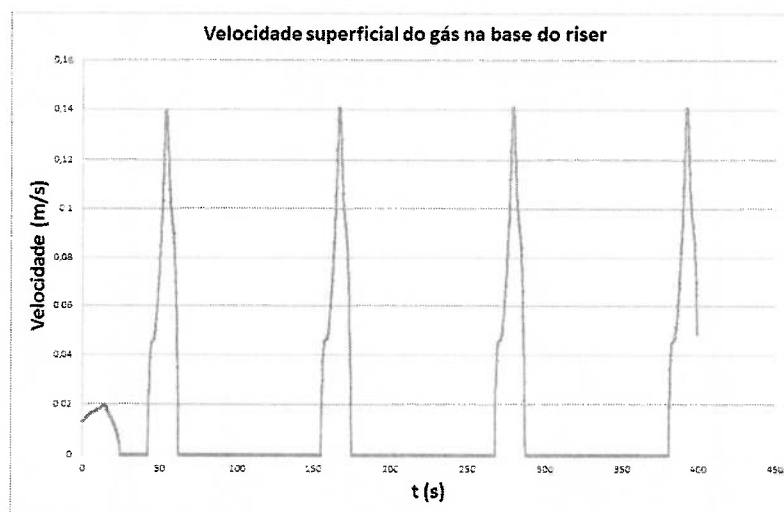


Figura 21: Velocidade superficial do gás na base do *riser*.

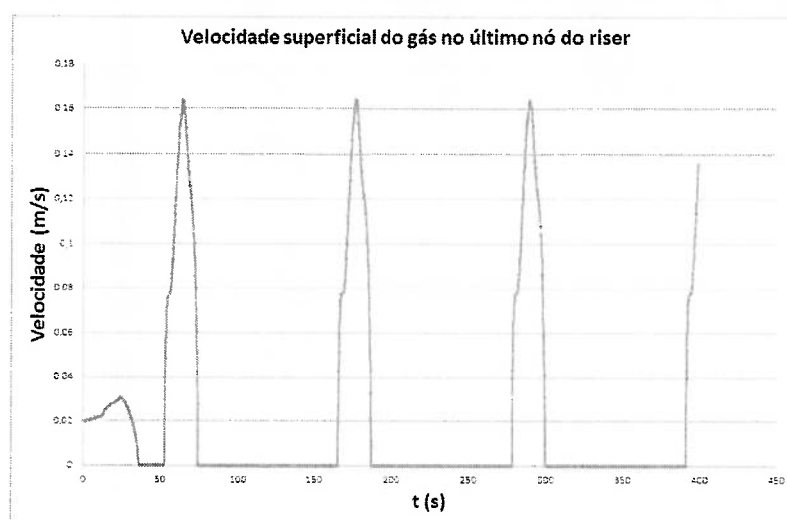


Figura 22: Velocidade superficial do gás no topo do *riser*.

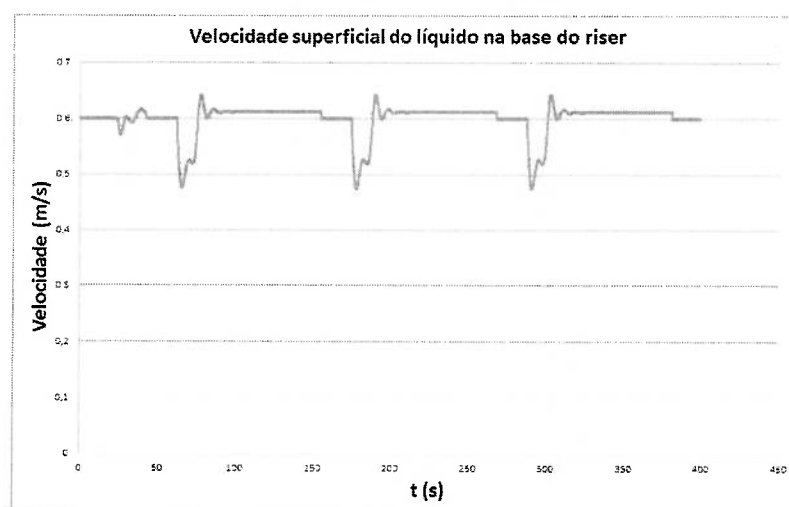


Figura 23: Velocidade superficial do líquido na base do *riser*.

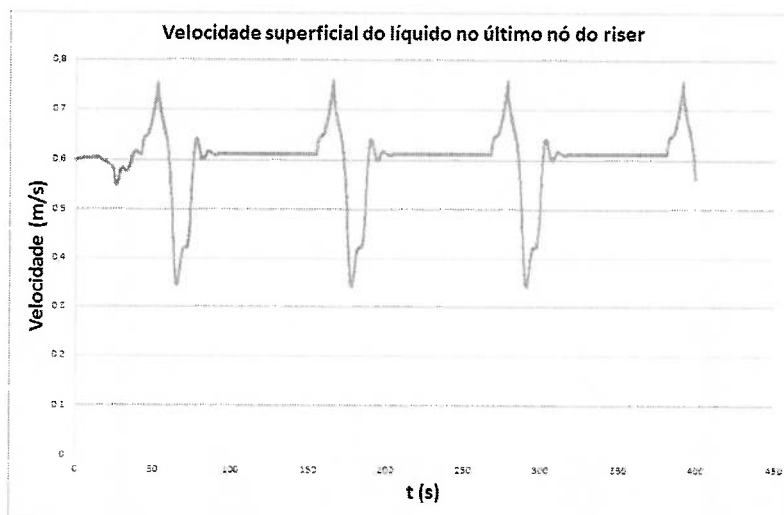


Figura 24: Velocidade superficial do líquido no topo do *riser*.

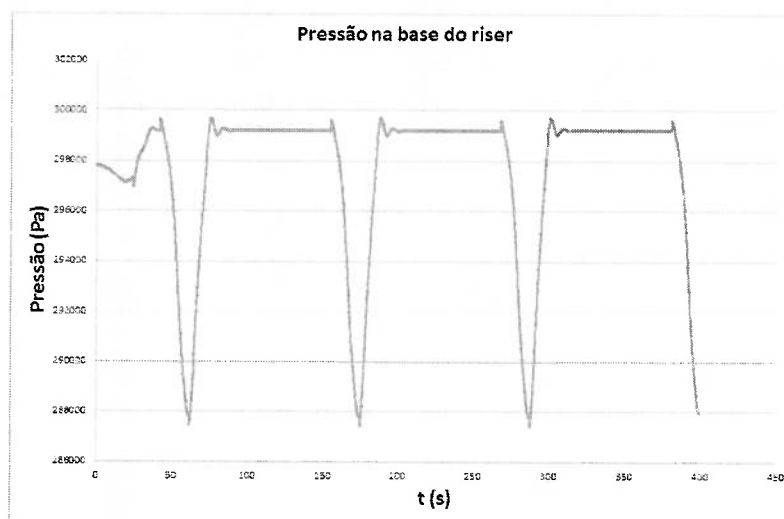


Figura 25: Pressão na base do *riser*.



Figura 26: Pressão no topo do *riser*.

### A.3 Resultados das simulações para $K_v = 10$

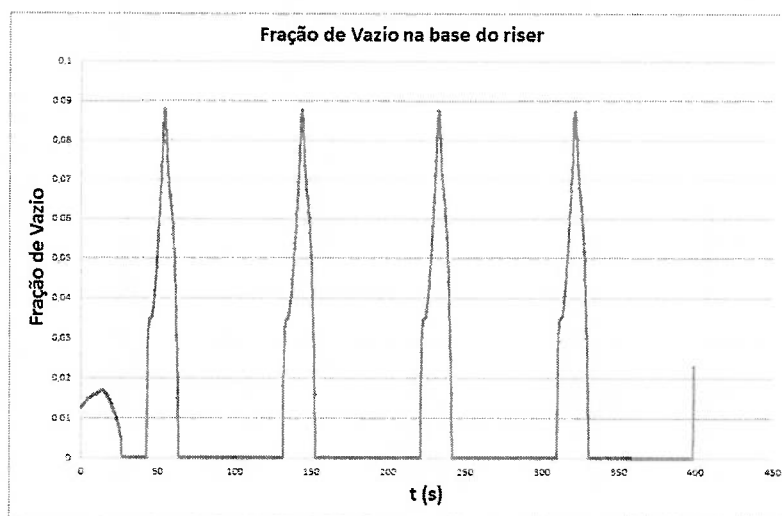


Figura 27: Fração de vazio na base do *riser*.

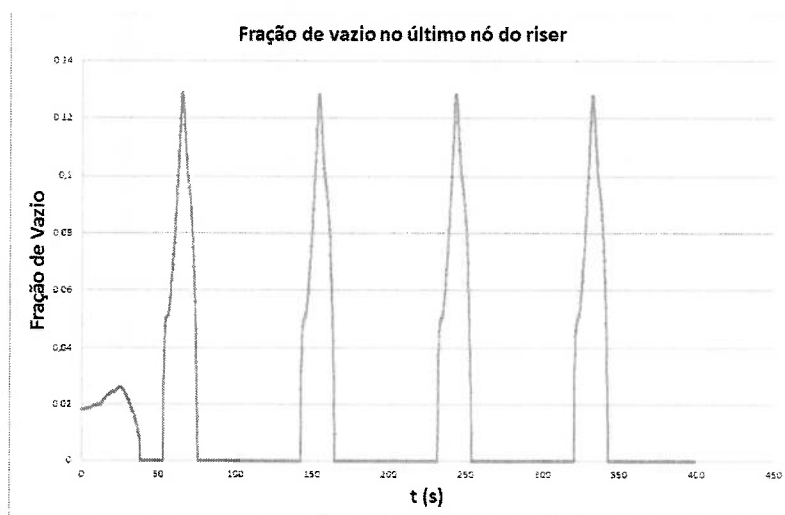


Figura 28: Fração de vazio no topo do *riser*.

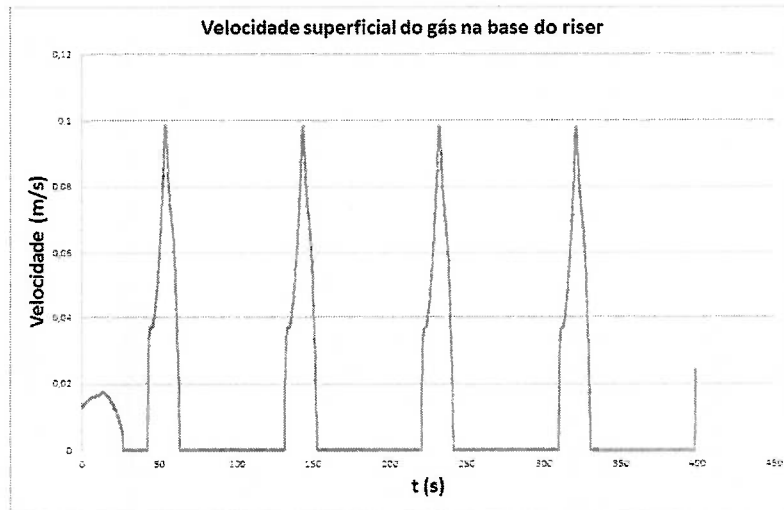


Figura 29: Velocidade superficial do gás na base do *riser*.

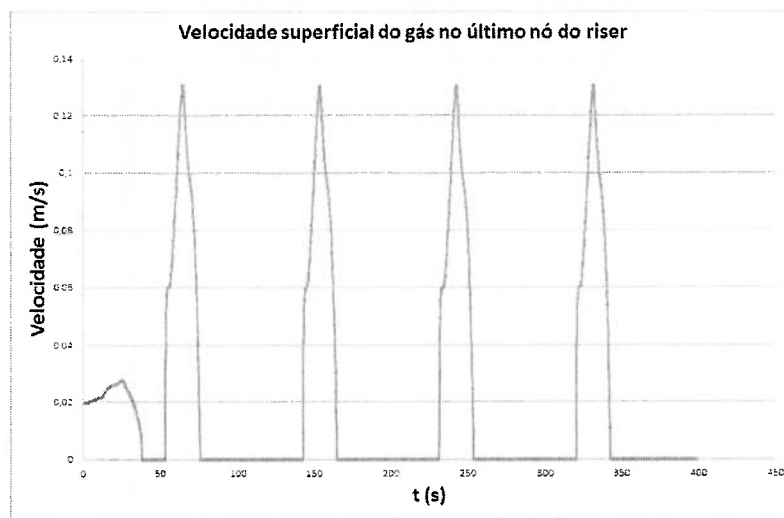


Figura 30: Velocidade superficial do gás no topo do *riser*.

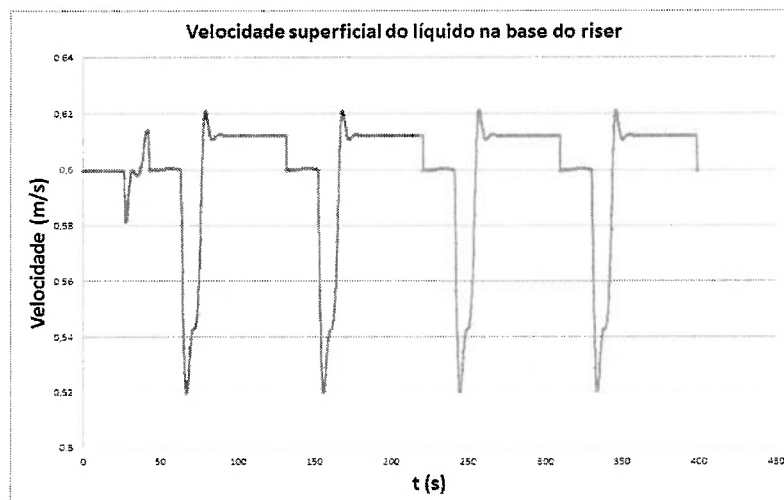


Figura 31: Velocidade superficial do líquido na base do *riser*.

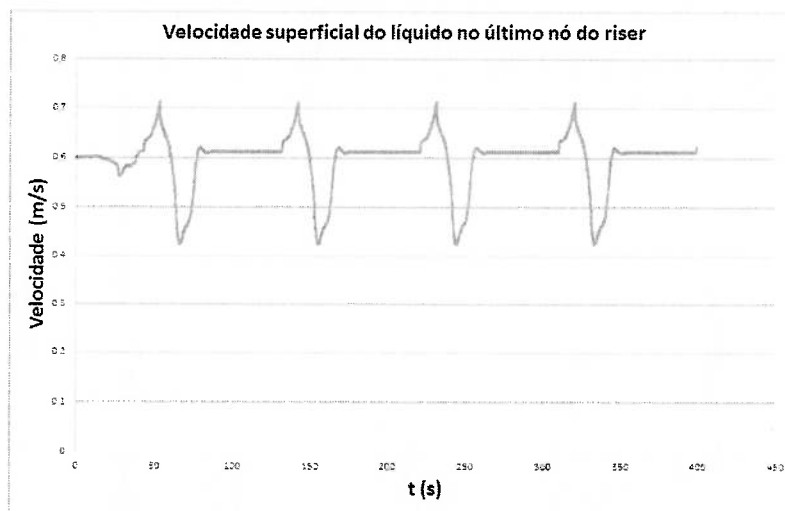


Figura 32: Velocidade superficial do líquido no topo do *riser*.

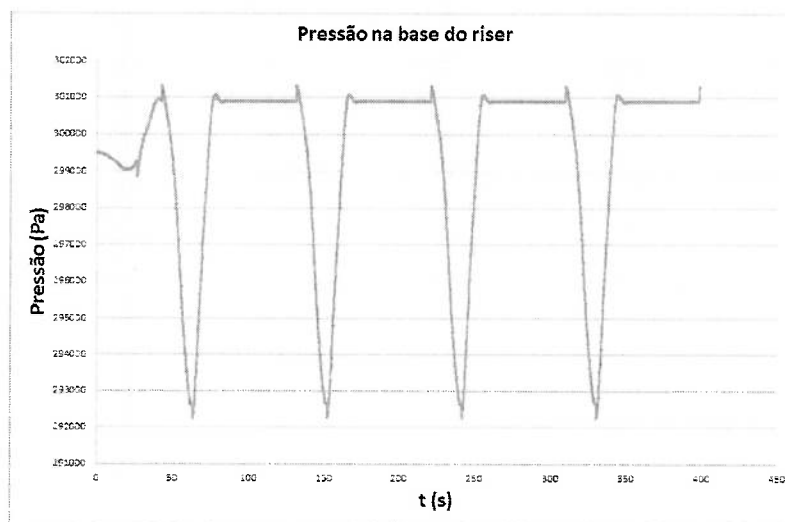


Figura 33: Pressão na base do *riser*.

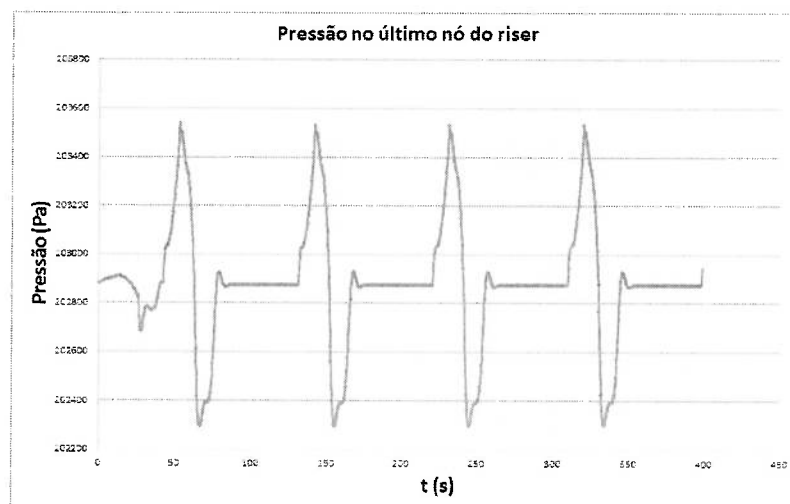


Figura 34: Pressão no topo do *riser*.



#### A.4 Resultados das simulações para $K_v = 50$

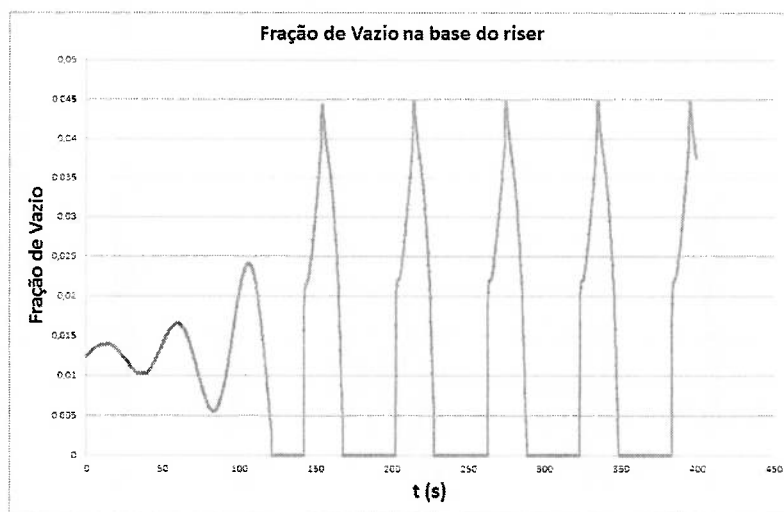


Figura 35: Fração de vazio na base do *riser*.

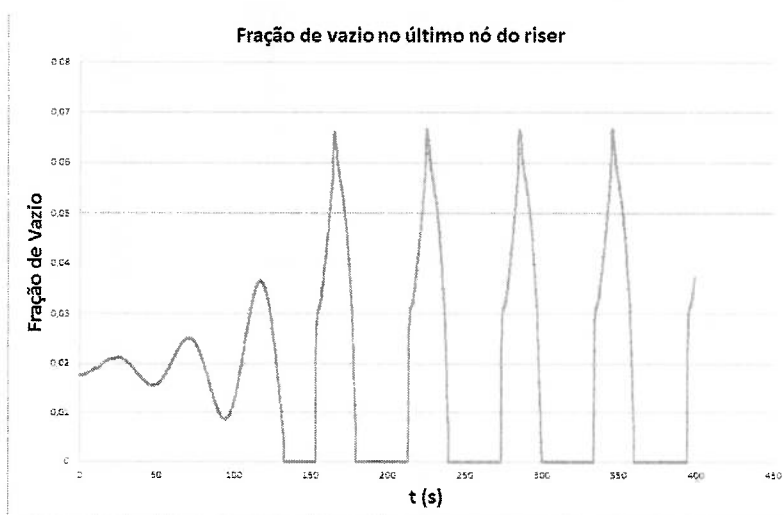


Figura 36: Fração de vazio no topo do *riser*.

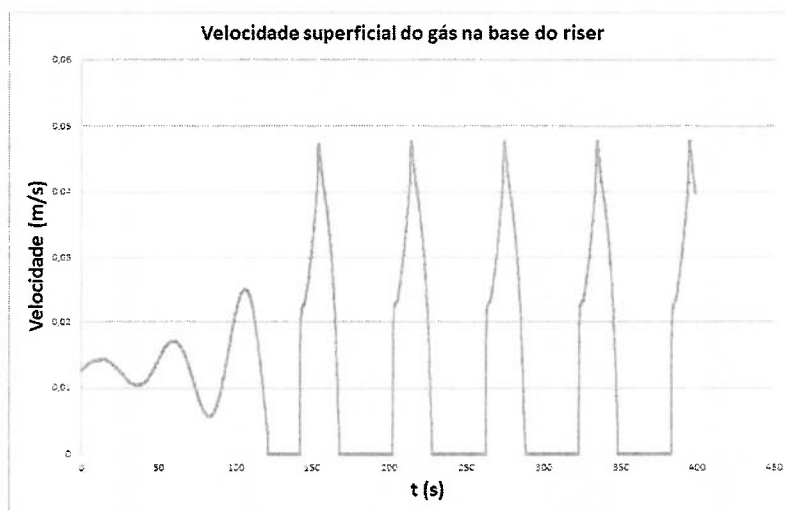


Figura 37: Velocidade superficial do gás na base do *riser*.

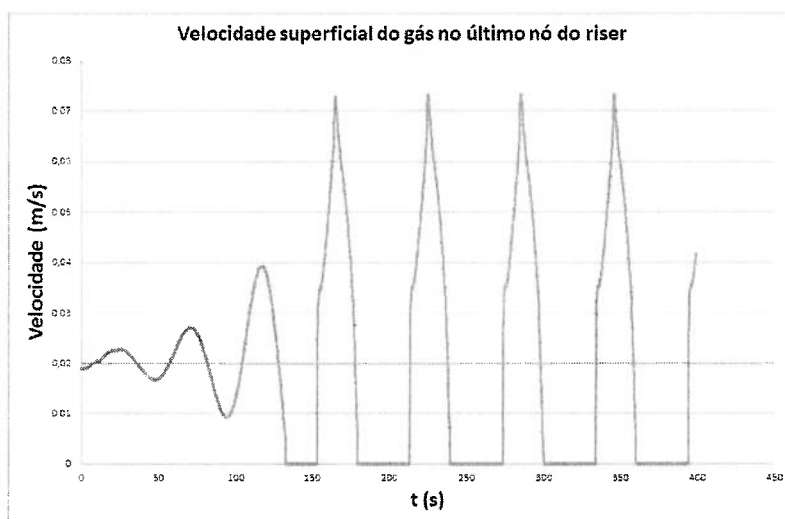


Figura 38: Velocidade superficial do gás no topo do *riser*.

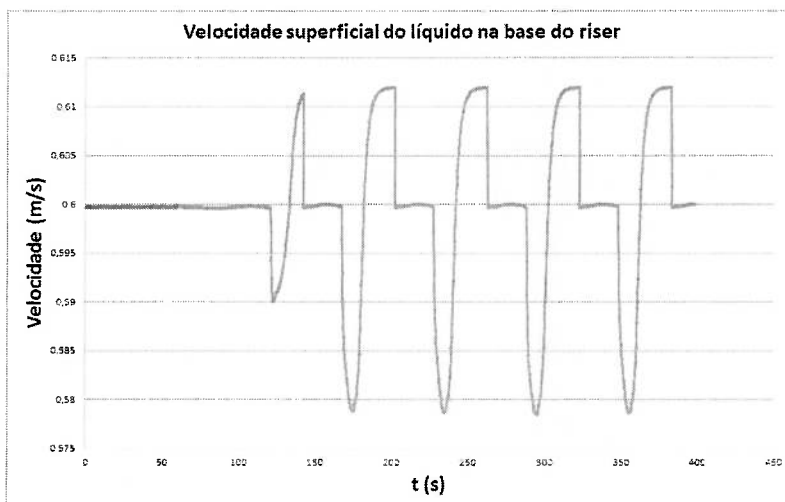


Figura 39: Velocidade superficial do líquido na base do *riser*.

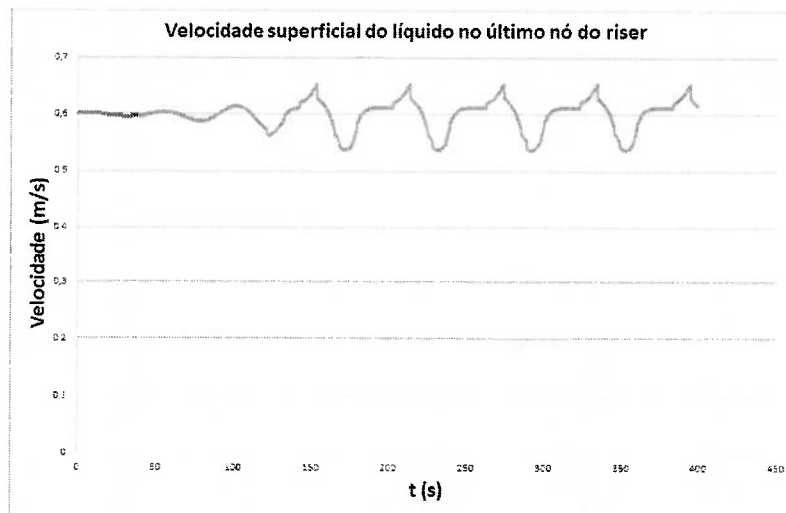


Figura 40: Velocidade superficial do líquido no topo do *riser*.

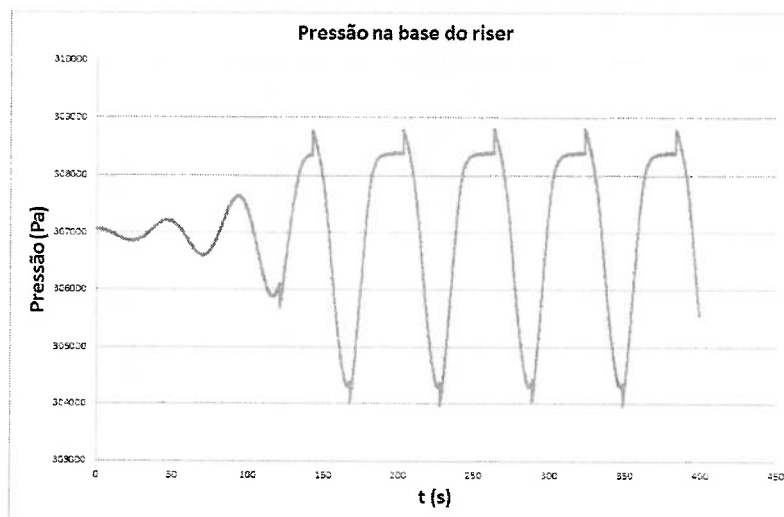


Figura 41: Pressão na base do *riser*.

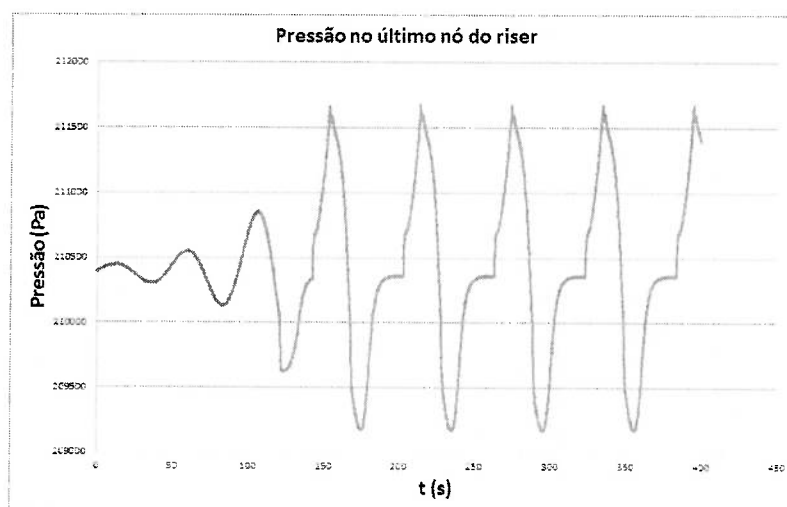


Figura 42: Pressão no topo do *riser*.

### A.5 Resultados das simulações para $K_v = 100$

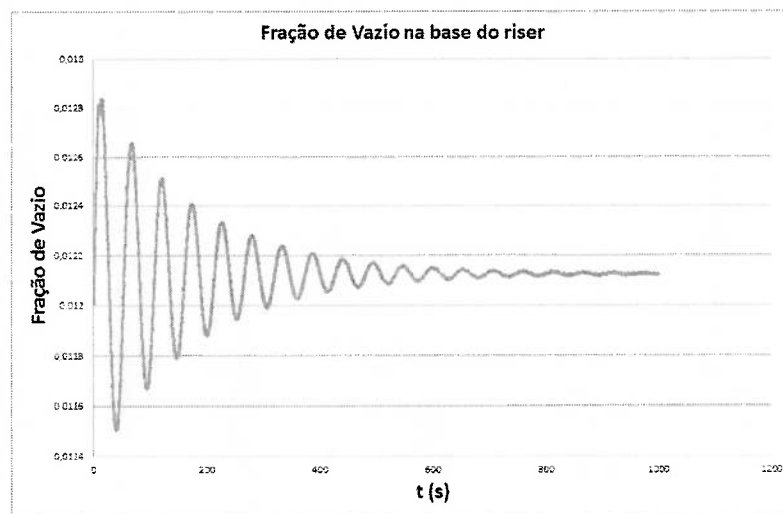


Figura 43: Fração de vazio na base do *riser*.

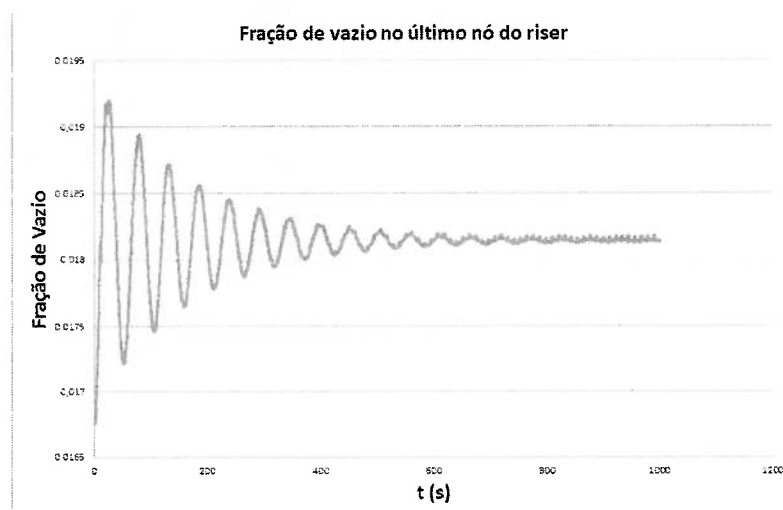


Figura 44: Fração de vazio no topo do *riser*.

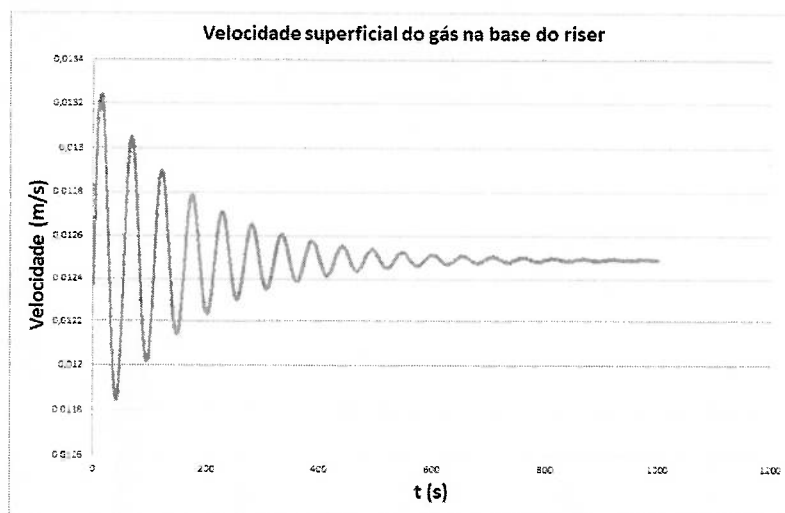


Figura 45: Velocidade superficial do gás na base do *riser*.

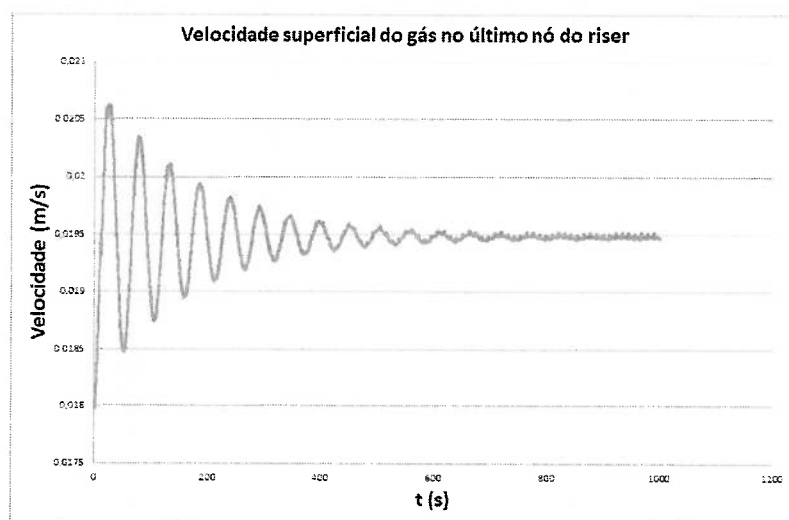


Figura 46: Velocidade superficial do gás no topo do *riser*.

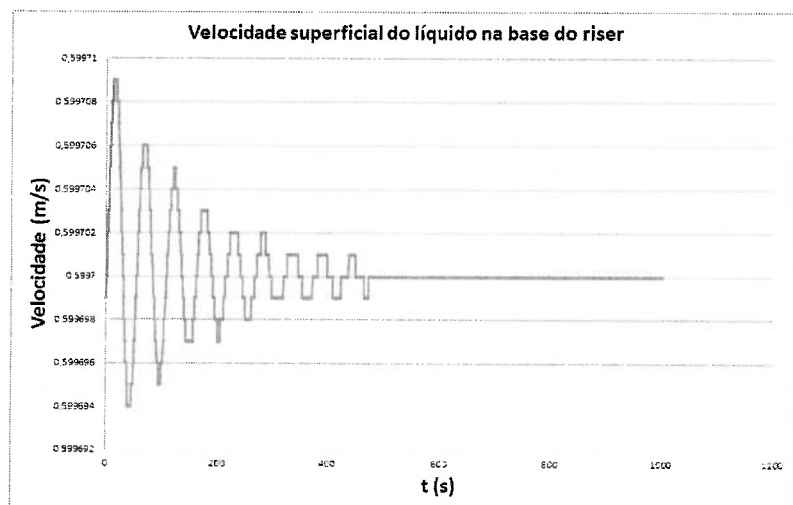


Figura 47: Velocidade superficial do líquido na base do *riser*.

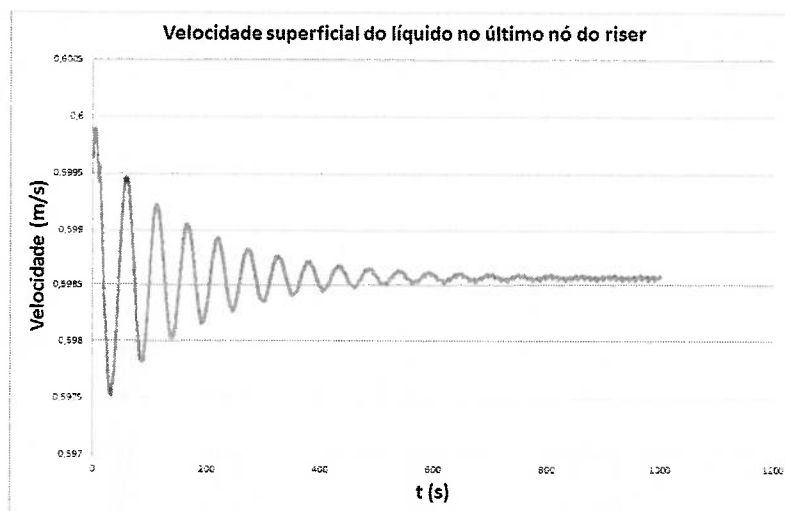


Figura 48: Velocidade superficial do líquido no topo do *riser*.

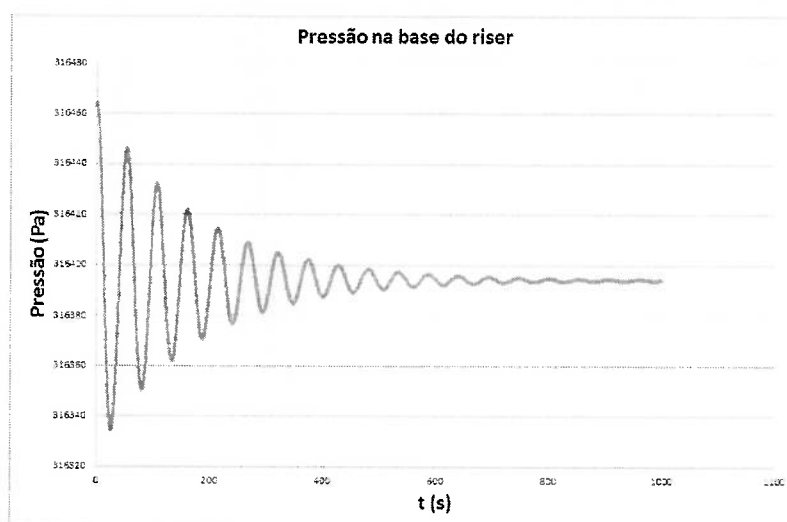


Figura 49: Pressão na base do *riser*.

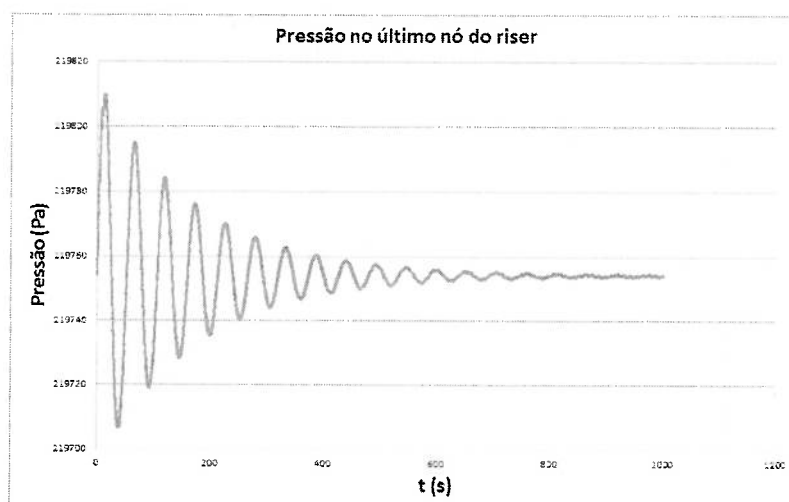


Figura 50: Pressão no topo do *riser*.

### A.6 Resultados das simulações para $m_{g0GL} = 5 * 10^{-5} \frac{kg}{s}$

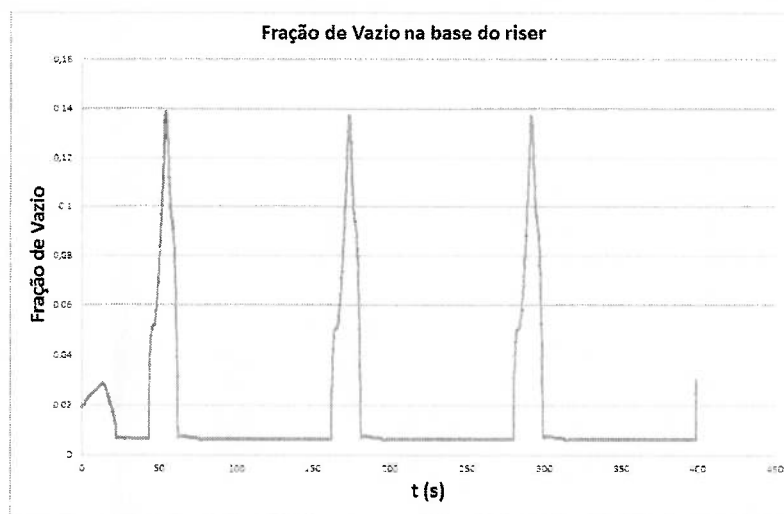


Figura 51: Fração de vazio na base do *riser*.

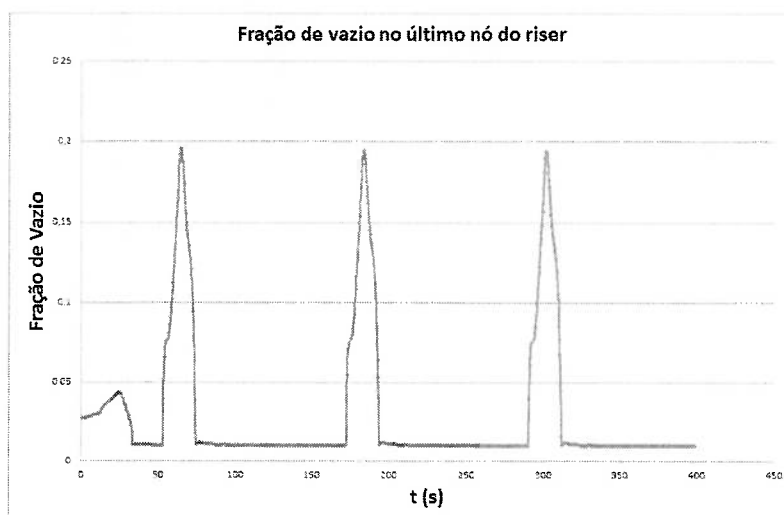


Figura 52: Fração de vazio no topo do *riser*.

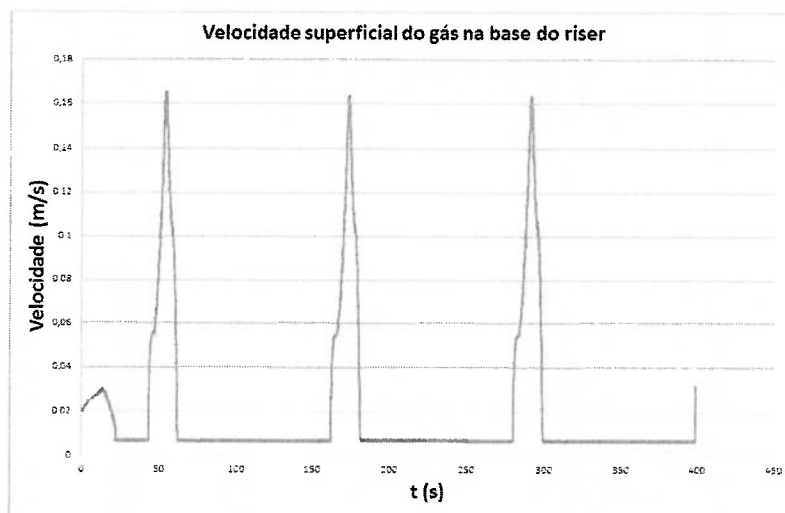


Figura 53: Velocidade superficial do gás na base do *riser*.

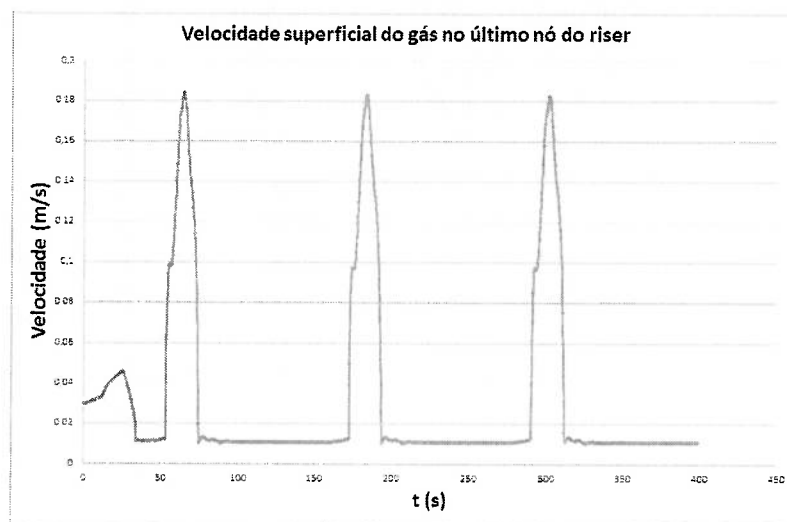


Figura 54: Velocidade superficial do gás no topo do *riser*.

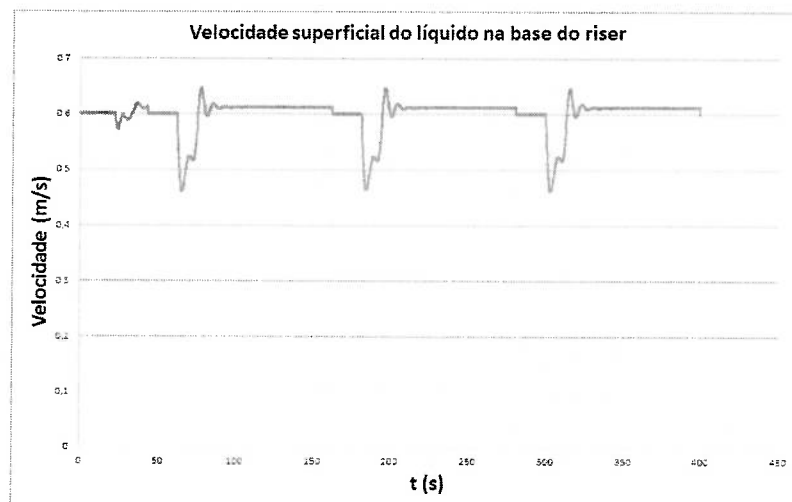


Figura 55: Velocidade superficial do líquido na base do *riser*.



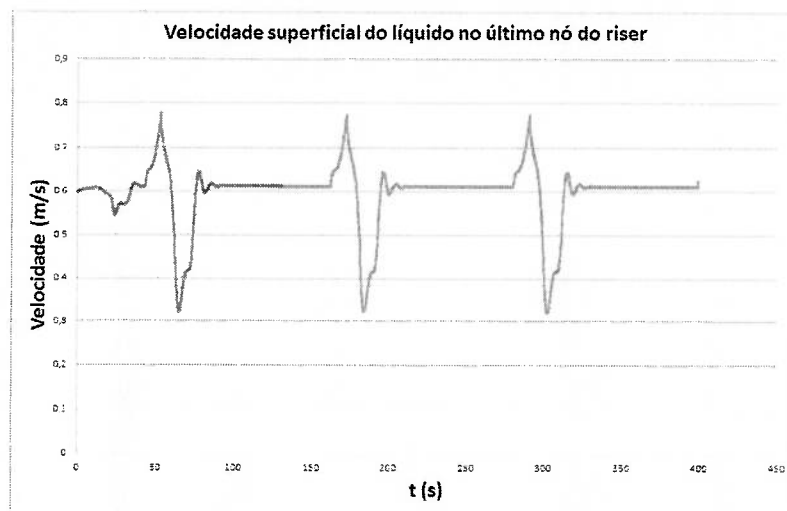


Figura 56: Velocidade superficial do líquido no topo do *riser*.

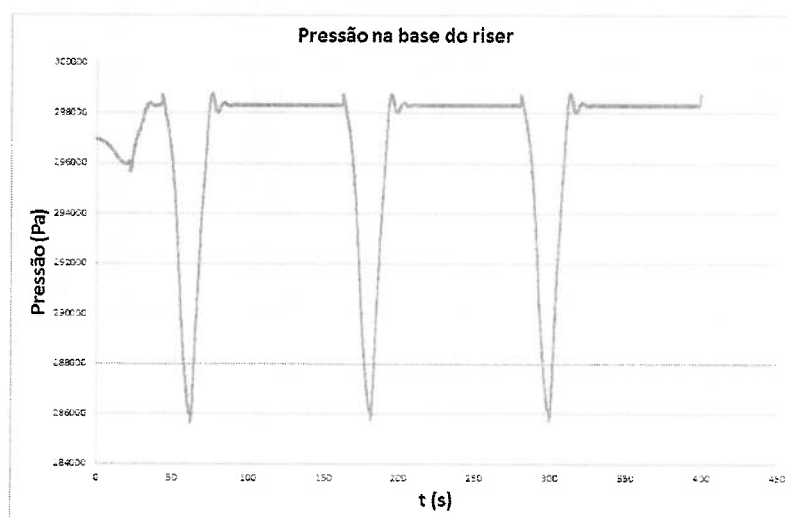


Figura 57: Pressão na base do *riser*.

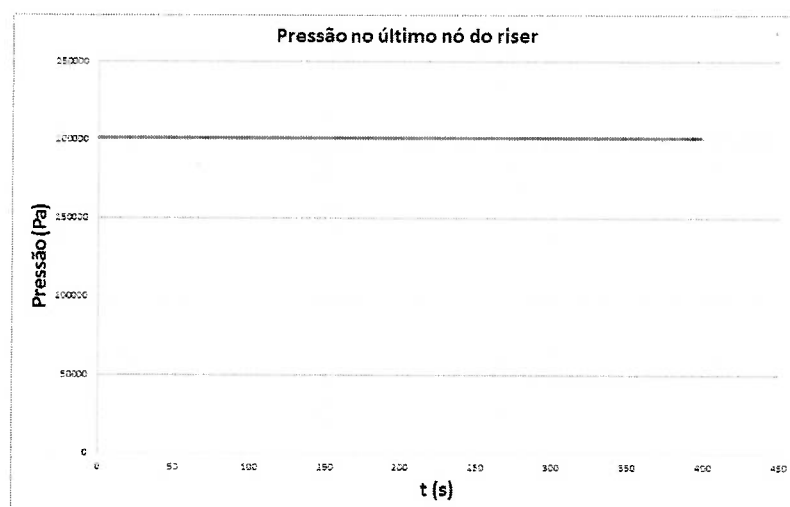


Figura 58: Pressão no topo do *riser*.

### A.7 Resultados das simulações para $m_{g0GL} = 1 * 10^{-4} \frac{kg}{s}$

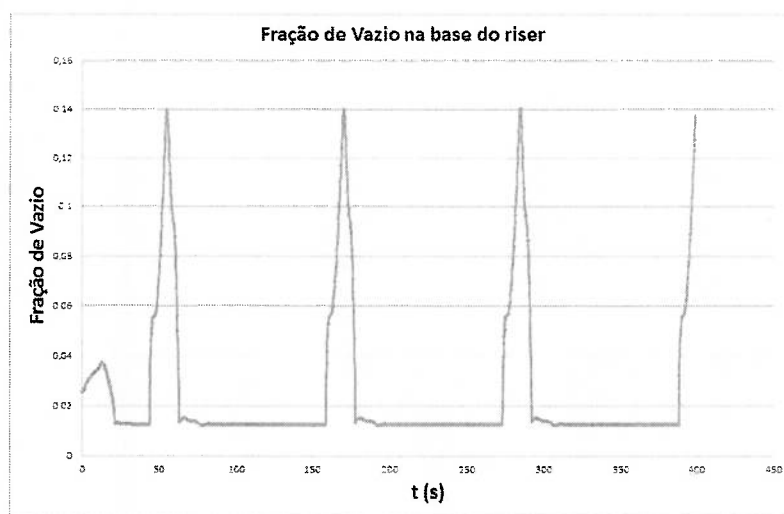


Figura 59: Fração de vazio na base do *riser*.

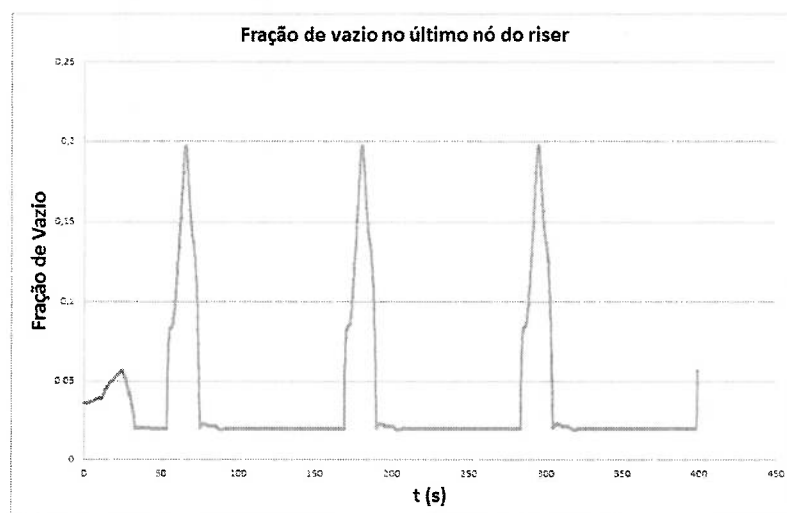


Figura 60: Fração de vazio no topo do *riser*.

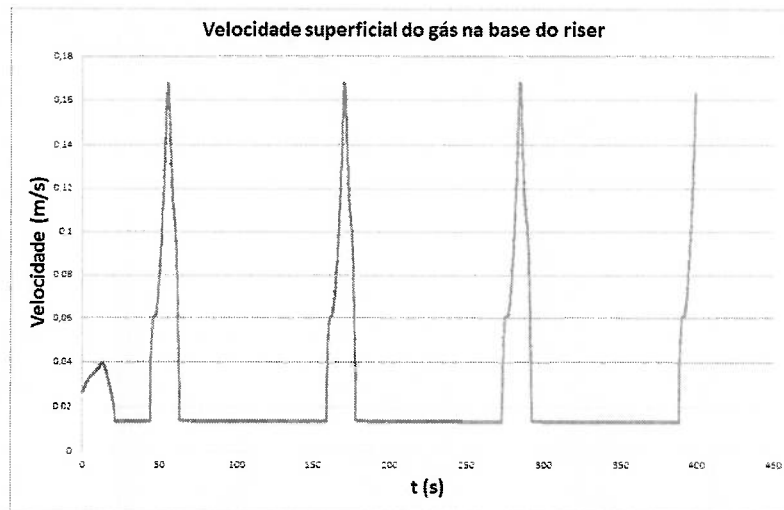


Figura 61: Velocidade superficial do gás na base do *riser*.

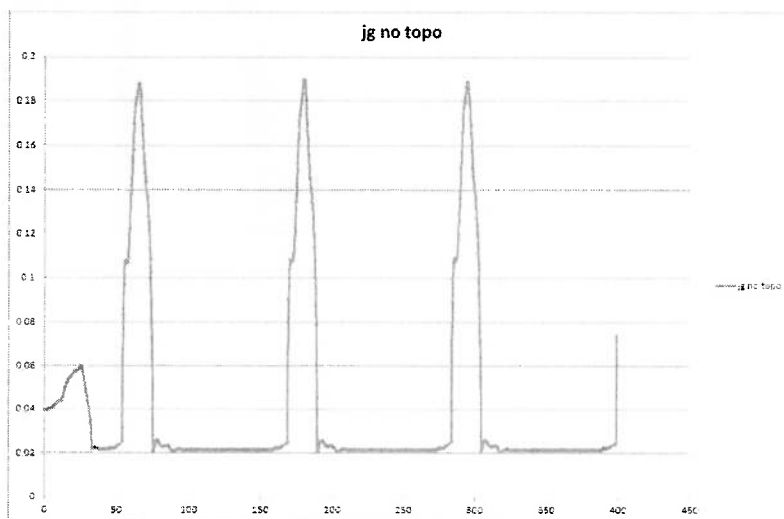


Figura 62: Velocidade superficial do gás no topo do *riser*.

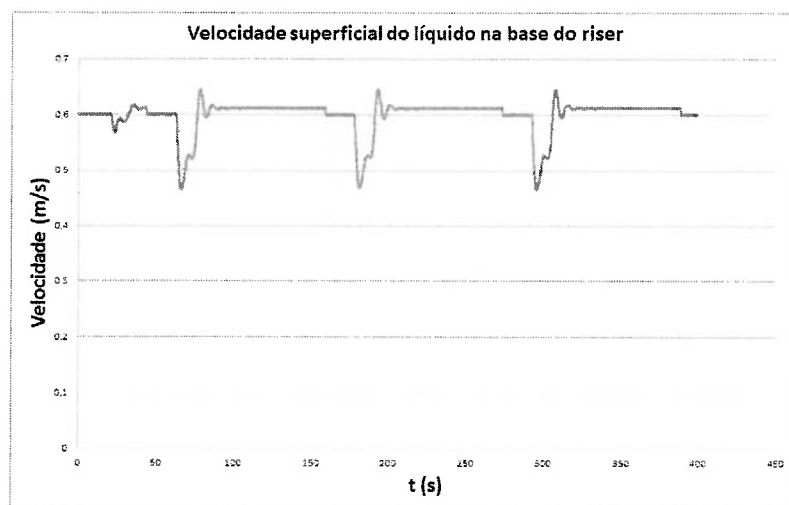


Figura 63: Velocidade superficial do líquido na base do *riser*.

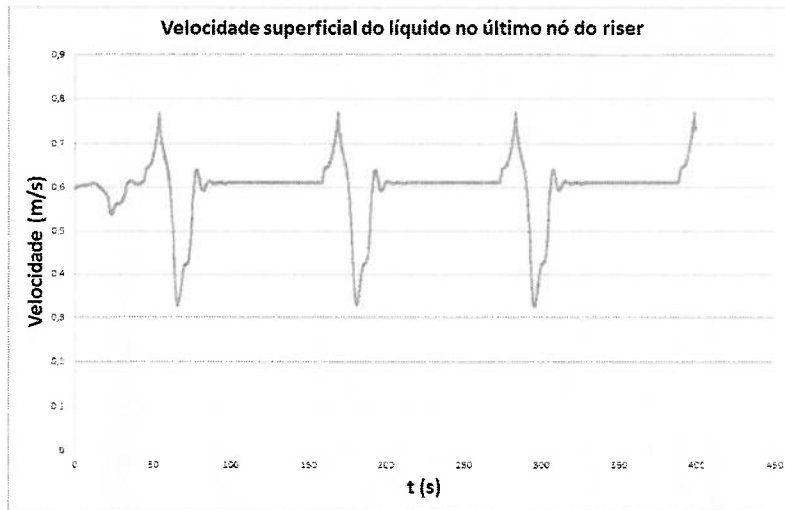


Figura 64: Velocidade superficial do líquido no topo do *riser*.

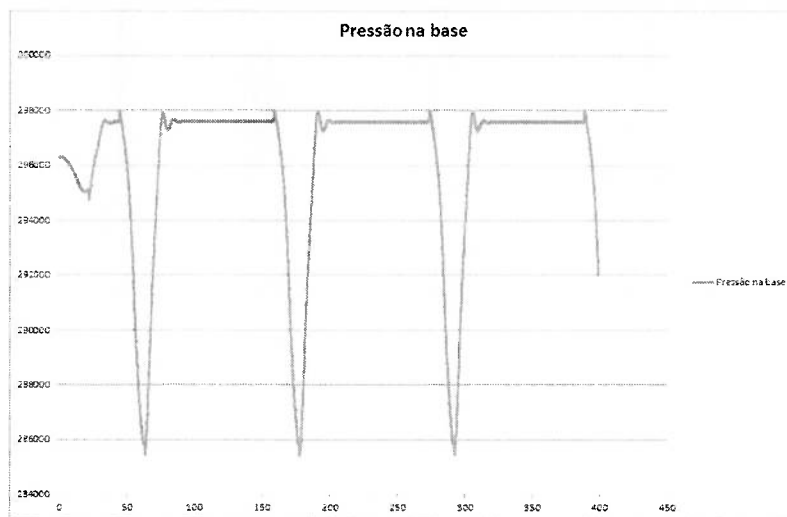


Figura 65: Pressão na base do *riser*.

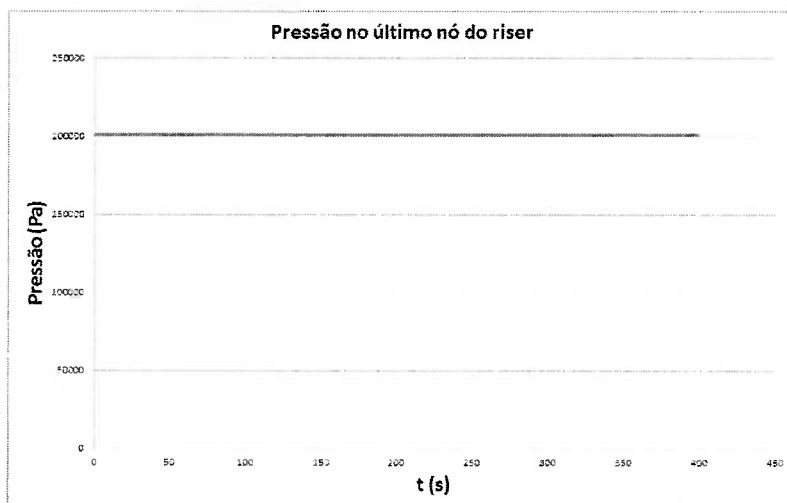


Figura 66: Pressão no topo do *riser*.

### A.8 Resultados das simulações para $m_{g0GL} = 5 * 10^{-4} \frac{kg}{s}$

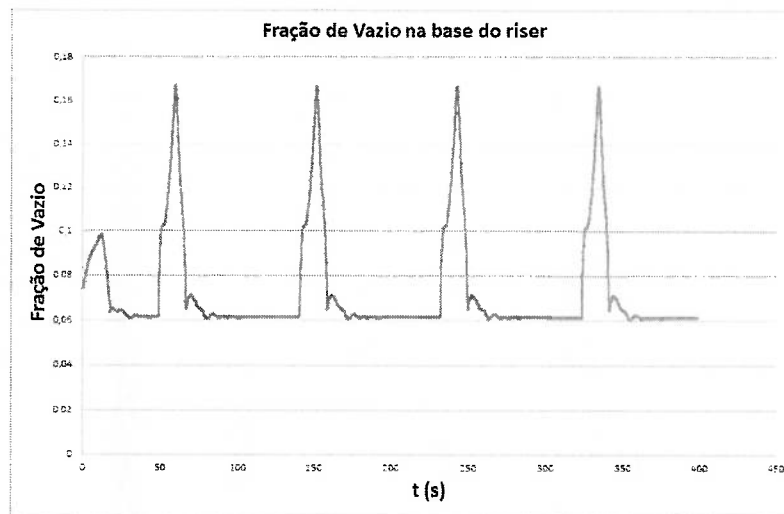


Figura 67: Fração de vazio na base do *riser*.

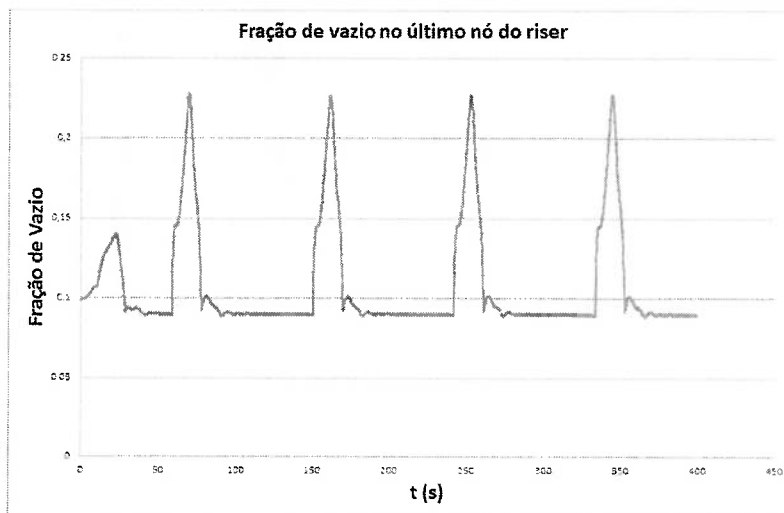


Figura 68: Fração de vazio no topo do *riser*.

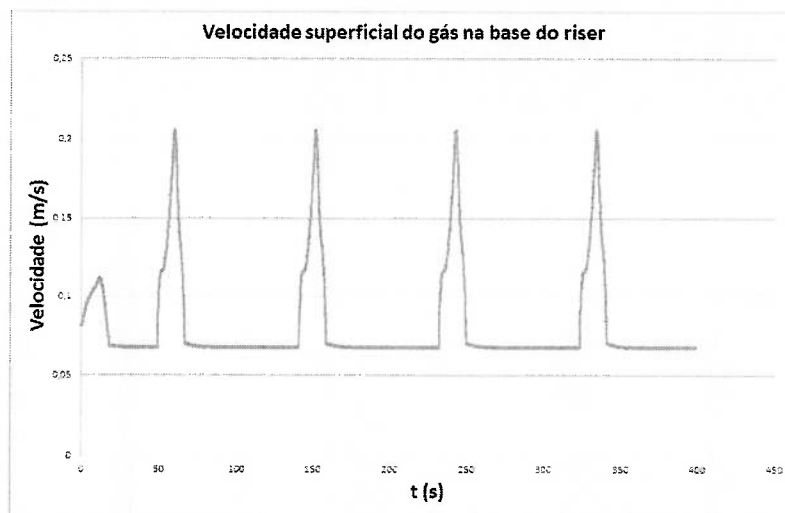


Figura 69: Velocidade superficial do gás na base do *riser*.

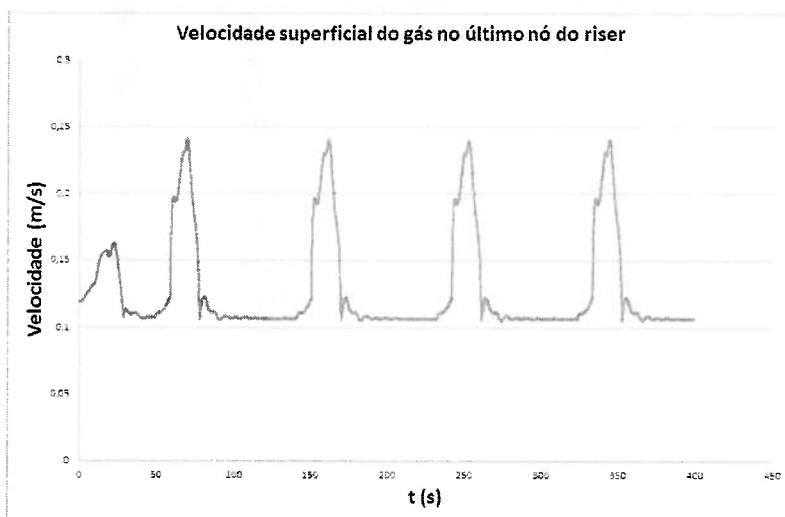


Figura 70: Velocidade superficial do gás no topo do *riser*.

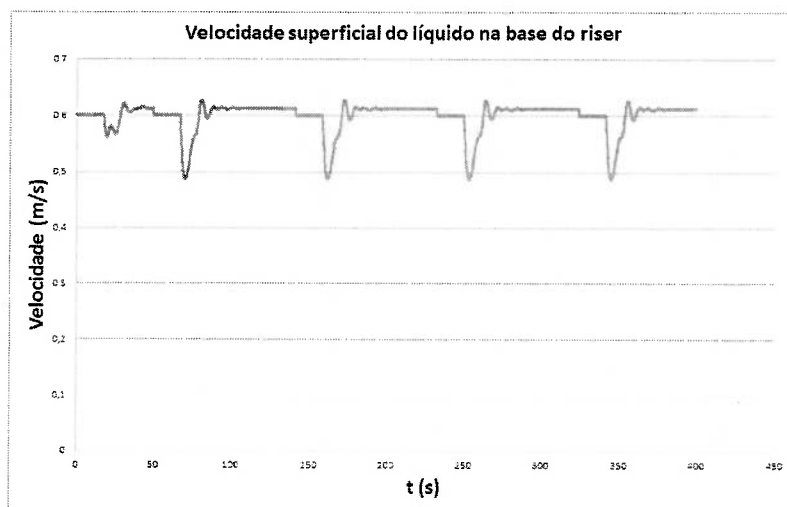


Figura 71: Velocidade superficial do líquido na base do *riser*.

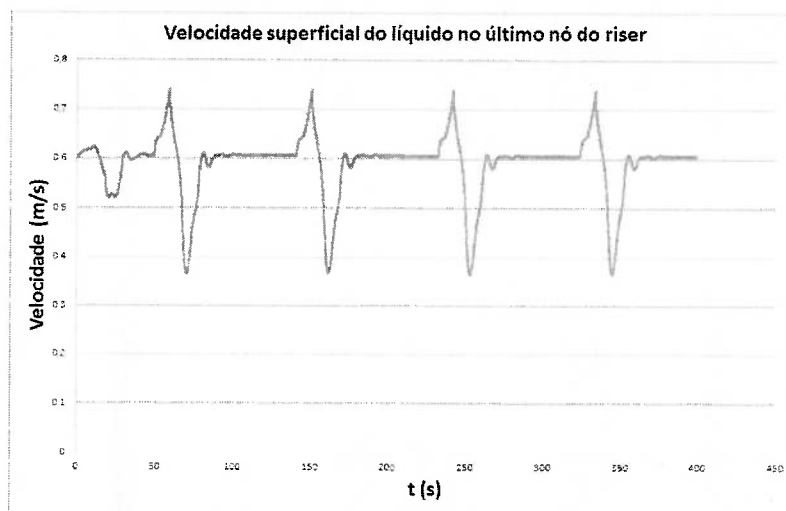


Figura 72: Velocidade superficial do líquido no topo do *riser*.

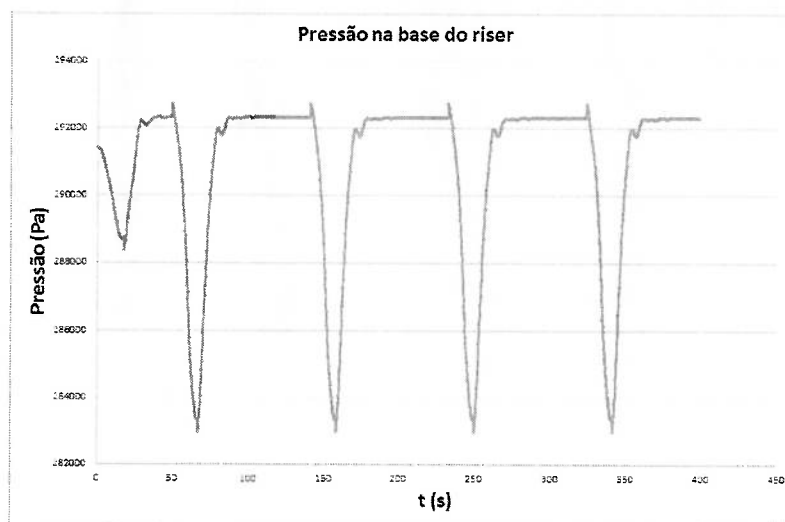


Figura 73: Pressão na base do *riser*.

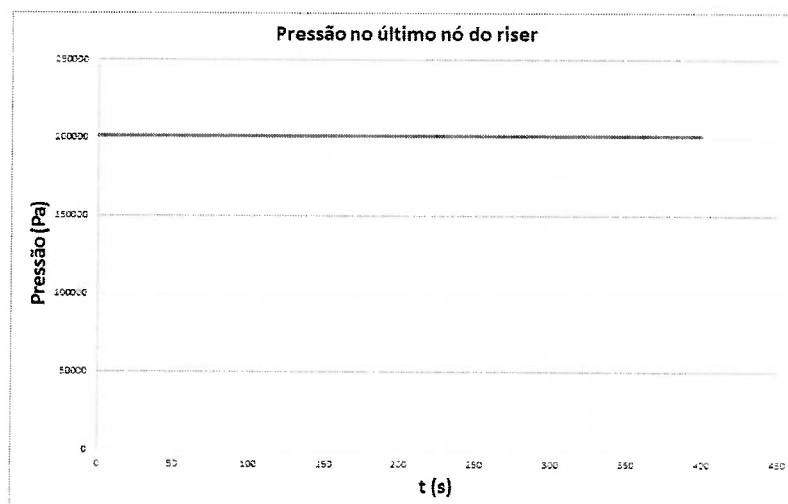


Figura 74: Pressão no topo do *riser*.

### A.9 Resultados das simulações para $m_{g0GL} = 1 * 10^{-3} \frac{kg}{s}$

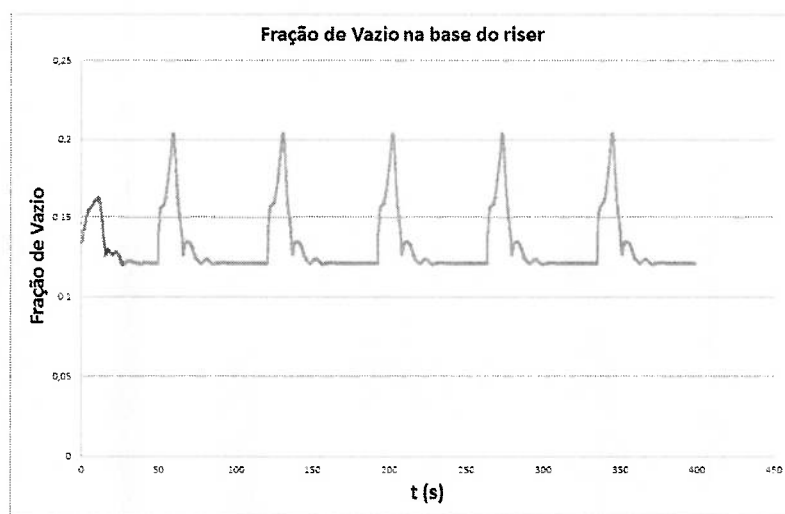


Figura 75: Fração de vazio na base do *riser*.

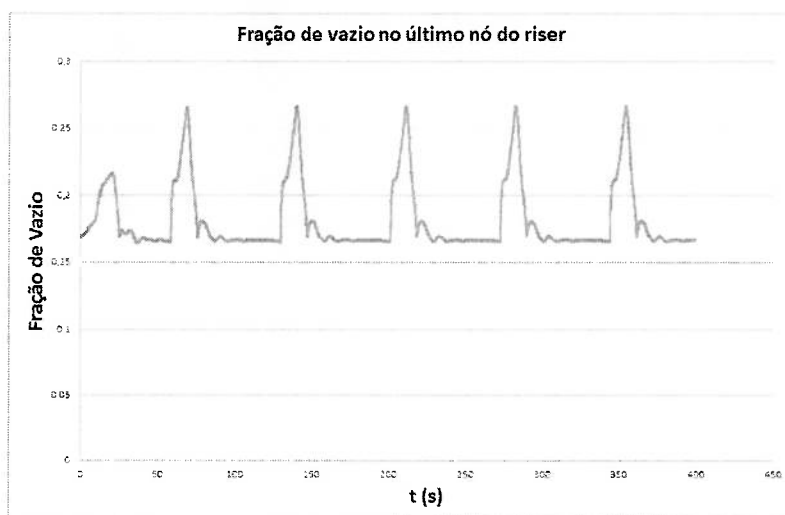


Figura 76: Fração de vazio no topo do *riser*.



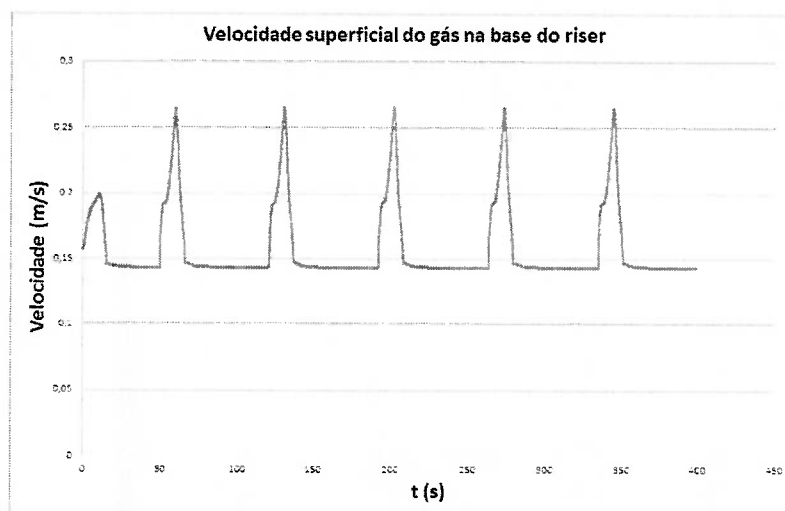


Figura 77: Velocidade superficial do gás na base do *riser*.

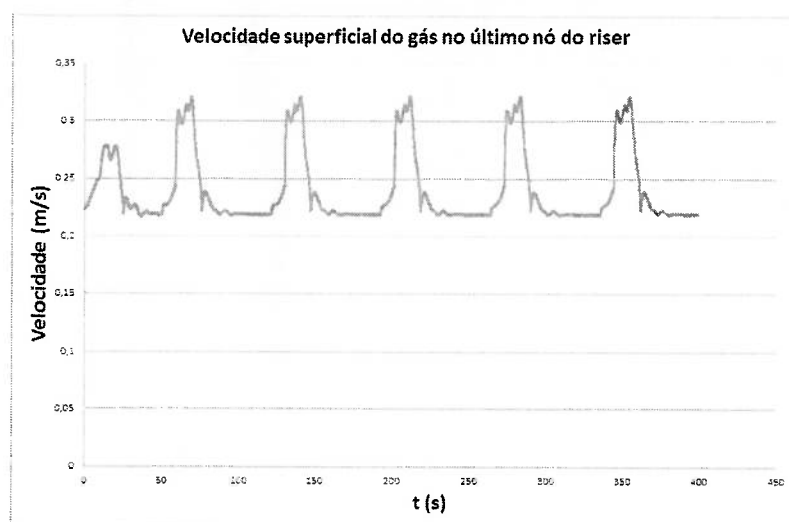


Figura 78: Velocidade superficial do gás no topo do *riser*.

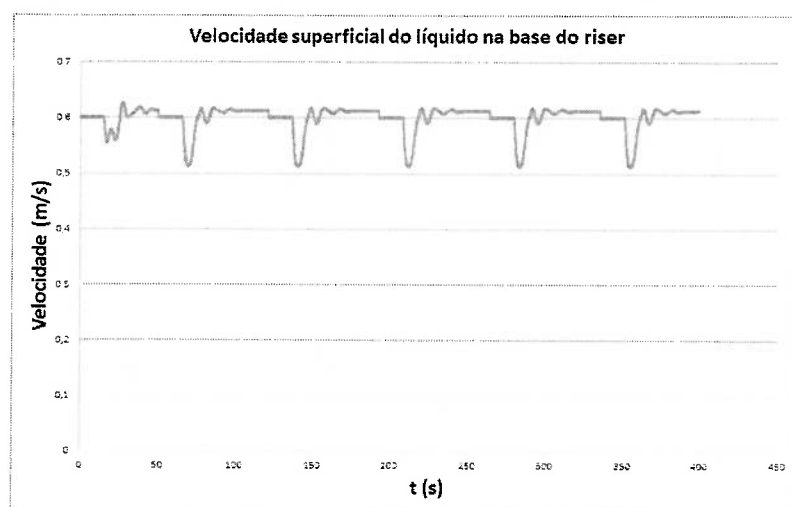


Figura 79: Velocidade superficial do líquido na base do *riser*.

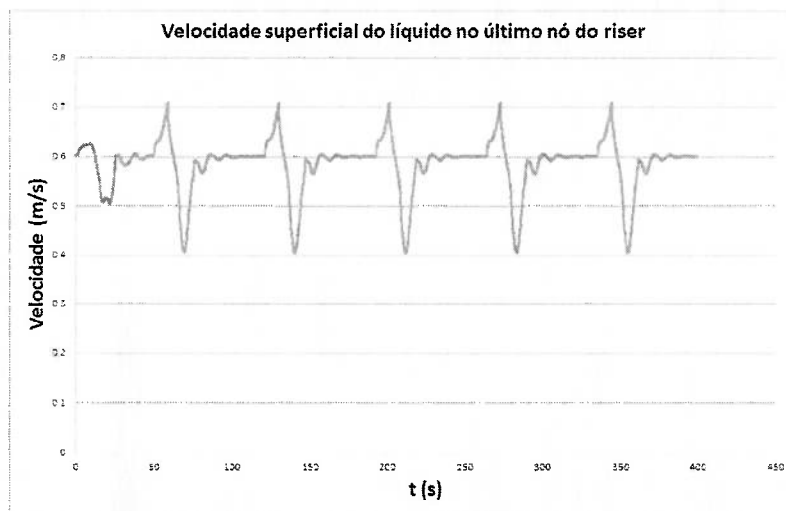


Figura 80: Velocidade superficial do líquido no topo do *riser*.

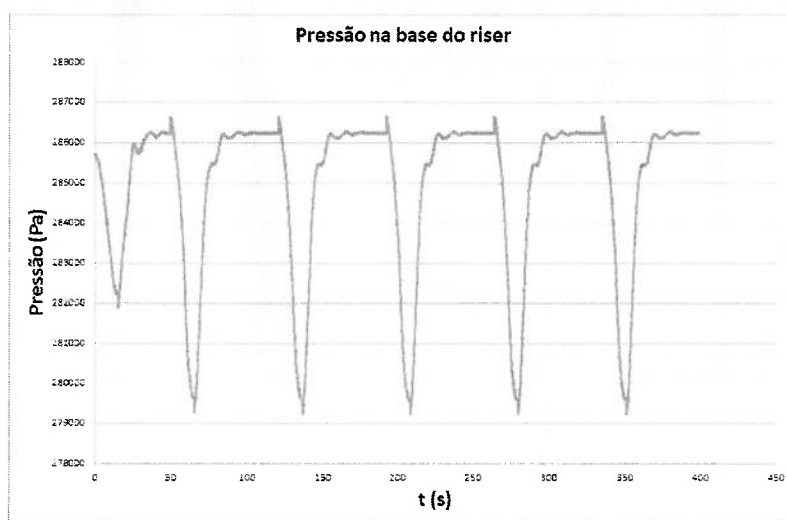


Figura 81: Pressão na base do *riser*.

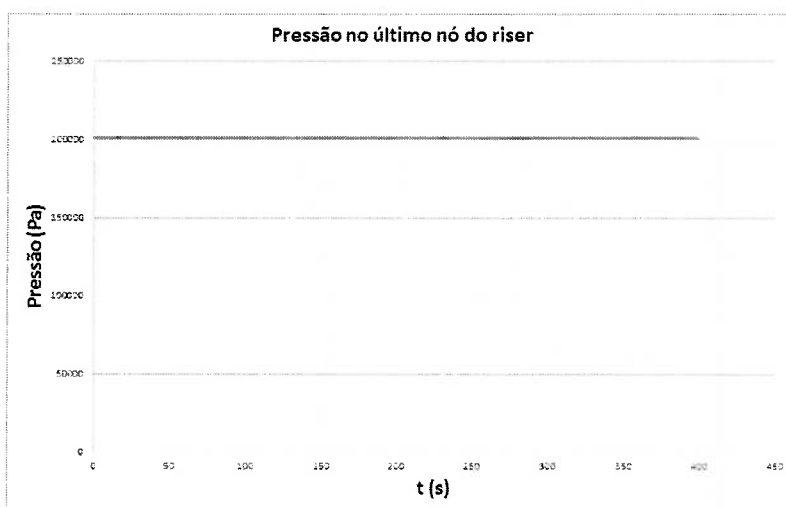


Figura 82: Pressão no topo do *riser*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Baliño, J. L. (coordenador), Análise de intermitência severa em *risers* de geometria catenária, *Relatório Final Projeto Petrobras/FUSP 0050.0007646.04.2*, 191 p., 2006.
- [2] Baliño, J. L., Burr, K. P. & Pereira, N. A. L., Modeling and simulation of severe slugging in pipeline-riser systems, *XIX International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2007)*, Brasília, Brasil, Novembro 2007.
- [3] Baliño, J. L. (coordenador), Análise de escoamentos intermitentes em *risers* em catenária, *Contrato Petrobras/FUSP 0050.0036706.07.2*, 2008.
- [4] Baliño, J. L., *Análise de intermitência severa em risers de geometria catenária*, Tese de Livre Docência em Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 141 p., 2008.
- [5] Baliño, J. L. (coordenador), Desenvolvimento de modelos para medição, dinâmica e estabilidade de escoamentos multifásicos em sistemas de produção de petróleo , *Relatório Anual 2 Projeto Petrobras/FUSP 0050.0048556.09.9*, 179 p., 2011.
- [6] Chexal, B., Lellouche, G., Horowitz, J. & Healer, J., A void fraction correlation for generalized applications, *Progress in nuclear energy*, vol. 27, pp.255-295, 1992.
- [7] Economides, M.J., Hill, A.D. & Ehlig-Economides, C., Petroleum Production System, *Prentice Hall Petroleum Engineering Series*, p.p.616, 1994.
- [8] Elias, E., Lellouche, G.S., Two-phase critical flow, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 20, pp.91-168, 1994.
- [9] Jansen, F. E., Shoham, O. & Taitel, Y., The elimination of severe slugging - Experiments and modeling, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 22, No. 6, pp. 1055-1072, 1996.
- [10] Kokal, S. L. & Stanislav, J. F., An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes - II. Liquid holdup and pressure drop, *Chem. Engng. Sci.*, vol. 44, pp. 665-679, 1989.
- [11] Lannom, D.A. & Hatzignatiou, D.G., Multiphase-flow choke correlation limits analyzed, *Oil & Gas Journal*, vol. 94, pp.37-41, 1996.
- [12] Masella, J.M., Tran, Q.H., Ferre, D. & Pauchon, C., Transient simulation of two-phase flows in pipes, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 24, pp.739-755, 1998.
- [13] Sarica, C. & Shoham, O., A simplified transient model for pipeline-riser systems, *Chemical Engineering Science*, vol. 46, No. 9, pp. 2167-2179, 1991.
- [14] Taitel, Y., Stability of severe slugging, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 12, pp. 203-217, 1986.
- [15] Taitel, Y., Vierkand, S., Shoham, O. & Brill, J. P., Severe slugging in a riser system, experiments and modeling, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 16, pp.57-68, 1990.
- [16] Thomas, E.T., Fundamentos de Engenharia de Petróleo, *Editores Interciência*, 2a. edição, 2001.