

Juliana Coraça Silva

**SIMULAÇÃO DE CIRCULAÇÃO DE KICK PELO MÉTODO DO
SONDADOR**

São Paulo
2014

Juliana Coraça Silva

SIMULAÇÃO DE CIRCULAÇÃO DE KICK PELO MÉTODO DO SONDADOR

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

Orientador: Prof. Dr. Marcio Yamamoto

São Paulo
2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo incentivo e apoio ao longo de todos os meus anos de estudos, especialmente a meus pais, Lúcia e João Ignácio, por me inspirarem e proporcionarem todas as oportunidades para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

Agradeço também ao professor Marcio Yamamoto, não somente por orientar este trabalho, mas também por todo o estímulo e atenção que dedicou a seus alunos durante o curso de Engenharia de Petróleo.

RESUMO

Para garantir-se a segurança de pessoas e equipamentos e preservação ambiental durante a operação de perfuração de um poço de petróleo são necessários rigorosos processos e ferramentas de controle de poço. Uma situação particular de grande importância que pode comprometer a segurança do poço se não for controlada é a operação de circulação de kick.

Este trabalho busca o desenvolvimento de um simulador computacional que prevê diante de determinados dados operacionais as medidas de pressões em superfície durante a circulação de um kick gasoso pelo método do sondador. Com base no simulador, é realizado um estudo das variáveis de maior influência na operação.

ABSTRACT

To ensure the security of people and equipment and environmental protection during drilling operations of oil wells, rigorous processes and well control tools are needed. A very important particular situation that may compromise the well security if not controlled is the kick circulation operation.

This thesis seeks the development of a computer simulation tool that is able to predict the pressures measured on the surface during a gas kick circulation using the driller's method. Based on the outputs of the simulation tool, a study of the operation's most relevant variables will be conducted.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	IV
NOMENCLATURA	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Relevância e justificativas	2
1.2 Objetivo	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Causas e indícios do kick	3
2.2 Padrões de escoamento	3
2.3 Escoamento vertical ascendente	4
3 METODOLOGIA	6
3.1 Programação do Simulador	6
3.2 Determinação dos parâmetros	6
3.2.1 Definição das condições assumidas	6
3.2.2 Esquema da circulação de kick pelo método do sondador (Driller's Method)	6
3.2.3 Determinação das condições iniciais de simulação	8
3.2.4 Determinação das velocidades da região bifásica ao longo da circulação	9
3.2.5 Circulação do kick pelo anular e linha de choke	10
3.2.6 Início da produção de gás	13
3.3 Simulador	13
4 RESULTADOS	15
4.1 Dados de entrada	15
4.2 Resultados obtidos	15
4.2.1 Análise 1	17
4.2.2 Análise 2	18
4.2.3 Análise 3	19
5 CONCLUSÕES	20
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
ANEXO I: FLUXOGRAMA DO SIMULADOR	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Padrões de escoamento para tubos verticais (Taitel, Barnea, & Dukler, 1980).....	4
Figura 2-2: Constantes K1 e K2 (Griffith, 1964)	5
Figura 3-1: Esquema de um poço em perfuração.	7
Figura 3-2: Processo de circulação de kick através do anular pelo método do sondador.....	7
Figura 3-3: Esquema do padrão de escoamento adotado para o modelo computacional.	9
Figura 3-4: Estado inicial da circulação do kick. Kick encontra-se no fundo do poço.	11
Figura 3-5: Representação das colunas hidrostáticas compondo o tubo de perfuração e o anular do poço.....	12
Figura 4-1: Variação da pressão de superfície com a variação geométrica do poço.	16
Figura 4-2: Influência do ganho de tanque na pressão de superfície durante a circulação do kick. 17	
Figura 4-3: Influência da densidade do fluido de perfuração na pressão de superfície durante a circulação do kick.....	18
Figura 4-4: Influência da espessura da lâmina d'água na pressão de superfície durante a circulação do kick.....	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Padrões de escoamento. (Nunes, 2001).....	4
Tabela 3-1: Variáveis de entrada e saída do simulador.	14
Tabela 4-1: Dados de entrada do simulador para as diferentes situações a serem analisadas.....	15
Tabela 4-2: Descrição da posição do kick por trechos de circulação.	16

NOMENCLATURA

Letras latinas

C_{an}	Capacidade volumétrica do anular	ft ³ /ft
d	Diâmetro interno de um tubo	in
d_{ep}	Diâmetro equiperiférico	in
d_{ck}	Diâmetro interno da linha de choke	in
d_e	Diâmetro externo do anular	in
d_i	Diâmetro interno do anular	in
g	Aceleração da gravidade	ft/s ²
Hk_0	Comprimento inicial do kick	ft
Hk	Comprimento do kick	ft
L_s	Comprimento do último revestimento	ft
P_b	Pressão na base da região bifásica	psi
P_f	Pressão da formação	psi
P_{sup}	Pressão na superfície	psi
P_t	Pressão no topo da região bifásica	psi
Q	Vazão de injeção de fluido de perfuração no poço	bbbl/s
Q_{prod}	Vazão de produção de gás no choke	ft ³ /s
t	Tempo transcorrido desde o início da circulação	s
t_{off}	Tempo transcorrido entre o início do kick e o fechamento do poço	s
v_b	Velocidade da base da região bifásica durante a circulação	ft/s
v_B	Velocidade de ascensão da bolha	ft/s
v_m	Velocidade média de injeção de fluido	ft/s
V_{fl}	Volume de fluido de perfuração na região bifásica	bbbl
V_{g_0}	Volume inicial de gás na região bifásica	bbbl
V_{k_0}	Volume inicial da região bifásica	bbbl
v_t	Velocidade do topo da região bifásica durante a circulação	ft/s
y_b	Posição da base da região bifásica	ft
y_t	Posição do topo da região bifásica	ft

Letras gregas

$\bar{\alpha}$	Fração média de gás na região bifásica	
$\bar{\beta}$	Fração média de líquido na região bifásica	
ρ_g	Densidade do gás	ppg
ρ_k	Densidade do kick	ppg
ρ_m	Densidade do fluido de perfuração	ppg

Siglas

<i>SICP</i>	<i>Shut in casing pressure</i>	psi
<i>SIDPP</i>	<i>Shut in drill pipe pressure</i>	psi
<i>TVD</i>	<i>True vertical depth</i>	ft
<i>WD</i>	<i>Water Depth</i>	ft

1 INTRODUÇÃO

A importância da segurança de pessoas e proteção ambiental é cada vez maior na indústria do petróleo. O controle de operações que envolvem desde a pesquisa e exploração até o descomissionamento de campos de petróleo pelo mundo é de suma importância para garantir segurança em qualquer estágio de operação de um campo.

A operação de perfuração apresenta particularmente uma maior incerteza, principalmente no caso de poços pioneiros, devido ao menor conhecimento da formação geológica e do reservatório.

Ao perfurar-se uma formação, é preciso ter conhecimento do tipo de pressão que está atuando no interior dos poros da mesma. Para equilibrar-se a pressão da formação com a pressão do interior do poço deve ser utilizado um fluido de perfuração com densidade adequada. Este fluido deve garantir que a pressão no interior do poço não seja inferior à pressão dos poros da formação.

Entretanto, durante a operação de perfuração, a pressão hidrostática dentro do poço deve permanecer dentro dos limites da janela operacional, ou seja, deve ser maior que a pressão de poros e não deve ultrapassar a pressão de fraturamento da formação. Se a pressão do poço for inferior à pressão de poros da formação, haverá fluxo dos fluidos contidos na formação para dentro do poço. Este influxo indesejado é denominado de kick. (Schlumberger, 2014)

Conforme Grace (2003), são enumeradas e explicadas quatro possíveis causas de kick:

1) *Densidade do fluido de perfuração inferior à pressão de poros da formação:*

Em determinadas situações, operadores acabam optando por um fluido de perfuração mais leve que o recomendado para garantir maior taxa de penetração da broca e, como o gradiente de pressão torna-se negativo em direção ao interior do poço, o kick é viabilizado.

2) *Falha no preenchimento do poço por fluido de perfuração ou efeito êmbolo durante manobra:*

Ao retirar-se a coluna de perfuração durante uma operação de manobra, o volume correspondente ao volume da coluna deve ser repostado em fluido de perfuração. Além disso, durante esta operação, pode ser criada no fundo do poço uma zona de baixa pressão que possibilita o fluxo de fluidos da formação para o interior do poço.

3) *Perda de circulação:*

Pode haver na formação alguma falha em que o fluido de perfuração penetra e, conseqüentemente, é perdido para o meio. Neste caso, se o fluido não é repostado, há perda de pressão hidrostática no poço e fluidos da formação podem escoar para o interior do poço.

Esta causa pode criar uma situação bastante difícil de controlar o kick, pois nem sempre a perda de fluido de perfuração é mensurável em superfície.

4) *Lama cortada por gás*

Quando se perfura em uma zona em que há presença de gás, parte deste gás pode misturar-se ao fluido de perfuração implicando na redução da massa específica do mesmo e, conseqüentemente, reduzindo-se a pressão no interior do poço.

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVAS

O kick por si só não apresenta implicações graves para a segurança da operação ou para o meio ambiente. Entretanto, uma vez ocorrido, ele deve ser tratado com atenção e removido, pois, caso seja perdido o controle das pressões dentro do poço, a situação pode se desenvolver em um blowout¹, ou seja, o fluxo descontrolado do fluido da formação para o meio ambiente. Neste caso, o fluido pode vir a contaminar a formação ou chegar à superfície tendo conseqüências catastróficas. Tanto a segurança das pessoas envolvidas direta ou indiretamente na operação quanto a preservação do meio ambiente estarão assim comprometidas.

Deste modo, torna-se indispensável o uso de ferramentas que garantam o controle do poço e que possam prever com exatidão os pontos críticos da operação de circulação. Ao decorrer dos anos, foram desenvolvidos e aprimorados métodos que garantem cada vez mais segurança à operação de circulação do kick. Tais métodos devem ser estudados através de modelos computacionais para prever sua aplicabilidade perante diversas situações que podem ser obtidas na prática.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o estudo qualitativo e quantitativo do processo de circulação de kick através do método do sondador, com a criação de um simulador numérico no domínio do tempo que leva em consideração um kick gasoso e tem como entrada dados como a geometria do poço, as condições de perfuração no momento do kick, as características do kick, etc.

A partir do simulador serão realizadas análises da influência das principais variáveis nos valores de pressão medidos na superfície, no final da linha de choke.

¹ Blowout: o termo em Português é "Erupção", mas neste trabalho será utilizado o termo em Inglês por ser largamente utilizado na Indústria.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CAUSAS E INDÍCIOS DO KICK

Grace (2003) apresenta uma visão geral sobre kick e o passo a passo para circulação do mesmo pelo método do sondador. Segundo o autor, existem quatro possíveis causas para a ocorrência de um kick:

- 1- Densidade do fluido de perfuração inferior à pressão de poros da formação;
- 2- Falha no preenchimento do poço por fluido de perfuração ou efeito êmbolo durante manobra;
- 3- Perda de circulação;
- 4- Lama cortada por gás.

De acordo com Oliveira, Arruda, & Negrão (1987), existem alguns indícios que permitem a detecção do kick antes que ele se torne um *blowout*. Dentre eles, podem se destacar:

- 1- Aumento do volume de fluido de perfuração nos tanques (*ganho de lama* ou *ganho de tanque*);
- 2- Aumento da vazão de fluido de perfuração no retorno;
- 3- Presença de fluxo mesmo com as bombas desligadas;
- 4- Poço aceitando menos fluido de perfuração que o volume da coluna de perfuração quando esta é retirada;
- 5- Poço devolvendo mais fluido de perfuração que o volume de aço descido, quando a coluna de perfuração for inserida no poço;
- 6- Aumento da taxa de penetração;
- 7- Corte da lama por água ou gás da formação;
- 8- Redução na pressão de circulação e aumento na velocidade de bombeio.

2.2 PADRÕES DE ESCOAMENTO

Uma vez presente no interior do poço, o fluido invasor pode se comportar de diversas maneiras. Basicamente, existem quatro tipos de escoamento vertical ascendente para gás em meio líquido, segundo Taitel, Barnea, & Dukler (1980): bolhas, pistonado, agitante e anular. Estes quatro tipos estão esquematizados na figura (2-1).

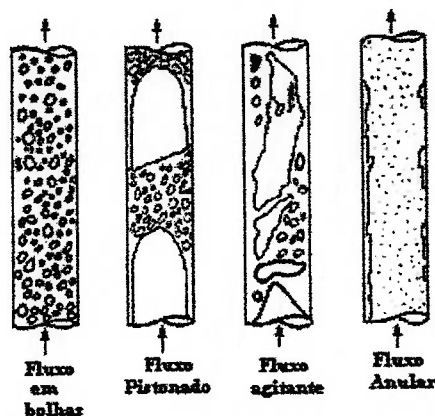


Figura 2-1: Padrões de escoamento para tubos verticais (Taitel, Barnea, & Dukler, 1980)

De acordo com Nunes (2001), estes quatro padrões podem ser descritos conforme a tabela abaixo (2-1):

Tabela 2-1: Padrões de escoamento. (Nunes, 2001)

Padrão de escoamento	Descrição
Bolhas (Bubble Flow)	Caracteriza-se por uma fase gasosa escoando na forma bolhas dentro da fase líquida contínua, formando um meio homogêneo;
Pistonado (Slug Flow)	O escoamento pistonado é caracterizado pela formação de grandes bolhas que ocupam quase toda a seção transversal do tubo. Essas bolhas são conhecidas como Bolhas de Taylor. As bolhas de Taylor apresentam comprimento várias vezes maior que o diâmetro do tubo e se movimentam para cima intercaladas por tampões de líquido;
Agitante (Churn Flow)	É caracterizado por um escoamento aleatório. Neste regime, a mudança da fase contínua líquida para a de gás ocorre em alguns pontos. Em tubos com comprimentos maiores, ocorre um movimento oscilatório ascendente e descendente do líquido. Esse padrão ocorre entre os padrões pistonado e anular;
Anular (Annular Flow)	A fase contínua é a de gás contendo pequenas gotas de líquido no seu interior. A parede do tubo é coberta por um filme líquido, mas a fase gasosa tem maior influência na perda de carga.

2.3 ESCOAMENTO VERTICAL ASCENDENTE

Diversos estudos foram conduzidos ao longo dos anos para caracterizar-se o movimento de ascendência de gás em um meio líquido. Considerando o escoamento de uma região composta por uma mistura de gás e líquido em um espaço anular, a correlação expressa pela equação (2-1) foi desenvolvida por Griffith (1964).

$$v_B = K_1 \cdot \sqrt{g \cdot \frac{(\rho_m - \rho_k)}{\rho_m} \cdot (d_{ep})} + (1 + K_2) \cdot v_m \quad (2-1)$$

$$K_1 = 0,345 - 0,037 \cdot \frac{d_i}{d_e} + 0,235 \cdot \left(\frac{d_i}{d_e}\right)^2 - 0,134 \cdot \left(\frac{d_i}{d_e}\right)^3 \quad (2-2)$$

$$K_2 = 0,200 - 0,041 \cdot \frac{d_i}{d_e} + 0,010 \cdot \left(\frac{d_i}{d_e}\right)^2 - 0,033 \cdot \left(\frac{d_i}{d_e}\right)^3 \quad (2-3)$$

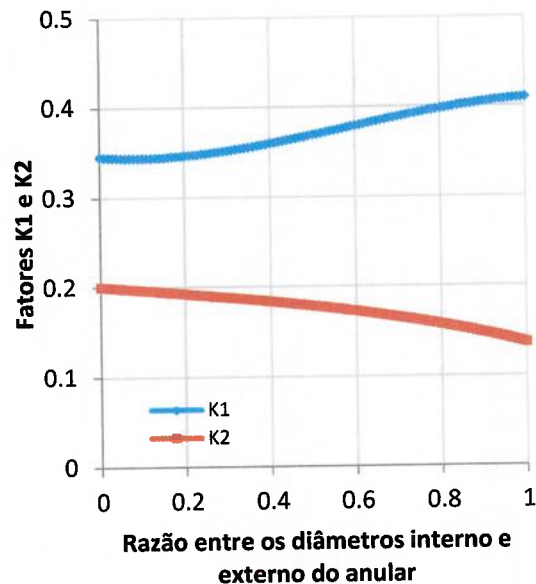


Figura 2-2: Constantes K1 e K2 (Griffith, 1964)

Stanbery (1976) propôs a utilização de uma distribuição uniforme de gás e líquido na região bifásica. Neste caso, as bolhas maiores se distribuem na parte superior da região, pois têm velocidades maiores, e as bolhas menores ficam na parte inferior. A expressão de Griffith (1964) foi utilizada para o cálculo das velocidades das bolhas.

Para o cálculo da pressão causada pela coluna hidrostática atuante em um ponto, Bourgoyne Jr, Millheim, Chenevert, & Young Jr (1986) levaram em consideração um fluido de densidade ρ a uma profundidade D , com todas as variáveis em unidades de campo. A pressão hidrostática causada pela coluna de fluido é dada pela equação (2-4):

$$P = 0,052 \cdot \rho \cdot D \quad (2-4)$$

3 METODOLOGIA

3.1 PROGRAMAÇÃO DO SIMULADOR

Para confecção do simulador será adotada a linguagem C, de acordo com o manual de Cocian (2004) e será utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado – IDE CodeBlocks, com compilador GCC.

3.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS

3.2.1 Definição das condições assumidas

1. Poço vertical

2. Geometria do poço

- A coluna de perfuração (drill pipe) é sempre concêntrica ao poço.
- Diâmetro interno do anular é variável (dependente da seção do tubo de perfuração)
- Diâmetro externo do anular é variável (região revestida e região de poço aberto)

3. Kick composto puramente por gás

4. Método de circulação do sondador

5. Não há mudança de fase de nenhum dos fluidos envolvidos

6. O kick entra no volume de controle pelo fundo do poço

7. A pressão no fundo do poço é equivalente à pressão da formação

8. O padrão do escoamento ascendente do kick é o *slug flow* (bolha de Taylor)

9. O fluido de perfuração é incompressível

10. O fluido de perfuração é newtoniano

11. A densidade do gás do kick não terá variação considerável durante a circulação

12. As perdas de carga ao longo da circulação serão desconsideradas

3.2.2 Esquema da circulação de kick pelo método do sondador (Driller's Method)

A figura (3-1) abaixo representa um esquema de um poço sendo perfurado.

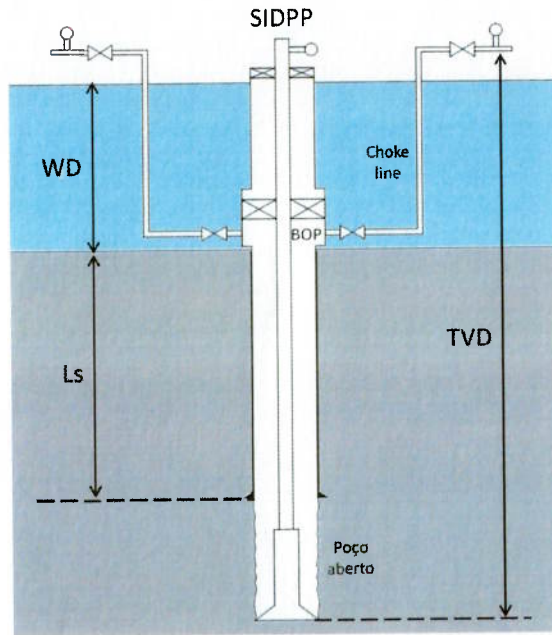


Figura 3-1: Esquema de um poço em perfuração.

A seguir, a figura (3-2) apresentada um esquema do passo a passo da circulação de kick pelo método do sondador.

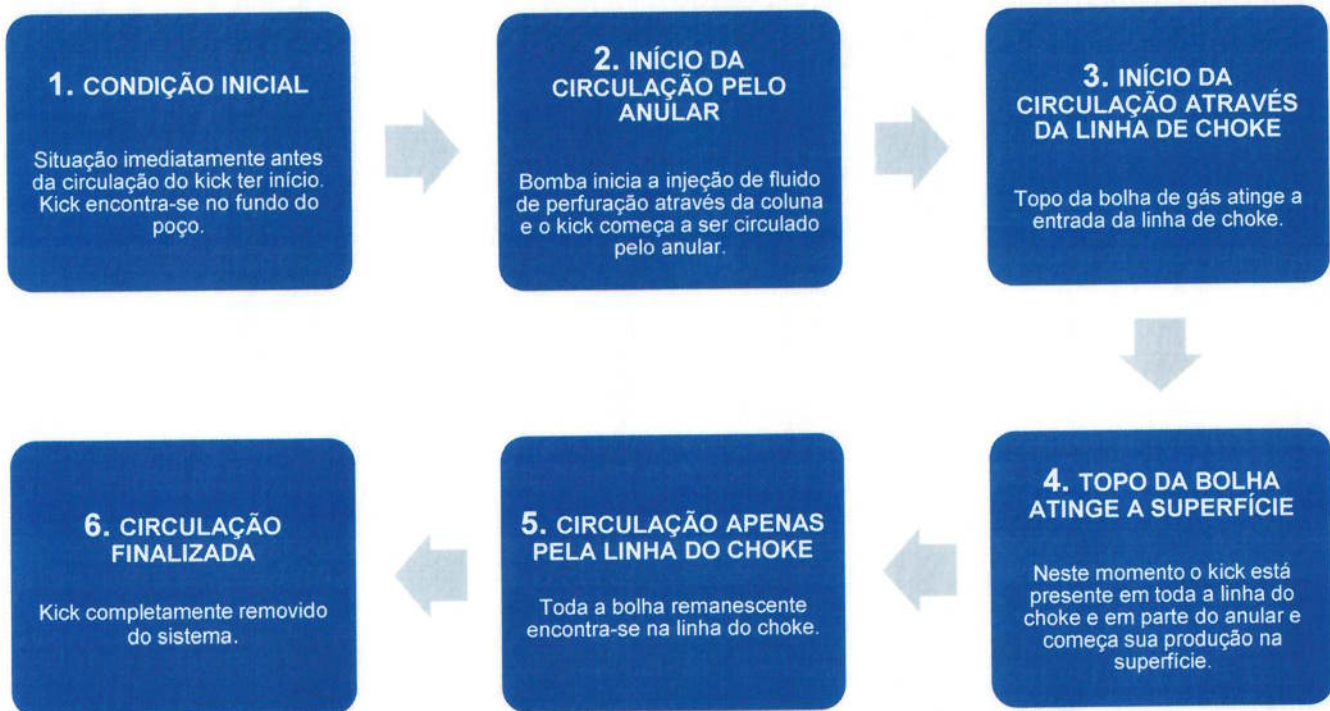


Figura 3-2: Processo de circulação de kick através do anular pelo método do sondador.

3.2.3 Determinação das condições iniciais de simulação

3.2.3.1 Determinação da pressão da formação

A pressão da formação é obtida a partir da pressão na entrada da coluna de perfuração (SIDPP: *shut in drill pipe pressure*) e da pressão hidrostática gerada pelo fluido de perfuração presente no interior da coluna de perfuração. Tomando por base a equação de Bourgoyne Jr, Millheim, Chenevert, & Young Jr (1986) descrita anteriormente pela equação (2-4), tem-se:

$$P_f = SIDPP + 0,052 \cdot \rho_m \cdot TVD \quad (3-1)$$

3.2.3.2 Determinação da fração média inicial de gás

A região bifásica é composta pelo gás do kick e pelo fluido de perfuração. A fração média de gás representa a quantidade de gás presente nessa região, em relação ao volume total da mesma. O volume inicial da região bifásica é dado por:

$$Vk_0 = Vf_l + Vg_0 \quad (3-2)$$

O valor do volume de gás que entrou no poço é numericamente igual ao ganho no tanque. O volume de fluido de perfuração na região bifásica é constante ao longo da circulação e pode ser obtido pela equação (3-3), na qual considera-se o tempo transcorrido entre o início da invasão do kick no fundo do poço e o momento em que o kick foi detectado e o poço fechado.

$$Vf_l = Q \cdot t_{off} \quad (3-3)$$

A fração média de gás na região bifásica é então dada por:

$$\bar{\alpha} = \frac{Vg_0}{Vk_0} \quad (3-4)$$

3.2.3.3 Determinação do comprimento inicial do kick

A partir da determinação da fração inicial de gás da região bifásica, pode-se obter o comprimento inicial do kick, dispondo-se da capacidade volumétrica do anular, C_{an} .

$$Hk_0 = \frac{Vk_0}{C_{an}} \quad (3-5)$$

3.2.4 Determinação das velocidades da região bifásica ao longo da circulação

Para este modelo, foi adotado o padrão de escoamento *slug flow*. Para simplificar o modelo, o kick será representado por uma zona bifásica, composta por inúmeras bolhas de Taylor, conforme esquema da figura (3-3) abaixo:

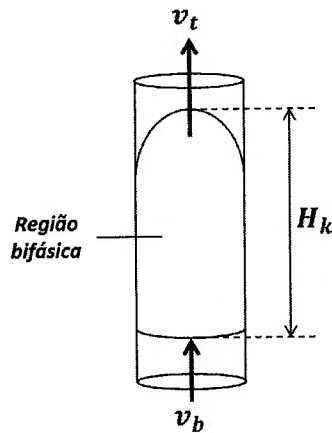


Figura 3-3: Esquema do padrão de escoamento adotado para o modelo computacional.

Neste modelo, serão consideradas duas velocidades. A primeira atuante no topo da região bifásica v_t , e a segunda atuante na base desta região, v_b . A seguir serão apresentadas as fórmulas correspondentes a essas velocidades.

3.2.4.1 Velocidade no topo da bolha

Para este modelo, será considerada uma zona bifásica em que o gás do kick recebido forma bolhas de diversos tamanhos em suspensão no líquido, o fluido de perfuração. As bolhas de diâmetro maior ascendem com maior velocidade e, assim, se concentrarão no topo da zona bifásica. Deste modo, a distribuição das bolhas pela zona bifásica será baseada no tamanho das bolhas.

A equação da velocidade de ascensão de uma bolha (v_B) em um meio contínuo que será utilizada no modelo foi obtida por Griffith (1964) e é expressa abaixo:

$$v_B = K_1 \cdot \sqrt{g \cdot \frac{(\rho_m - \rho_k)}{\rho_m} \cdot (d_{ep})} + (1 + K_2) \cdot v_m \quad (3-6)$$

A velocidade de injeção de fluido de perfuração é dada a partir da vazão de injeção de mesmo:

$$v_m = \frac{5,614583.Q}{C_{an}} \quad (3-7)$$

Durante a circulação no anular do poço, o diâmetro equiperiférico será considerado como $d_{ep} = \frac{(d_i + d_e)}{2}$. Quando o kick atingir a linha de choke, o diâmetro da bolha no topo da zona bifásica será considerado como o diâmetro da própria linha de choke.

3.2.4.2 Velocidade na base da bolha

Para calcular-se a velocidade na base da região bifásica é assumido que o diâmetro das bolhas tende a zero. Logo, a velocidade da base resume-se à velocidade com que o fluido de perfuração circula pelo trecho analisado.

3.2.5 Circulação do kick pelo anular e linha de choke

3.2.5.1 Velocidades de ascensão da bolha

A) Anular

A partir da equação (3-6), chega-se a equação do topo e da base da região bifásica:

$$v_m = \frac{4.Q}{\pi.(d_e^2 - d_i^2)} \quad (3-8)$$

$$v_B = K_1 \cdot \sqrt{g \cdot \frac{(\rho_m - \rho_k)}{\rho_m} \cdot (d_{ep})} + (1 + K_2) \cdot v_m \quad (3-9)$$

$$v_b = v_m \quad (3-10)$$

É importante observar que os diâmetros interno e externo do anular podem variar dependendo da posição que o kick se encontra no poço. Conseqüentemente, o diâmetro equiperiférico também vai variar.

B) Linha de choke

Quando a região bifásica atinge a linha de choke, a velocidade do topo da bolha seguirá a seguinte expressão:

$$v_m = \frac{4.Q}{\pi.d_{ck}^2} \quad (3-11)$$

$$v_t = 1,2 \cdot v_m + 0,345 \cdot \sqrt{g \cdot \frac{(\rho_m - \rho_k)}{\rho_m} \cdot (d_{ck})} \quad (3-12)$$

A velocidade da base continuará sendo igual à velocidade do fluido de perfuração na linha do choke, conforme equação (3-10).

$$Hk(t) = Hk_0 + v_t \cdot t - v_b \cdot t \quad (3-15)$$

Assume-se que a variação do comprimento do kick é devida somente à expansão do gás e o fluido de perfuração é incompressível. Deste modo, o volume de fluido de perfuração permanece constante na região analisada, enquanto que o volume de gás aumenta a cada iteração. Assim, tem-se a equação abaixo que representa a variação da fração média de gás da região bifásica em função do tempo:

$$\bar{\alpha}(t) = \frac{Hk(t) \cdot C_{an} - v_{fl}}{Hk(t) \cdot C_{an}} \quad (3-16)$$

$$\bar{\beta}(t) = 1 - \bar{\alpha}(t) \quad (3-17)$$

3.2.5.3 Variação das pressões de superfície

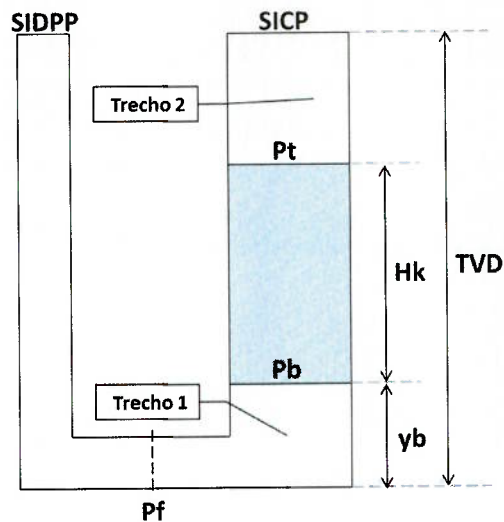


Figura 3-5: Representação das colunas hidrostáticas compondo o tubo de perfuração e o anular do poço.

A pressão da base da região de duas fases é equivalente à pressão no fundo do poço descontando-se a pressão exercida pela coluna hidrostática de fluido de perfuração e as perdas de carga neste trecho, ou seja:

$$P_b = P_f - 0,052 \cdot \rho_m \cdot y_b(t) \quad (3-18)$$

A pressão no topo da bolha do kick, por sua vez, será a pressão na sua base descontada a pressão da coluna hidrostática exercida pelo trecho do kick:

$$P_t = P_b - 0,052 \cdot \rho_k \cdot H_k \quad (3-19)$$

A partir da pressão do topo, calcula-se a pressão na superfície, que equivale à pressão no topo da região bifásica, descontando-se a pressão exercida pela coluna hidrostática de fluido de perfuração acima da região bifásica.

$$P_{sup} = P_t - (0,052 \cdot \rho_m) \cdot (TVD - y_t(t)) \quad (3-20)$$

3.2.6 Início da produção de gás

Quando o topo da região bifásica atinge a válvula do choke, inicia-se a produção de gás. O gás proveniente do choke manifold será direcionado ao queimador, onde será queimado. Nesta fase, ocorrerá uma diminuição da massa de gás dentro do volume de controle.

A velocidade do topo da bolha, em qualquer ponto da linha de choke é dada pela equação (3-12). Logo, a vazão pela válvula de choke quando o kick atinge a superfície é:

$$Q_{prod} = v_t \cdot \pi \cdot \frac{d_{ck}^2}{36} \quad (3-21)$$

A pressão de superfície a partir do momento em que o topo do kick atinge a válvula do choke é dada por:

3.2.6.1 Pressão na superfície durante a produção de gás

Conforme o kick vai sendo retirado do volume de controle, seu comprimento é dado pela equação abaixo, sendo que a velocidade da sua base é igual à velocidade de escoamento do fluido de perfuração na linha do choke.

$$Hk(t) = TVD - y_b(t) \quad (3-22)$$

A pressão na base do kick segue a equação (3-18). O diferencial de pressão ao longo do kick será dado pela diferença das equações (3-19) e (3-18), com o comprimento do kick dado pela equação acima (3-22).

Finalmente, a pressão de superfície será igual à pressão no topo do kick, com P_b e P_t definidos pelas equações anteriormente descritas.

$$P_{sup} = P_t \quad (3-23)$$

3.3 SIMULADOR

Na tabela (3-1) abaixo estão listadas as variáveis de entrada e saída do programa e da planilha de análise:

Tabela 3-1: Variáveis de entrada e saída do simulador.

Simulador	
Entrada	Saída
<p>CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tempo de iteração <p>GEOMETRIA DO POÇO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Espessura da lâmina d'água • <i>True Vertical Depth</i> • Profundidade da última sapata • Comprimento do comando • Diâmetro do último revestimento • Diâmetro do poço aberto (diâmetro da broca) • Diâmetro do <i>drillpipe</i> • Diâmetro do comando • Diâmetro do <i>choke line</i> <p>CONDIÇÕES DE PERFURAÇÃO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vazão de bombeio do fluido de perfuração • Densidade do fluido de perfuração <p>CONDIÇÕES DO KICK/FECHAMENTO DO POÇO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Densidade do gás invasor • Tempo transcorrido entre o início da invasão e o fechamento do poço • Ganho no tanque • Pressão de fechamento da coluna de perfuração 	<p>PRESSÕES NA SUPERFÍCIE</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variação da pressão SICP durante a circulação do kick <p>CONDIÇÕES DE CIRCULAÇÃO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variação da posição do kick ao longo do tempo • Variação do comprimento do kick • Variação das velocidades de topo e base do kick <p>ANÁLISE GRÁFICA</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análise da variação de pressão na superfície com o tempo

4 RESULTADOS

Com base no programa construído, serão realizadas a seguir algumas simulações para realizar uma análise qualitativa das variáveis que mais influenciam as variações de pressão na superfície durante a circulação de um kick. Para um mesmo poço, serão analisadas as situações abaixo:

Análise 1: Influência do volume de fluido invasor na circulação

Análise 2: Influência da densidade do fluido de perfuração na circulação

Análise 3: Influência da espessura da lâmina d'água na circulação

4.1 DADOS DE ENTRADA

Tabela 4-1: Dados de entrada do simulador para as diferentes situações a serem analisadas.

Variáveis	Unidade	Análise 1	Análise 2	Análise 3
CONDIÇÃO DE SIMULAÇÃO				
Tempo de iteração	s	10	10	10
GEOMETRIA DO POÇO				
Espessura da lâmina d'água	ft	1000	1000	VARIÁVEL
Comprimento do trecho aberto do poço	ft	2000	2000	2000
Profundidade da última sapata	ft	5000	5000	5000
Comprimento do comando	ft	600	600	600
Diâmetro do último revestimento	in	12	12	12
Diâmetro do poço aberto	in	10	10	10
Diâmetro do <i>drillpipe</i>	in	5	5	5
Diâmetro do comando	in	8	8	8
Diâmetro do <i>choke line</i>	in	2	2	2
CONDIÇÕES DE PERFURAÇÃO				
Vazão de bombeio do fluido de perfuração	bbl/s	0,2	0,2	0,2
Densidade do fluido de perfuração	ppg	10	VARIÁVEL	10
CONDIÇÕES DO KICK				
Densidade do gás invasor	ppg	3,6	3,6	3,6
Tempo transcorrido entre o início da invasão e o fechamento do poço	s	45	45	45
Ganho no tanque	bbl	VARIÁVEL	30	30
Pressão de fechamento da coluna de perfuração	psi	200	200	200

4.2 RESULTADOS OBTIDOS

O gráfico da figura (4-1) representa qualitativamente o efeito observado na pressão de superfície durante a circulação do kick. É possível identificar quatro zonas com inclinações diferentes. Esta diferença na inclinação é consequência da variação geométrica do poço.

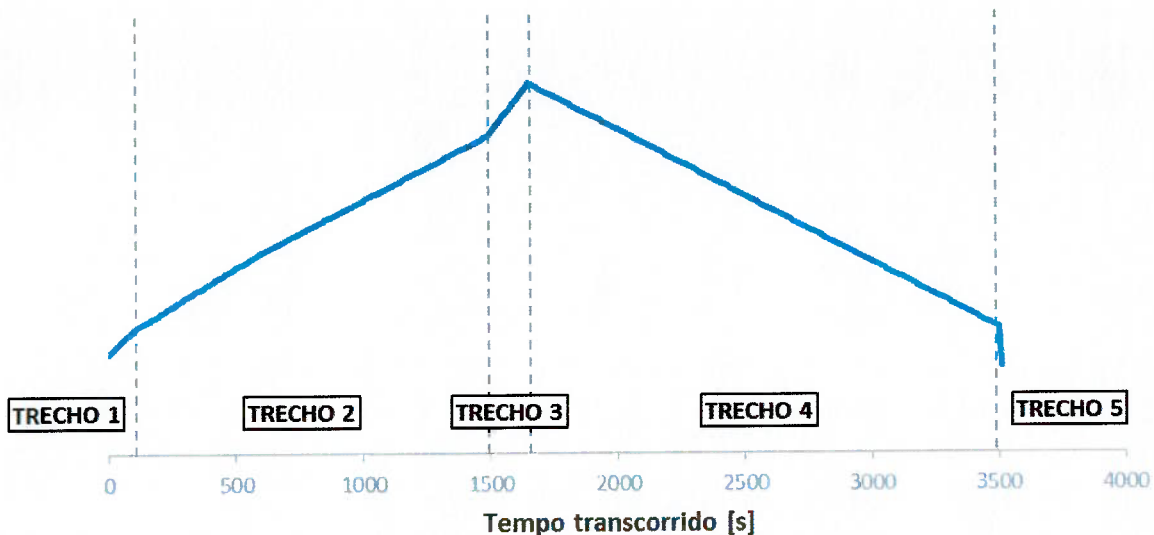


Figura 4-1: Variação da pressão de superfície com a variação geométrica do poço.

Tabela 4-2: Descrição da posição do kick por trechos de circulação.

Trecho	Descrição
1	Kick encontra-se no trecho aberto do poço. Há variação do espaço anular com a variação do diâmetro da coluna de perfuração (comando e <i>drillpipe</i>)
2	O kick é circulado ao longo do trecho revestido do poço. Neste trecho não há variação do espaço anular.
3	Topo do kick atinge a linha de choke. No final deste trecho, o kick atinge a válvula de choke dando início à produção de gás. O pico observado corresponde ao momento em que se inicia a produção de gás.
4	Produção de gás. O kick preenche toda a linha de choke e também se encontra no espaço anular do poço.
5	Restante do kick encontra-se totalmente na linha de choke. Ao final deste trecho a pressão estabiliza-se, igualando-se a SIDPP.

4.2.1 Análise 1

SICP - pressão de superfície

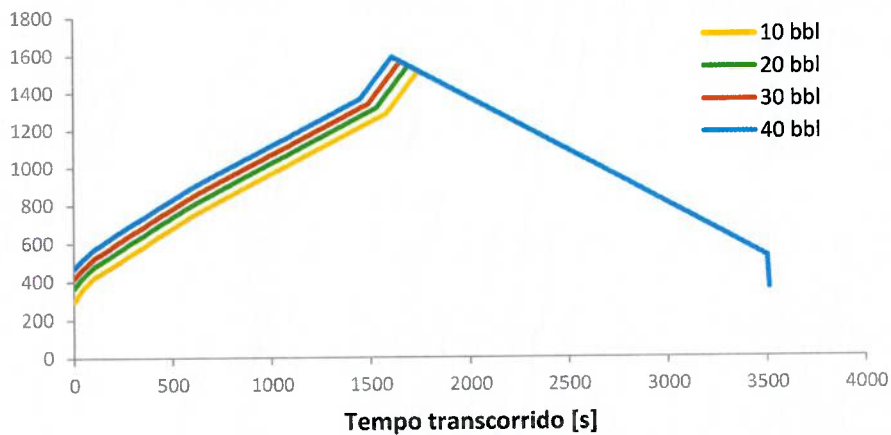


Figura 4-2: Influência do ganho de tanque na pressão de superfície durante a circulação do kick.

O ganho no tanque representa indiretamente o volume de fluido invasor no fundo do poço. Está diretamente ligado ao tempo transcorrido entre o início da invasão e a sua detecção, seguida pelo fechamento do poço.

Ao detectar-se o kick, os procedimentos de acionamento de BOP e fechamento do poço devem ser realizados da maneira mais rápida possível, evitando-se que a bolha chegue à superfície e provoque um *blowout*.

Pela figura (4-2), gráfico gerado a partir do simulador, nota-se a influência direta do volume de kick na pressão medida na superfície durante a circulação. As curvas permanecem paralelas, pois todas as demais variáveis são mantidas constantes. A principal diferença entre elas é o comprimento do kick, o que implica diretamente na diferença das pressões.

Quanto maior é o ganho no tanque, maiores são as pressões no choke manifold, o que torna a operação ainda mais perigosa. Deste modo, é fundamental no controle de poço a detecção do kick no menor tempo possível.

4.2.2 Análise 2

SICP - pressão de superfície

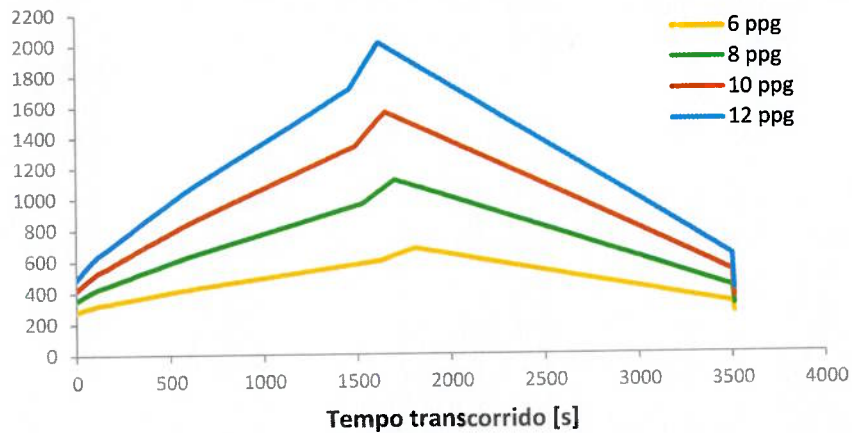


Figura 4-3: Influência da densidade do fluido de perfuração na pressão de superfície durante a circulação do kick.

Parte essencial do projeto de perfuração de um poço, o fluido de perfuração exerce grande influência não somente na estabilidade do poço, mas também no controle do poço quando o kick acontece. As diferentes pressões medidas em superfície estão diretamente ligadas às colunas hidrostáticas do poço.

Pelo gráfico da figura (4-3), observa-se que uma pequena variação na densidade deste fluido implica em uma grande diferença nas pressões medidas em superfície. Além disso, observa-se que quanto mais pesado for o fluido de perfuração, maiores serão as pressões esperadas em superfície e maiores serão os tempos necessários para a bolha atingir o choke manifold, pois a densidade do fluido influencia a velocidade de ascensão da bolha de gás.

4.2.3 Análise 3

SICP - pressão de superfície

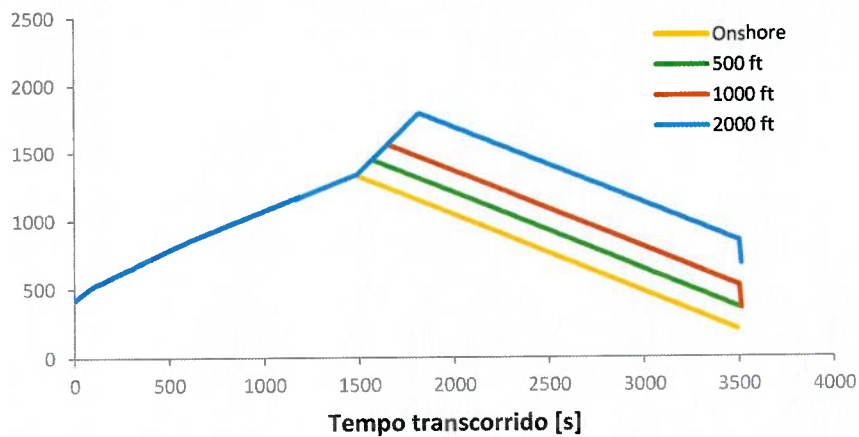


Figura 4-4: Influência da espessura da lâmina d'água na pressão de superfície durante a circulação do kick.

A partir do gráfico da figura (4-4), observa-se o comportamento das curvas de pressão para diferentes profundidades de lâmina d'água. Como, no caso deste simulador, todas as condições de simulação são mantidas constantes, as pressões iniciais da circulação são iguais. Isto ocorre, pois o fluido de perfuração e o volume de kick são iguais em todas as simulações e a coluna de fluido de perfuração "adicionada" com o aumento de lâmina d'água tanto dentro da coluna de perfuração como na linha do choke é compensada.

Em linha com as premissas adotadas para os cálculos, a circulação mostra resultados iguais para todas as simulações até que o kick atinja a profundidade do leito marinho. Como foi assumido um poço idêntico na parte subterrânea para todas as simulações, quanto maior for a profundidade da água, maior será a pressão esperada em superfície.

5 CONCLUSÕES

A partir da revisão bibliográfica realizada, fica evidente a importância do estudo do controle de poço para a segurança nas operações de perfuração. Ao longo dos anos, estudos sobre escoamento e comportamento dos fluidos de perfuração e fluidos da formação levaram à elaboração de modelos permitindo a previsão do comportamento destes fluidos em situações específicas.

Os simuladores de kick permitem a previsão do comportamento das pressões em superfície durante a circulação, o que reduz as chances de ocorrência de acidentes, que poderiam levar a diversas perdas materiais, danos ao meio ambiente e, principalmente, perda de vidas.

Deste modo, foi desenvolvido a partir do escopo inicial do projeto, um simulador simplificado de circulação de kick pelo método do sondador. A partir da utilização do programa desenvolvido, foi possível realizar um estudo sobre a influência de variáveis importantes na operação de circulação.

As variáveis escolhidas para análise foram:

- Ganho no tanque
- Densidade do fluido de perfuração
- Espessura da lâmina d'água

A análise de sensibilidade das variáveis escolhidas permitiu verificar a grande influência das mesmas nas pressões obtidas em superfície durante a circulação. Em especial, a variação da densidade do fluido de perfuração que, mesmo muito pequena, causa um impacto acentuado. Pelo gráfico, o aumento de 1 ppg da densidade provoca um aumento de pressão em superfície de aproximadamente 100 psi, o que a torna uma variável de extrema importância, não só no projeto inicial de perfuração, para evitar-se o kick, mas também no controle do mesmo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bezerra, E. M. (2006). *Estudo do Controle de Poço Considerando-se o Comportamento de Fases da Mistura Gás-Líquido*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Bourgoyne Jr, A., Millheim, K., Chenevert, M., & Young Jr, F. (1986). *Applied Drilling Engineering*. Richardson: SPE.
- Cocian, L. F. (2004). *Manual da Linguagem C*. Canoas: ULBRA.
- de Oliveira, P. C., de Arruda, A. M., & Negrão, A. F. (1987). *Kicks: prevenção e controle*. Petrobras, Petróleo Brasileiro S.A.
- Grace, R. D. (2003). *Blowout and Well Control Handbook*. Burlington: Elsevier Science.
- Griffith, P. (v. 86 de 1964). The Prediction of Low-Quality Boiling Void. *Journal of Heat Transfer*, pp. p. 327-333.
- Hoberock, L. L., & Stanbery, S. R. (1981). Pressure Dynamics in Well During Gas Kicks: Part 2 - Component Models and Results. *Journal of Petroleum Technology*, 12.
- Hoberock, L. L., & Stanbery, S. R. (1981). Pressure Dynamics in Wells During Gas Kicks: Part 1 - Fluid Line Dynamics. *Journal of Petroleum Technology*, 10.
- Ling, K., He, J., & Shen, Z. (2013). *A Rigorous Method to Calculate the Rising Speed of Gas Kick*. Society of Petroleum Engineers, Muscat.
- Nunes, J. O. (2001). *Study of Well Control in Deep and Ultra Deepwaters Drilling Operation*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Sadatomi, M., & Sato, Y. (1982). Two-phase flow in vertical noncircular channels. *International Journal of Multiphase Flow*, 641-655.
- Santos, O. (1982). A Mathematical Model of a Gas Kick When Drilling in Deep Waters. *Golden: Colorado School of Mines*, 76 p.
- Santos, O. (s.d.). *Manual de Treinamento em Controle de Poço*. Petróleo Brasileiro S.A.-PETROBRÁS, SEREC/CEN-NOR.
- Schlumberger. (29 de March de 2014). *Oilfield Glossary*. Fonte: Schlumberger: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/k/kick.aspx>
- Stanbery, S. (1976). *Well Pressure Dynamics Under Impending Blowout Conditions*. Austin: University of Texas at Austin (Doutorado).
- Taitel, Y., Barnea, D., & Dukler, A. (1980). Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas - Liquid Flow in Vertical Tubes. *AIChE J.* v. 26, p. 345-354.

ANEXO I: FLUXOGRAMA DO SIMULADOR

