

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO DE KICK
PARA A PERFURAÇÃO OFFSHORE

Cláudio da Silva Limoeiro

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia do Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Couto

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
Maio de 2011

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO DE KICK
PARA A PERFURAÇÃO OFFSHORE

Cláudio da Silva Limoeiro

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA DO PETRÓLEO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO DO PETRÓLEO.

Examinada por:

Prof. Paulo Couto, Dr. Eng.
Engenharia do Petróleo – POLI/COPPE - UFRJ

Shiniti Ohara, Ph. D.
Devon Energy do Brasil Ltda.

Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, Dr. Eng.
Engenharia do Petróleo –POLI/COPPE –UFRJ

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
Maio de 2011

Limoeiro, Cláudio da Silva

Implementação de um modelo de Kick para a Perfuração Offshore/
Cláudio da Silva Limoeiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola
Politécnica, 2011.

XI, 69 p.: il.; 29,7 cm. Orientador: Paulo Couto

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia do Petróleo,
2011.

Referencias Bibliográficas: p. 37-38.

1. Modelo de Kick 2.Perda de Carga. 3. Método de Diferenças
Finitas. I. Couto, Paulo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Escola Politécnica, Curso de Engenharia do Petróleo. III. Título.

Dedicatória

Dedico o presente trabalho à minha mãe pelos sacrifícios enfrentados e as batalhas vencidas para que eu conseguisse chegar até aqui. É sempre um prazer ser seu filho. E de um modo geral a toda a minha família e amigos pelo suporte durante esta caminhada.

“Dêem-me uma alavanca
e um ponto de apoio e
eu moverei o mundo.”

Arquimedes

Agradecimento

Agradeço ao professor Dr. Paulo Couto pela orientação, confiança e ensinamentos. Aos demais professores que contribuíram para o meu aprendizado e em especial ao coordenador Dr. Alexandre de Castro Leiras Gomes pelos vários conselhos concedidos durante o curso.

Agradeço também ao Dr. Shiniti Ohara, pela paciência infinita no auxílio a este trabalho.

E por fim aos amigos de turma pelas conversas e momentos inesquecíveis vividos.

"Se enxerguei mais longe, foi porque me
apoiei nos ombros de gigantes."

Sir Isaac Newton

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro do Petróleo.

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO DE KICK
PARA PERFURAÇÃO OFFSHORE

Cláudio da Silva Limoeiro

Maio/2011

Orientador: Paulo Couto

Curso: Engenharia do Petróleo

Este trabalho apresenta uma modelagem matemática para a previsão do comportamento da pressão no espaço anular, no fundo do poço e na sapata do revestimento, enquanto um kick de gás adentra um poço. Considerações em relação aos efeitos da geometria de poço, perda friccional de pressão e modelos de escoamento de duas fases foram implementados. Este modelo foi implementado e simulado no software algébrico Mathematica 7.0 alimentado por dados de campo. Por fim este modelo será comparado com outros modelos propostos.

Palavras – chaves: modelo de kick, perda de carga, método de diferenças finitas

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

IMPLEMENTATION OF A KICK MODEL
TO OFFSHORE DRILLING

Cláudio da Silva Limoeiro

May/ 2011

Advisor: Prof. Paulo Couto

Course: Petroleum Engineering

This paper presents a mathematical model to predict the behavior of pressure in the annular, at bottom hole and casing shoe while a gas-kick enters into the well. Considerations regarding effects of well geometry, frictional pressure losses and two-phase flow models have been implemented. This model was implemented and simulated on algebraic software Mathematica 7.0 powered by field data. Finally this model is compared with some proposed kick model.

Keywords: Kick models, pressure losses, method of finite difference

Sumário

Dedicatória	ii
Agradecimento	iii
Lista de Figuras	vii
Nomenclatura	ix
1.Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Metodologia	3
1.3 Objetivo	3
2.Revisão da Literatura	4
3.Desenvolvimento Teórico.....	7
3.1 Modelo do Anular do Poço.....	7
3.2 Pressupostos e Considerações	8
3.3 Equações de Continuidade	8
3.4 Equação de Balanço do Momento	9
3.5 Equações de Estado.....	11
3.6 Modelo do Reservatório de Gás.....	12
3.7 Modelo de fluxo Ascendente de gás	13
3.8 Solução das Equações Diferenciais.....	13
4. Modelagem Numérica e Resultados de Simulações	18
4.1 Programa computacional	18
4.2 Cenário de Estudo.....	18
4.3 Resultados	22
4.4 Comparações dos Resultados.....	27
5. Conclusões e Recomendações.....	32
5.1 Conclusões.....	32
5.2 Recomendações para Futuros Trabalhos	33
Bibliografia.....	35
Anexos	37

Lista de Figuras

Figuras do Capítulo 3

FIGURA 3.1 ESQUEMA DE DIFERENÇAS FINITAS PARA CÉLULA NO ANULAR 15

FIGURA 3.2 FLUXOGRAMA DO PROGRAMA 17

Figuras do Capítulo 4

FIGURA 4.1 PROJETO DE POÇO ESTUDADO 19

FIGURA 4.2 CICLO DE BOMBEIO DO FLUIDO DE PERFURAÇÃO..... 20

FIGURA 4.3 ILUSTRAÇÃO DOS PONTOS NO TRAJETO DO FLUIDO 21

FIGURA 4.4 TABELA DE DADOS UTILIZADOS 22

FIGURA 4.5 PRESSÃO NO FUNDO DO POÇO PARA 30 BARRIS E LDA 500 METROS 23

FIGURA 4.6 PRESSÃO NA SAPATA PARA 30 BARRIS E 500 METROS DE LDA..... 24

FIGURA 4.7 PRESSÃO NO FUNDO DO POÇO PARA 30 BARRIS E 1000 METROS DE LDA 24

FIGURA 4.8 PRESSÃO NA SAPATA PARA 30 BARRIS E 1000 METROS DE LDA..... 25

FIGURA 4.9 PRESSÃO NO FUNDO DO POÇO PARA 30 BARRIS E 2000 METROS DE LDA 25

FIGURA 4.10 PRESSÃO NA SAPATA PARA 30 BARRIS E 2000 METROS DE LDA 26

FIGURA 4.11 PRESSÃO NO FUNDO DO POÇO PARA 1000 METROS DE LDA..... 27

FIGURA 4.12 PRESSÃO NA SAPATA PARA 1000 METROS DE LDA 28

FIGURA 4.13 PRESSÃO NO FUNDO DO POÇO PARA 30 BARRIS DE GANHO DE LAMA..... 29

FIGURA 4.14 PRESSÃO NA SAPATA PARA 30 BARRIS DE GANHO DE LAMA 29

Lista de Tabelas

Tabela 4.1.....	24
-----------------	----

Nomenclatura

Bbl = Barris (unidade americana)

C_d = coeficiente de descarga

C_g = compressibilidade do gás

D_e = diâmetro externo

D_i = diâmetro interno

f_F = fator de atrito de fanning

f_{TP} = fator de atrito bifásico

g = aceleração da gravidade

G_f = gradiente de fratura

G_p = gradiente de poros

H = holdup do líquido

H_f = comprimento da formação

H_{ca} = altura do revestimento

H_{dc} = altura do drillcollar

H_{dp} = altura do drillpipe

H_{oh} = altura do poço aberto

H_{ri} = altura do riser

ID_{ca} = diâmetro interno do revestimento

ID_{dc} = diâmetro interno do drillcollar

ID_{dp} = diâmetro interno do drillpipe

ID_{oh} = diâmetro interno do poço

ID_{ri} = diâmetro interno do riser

k = permeabilidade

LDA = Lâmina d'água

M = massa do gás

N_{bj} = número de furos da broca

N_{RE} = número de Reynolds

N_{RCRIT} = número de Reynolds Crítico

OD_{bj} = diâmetro do furo da broca

OD_{dc} = diâmetro externo drillcollar

OD_{dp} = diâmetro externo drillpipe

P= Pressão

P_{std} = Pressão padrão

q_b = vazão de líquido

q_{br} = vazão reduzida de líquido

q_l = vazão de líquido

q_g = vazão de gás

q_{g,std} = vazão de gás padrão

R = constante de avogrado

r_w = raio do poço

T = temperatura

T_{bh} = Temperatura no fundo do poço

T_{ml} = Temperatura no leito marinho

T_{std} = temperatura em condições de superfície

ρ_m = densidade do líquido

ρ_g = densidade do gás

ρ_{ns} = densidade da mistura

\bar{v} = velocidade média

v_g = velocidade do gás

v_m = velocidade da mistura

v_l = velocidade do líquido

v_{ls} = velocidade superficial do líquido

v_{gs} = velocidade superficial do gás

ξ = rugosidade média

θ_{300} = leitura no viscosímetro à 300 rpm

θ_{600} = leitura no viscosímetro à 600 rpm

μ_g = viscosidade do gás

μ_l = viscosidade do líquido

μ_m = viscosidade da mistura

μ_p = viscosidade plástica

1.Introdução

A indústria do petróleo vem sendo desafiada, cada vez mais, pelos desafios técnicas impostas pelas novas descobertas. Ao longo dos anos esta indústria vem ampliando suas fronteiras tecnológicas buscando a produção de acumulações de hidrocarbonetos localizados em cenários offshore desfavoráveis. Em 1960, a exploração estava limitada à profundidade de pouco mais de 45 metros. Hoje em dia, profundidades acima de 400 metros são consideradas águas profundas e acima de 1500 metros são consideradas como ultra-profundas [1].

A perfuração em águas ultra-profundas é uma realidade no cenário atual. No entanto este tipo de perfuração possui problemas especiais, tais como baixo gradiente de fratura, alta perda de carga nas linhas de choke – linha de estrangulamento – utilizada para circular o kick–, com relação a margem de segurança do riser temos perfuração em overbalanced (perfuração utilizando peso de lama acima do necessário para se manter a coluna hidrostática no caso de desconexão), e também temos problemas de desconexão emergencial. Dentre os vários fatores que influenciam o sucesso da operação nesse cenário, faz-se necessário: um projeto de poço bem detalhado; plano de perfuração enquanto se perfura para evitar kicks ou novos kicks; analisar possíveis perdas de circulação e a possibilidade de underground blowout (fluxo descontrolado de hidrocarbonetos subterrâneo), o qual pode acarretar enormes prejuízos **financeiro**, **humano** e **ambiental**. Portanto, um cuidado especial deve ser aplicado tanto no momento do planejamento quanto na perfuração destes tipos de poços [2]

Sendo assim, mostra-se o conceito de Kick Tolerance (tolerância ao kick), uma ferramenta muito poderosa, que pode ser usada durante o projeto do poço, junto com o gradiente da formação e o gradiente de fratura, para determinar as profundidades as

quais o revestimento deve ser assentado. A tolerância ao kick pode ser usada também durante a perfuração para estimar o risco da formação mais frágil fraturar. Se um kick for tomado e circulado, o rompimento desta formação pode dar início a um fluxo descontrolado de hidrocarbonetos subterrâneo, ou a um blowout. [2]

Este trabalho consiste no estudo do perfil de escoamento de um fluido de duas fases em um poço sob influência de um kick de gás, tendo como objetivo prever o comportamento da pressão, frações gás/líquido e velocidade do líquido ao longo do seu espaço anular. Por fim analisa-se o comportamento da pressão na sapata do revestimento e no fundo do poço.

1.1 Motivação

A exploração em águas profundas e a aplicação de conceitos relativos a esta atividade vem se alterando ao longo dos anos. No Brasil, particularmente, a grande maioria da produção nacional, cerca de 75%, vem da região da bacia de Campos, no norte fluminense, com cerca de 70% das reservas localizadas em águas profundas e ultra-profundas [3]. As operações de perfuração no Brasil foram alavancadas pela descoberta do campo de Albacora, em 1984, numa profundidade que varia entre 304 metros (1000 pés) à 1981 metros (6500 pés). Outro campo gigante descoberto foi Marlim que teve como descobridor o poço RJS-219A, a uma profundidade de 853 metros (2750 pés) de lâmina d'água. Sua produção foi iniciada em 1994 quando o poço Marlin – 4 foi completado.[3] Dois anos mais tarde, em 1996, o campo de Roncador, outro campo gigante em águas ultra-profundas, 1524 metros (5000 pés) à 3048 (10000 pés) metros de lamina d'água, foi descoberto [4]. O recorde brasileiro de lâmina d'água é detido pela Shell com o poço 1- Shell-14-RJS, em 2003 com uma profundidade de lâmina d'água de 2887 metros.

Portanto é preciso que haja um controle preciso nos parâmetros de perfuração aliado a um projeto bem detalhado das operações envolvidas nos cenários expressados acima. Sendo assim, uma preocupação sobre essas operações é o controle de kicks e prevenção de blowouts. [2]

1.2 Metodologia

Implementar o modelo de kick proposto por OHARA [2], que foi previamente desenvolvido em FORTRAN, no software MATHEMATICA 7.0. Para isso serão utilizadas as equações de continuidade para o líquido e para o gás e a equação do balanço de momento para a mistura líquido-gás. Utilizando, também, dados de campo, partindo da condição inicial na iminência de um kick enquanto se perfura uma formação.

1.3 Objetivo

O objetivo da modelagem matemática é obter as seguintes propriedades ao longo da região do anular: holdup do líquido (fração de líquido); velocidade do líquido; velocidade do gás; densidade do gás e a pressão. Obtidas estas propriedades, Identificar-se-á as influências do máximo valor permitido de ganho de tanque (Pit Gain) e da profundidade de lamina d'água no comportamento da pressão tanto na sapata quanto no fundo do poço. Este comportamento também será comparado com os resultados obtidos por OHARA [2].

2.Revisão da Literatura

Antigos modelos computacionais de simulação de kick eram limitados pelo pressuposto de que o gás entra no poço como uma bolha de forma irregular e se mantêm como uma bolha contínua por todo o espaço anular até a superfície.

O primeiro modelo matemático de kick foi proposto por LEBLANC e LEWIS [5] em 1968. O modelo desconsidera perdas de pressão por fricção no anular e esta região possui uma capacidade uniforme, o gás é insolúvel na lama de perfuração e possui a mesma velocidade que a lama.

RECORDS [6], em 1972, incorporou o efeito da perda de pressão por fricção no escoamento no anular. Embora houvesse uma melhoria em relação aos modelos anteriores, este modelo apresentava resultados que não correspondiam corretamente aos dados de campo.

HOBEROCK e STANBERRY [7], [8] apresentaram um modelo que simulou o comportamento dinâmico de um escoamento, incorporando as equações do momento para descrever a pressão numa linha rígida de transmissão vertical com uma seção de área constante. Eles ajustaram as propriedades de uma região de escoamento bifásico com propriedades médias, de tal modo que eles puderam considerar escoamento bifásico como escoamento monofásico. Eles, também, aplicaram as correlações de GRIFFITH [9] e regime de escoamento de bolha.

SANTOS [10] apresentou um modelo matemático para circulação de kick em águas profundas considerando o escorregamento entre gás e fluido de perfuração, perdas de pressão por fricção na região bifásica e fração de vazios. O modelo também considera o regime de bolhas na região bifásica e geometria do poço constante. Santos utilizou o método de ORKISZEWSKI [11] para computar as perdas de pressão por fricção na região bifásica. Considerando o modelo reológico de Lei de Potência para a

lama. De acordo com os resultados, a densidade do gás, o gradiente geotérmico e o diâmetro mínimo das bolhas de gás causam um efeito mínimo na circulação do kick. Por outro lado, variáveis como a fração inicial de gás, geometria do poço, profundidade da lâmina d'água, diâmetro da linha de choke e parâmetros reológicos da lama exercem um efeito moderado na circulação. E também concluiu que o volume inicial de kick e a massa específica do fluido de perfuração exercem grande efeito durante a circulação do kick.

NICKENS [12] apresenta um modelo baseado nas equações de conservação de massas do gás e da lama, do momento (mistura gás-lama), com uma correlação empírica que associa a velocidade do gás com a velocidade da mistura adicionado o fator de escorregamento entre as fases, além das equações de estado para a lama e para o gás. O modelo também considera os efeitos da geometria do poço, coluna de perfuração, broca, bomba de lama, e do acoplamento entre o poço aberto e o reservatório.

PODIO e YANG [13] propuseram um simulador de controle de poço para com características similares de modelos anteriores [12], com método diferente de solução das equações diferenciais. Ao invés de uma malha fixa, utilizou-se a técnica de fronteira móvel.

NEGRÃO e MAIDLA [14] modelaram um kick de gás em águas profundas aplicando correlações bifásicas para o fluxo vertical da lama de perfuração e da mistura de gás. Este modelo pode prever a pressão ao longo da linha de choke durante o controle de kick. Utilizou a correlação de BEGGS e BRILL [15] para computar a perda de carga por fricção na região bifásica.

Foi proposto um modelo matemático para controle de kick in poços horizontais [16], baseado em modelos anteriores [12]. O modelo prevê o comportamento da pressão no espaço anular durante a circulação do kick no poço. O modelo mostrou que poços

horizontais possuem valor maior de kick tolerance durante o período de shut in que os poços verticais. Isto permite concluir que há uma menor probabilidade de fraturar no período de shut in num poço horizontal.

Mais tarde, ROMMETVEIT e VEFRING [17] apresentaram testes de performance realizados com o simulador de kick que considerava a maioria dos efeitos físicos relacionados a circulação de kick bem como aos fluidos de perfuração de base óleo e base água. Os dados de superfície e de fundo de poço foram obtidos em Ullandhaug 2 poço de teste, Noruega, com 60° graus de inclinação e 2042 metros (6700 pés) de profundidade de poço.

OHARA [2] desenvolveu um modelo matemático para controle de kick em poços localizados em águas profundas com uma formulação similar a estudos anteriores [12]. O programa foi dividido em sub-modelos: anular do poço, reservatório de gás, linha de choke e escoamento em região bifásica. O desenvolvimento do escoamento de gás natural dentro do anular foi baseado em dados experimentais do poço de teste da Louisiana State University.

3.Desenvolvimento Teórico

3.1 Modelo do Anular do Poço

O modelo para o poço inclui o escoamento bifásico ascendente no anular (poço/coluna de perfuração, revestimento/coluna de perfuração e riser/coluna de perfuração). O presente modelo é baseado no utilizado por OHARA [2] originalmente proposto por NICKENS [12]. SANTOS [16] e NEGRÃO [14] utilizaram uma abordagem similar, mas o programa desse é restrito a somente duas seções de anular.

O presente modelo é numérico com procedimentos de iterações para computar o perfil de velocidade de escoamento, distribuição de pressão e fração de gás/líquido nas regiões do anular, a cada instante de tempo, para uma taxa de fluxo constante de vazão de lama, e é baseado em:

- Equações de balanço de massa para o líquido e para o gás;
- Equação de balanço do momento para a mistura líquido-gás;
- Equações de estado para o líquido e para o gás;
- Geometria variável do anular, com a coluna de perfuração de forma concêntrica;
- Fluido de perfuração base água;
- Fluxo radial proveniente do reservatório segundo a lei de Darcy.

3.2 Pressupostos e Considerações

Estudos anteriores demonstraram que se a região com gás for considerada como um fluxo pistonado ou de bolha única, perde-se considerável precisão nos resultados da modelagem. Resultados mais precisos são obtidos quando esta região é modelada como sendo uma região bifásica [16]. Sendo assim, este trabalho assumirá que a região de kick de gás é uma mistura bifásica de gás e fluido à base água escoando sob condições transientes. Modelou-se esta região através da correlação de BEGGS e BRILL [15] que considera características importantes do escoamento bifásico, como velocidade de escorregamento, canalização e distribuição da concentração do gás dentro do poço, holdup do líquido e também o fator de fricção bifásico.

3.3 Equações de Continuidade

As equações de continuidade são fundadas no princípio da conservação de massa. Sob condições de fluxo transiente, a equação de continuidade para a fase líquida é dada por:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(v_l H)}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Onde o líquido holdup H é definido como:

$$H = \frac{\text{Volume de líquido no segmento anular}}{\text{Volume do segmento anular}} \quad (3.2)$$

E para a fase de gás temos:

$$\frac{\partial[\rho_g(1-H)]}{\partial t} + \frac{\partial[v_g \rho_g(1-H)]}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

3.4 Equação de Balanço do Momento

A equação em questão é baseada na segunda lei de Newton [18], a qual atesta que a soma de todas as forças atuando em um sistema é igual à taxa de variação do momento deste sistema. Para o escoamento bifásico a equação de balanço de momento é dado por:

$$\frac{\partial [v_l \rho_l H + (v_g \rho_g (1-H))]}{\partial t} + \frac{\partial [v_l^2 \rho_l H + (v_g^2 \rho_g (1-H))]}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^{elev} + \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^{fric} = 0 \quad (3.4)$$

Onde $\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)$ é o gradiente de pressão.

O termo de elevação ou também chamado gradiente de pressão hidrostática é fornecido por:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^{elev} = g[\rho_l H + \rho_g (1-H)] \quad (3.5)$$

Para o caso de escoamento monofásico, o termo de fricção é calculado pelas equações utilizadas por BOURGOYNE et al. [19] . Essas equações serão utilizadas em cada seção do poço.

Sendo assim, a equação para a perda de carga depende, a priori, do tipo de escoamento e da região onde este ocorre. O tipo de escoamento é definido pelo valor do número de REYNOLDS [20] e a região pela geometria do espaço a ser percorrido.

A fórmula para a perda de circulação é a seguinte:

Para escoamento laminar:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^{fric} = \frac{\mu \bar{v}}{\pi d^2} \quad \text{escoamento no duto} \quad (3.6)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^{fric} = \frac{\mu \bar{v}}{\pi (d_e - d_i)^2} \quad \text{escoamento no anular} \quad (3.7)$$

Para escoamento turbulento:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^{fric} = \frac{f \rho \bar{v}^2}{d} \quad \text{escoamento no duto} \quad (3.8)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^{fric} = \frac{f \rho \bar{v}^2}{(d_e - d_i)} \quad \text{escoamento no anular} \quad (3.9)$$

Para o caso bifásico será utilizado a correlação de BEGGS E BRILL [15]. Onde o gradiente de pressão por fricção é calculado por:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)^{fric} = \frac{f_{tp} \rho_{ns} v_m^2}{2d} \quad (3.10)$$

Onde a velocidade da mistura é definida como:

$$v_m = v_l * H + v_g (1 - H) \quad (3.11)$$

E a densidade bifásica é definida como:

$$\rho_{ns} = \rho_l \lambda + \rho_g (1 - \lambda) \quad (3.12)$$

E o fator de atrito bifásico é definido como:

$$f_{tp} = f_F \cdot e^s \quad (3.13)$$

Onde temos que o fator f_F é obtido a partir da correlação empírica de COLEBROOK [21], que é definida como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left(0.269 * \frac{\epsilon}{d} + \frac{1.255}{N_{RE} \sqrt{f}} \right) \quad (3.14)$$

E a razão do atrito bifásico entre escorregamento e não escorregamento e^s é calculado como:

$$s = \frac{\ln \frac{\lambda}{H^2}}{-0.0523 + 3.182 \ln \frac{\lambda}{H^2} - 0.8725 \left[\ln \frac{\lambda}{H^2} \right]^2 + 0.01853 \left[\ln \frac{\lambda}{H^2} \right]^4} \quad (3.15)$$

Onde temos que o holdup líquido de não escorregamento é definido como:

$$\lambda = \frac{q_l}{q_l + q_g} \quad (3.16)$$

Se $\frac{\lambda}{H^2}$ for maior que 1.2 ou menor que 1 então o expoente s é calculado a partir de:

$$s = \ln \left(2.2 \frac{\lambda}{H^2} - 1.2 \right) \quad (3.17)$$

3.5 Equações de Estado

Para o fluido de perfuração utilizar-se-á o conceito de fluido incompressível, o fluido utilizado no modelo será fluido à base-água:

$$\rho_l = \text{constante} \quad (3.18)$$

E para a densidade do gás, a partir da equação de estado para um gás ideal é dada por:

$$\rho_g = \frac{P * M}{R * T} \quad (3.19)$$

3.6 Modelo do Reservatório de Gás

Como durante o projeto de poço, ou até mesmo durante a perfuração, muito pouco se sabe sobre as propriedades do reservatório não se faz necessário um modelo detalhado sobre o reservatório [2]. Assim, no simulador proposto está inserido o modelo de THOMAS et. al. [22], que em 1982 introduziram o uso da seguinte equação:

$$q_{g\ std} = \frac{\pi k h}{\mu_g} * \frac{T_{std}}{P_{std} T} * \frac{(P_e^2 - P_{wf}^2)}{\text{Log}\left(\frac{4kt}{c_g * r w^2 * \gamma * \mu_g * \phi}\right)} \quad (3.20)$$

A solução aproximada da equação de difusividade (3.20) requer o pressuposto de que a taxa de fluxo seja constante. Como, durante um kick, a pressão de fundo do poço e a taxa de fluxo de gás variam, esse pressuposto não é verdadeiro. NICKENS [12] havia feito uma singela modificação na equação 3.20. Onde dividiu-se a formação em segmentos axiais de espessura hi iguais a taxa de penetração (ROP) multiplicado pelo passo de tempo. Após o procedimento cada segmento flui independentemente dos outros. Como resultado a taxa de fluxo total é então:

$$q_g = \sum_{i=0}^{N(t)} q_{gi} \quad (3.21)$$

Onde N(t) é o numero de segmentos no instante t. Esta modificação remove a aproximação que o fluxo de gás é axialmente simétrico.

Implicitamente, temos que o reservatório estende-se até o infinito. Na maioria das situações de controle de kick, este pressuposto é aceitável porque o tempo de fluxo do gás é curto sendo assim as fronteiras do reservatório não são afetadas.

3.7 Modelo de fluxo Ascendente de gás

A velocidade do gás enquanto na região anular será obtida pela correlação empírica obtida por OHARA [2] usando dados disponíveis de experimentos com um poço de 6000 pés usando fluido de perfuração e gás natural. A correlação proposta é a seguinte:

$$v_g = 1.425v_M + 0.2125 \quad (3.22)$$

Onde

$$v_M = v_{ls} + v_{gs} \quad (3.23)$$

3.8 Solução das Equações Diferenciais

A solução das equações diferenciais da seção 3.1 é obtida usando o método de diferenças finitas. Várias formulações podem ser utilizadas para solucionar as equações diferenciais por este método. Utilizar-se-à a formulação totalmente implícita com uma malha fixa no espaço para afastar a possibilidade de problemas de convergência [2] [16]. O caminho do fluxo será dividido em um número finito de células.

A figura 3.1 ilustra o esquema da aplicação de diferenças finitas em uma célula no anular. O Ponto 1 representa as propriedades do fluxo (velocidades do gás e líquido, holdup do líquido, pressão e densidade do gás) no instante temporal anterior para fronteira inferior. Na seqüência, o ponto 2 refere-se as propriedades no instante temporal anterior mas desta vez para a fronteira superior. E o ponto 3, por sua vez, representa as propriedades do fluxo no instante atual ou no novo instante de tempo para a fronteira inferior. As propriedades são conhecidas nos pontos 1,2,3 e as aproximações por diferenças finitas são usadas para computar as propriedades no ponto 4 – fronteira

superior da célula no instante de tempo atual -. As seguintes aproximações [2] são utilizadas para as equações da seção 3.1.

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{U_4 - U_3}{\Delta z} \quad (3.24)$$

E o termo derivado no espaço é aproximado por:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{U_4 - U_3 + U_2 - U_1}{2\Delta t} \quad (3.25)$$

Onde U é uma função de z e t. Substituindo estas aproximações nas equações 3.1 e 3.3, a formulação de diferenças finitas para a equação da continuidade, torna-se para o líquido:

$$\frac{(v_l \rho_l H)_4 - (v_l \rho_l H)_3}{\Delta z} + \frac{(\rho_l H)_4 - (\rho_l H)_3 + (\rho_l H)_2 - (\rho_l H)_1}{2\Delta t} = 0 \quad (3.26)$$

E para o gás:

$$\begin{aligned} & \frac{(v_g \rho_g (1-H))_4 - (v_g \rho_g (1-H))_3}{\Delta z} + \\ & + \frac{(\rho_g (1-H))_4 - (\rho_g (1-H))_3 + (\rho_g (1-H))_2 - (\rho_g (1-H))_1}{2\Delta t} = 0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

A formulação para a equação do balanço do momento para o termo derivado no tempo é a própria equação 3.25, mas para o termo derivado no espaço temos a seguinte modificação:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{U_4 - U_3 + U_2 - U_1}{2\Delta z} \quad (3.28)$$

Substituindo a aproximação 3.28 na equação 3.4 temos:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2\Delta z} \left\{ [v_g^2 \rho_g (1-H)]_4 + [v_g^2 \rho_g (1-H)]_2 - [v_g^2 \rho_g (1-H)]_3 - [v_g^2 \rho_g (1-H)]_1 + \right. \\
 & + (v_l^2 \rho_l H)_4 + (v_l^2 \rho_l H)_2 - (v_l^2 \rho_l H)_3 - (v_l^2 \rho_l H)_1 \left. \right\} + \frac{1}{2\Delta t} \left\{ [v_g \rho_g (1-H)]_4 + \right. \\
 & + [v_g \rho_g (1-H)]_3 - [v_g \rho_g (1-H)]_2 - [v_g \rho_g (1-H)]_1 + (v_l \rho_l H)_4 + (v_l \rho_l H)_3 - \\
 & \left. (v_l \rho_l H)_2 - (v_l \rho_l H)_1 \right\} - \frac{P_{i-1} - P_i}{\Delta z} - \left(\frac{\Delta P}{\Delta z} \right)^{elev} + \left(\frac{\Delta P}{\Delta z} \right)^{fric} = 0 \quad (3.29)
 \end{aligned}$$

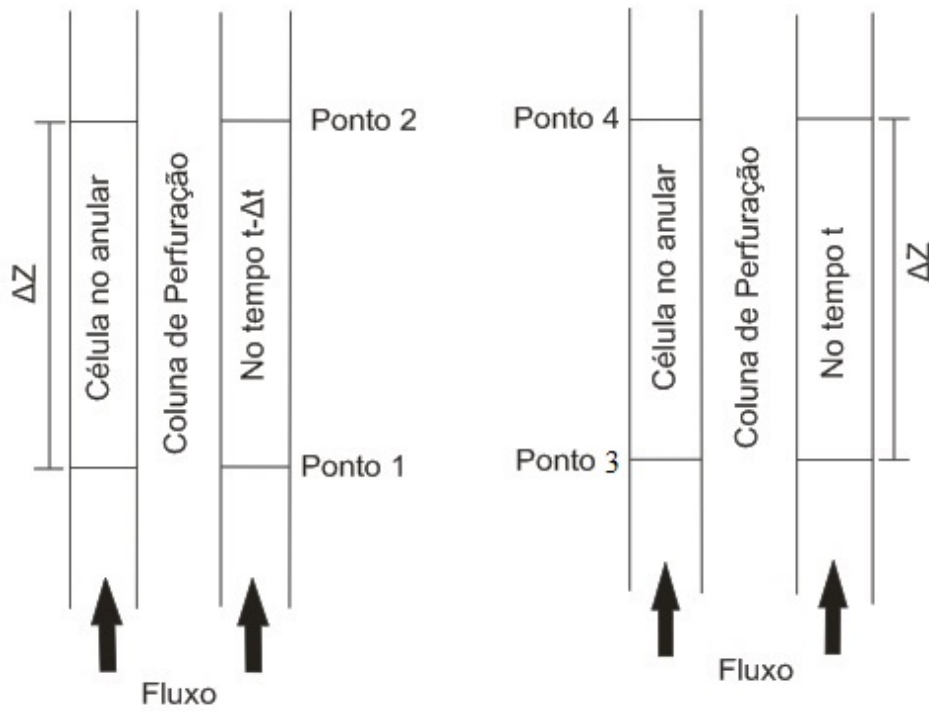
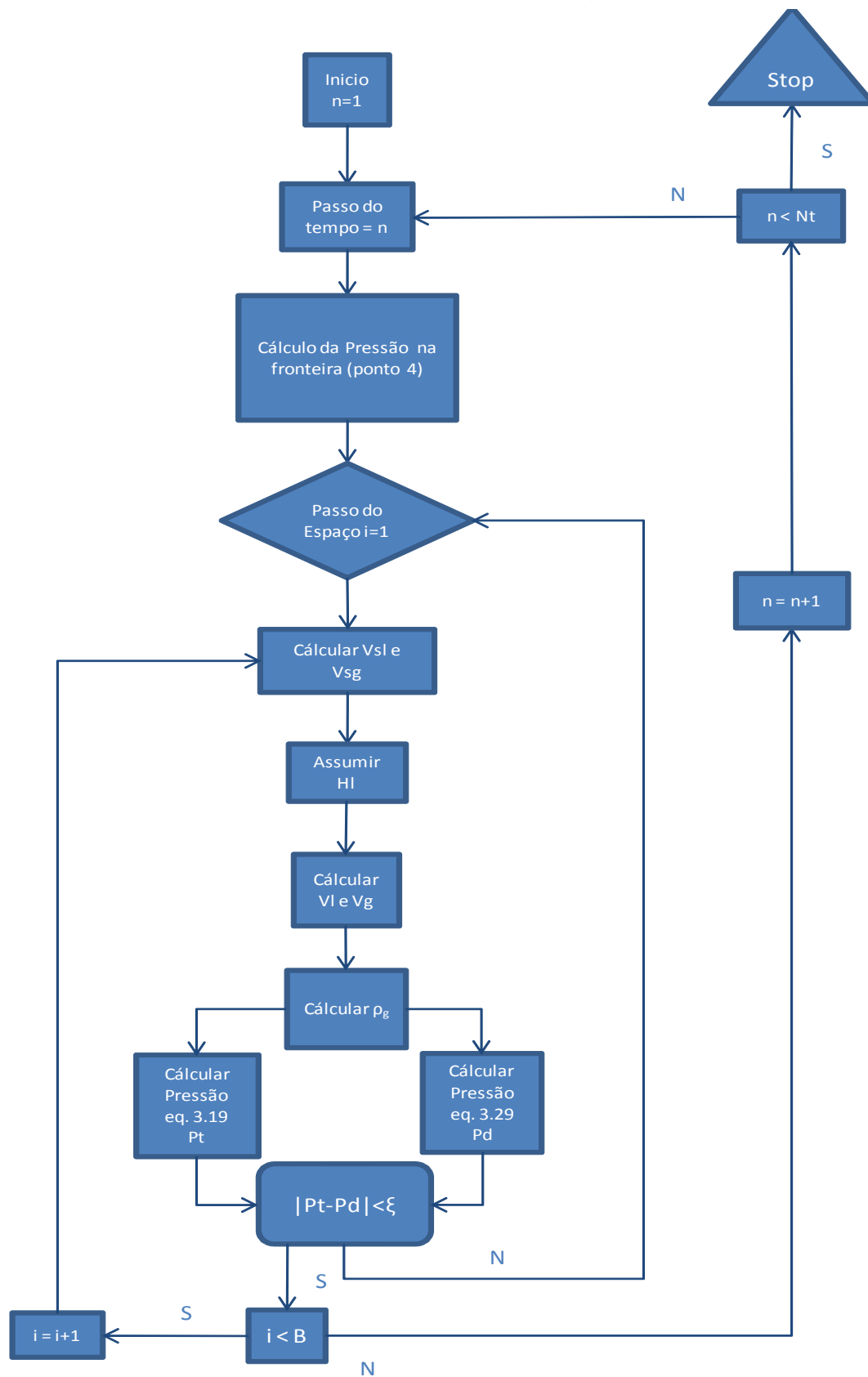


Figura 3.1Esquema de diferenças finitas para célula no anular [17].

O procedimento de discretização é aplicado somente na região bifásica. No primeiro instante de tempo somente há uma célula, no segundo seguinte haverá duas e assim por diante. Em cada instante de tempo o processo inicia-se na base da célula e termina no topo coincidindo com o contorno superior da região bifásica. Com este procedimento pode-se calcular a pressão em qualquer posição e instante de tempo.

O sistema de equações compõe um sistema não linear com cinco incógnitas: pressão, velocidades do líquido e do gás, densidade do gás e holdup do líquido. Com a solução deste sistema, todas as incógnitas serão função do tempo e da posição ao longo do poço. Entretanto a solução não é trivial. Soluções analíticas não estão disponíveis, e soluções numéricas necessitam de processos iterativos [2], [16]. O seguinte procedimento para cálculo das propriedades do escoamento bifásico é utilizado:

- 1) Assumir um valor inicial do Holdup do líquido para o ponto 4.
- 2) Calcular a velocidade do líquido usando a equação 3.26 para o ponto 4.
- 3) Calcular a velocidade do gás usando a correlação empírica (3.22) para o ponto 4.
- 4) Calcular a densidade do gás usando a equação 3.27 para o ponto 4.
- 5) Calcular a pressão usando a equação 3.19 para o ponto 4.
- 6) Utilizando as propriedades do fluxo, calculadas do passo 1 ao 4, resolver a equação do balanço da mistura (equação 3.29) para a pressão no ponto 4.
- 7) Comparar as pressões calculadas nos passos 5 e 6. Se a diferença entre ambas for menor que um valor arbitrário, pare o procedimento. Caso contrário assumir outro valor para o holdup do líquido e repetir o processo até que haja convergência.



3.2 Fluxograma do programa

4. Modelagem Numérica e Resultados de Simulações

Os procedimentos para o cálculo do perfil de pressão no espaço anular, conforme explicado no capítulo três, foram implementados no software MATHEMATICA 7.0 e serão descritos neste capítulo. O programa desenvolvido será comparado com os resultados obtidos pelo modelo proposto por OHARA [2].

4.1 Programa computacional

O programa foi desenvolvido utilizando o software MATHEMATICA 7.0, aplicando o desenvolvimento teórico já foi descrito previamente descrito no capítulo 3. O programa simulará o cenário desde a iminência de se tomar um kick – o gás adentra o poço, misturando-se com o fluido de perfuração bombeado – até o momento que o reservatório pressuriza o poço – quantidade de gás entra no poço devido a diferença entre as pressões no fundo do poço e do reservatório .

A região bifásica é dividida em células, onde o usuário pode controlar o tamanho ou volume da célula. Normalmente uma célula com volume de um ou dois barris é adequado, entretanto com um volume de 10 barris o tempo computacional é bem menor. Na realidade há uma relação entre tamanho da célula, tempo computacional e precisão. Uma célula grande permite que o programa rode de forma mais rápida, mas com perda de precisão e em certos casos levando a uma instabilidade do sistema.

4.2 Cenário de Estudo

O cenário utilizado na simulação de kick, inicialmente será o mesmo utilizado por OHARA [2], o qual está ilustrado na figura 4.1. Além disso, a simulação representa um caso utilizando gradiente de fratura de 12 lbm/gal, densidade da lama de 9,8 lbm/gal e pressão de poros de 10,5 lbm/gal. Uma tabela com todos os dados de entrada encontra-

se no ANEXO A. Algumas alterações como variações do máximo valor permitido de ganho de lama e também da lâmina d'água foram simuladas serão comparadas com o objetivo de se ter sua influencia na obtenção das pressões no fundo do poço e também na sapata do revestimento.

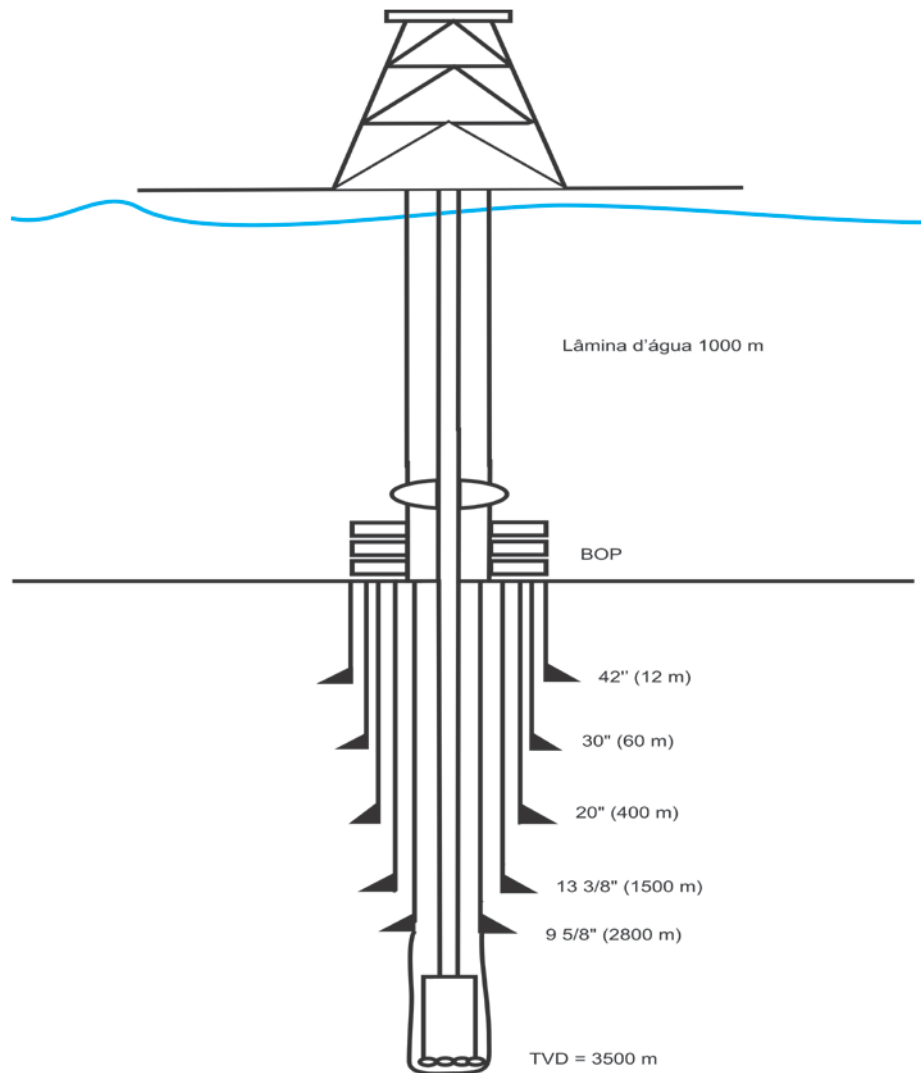


Figura 4.1 Projeto de poço estudado

Ao longo da atividade de perfuração, algumas propriedades são gerenciadas buscando parâmetros para avaliar se a atividade está ocorrendo da forma esperada.

Uma destas propriedades é a pressão, ou seja, a forma como a mesma se comporta na profundidade da formação mais fraca ao longo da circulação do kick.

Após a introdução dos dados de entrada obtém-se, como primeiros resultados o cenário de uma perfuração de poço na iminência de acontecer um kick. Um destes é o gráfico de bombeio do fluido de perfuração (figura 4.2), que indica o ciclo percorrido pelo fluido durante sua utilização antes de ser, algumas vezes, descartado.

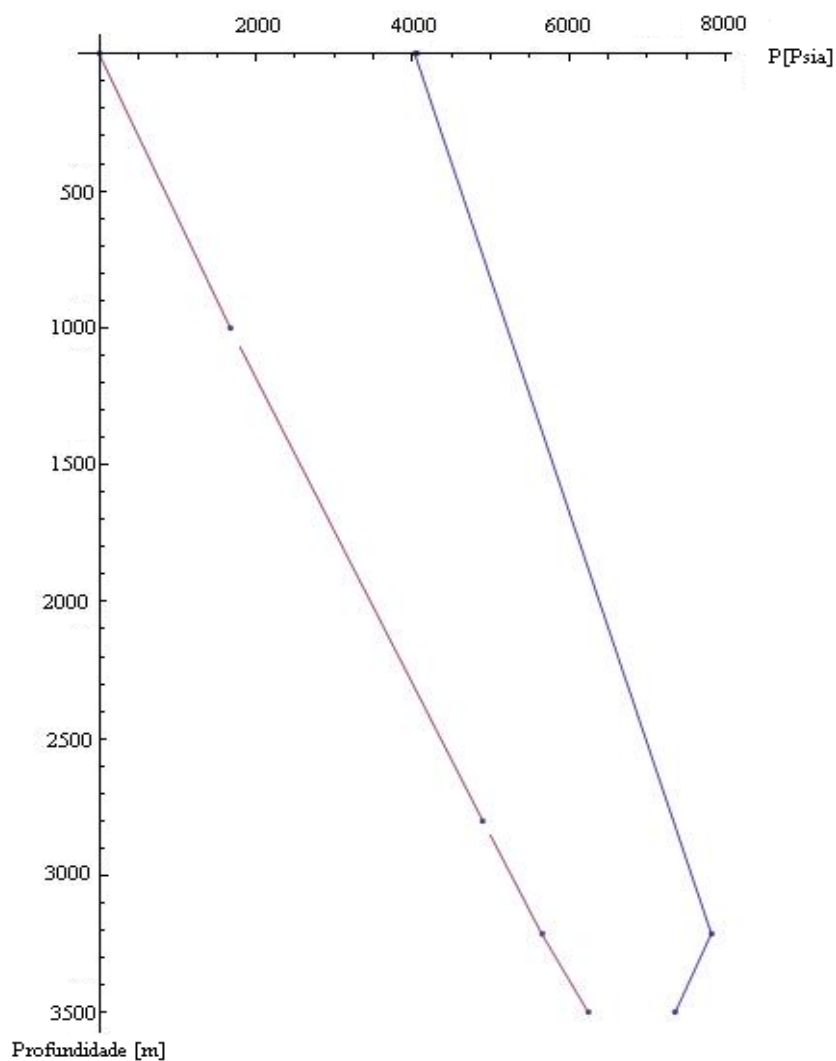


Figura 4.2 Ciclo de bombeio do fluido de perfuração

Onde na figura 4.3 temos a representação de cada ponto do ciclo ao longo do trajeto do fluido.

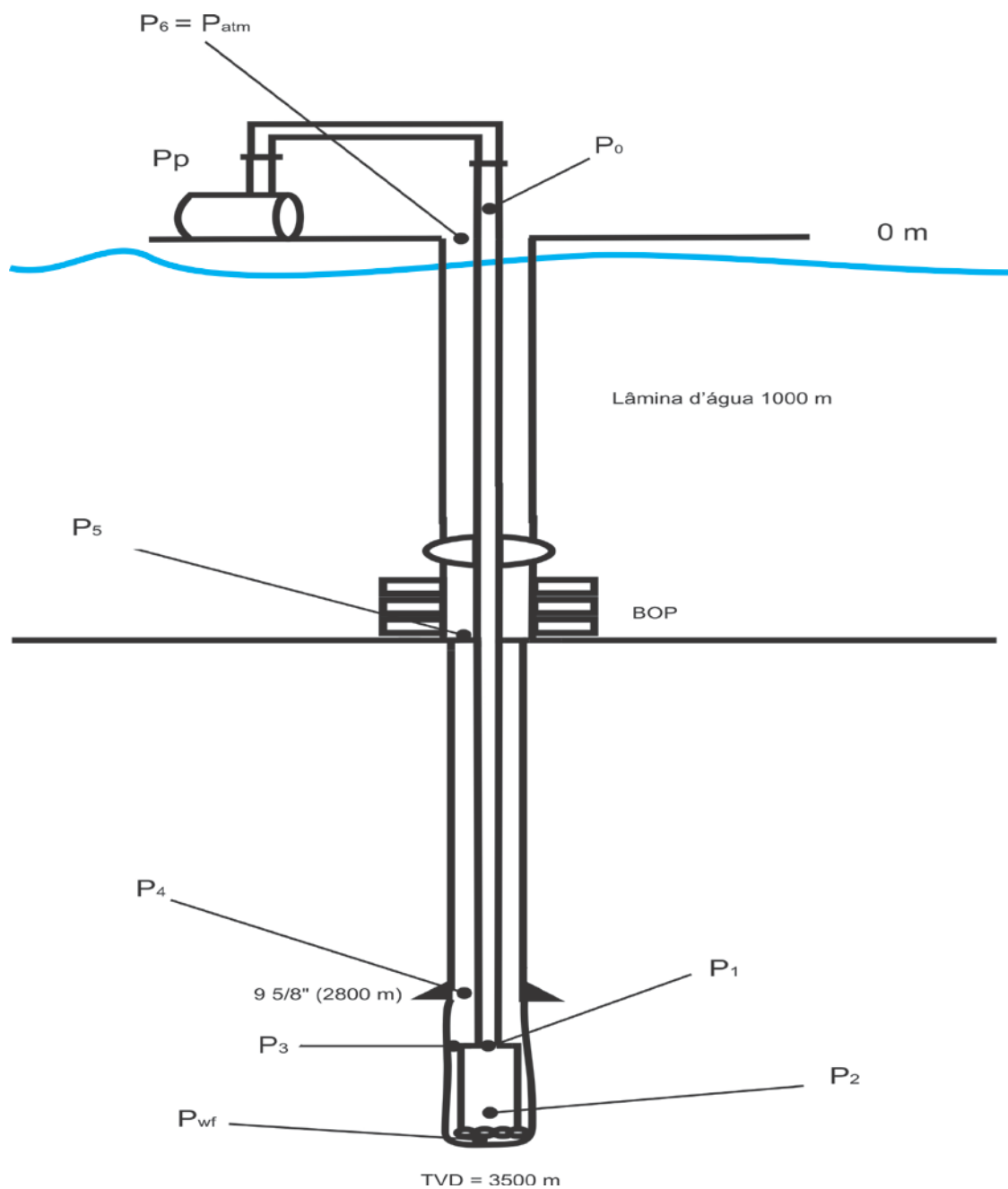


Figura 4.3 Ilustração dos pontos no trajeto do fluido

4.3 Resultados

O primeiro caso simulado é o cenário ilustrado pela figura 4.1. Onde todos os dados utilizados encontram-se na figura 4.4.

	Parameter	API Units	SI Units	Abs. Value
1	Pstd	14.7*PSI	101352.9*Pascal	Pstd -> 101352.9
2	Tstd	520.*Rankine	288.88*Kelvin	Tstd -> 288.88
3	Tml	500.*Rankine	277.77*Kelvin	Tml -> 277.77
4	TBH	680.*Rankine	377.77*Kelvin	TBH -> 377.77
5	k	3.45423155*10 ⁻¹⁰ *Meter ² *Milli	3.45*10 ⁻¹³ *Meter ²	k -> 3.45*10 ⁻¹³
6	φ	0,2	0,2	φ -> 0.2
7	hf	66.*Feet	20.11*Meter	hf -> 20.11
8	Gp	(10.5*Pound)/Gallon	(1258.17*Kilogram)/Meter ³	Gp -> 1258.17
9	Gf	(12.*Pound)/Gallon	(1437.91*Kilogram)/Meter ³	Gf -> 1437.91
10	Hgf	9187.*Feet	2800.19*Meter	Hgf -> 2800.19
11	μg	0.015*Centi*Poise	0.000015*Pascal*Second	μg -> 0.000015
12	dg	0,604	0,604	dg -> 0.604
13	cg	0.0008/PSI	1.16*10 ⁻⁷ /Pascal	cg -> 1.16*10 ⁻⁷
14	M	16	16	M -> 16.
15	Ru	(10.73*Feet ³ *PSI)/(Pound*Rankine)	(8313.24*Meter ³ *Pascal)/(Kelvin*Kilogram)	Ru -> 8313.24
16	Hoh	11483.*Feet	3500.02*Meter	Hoh -> 3500.02
17	Hca	9187.*Feet	2800.19*Meter	Hca -> 2800.19
18	Hri	3281.*Feet	1000.048*Meter	Hri -> 1000.048
19	IDoh	8.5*Inch	0.21*Meter	IDoh -> 0.21
20	IDca	8.755*Inch	0.22*Meter	IDca -> 0.22
21	IDri	18.8*Inch	0.47*Meter	IDri -> 0.47
22	Hdp	10538.*Feet	3211.98*Meter	Hdp -> 3211.98
23	Hdc	11483.*Feet	3500.02*Meter	Hdc -> 3500.02
24	ODdp	5.*Inch	0.127*Meter	ODdp -> 0.127
25	ODdc	6.25*Inch	0.16*Meter	ODdc -> 0.16
26	IDdp	4.28*Inch	0.11*Meter	IDdp -> 0.11
27	IDdc	2.81*Inch	0.07*Meter	IDdc -> 0.07
28	ε	0,00065	0,00065	ε -> 0.00065
29	ODbj	0.4375*Inch	0.011*Meter	ODbj -> 0.011
30	Nbj	3	3	Nbj -> 3.
31	pm	(9.65*Pound)/Gallon	(1156.32*Kilogram)/Meter ³	pm -> 1156.32
32	θ600	53	53	θ600 -> 53.
33	θ300	34	34	θ300 -> 34.
34	μp	19.*Centi*Poise	0.019*Pascal*Second	μp -> 0.019
35	τy	(0.15*PoundForce)/Feet ²	(7.18*Newton)/Meter ²	τy -> 7.18
36	qb	(500.*Gallon)/Minute	(0.031*Meter ³)/Second	qb -> 0.031
37	qbr	(100.*Gallon)/Minute	(0.0063*Meter ³)/Second	qbr -> 0.0063
38	Cd	0,95	0,95	Cd -> 0.95
39	ROP	(20.*Feet)/Hour	(0.00169*Meter)/Second	ROP -> 0.00169
40	ΔPs	23.*PSI	158579.41*Pascal	ΔPs -> 158579.41
41	NRCrit	2100	2100	NRCrit -> 2100.
42	IDch	3.*Inch	0.07*Meter	IDch -> 0.07
43	IDkl	3.*Inch	0.07*Meter	IDkl -> 0.07
44	g	(9.80665*Meter)/Second ²	(9.80665*Meter)/Second ²	g -> 9.80665

Tabela 4.1. Tabela de dados utilizados (dados completos encontram-se no anexo)

Primeiramente, foram feitas simulações variando-se a profundidade da lâmina d'água de 500 a 2000 metros, mantendo as mesmas propriedades do reservatório. A Figura 4.5 mostra o resultado obtido para a pressão no fundo do poço, para o caso de lâmina d'água igual a 500 metros e para a respectiva pressão de poros a esta profundidade. Enquanto que, na figura 4.6 temos o resultado do comportamento da pressão na profundidade da última sapata e a pressão de fratura nesta profundidade.

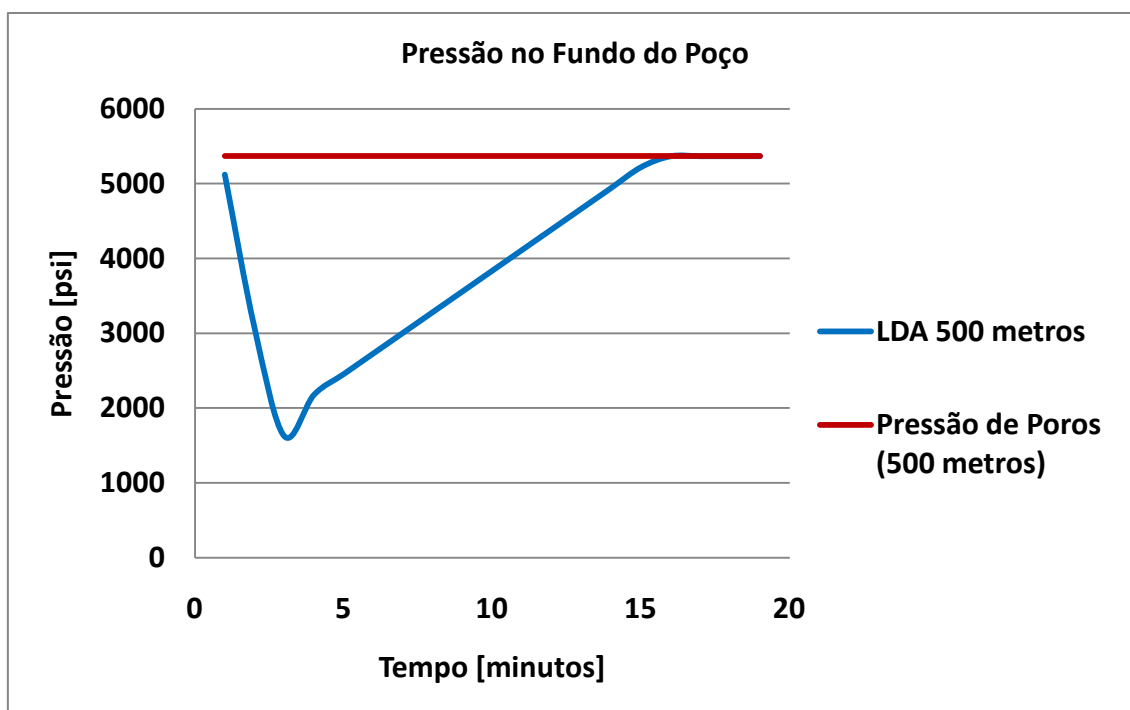


Figura 4.4 Pressão no fundo do poço para 30 barris e LDA 500 metros

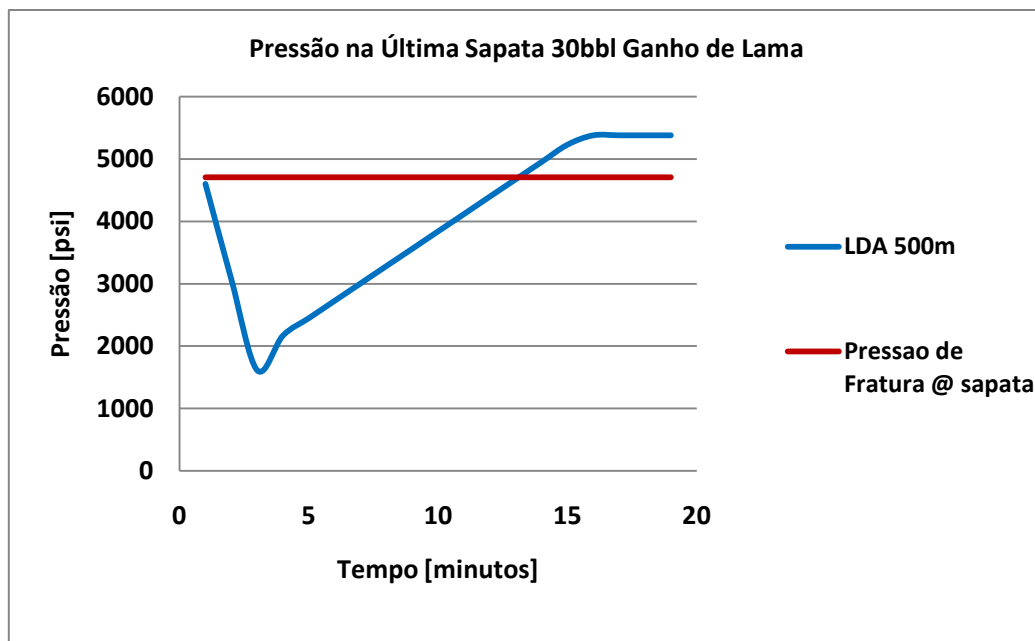


Figura 4.5 Pressão na Sapata para 30 barris e 500 metros de LDA

Ao introduzir uma lâmina d'água de 1000 metros, temos como resultado para o comportamento da pressão no fundo do poço e na última sapata, respectivamente, as figuras 4.7 e 4.8. Onde em cada gráfico observamos o valor da pressão de poros e a pressão de fratura na profundidade da última sapata.

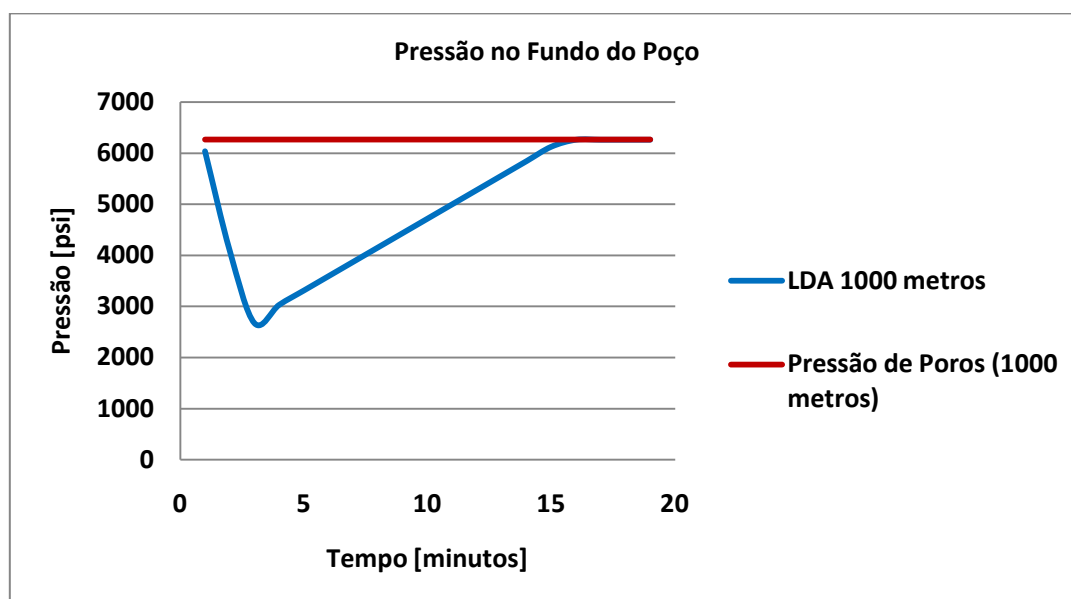


Figura 4.6 Pressão no fundo do poço para 30 barris e 1000 metros de LDA

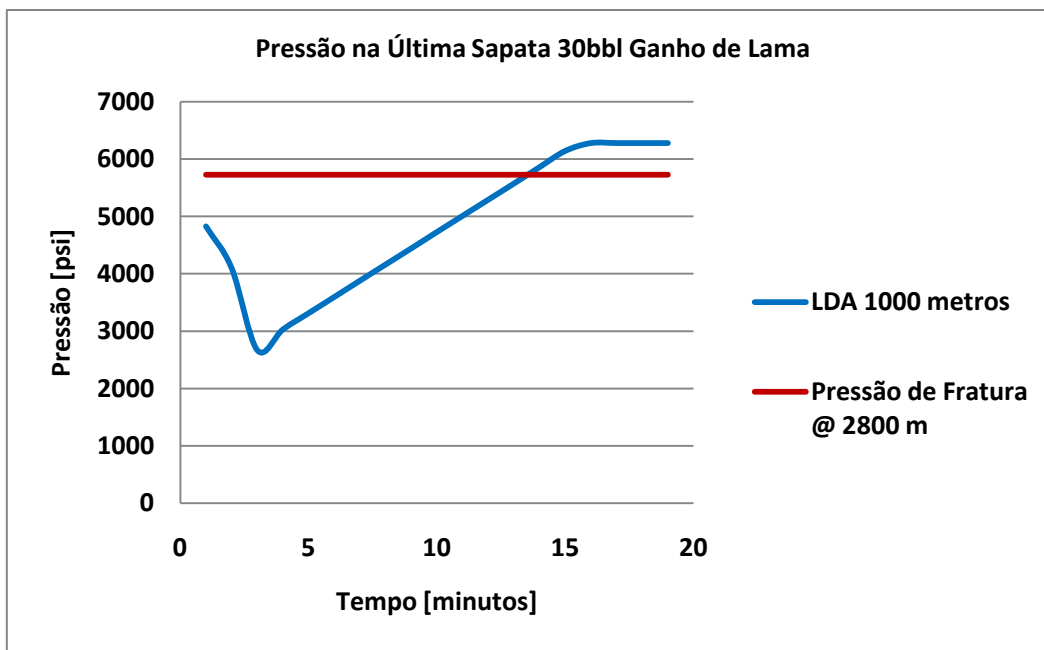


Figura 4.7 Pressão na Sapata para 30 barris e 1000 metros de LDA

Para o último caso, lâmina d'água 2000 metros, temos os seguintes resultados , novamente, para o comportamento da pressão no fundo do poço e na última sapata, as figuras 4.9 e 4.10.

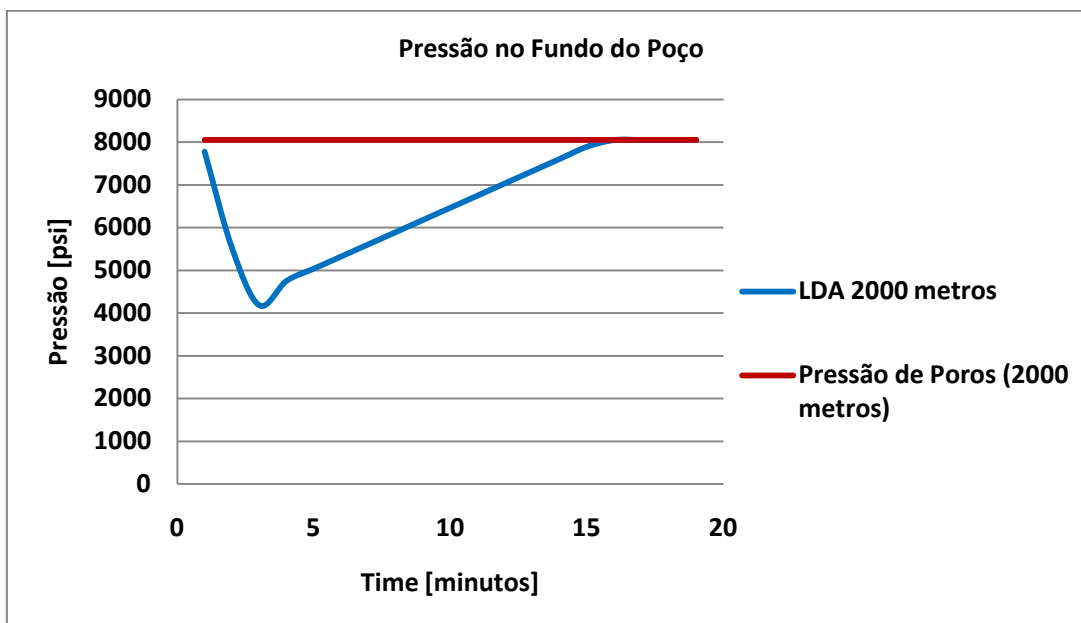


Figura 4.8 Pressão no fundo do poço para 30 barris e 2000 metros de LDA

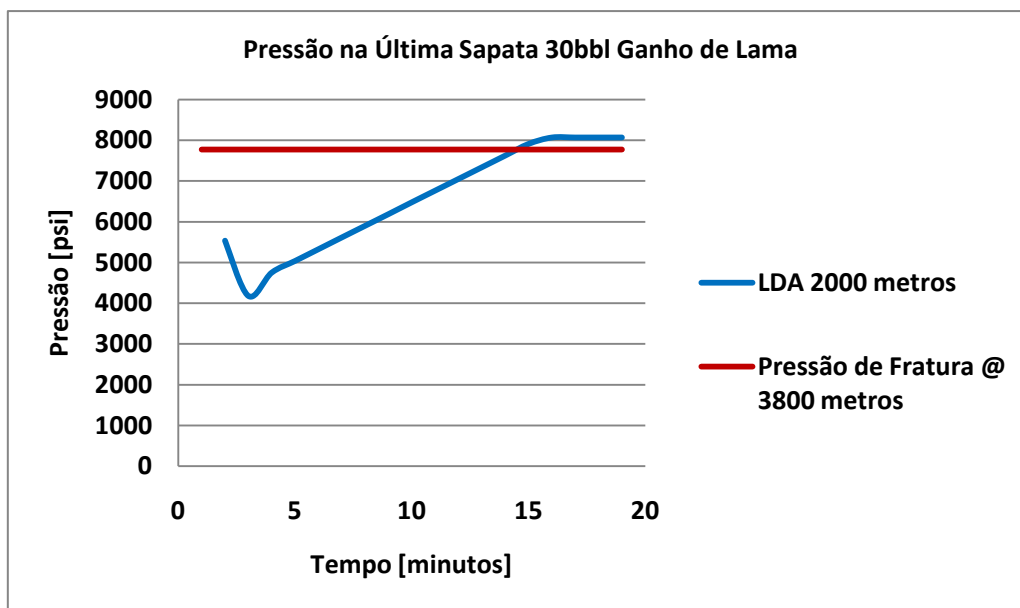


Figura 4.9 Pressão na sapata para 30 barris e 2000 metros de LDA

Tanto as figuras que representam o comportamento da pressão no fundo do poço (4.5, 4.7 e 4.9), quanto as que representam o comportamento da pressão na última sapata (4.6, 4.8 e 4.10) mostram que a pressão do poço cai durante aproximadamente 4 minutos, como consequência da substituição de uma coluna de fluido pesado (lama) por uma coluna que cresce em comprimento de um fluido mais leve, no caso um kick de gás.

A partir do quarto, instante em que o BOP é fechado, a pressão no poço começa a crescer, pois o gás não tem para onde se expandir, a pressão no fundo do poço é menor que a pressão da formação, quantidade de matéria, no caso gás, continua invadindo o poço. Como a linha de choke não foi modelada, a pressão continuará a subir até por volta de 16 minutos quando o kick encontra-se em sua maioria na profundidade do BOP e, como dito anteriormente, não há lugar para escoar. Neste momento, a pressão no poço torna-se igual a pressão da formação e não há mais entrada de gás no poço.

No que diz respeito à sapata, temos o cuidado de, numa operação real de perfuração, impedir que a pressão nesta profundidade exceda o valor da pressão de fratura. Caso isso ocorra, terá como consequência o fraturamento nesta profundidade. Conforme os gráficos relacionados ao comportamento da pressão na última sapata, é necessário que haja uma intervenção enquanto o BOP está fechado. O método indicado para que a pressão de fratura nesta profundidade continue inalcançável é impor uma circulação do kick pelo choke mantendo-se um nível de abertura desta válvula de maneira que a pressão no fundo do poço mantenha-se igual ou poucos psi superiores a da formação – eliminando assim a entrada de novos gases – e, simultaneamente, injetar lama de perfuração à uma vazão reduzida de circulação (vazão utilizada para matar, amortecer, o poço). Esta ação representa o modo controlado e seguro de se expulsar do poço o fluido invasor.

4.4 Comparações dos Resultados

Neste momento e analisa-se o comportamento da pressão no fundo do poço e na profundidade da sapata traçando-se gráficos variando a profundidade da lâmina d'água e o ganho de lama permitido.

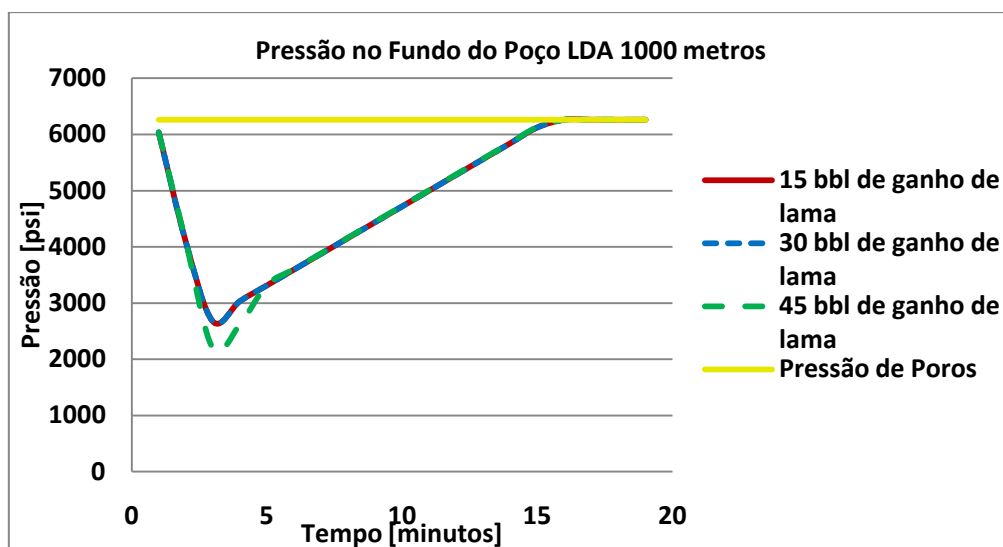


Figura 4.10 Pressão no fundo do poço para 1000 metros de LDA

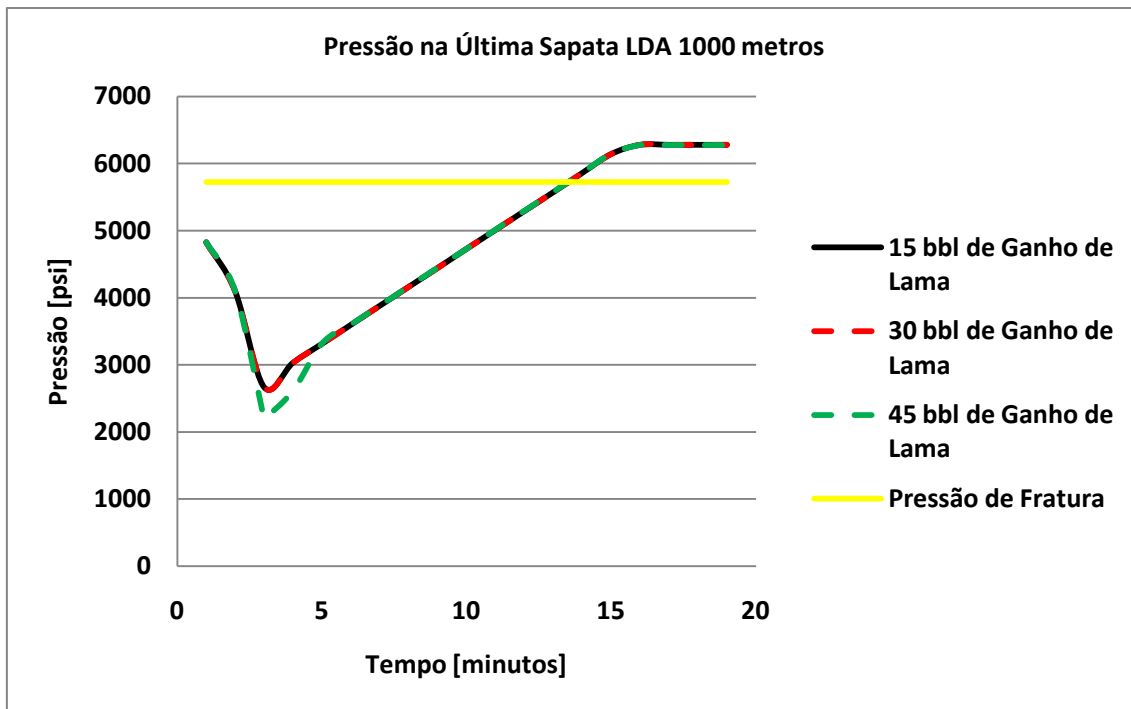


Figura 4.11 Pressão na sapata para 1000 metros de LDA

Nas figuras 4.11 e 4.12 variou-se o ganho de lama no tanque de 15 a 45 barris e o comportamento da pressão nestas duas profundidades é ilustrado nestas figuras. Nota-se que para um ganho de lama de 15 ou de 30 barris tanto a pressão no fundo do poço quanto na última sapata não sofre influência destes valores. Por outro lado, sob o cenário de um ganho de lama de 45 barris, nota-se que a pressão para o mesmo instante em que o BOP é fechado, por volta de 3 minutos, alcança um valor mais baixo, ou seja, com um kick de 45 barris a pressão alcança um patamar mais baixo que o alcançado com ganho de 15 e 30 barris. Isto reflete o fato que um kick de 45 barris substitui uma maior quantidade a coluna de fluido pesado (lama), do que o obtido com os outros dois valores de ganho de lama, no instante em que o BOP é fechado há frente de gás está numa região do anular acima do BOP, anular riser – drill piper.

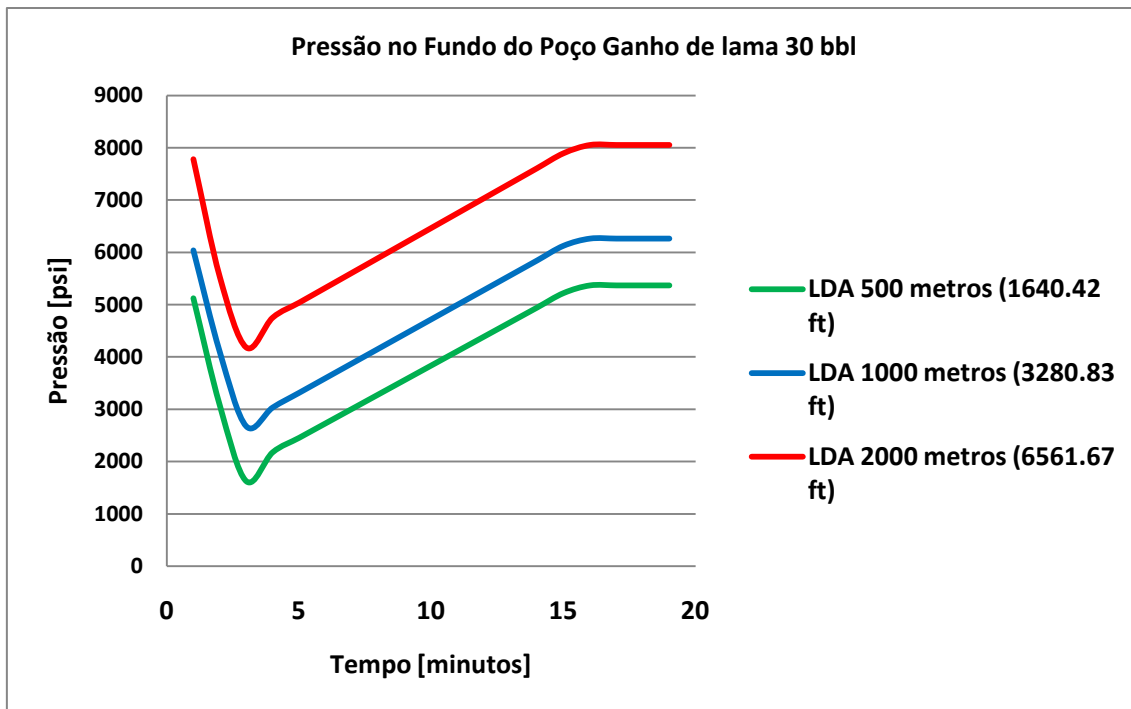


Figura 4.12 Pressão no fundo do poço para 30 barris de ganho de lama

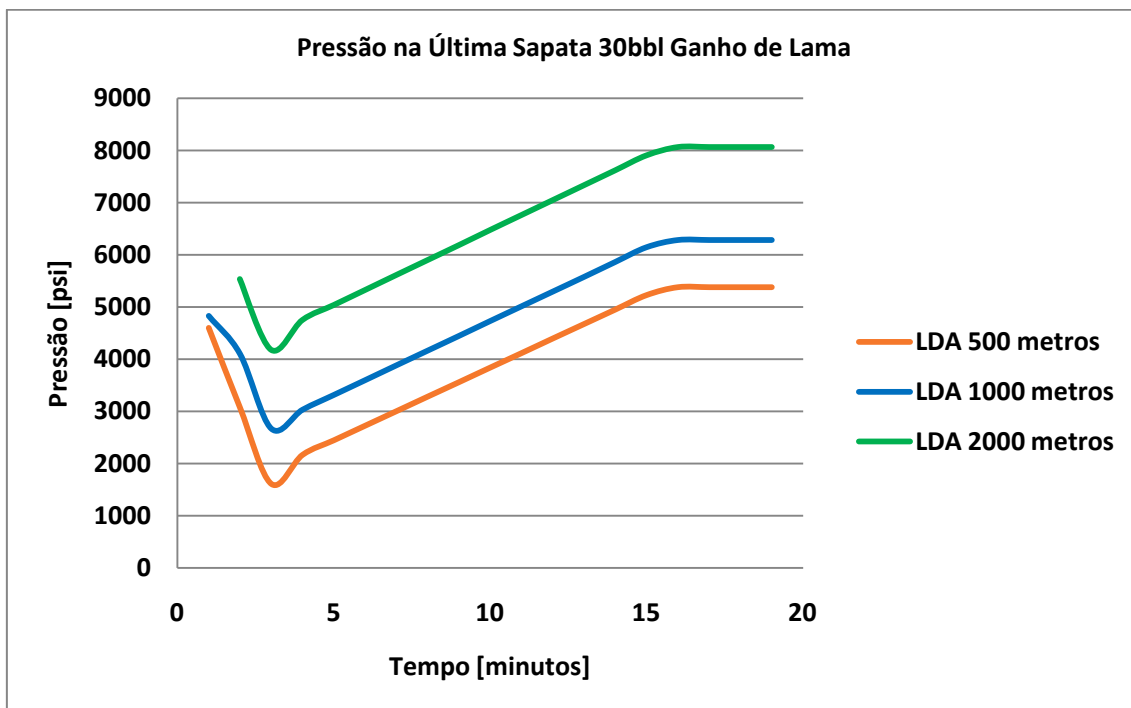


Figura 4.13 Pressão na sapata para 30 barris de ganho de lama

As Figuras 4.13 e 4.14 demonstram o comportamento, já esperado, da pressão no fundo do poço e o comportamento da pressão na sapata do revestimento, respectivamente.

As figuras 4.15 e 4.16 apresentam os resultados obtidos por OHARA [2], para o comportamento da pressão no fundo do poço e na última sapata, respectivamente.

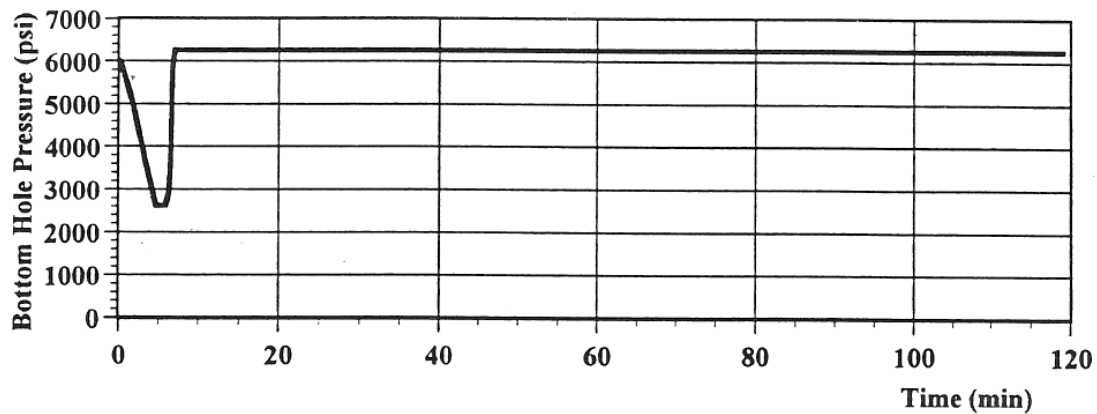


Figura 4.15 Pressão no fundo do poço

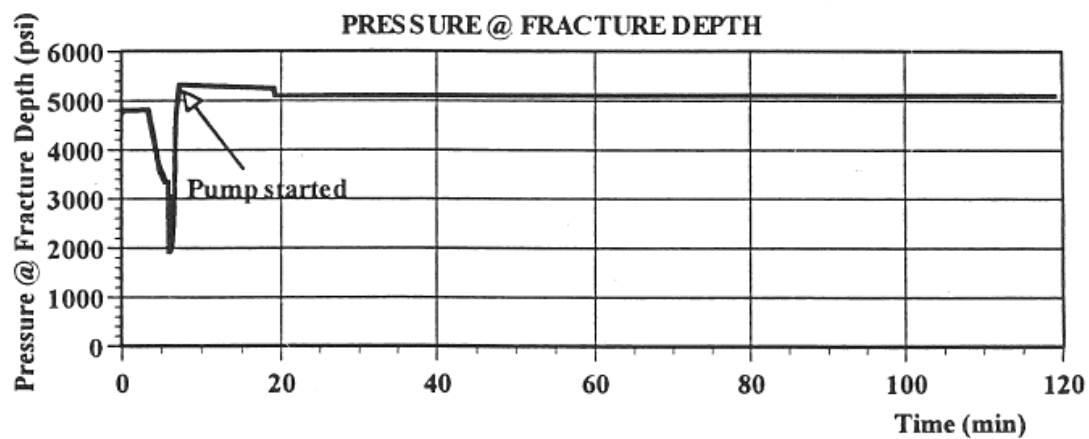


Figura 4.16 Pressão na sapata

Comparando-se os gráficos obtidos pelo presente modelo com os obtidos pelo modelo de OHARA [2], nota-se que o tempo de re-pressurização do poço é maior neste. Apesar de fisicamente o modelo apresentar resultados coerentes, a taxa de aumento da

pressão no poço após o fechamento do BOP deveria ser próxima ao que foi encontrado no outro modelo, pois os dados utilizados foram os mesmos. A diferença entre os dois modelos de kick reside no modelo de reservatório implementado. Enquanto OHARA [2] implementou o modelo de AL-HUSSAINY, RAMEY, CRAWFORD [23], o atual modelo implementou, novamente, o proposto por THOMAS et. al [22].

5. Conclusões e Recomendações

5.1 Conclusões

É preciso que haja um controle preciso nos parâmetros de perfuração aliado a um projeto bem detalhado das operações envolvidas nos cenários offshore atuais. Sendo assim, uma preocupação sobre essas operações é o controle de kicks e prevenção de blowouts.

O objetivo deste modelo foi obter as seguintes propriedades ao longo da região do anular: holdup do líquido (fração de líquido); velocidade do líquido; velocidade do gás; densidade do gás e a pressão. Obtidas as seguintes propriedades, Identificou-se as influências do máximo valor permitido de ganho de tanque (Pit Gain) e da profundidade de lamina d'água no comportamento da pressão tanto na sapata quanto no fundo do poço. Por fim, este comportamento foi comparado com os resultados obtidos por OHARA [2].

Apesar dos resultados obtidos estarem coerentes com a física envolvida na circulação do kick, o tempo de re-pressurização do poço está acima do esperado para os dados utilizados, que foram os mesmos utilizados por OHARA [2]. A diferença entre os dois modelos de kick reside no modelo de reservatório implementado. Enquanto OHARA [2] implementou o modelo de AL-HUSSAINY, RAMEY, CRAWFORD [23]., neste trabalho utilizou-se o proposto por THOMAS et. al. [22], que é um modelo teórico. É necessário implementar um modelo mais preciso porque nos primeiros 3 minutos não é necessário de um modelo de reservatório "real" pois estamos interessados somente na existência de um que simule a produção de gás no poço. Agora no segundo momento, após 3 minutos, necessita-se do modelo porque este deve simular a quantidade de gás que entra no poço como consequência temos o aumento da pressão

neste local. Como o BOP está fechado o gás fica aprisionado e o sistema fica somente recebendo massa de gás, conseqüentemente aumentando sua pressão.

5.2 Recomendações para Futuros Trabalhos

Inicialmente seria importante implementar o modelo de reservatório utilizado por Ohara, pois sendo assim seria possível comparar os resultados obtidos além de se ter resultados mais precisos.

Com relação ao software utilizado, gasta-se um alto tempo de processamento, alguns resultados demoraram uma hora e 30 minutos. Como o modelo numérico necessita acessar locações de memória simultaneamente, seria mais produtivo utilizar uma linguagem onde possa-se exigir mais neste requisito.

O programa estima o holdup (conforme pode ser visto no fluxograma) através do método da tentativa e erro. Pode-se buscar um método que encontre um holdup que satisfaça a condição de erro de uma forma mais otimizada. No atual caso é necessário dez mil interações para varrer a faixa de holdup possível ($0 - 1$, para um passo de $0,0001$ em cada interação).

Neste trabalho foi utilizada a formulação para gás ideal, onde os resultados não são precisos como a modelagem para os gases reais. Então é necessário que a modelagem de gás real seja implementada.

Um outro pressuposto admitido foi com relação a temperatura no poço. Esta foi tomada como constante e igual a do reservatório, o que não condiz com a realidade. Seria interessante introduzir um gradiente de temperatura entre o fundo do poço e o leito marinho.

Atualmente o fluido utilizado na perfuração depende da seção do poço em que esta sendo perfurada, onde em seções próximas ao reservatório utiliza-se normalmente fluido base-óleo para minimizar o risco de dano ao reservatório. No presente trabalho

utilizou-se as premissas de um fluido incompressível, ou seja à base-água. Uma outra recomendação, portanto, é a introdução também dos modelos reológicos para fluidos sintéticos e fluidos base-óleo.

Para completar o simulador de kick resta ainda implementar o modelo da linha de choke inserindo neste modelo suas condições de contorno. Há na literatura artigos que fornecem suporte a implementação de um modelo preciso.

A extensão deste modelo de kick a poços horizontais é vista como perfeitamente possível. A correlação de Beggs e Brill foi adotada porque pode-se utilizá-la em escoamentos inclinados ou até mesmo em poços horizontais.

Bibliografia

1. OHARA, S.; BOURGOYNE JR., A. T. **Circulating Kick Tolerance for Deepwater Drilling**. Well Control Conference of the Americas. Caracas: [s.n.]. 1998. p. 29-30.
2. OHARA, S. **Improved Method for Selecting Kick Tolerance during Deepwater Operations**. Louisiana State University. [S.I.]. 1996.
3. MARTINS, F. S. B.; SANTOS, O. L. A.; DE PAULA, I. L. **Well Control in Campos Basin-Brazil**. IADC/SPE Drilling Conference. Nova Orleans: [s.n.]. 2000. p. 13-25.
4. NUNES, J. O. L.; BANNWART, A. C.; RIBEIRO, P. R. **Mathematical Modeling of Gas Kicks in Deep Water Scenario**. Unicamp. Campinas -SP, p. 8. 2002. (IADC/SPE 77253).
5. LEBLANC, J. L.; LEWIS, R. L. A Mathematical Model of a Gas Kick. **Journal of Petroleum Technology**, p. 888-889, 1968.
6. RECORDS, L. R. Mud System and Well Control, v. XLIV, 1972.
7. HOBEROCK, L. L.; STANBERY, S. R. Pressure Dynamics in Wells During Gas Kicks: Part 1- Fluid Lines Dynamics. **Journal of Petroleum Technology**, Agosto 1981. 1357-1366.
8. HOBEROCK, L. L.; STANBERY, S. R. Pressure Dynamics in Wells During Gas Kicks: Part 2- Component Models and Results. **Journal of Petroleum Technology**, Agosto 1981. 1367-1378.
9. GRIFFITH, P. The Prediction of Low-Quality Boiling Void. **Journal of Heat Transfer**, 1964. 327-333.
10. SANTOS, O. L. A. **A Mathematical Model of a Gas Kick When Drilling in Deep Waters**. Colorado School of Mines, MS Thesis. [S.I.]. 1982.
11. ORKIZEWSKI, J. Prediction Two-phase Pressure Drops in Vertical Pipes. **Journal of Petroleum Technology**, 1967. 829-838.
12. NICKENS, H. V. A Dynamic Computer Model of a Kicking Well. **SPE Drilling engineering**, Junho 1987. 158-173.
13. PODIO, A. L.; YANG, A. P. **Well Control Simulator for IBM personal Computer**. IADC/SPE 14737. [S.I.]: [s.n.]. 1986.
14. NEGRÃO, A. F.; MAIDLA, E. E. **Optimization of Flow Rate Selection for Kick Control**. 64th Annual Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. San Antonio, Texas: [s.n.]. 1989.
15. BEGGS, H. D.; BRILL, J. P. A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes. **Journal of Petroleum Technology**, May 1973. 607-617.
16. SANTOS, O. L. A. Well Control Operations in Horizontal Wells. **SPE Drilling Engineering**, junho 1991. 111-117.
17. ROMMETVEIT, R.; VEFRING, E. H. **Comparison of Results from an Advanced Gas Kick Simulator with Surface and Downhole data from Full Scale Gas Kick Experiments in an Inclined Well**. 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. Dallas, Texas: [s.n.]. 1991. p. 6-9.
18. NEWTON, I. **Philosophie Naturalis Principia Mathematica**. [S.I.]: [s.n.], 1687.
19. BOURGOYNE JR., A. T. et al. **Applied Drilling Engineering**. [S.I.]: SPE textbook series, v. II, 1986.

20. REYNOLD, O. **An Experimental Investigation of the Circumstances wich Determine whether the Motion of Water shall be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels.** [S.l.]: [s.n.], v. 174, 1883. 935-982 p.
21. COLEBROOK, C. F. **Turbulent Flow in Pipes, with Particular reference to the Transition Region Between the Smooth and Rough Pipe Laws.** J. Inst Engenharia Civil. Londres. 1938.
22. THOMAS, D. C.; LEA, J. F.; TUREK, E. A. **Gas Solubility in Oil-Based Drilling Fluids: Effeects on Kick Detection.** 57th Society of Petroleum Engineers Annual Fall Technical Conference and Exhibition. [S.l.]: [s.n.]. 1982. p. 26-29.
23. AL-HUSSAINY, R.; RAMEY, H. J.; CRAWFORD, P. B. The Flow of Real gases Through Porous Media. **Journal of Petroleum Technology**, v. XVIII, n. 5, p. 624-636, Maio 1966.

Anexos

```
Off[General::spell]
Off[General::spell1]
```

```
SetDirectory[
  "C:\\Users\\teste\\Dropbox\\PG\\Atual\\Modelo Mathematica\\Fracture Pressure"]
C:\\Users\\teste\\Dropbox\\PG\\Atual\\Modelo Mathematica\\Fracture Pressure
```

```
FP = OpenWrite["DataBeforeKick30_500.txt"];
(*30 is the Pit gain level in bbl and 1000 is the water depth in meters*)
FP2 = OpenWrite["DataAfterKick30_500.txt"];
FP3 = OpenWrite["BottomHolePressure30_500.txt"];
FP4 = OpenWrite["CasingShoePressure30_500.txt"];
```

```
<< Units`
```

```
(* Definições de unidades não existentes no Mathematica *)
```

```
Psia = PSI
```

```
Darcy =  $9.869233 \times 10^{-13}$  Meter2
```

```
PSI
```

```
 $9.86923 \times 10^{-13}$  Meter2
```

```
(* Correção de conversões errôneas feitas pelo Mathematica *)
```

```
Unprotect[SI]
SI[y_Celsius] := (y + 273.15) * Kelvin
SI[y_Fahrenheit] := (273.15 + (y - 32) / 1.8) * Kelvin
Protect[SI]

{}

{SI}

(* Entrada de dados no sistema API *)
```

```

DadosAPI = {
    Pstd → 14.7 Psia,          (* Standard pressure *)
    Tstd → (60 + 460.) Rankine, (* Standard temperature *)
    Tml → (40 + 460.) Rankine, (* Mud line temperature *)
    TBH → (220 + 460.) Rankine, (* Bottom hole Temperature *)

    k → 350. Milli Darcy,      (* Formation permeability *)
    φ → 0.2 ND,                (* Formation porosity *)
    hf → 66. Feet,             (* Formation thickness *)
    Gp → 10.5 Pound / Gallon,  (* Formation pore pressure *)
    Gf → 12. Pound / Gallon,   (* Formation fracture pressure *)
    Hgf → 9187. Feet,          (* Depth of formation fracture pressure *)
    μg → 0.015 Centi Poise,    (* Formation gas viscosity *)
    dg → 0.604 ND,             (* Gas density *)
    cg → 8. * 10-4 1 / Psia,    (* Gas compressibility @reservoir conditions *)

    M → 16. ND,                (* Molecular weight for Methane *)
    Ru → 10.73 Psia * Feet3 / (Pound * Rankine), (* Gas constant for Methane *)

    Hoh → (11483.) Feet,       (* Open hole depth *)
    Hca → (9187.) Feet,        (* Casing depth *)
    Hri → (3281.) Feet,        (* Water/riser string Depth *)
    IDoh → 8.5 Inch,           (* Open hole/Bit diameter *)
    IDca → 8.755 Inch,         (* Casing ID *)
    IDri → 18.8 Inch,          (* Riser string ID *)

    Hdp → (10538.) Feet,       (* Drillpipe depth *)
    Hdc → (11483.) Feet,       (* Drillcollar depth *)
    ODDp → 5. Inch,            (* Drillpipe OD *)
    ODDc → 6.25 Inch,          (* Drillcollar OD *)
    IDdp → 4.28 Inch,          (* Drillpipe ID *)
    IDdc → 2.81 Inch,          (* Drillcollar ID *)
    ε → 0.00065 ND,           (* Absolute pipe roughness *)

    ODbj → 14. / 32 Inch,      (* Bit jet diameter *)
    Nbj → 3. ND,               (* Number of bit noozles *)

    ρm → 9.65 Pound / Gallon,   (* Mud specific weight *)
    θ600 → 53. ND,              (* Viscosimeter reading @ 600 rpm *)
    θ300 → 34. ND,              (* Viscosimeter reading @ 300 rpm *)

    qb → 500. Gallon / Minute,  (* Mud pump flow rate *)
    qbr → 100. Gallon / Minute, (* Reduced mud pump flow rate *)
    Cd → 0.95 ND,               (* Discharge coefficient *)
    ROP → 20. Feet / Hour,      (* Rate of penetration *)
    ΔPs → 23. Psia,             (* Pressure drop in the standpipe *)
    NRCrit → 2100. ND,          (* Critical Reynolds number *)

    IDch → 3. Inch,             (* ID of choke line *)
    IDkl → 3. Inch,             (* ID of kill line *)

    g → 9.80665 Meter / Second2 (* Gravity accelerations *)
};

(* Conversão dos dados para o sistema SI *)

```

```

vp = (0600 - 0300) /. DadosAPI /. ND → 1;
DadosAPI = Insert[DadosAPI,  $\mu$ p → vp Centi Poise, 34];
YP = 0300 - vp /. DadosAPI /. ND → 1;
DadosAPI = Insert[DadosAPI,  $\tau$ y → YP PoundForce / (100 * Feet2), 35];

DadosSI = SI[DadosAPI];

Length[DadosSI]

44

(* Matriz dos dados SI sem as dimensões. Esta
   é a matriz de dados utilizada nos cálculos *)

DadosA = Table[DadosSI[[i, 1]] → DadosSI[[i, 2, 1]], {i, 1, Length[DadosSI]};

(* Tabela dos dados de entrada *)

```

TableData =

```
TableForm[Table[{i, DadosAPI[[i, 1]], DadosAPI[[i, 2]], DadosSI[[i, 2]], DadosA[[i]]},
  {i, 1, Length[DadosSI]}], TableHeadings →
  {None, {" ", "Parameter", "API Units", "SI Units", "Abs.Value"}}] /. ND → 1
```

	Parameter	API Units	SI Units	Abs.Value
1	Pstd	14.7 PSI	101 353. Pascal	Pstd → 101 353.
2	Tstd	520. Rankine	288.889 Kelvin	Tstd → 288.889
3	Tml	500. Rankine	277.778 Kelvin	Tml → 277.778
4	TBH	680. Rankine	377.778 Kelvin	TBH → 377.778
5	k	3.45423×10^{-10} Meter ² Milli	3.45423×10^{-13} Meter ²	k → 3.45423×10^{-13}
6	ϕ	0.2	0.2	ϕ → 0.2
7	hf	66. Feet	20.1168 Meter	hf → 20.1168
8	Gp	$\frac{10.5 \text{ Pound}}{\text{Gallon}}$	$\frac{1258.18 \text{ Kilogram}}{\text{Meter}^3}$	Gp → 1258.18
9	Gf	$\frac{12. \text{ Pound}}{\text{Gallon}}$	$\frac{1437.92 \text{ Kilogram}}{\text{Meter}^3}$	Gf → 1437.92
10	Hgf	9187. Feet	2800.2 Meter	Hgf → 2800.2
11	μg	0.015 Centi Poise	0.000015 Pascal Second	μg → 0.000015
12	dg	0.604	0.604	dg → 0.604
13	cg	$\frac{0.0008}{\text{PSI}}$	$\frac{1.1603 \times 10^{-7}}{\text{Pascal}}$	cg → 1.1603×10^{-7}
14	M	16.	16.	M → 16.
15	Ru	$\frac{10.73 \text{ Feet}^3 \text{ PSI}}{\text{Pound Rankine}}$	$\frac{8313.25 \text{ Meter}^3 \text{ Pascal}}{\text{Kelvin Kilogram}}$	Ru → 8313.25
16	Hoh	14 763.8 Feet	4500.02 Meter	Hoh → 4500.02
17	Hca	12 467.8 Feet	3800.2 Meter	Hca → 3800.2
18	Hri	6561.84 Feet	2000.05 Meter	Hri → 2000.05
19	IDoh	8.5 Inch	0.2159 Meter	IDoh → 0.2159
20	IDca	8.755 Inch	0.222377 Meter	IDca → 0.222377
21	IDri	18.8 Inch	0.47752 Meter	IDri → 0.47752
22	Hdp	13 818.8 Feet	4211.98 Meter	Hdp → 4211.98
23	Hdc	14 763.8 Feet	4500.02 Meter	Hdc → 4500.02
24	ODdp	5. Inch	0.127 Meter	ODdp → 0.127
25	ODdc	6.25 Inch	0.15875 Meter	ODdc → 0.15875
26	IDdp	4.28 Inch	0.108712 Meter	IDdp → 0.108712
27	IDdc	2.81 Inch	0.071374 Meter	IDdc → 0.071374
28	ϵ	0.00065	0.00065	ϵ → 0.00065
29	ODbj	0.4375 Inch	0.0111125 Meter	ODbj → 0.0111125
30	Nbj	3.	3.	Nbj → 3.
31	ρm	$\frac{9.65 \text{ Pound}}{\text{Gallon}}$	$\frac{1156.33 \text{ Kilogram}}{\text{Meter}^3}$	ρm → 1156.33
32	$\theta 600$	53.	53.	$\theta 600$ → 53.
33	$\theta 300$	34.	34.	$\theta 300$ → 34.
34	μp	19. Centi Poise	0.019 Pascal Second	μp → 0.019
35	τy	$\frac{0.15 \text{ PoundForce}}{\text{Feet}^2}$	$\frac{7.18204 \text{ Newton}}{\text{Meter}^2}$	τy → 7.18204
36	qb	$\frac{500. \text{ Gallon}}{\text{Minute}}$	$\frac{0.0315451 \text{ Meter}^3}{\text{Second}}$	qb → 0.0315451
37	qbr	$\frac{100. \text{ Gallon}}{\text{Minute}}$	$\frac{0.00630901 \text{ Meter}^3}{\text{Second}}$	qbr → 0.00630901
38	Cd	0.95	0.95	Cd → 0.95
39	ROP	$\frac{20. \text{ Feet}}{\text{Hour}}$	$\frac{0.00169333 \text{ Meter}}{\text{Second}}$	ROP → 0.00169333
40	ΔPs	23. PSI	158 579. Pascal	ΔPs → 158 579.
41	NRCrit	2100.	2100.	NRCrit → 2100.
42	IDch	3. Inch	0.0762 Meter	IDch → 0.0762
43	IDkl	3. Inch	0.0762 Meter	IDkl → 0.0762
44	g	$\frac{9.80665 \text{ Meter}}{\text{Second}^2}$	$\frac{9.80665 \text{ Meter}}{\text{Second}^2}$	g → 9.80665

Dados = DadosA;

```
Export["TabelaDados.txt", TableData]
TabelaDados.txt
```

Pressure drop calculation in the well fluid system

```
(* Apparent viscosity for duct flow *)

EqnμadSI = 
$$\frac{8 * \mu_{ad} * v}{(d / 2)^2} == \frac{8 * \mu * v}{(d / 2)^2} + \frac{8 * \tau}{3 * (d / 2)}$$


$$\frac{32 v \mu_{ad}}{d^2} == \frac{32 v \mu}{d^2} + \frac{16 \tau}{3 d}$$


Sol1 = Simplify[Solve[EqnμadSI, μad] // Flatten]

{μad →  $\mu + \frac{d \tau}{6 v}$ }
```

```
(* Apparent viscosity for annuly flow *)

EqnμaaSI = 
$$\frac{12 * \mu_{aa} * v}{(de / 2 - di / 2)^2} == \frac{12 * \mu * v}{(de / 2 - di / 2)^2} + \frac{3 * \tau}{(de / 2 - di / 2)}$$


$$\frac{12 v \mu_{aa}}{\left(\frac{de}{2} - \frac{di}{2}\right)^2} == \frac{12 v \mu}{\left(\frac{de}{2} - \frac{di}{2}\right)^2} + \frac{3 \tau}{\frac{de}{2} - \frac{di}{2}}$$


Sol2 = Simplify[Solve[EqnμaaSI, μaa] // Flatten]

{μaa →  $\frac{8 v \mu + de \tau - di \tau}{8 v}$ }
```

```
(* Apparent viscosity *)

μa[v_, μ_, de_, di_, τ_] = { μad /. Sol1      ToString[di] == "0"
                             μaa /. Sol2 ToString[di] ≠ "0 Meter" || di ≠ 0


$$\frac{8 v \mu + de \tau - di \tau}{8 v}$$

```

```
x = 35;
```

```
(* Average velocity *)

vm[q_, de_, di_] = { 
$$\frac{q}{(\pi * de^2) / 4}$$
      ToString[di] == "0"
                     
$$\frac{q}{(\pi * (de^2 - di^2)) / 4}$$
 ToString[di] ≠ "0 Meter" || di ≠ 0


$$\frac{4 q}{(de^2 - di^2) \pi}$$

```

```
(* Effective diameter *)

Deff[de_, di_] = { 
$$de$$
      ToString[di] == "0"
                  
$$(2 / 3) * (de - di)$$
 ToString[di] ≠ "0 Meter" || di ≠ 0


$$\frac{2 (de - di)}{3}$$

```


(* Reynolds Number *)

$NR[\rho_, v_, d_, \mu_] = (\rho * v * d) / \mu$

$$\frac{d \, v \, \rho}{\mu}$$

vm1 = vm[qb, IDdp, 0] /. Dados

vm2 = vm[qb, IDdc, 0] /. Dados

vm3 = vm[qb, IDoh, ODdc] /. Dados

vm4 = vm[qb, IDoh, ODDp] /. Dados

vm5 = vm[qb, IDca, ODDp] /. Dados

vm6 = vm[qb, IDri, ODDp] /. Dados

3.39849

7.88427

1.87586

1.31757

1.20532

0.189548

NRe1 = Convert[NR[ρm, vm1, Deff[IDdp, 0], μa[vm1, μp, IDdp, 0, τy]] /. Dados, 1]

NRe2 = Convert[NR[ρm, vm2, Deff[IDdc, 0], μa[vm2, μp, IDdp, 0, τy]] /. Dados, 1]

NRe3 = Convert[NR[ρm, vm3, Deff[IDoh, ODdc], μa[vm3, μp, IDoh, ODdc, τy]] /. Dados, 1]

NRe4 = Convert[NR[ρm, vm4, Deff[IDoh, ODDp], μa[vm4, μp, IDoh, ODDp, τy]] /. Dados, 1]

NRe5 = Convert[NR[ρm, vm5, Deff[IDca, ODDp], μa[vm5, μp, IDca, ODDp, τy]] /. Dados, 1]

NRe6 = Convert[NR[ρm, vm6, Deff[IDri, ODDp], μa[vm6, μp, IDri, ODDp, τy]] /. Dados, 1]

5968.62

13824.7

1782.97

1134.73

984.248

30.5018

```
TableForm[{{"-----Seção-----", "vmud", "Re", "Rec", "Regime"},
{"1-Esc. interno DP", vm1, NRe1, NRCrit, If[NRe1 ≥ NRCrit, "Esc.Turb.", "Esc.Lam."]},
{"2-Esc. interno DC", vm2, NRe2, NRCrit, If[NRe2 ≥ NRCrit, "Esc.Turb.", "Esc.Lam."]},
{"3-Esc. anular poço/DC", vm3, NRe3, NRCrit,
If[NRe3 ≥ NRCrit, "Esc.Turb.", "Esc.Lam."]}, {"4-Esc. anular poço/DP", vm4, NRe4,
NRCrit, If[NRe4 ≥ NRCrit, "Esc.Turb.", "Esc.Lam."]}, {"5-Esc. anular rev/DP", vm5,
NRe5, NRCrit, If[NRe5 ≥ NRCrit, "Esc.Turb.", "Esc.Lam."]}, {"6-Esc. anular riser/DP",
vm6, NRe6, NRCrit, If[NRe6 ≥ NRCrit, "Esc.Turb.", "Esc.Lam."]]} /. Dados
```

-----Seção-----	v _{mud}	Re	Re _c	Regime
1-Esc. interno DP	3.39849	5968.62	2100.	Esc.Turb.
2-Esc. interno DC	7.88427	13 824.7	2100.	Esc.Turb.
3-Esc. anular poço/DC	1.87586	1782.97	2100.	Esc.Lam.
4-Esc. anular poço/DP	1.31757	1134.73	2100.	Esc.Lam.
5-Esc. anular rev/DP	1.20532	984.248	2100.	Esc.Lam.
6-Esc. anular riser/DP	0.189548	30.5018	2100.	Esc.Lam.

(* Friction factor *)

$$\text{Eqnf}[NRe_] = \frac{1}{(f)^{1/2}} = -4 * \text{Log}\left[10, 0.269 * \epsilon + \frac{1.255}{NRe * (f)^{1/2}}\right] /. \text{Dados}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = - \frac{4 \text{Log}\left[0.00017485 + \frac{1.255}{\sqrt{f} NRe}\right]}{\text{Log}[10]}$$

```
f1 = f /. FindRoot[Eqnf[NRe1], {f, 0.1}]
f2 = f /. FindRoot[Eqnf[NRe2], {f, 0.1}]
f3 = f /. FindRoot[Eqnf[NRe3], {f, 0.1}]
f4 = f /. FindRoot[Eqnf[NRe4], {f, 0.1}]
f5 = f /. FindRoot[Eqnf[NRe5], {f, 0.1}]
f6 = f /. FindRoot[Eqnf[NRe6], {f, 0.1}]
```

0.00908265

0.00738263

0.0129534

0.0150644

0.0158331

0.0860138

(* Pressure drop per unit length *)

$$\text{dPdZ}[f_ , \rho_ , v_ , d_] = \frac{2 * f * \rho * v^2}{d}$$

$$\frac{2 f v^2 \rho}{d}$$

```

dPdZ1 = dPdZ[f1, ρm, vm1, Deff[IDdp, 0]] /. Dados
dPdZ2 = dPdZ[f2, ρm, vm2, Deff[IDdc, 0]] /. Dados
dPdZ3 = dPdZ[f3, ρm, vm3, Deff[IDoh, ODdc]] /. Dados
dPdZ4 = dPdZ[f4, ρm, vm4, Deff[IDoh, ODdp]] /. Dados
dPdZ5 = dPdZ[f5, ρm, vm5, Deff[IDca, ODdp]] /. Dados
dPdZ6 = dPdZ[f6, ρm, vm6, Deff[IDri, ODdp]] /. Dados

```

```
3347.41
```

```
22304.6
```

```
2766.74
```

```
1020.46
```

```
836.624
```

```
30.5839
```

```
(* Drill bit pressure drop *)
```

$$At = Nbj * \pi * \frac{(ODbj)^2}{4} /. \text{Dados} /. ND \rightarrow 1$$

```
0.000290961
```

$$\Delta Pb = \rho m * \frac{1}{2} \left(\frac{qb}{Cd * At} \right)^2 /. \text{Dados} /. ND \rightarrow 1$$

```
7.53002 × 106
```

```
(* Check API Units *)
```

```
Convert[ΔPb Pascal, Psia]
```

```
1092.14 PSI
```

```
(* Pump pressure *)
```

```
L1 = Hdp /. Dados
```

```
L2 = Hdc - Hdp /. Dados
```

```
L3 = Hdc - Hdp /. Dados
```

```
L4 = Hdp - Hca /. Dados
```

```
L5 = Hca - Hri /. Dados
```

```
L6 = Hri /. Dados
```

```
LBH = L1 + L2
```

```
4211.98
```

```
288.036
```

```
288.036
```

```
411.785
```

```
1800.15
```

```
2000.05
```

```
4500.02
```

Pressure drop as a function of time (ROP model)

```

Pp[t_] = ΔPs + dPdz1 * (L1 + ROP * t) + dPdz2 * L2 + ΔPb +
          dPdz3 * L3 + dPdz4 * (L4 + ROP * t) + dPdz5 * L5 + dPdz6 * L6 /. Dados
P0[t_] = Pp[t] - ΔPs /. Dados
P1[t_] = P0[t] - dPdz1 * (L1 + ROP * t) + ρm * g * (L1 + ROP * t) /. Dados
P2[t_] = P1[t] - dPdz2 * L2 + ρm * g * L2 /. Dados
Pw[t_] = P2[t] - ΔPb
P3[t_] = Pw[t] - dPdz3 * L3 - ρm * g * L3 /. Dados
P4[t_] = P3[t] - dPdz4 * (L4 + ROP * t) - ρm * g * (L4 + ROP * t) /. Dados
P5[t_] = P4[t] - dPdz5 * L5 - ρm * g * L5 /. Dados
P6[t_] = P5[t] - dPdz6 * L6 - ρm * g * L6 /. Dados

1.64773 × 107 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 3347.41 (4211.98 + 0.00169333 t)
1.63187 × 107 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 3347.41 (4211.98 + 0.00169333 t)
1.63187 × 107 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)
1.31604 × 107 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)
5.63037 × 106 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)
1.56722 × 106 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)
1.56722 × 106 - 11 339.7 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)
- 2.03519 × 107 - 11 339.7 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)
- 4.3093 × 107 - 11 339.7 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)

TabP[t_] = {{0, Pp[t]}, {0, P0[t]}, {L1, P1[t]}, {L2 + L1, P2[t]},
            {L2 + L1, Pw[t]}, {L4 + L5 + L6, P3[t]}, {L5 + L6, P4[t]}, {L6, P5[t]}, {0, P6[t]}}

{{0, 1.64773 × 107 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 3347.41 (4211.98 + 0.00169333 t)},
 {0, 1.63187 × 107 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 3347.41 (4211.98 + 0.00169333 t)},
 {4211.98, 1.63187 × 107 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)},
 {4500.02, 1.31604 × 107 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)},
 {4500.02, 5.63037 × 106 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)},
 {4211.98, 1.56722 × 106 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)},
 {3800.2, 1.56722 × 106 - 11 339.7 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)},
 {2000.05,
  - 2.03519 × 107 - 11 339.7 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)},
 {0, - 4.3093 × 107 - 11 339.7 (411.785 + 0.00169333 t) + 11 339.7 (4211.98 + 0.00169333 t)}}

```

TableForm[TabP[5 * 60 * 60], TableHeadings →

{{"Pp", "P0", "P1", "P2", "Pw", "P3", "P4", "P5", "P6"}, {"Depth [m]", "P [Pa]"}}

	Depth [m]	P [Pa]
Pp	0	3.11299×10^7
P0	0	3.09713×10^7
P1	4211.98	6.48782×10^7
P2	4500.02	6.17199×10^7
Pw	4500.02	5.41898×10^7
P3	4211.98	5.01267×10^7
P4	3800.2	4.46602×10^7
P5	2000.05	2.27411×10^7
P6	0	-1.49012×10^{-8}

DPP[z_, t_] = (P0[t] - dPdz1 * (z) + $\rho_m * g * z$) UnitStep[(L1 + ROP * t) - z] +

(P1[t] - dPdz2 * (z + ROP * t - (L1 + ROP * t)) + $\rho_m * g * (z + ROP * t - (L1 + ROP * t))$)
UnitStep[z + ROP * t - (L1 + ROP * t)] /. Dados

($1.63187 \times 10^7 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 3347.41 (4211.98 + 0.00169333 t) + 7992.26 z$)
UnitStep[4211.98 + 0.00169333 t - z] +
($1.63187 \times 10^7 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 11339.7 (4211.98 + 0.00169333 t) -$
 $10965. (-4211.98 + z)$) UnitStep[-4211.98 + z]

CP[z_, t_] = ((dPdz6 * (z) + $\rho_m * g * z$) * UnitStep[L6 - z]) +

(P5[t] + dPdz5 * (z - L6) + $\rho_m * g * (z - L6)$) * (UnitStep[z - L6] - UnitStep[z - (L5 + L6)]) +
(P4[t] + dPdz4 * (z + ROP * t - (L5 + L6)) + $\rho_m * g * (z + ROP * t - (L6 + L5))$) *
(UnitStep[z + ROP * t - (L5 + L6)] - UnitStep[z + ROP * t - ((L4 + ROP * t) + L5 + L6)]) +
(P3[t] + dPdz3 * (z + ROP * t - ((L4 + ROP * t) + L5 + L6)) +
 $\rho_m * g * (z + ROP * t - (L6 + L5 + (L4 + ROP * t)))$) *
(UnitStep[z + ROP * t - ((L4 + ROP * t) + L5 + L6)] -
UnitStep[z + ROP * t - (L3 + (L4 + ROP * t) + L5 + L6)]) /. Dados

11370.3 z UnitStep[2000.05 - z] +
($1.56722 \times 10^6 + 1020.46 (411.785 + 0.00169333 t) + 11339.7 (4211.98 + 0.00169333 t) +$
 $14106.4 (-4211.98 + z)$) (-UnitStep[-4500.02 + z] + UnitStep[-4211.98 + z]) +
($-2.03519 \times 10^7 - 11339.7 (411.785 + 0.00169333 t) + 11339.7 (4211.98 + 0.00169333 t) +$
 $12176.3 (-2000.05 + z)$) (-UnitStep[-3800.2 + z] + UnitStep[-2000.05 + z]) +
($1.56722 \times 10^6 - 11339.7 (411.785 + 0.00169333 t) + 11339.7 (4211.98 + 0.00169333 t) +$
 $12360.1 (-3800.2 + 0.00169333 t + z)$)
(-UnitStep[-4211.98 + z] + UnitStep[-3800.2 + 0.00169333 t + z])

tx = 0

Δtx = 5 * 60 * 60

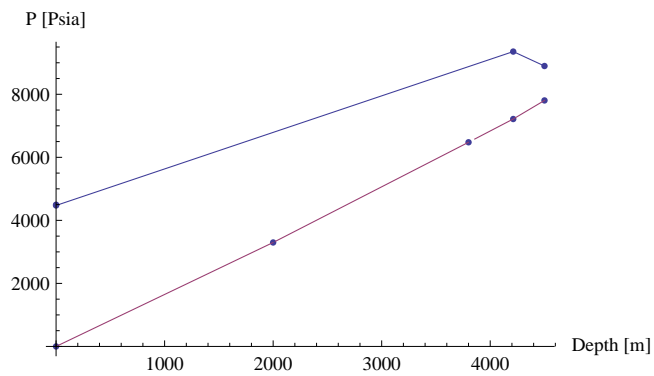
0

18000

```

Plot1 = ListPlot[
  Table[{TabP[tx][[i, 1]], Convert[TabP[tx][[i, 2]] Pascal, Psia] / PSI}, {i, 1, 9}]];
Plot2 = Plot[{Convert[DPP[zx, tx] Pascal, Psia] / PSI,
  Convert[CP[zx, tx] Pascal, Psia] / PSI}, {zx, 0, (LBH + ROP * tx) /. Dados}];
Show[Plot1, Plot2, AxesLabel → {"Depth [m]", "P [Psia]"}]

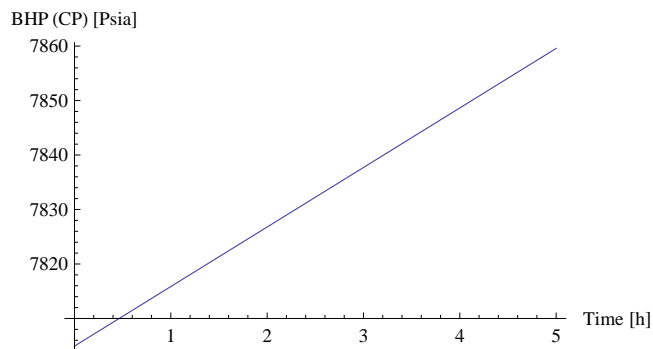
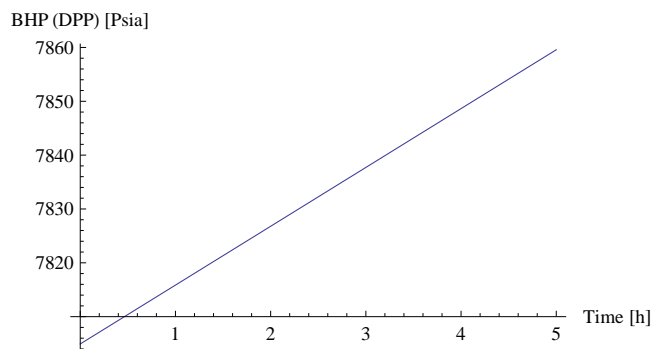
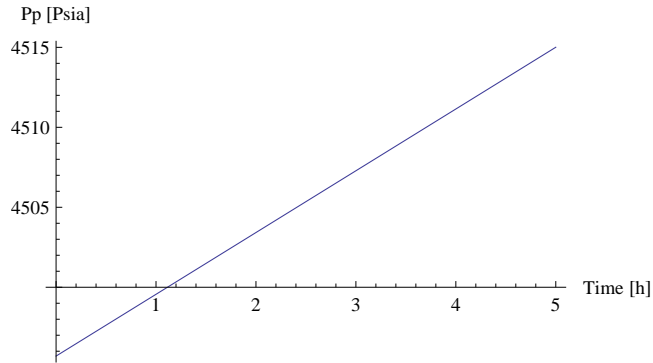
```




```

Plot[Convert[(DPP[0, t * 60 * 60] + ΔPs /. Dados) Pascal, Psia] / PSI,
  {t, 0, 5}, AxesLabel → {"Time [h]", "Pp [Psia]"}]
Plot[Convert[(DPP[LBH, t * 60 * 60] - ΔPb) Pascal, Psia] / PSI,
  {t, 0, 5}, AxesLabel → {"Time [h]", "BHP (DPP) [Psia]"}]
Plot[Convert[CP[LBH - 10-10, t * 60 * 60] Pascal, Psia] / PSI,
  {t, 0, 5}, AxesLabel → {"Time [h]", "BHP (CP) [Psia]"}]

```



Reservoir model (Ideal gas)

$\gamma = 1.78108$

1.78108

$$h[t_]= \begin{cases} \text{ROP} * t & \text{ROP} * t \leq hf \\ hf & \text{ROP} * t > hf \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{ROP} t & \text{ROP} t \leq hf \\ hf & \text{ROP} t > hf \\ 0 & \text{True} \end{cases}$$


```
rw = IDoh / 2 /. Dados
```

```
0.10795
```

```
Pf = Gf * g * Hca /. Dados
```

```
5.35872 × 107
```

```
Convert[Pf Pascal, Psia]
```

```
7772.16 PSI
```

```
Pe = Gp * g * Hdc /. Dados
```

```
5.55235 × 107
```

```
Convert[% Pascal, Psia]
```

```
8053. PSI
```

```
Pw[0]
```

```
5.38131 × 107
```

```
Convert[% Pascal, Psia]
```

```
7804.93 PSI
```

```
Bg[P_] =  $\frac{Pstd * TBH}{Tstd * P}$  /. Dados;
```

```
qstd[t_] =  $\begin{cases} \frac{2 * h[t] * \pi}{\mu g} * \frac{Tstd}{Pstd * TBH} * \frac{(Pe^2 - Pw[t]^2)}{\text{Log}\left[\frac{4 * k * t}{cg * rw^2 * \gamma * \mu g * \phi}\right]} & \text{Pe} \geq Pw[t] \\ 0 & \text{Pe} < Pw[t] \end{cases}$  /. Dados
```

```
(* Standard conditions *)
```

```
qr[t_] = qstd[t] * Bg[Pw[0]]; (* Reservoir conditions *)
```

Kick Model

```
Δt = 1 * 60;
```

```
ΔV = 0.159; (* Volume de cada elemento de simulação *)
```

```
A3 =  $\pi * \frac{(IDoh^2 - ODdc^2)}{4}$  /. Dados;
```

```
A4 =  $\pi * \frac{(IDoh^2 - ODdp^2)}{4}$  /. Dados;
```

```
A5 =  $\pi * \frac{(IDca^2 - ODdp^2)}{4}$  /. Dados;
```

```
A6 =  $\pi * \frac{(IDri^2 - ODdp^2)}{4}$  /. Dados;
```

```
V3 = L3 * A3;
```

```
V4 = (L4 + hf) * A4 /. Dados;
```

```
V5 = L5 * A5;
```

```
V6 = L6 * A6;
```

```

(*Number of volumes in each annular capacity*)
Nz3 = Ceiling[V3 / ΔV];
Nz4 = Ceiling[V4 / ΔV];
Nz5 = Ceiling[V5 / ΔV];
Nz6 = Ceiling[V6 / ΔV];

Δz3[t_] = L3 / Nz3;
Δz4[t_] = L4 / Nz4 +  $\frac{(ROP * t)}{Nz4}$  /. Dados;
Δz5[t_] = L5 / Nz5;
Δz6[t_] = L6 / Nz6;

NzT = Nz3 + Nz4 + Nz5 + Nz6;

tx = Δt;

```

```

Do[{
  Δz[i] = Δz3[tx]
}, {i, 1, Nz3}]
Do[{
  Δz[i] = Δz4[tx]
}, {i, Nz3 + 1, Nz3 + Nz4}]
Do[{
  Δz[i] = Δz5[tx]
}, {i, Nz3 + Nz4 + 1, Nz3 + Nz4 + Nz5}]
Do[{
  Δz[i] = Δz6[tx]
}, {i, Nz3 + Nz4 + Nz5 + 1, NzT}]

```

■ Boundary

```

n = 1;

vm[0] = vm3 (*liquid Velocity*)

H[0] =  $\frac{qb}{qb + qr[n * Δt]}$  /. Dados (*liquid holdup*)

BHP[t_] = Pw[t] - ρm * g * Hk /. Dados; (*Bottom hole pressure *)

(*P[0]=BHP[n*Δt]/.Dados*) (*Bottom hole pressure*)

vg[0] =  $\frac{qr[n * Δt]}{(2 * π * \frac{IDoh}{2} * h[n * Δt])}$  /. Dados; (*Gas velocity @ bottom hole*)

ρg[0] =  $\frac{P[0] * M}{(Ru * TBH)}$  /. Dados; (*Gas density*)

1.87586

0.141657

```

■ Initial Conditions

```

Do[{
  P0[i] = CP[3500 - i * Δz3[tx], 0]
}, {i, 1, Nz3}]

Do[{
  P0[i] = CP[3500 - (Nz3 * Δz3[tx] + (i - (Nz3)) * Δz4[tx]), 0]
}, {i, Nz3 + 1, Nz3 + Nz4}]

Do[{
  P0[i] = CP[3500 - (Nz3 * Δz3[tx] + Nz4 * Δz4[tx] + (i - (Nz3 + Nz4)) * Δz5[tx]), 0]
}, {i, Nz3 + Nz4 + 1, Nz3 + Nz4 + Nz5}]

Do[{
  P0[i] = CP[
    3500 - (Nz3 * Δz3[tx] + Nz4 * Δz4[tx] + Nz5 * Δz5[tx] + (i - (Nz3 + Nz4 + Nz5)) * Δz6[tx]), 0],
  If[i == NzT, P0[i] = 101 325, P0[i] = CP[
    3500 - (Nz3 * Δz3[tx] + Nz4 * Δz4[tx] + Nz5 * Δz5[tx] + (i - (Nz3 + Nz4 + Nz5)) * Δz6[tx]), 0]]
}, {i, Nz3 + Nz4 + Nz5 + 1, NzT}]

P0[97]

3.24825 × 107

ΔPf0[0] = 0;
Do[{
  ΔPf0[i] = dPd3
}, {i, 1, Nz3}]
Do[{
  ΔPf0[i] = dPd4
}, {i, Nz3 + 1, Nz3 + Nz4}]
Do[{
  ΔPf0[i] = dPd5
}, {i, Nz3 + Nz4 + 1, Nz3 + Nz4 + Nz5}]
Do[{
  ΔPf0[i] = dPd6
}, {i, Nz3 + Nz4 + Nz5 + 1, NzT}]

Do[{
  ρg0[i] = 0 /. Dados,
  H0[i] = 1.,
  vg0[i] = 0
}, {i, 1, NzT}]
ρg0[0] = ρg[0];
vg0[0] = vg[0];
vm0[0] = vm3;
H0[0] = 1. // N;

ΔPh0[i_] = (ρm * H[i] + ρg[i] * (1 - H[i])) /. Dados;
ΔPh0[0] = 0 ;

```

```

Do[{
  vm0[i] = vm3
}, {i, 1, Nz3}]
Do[{
  vm0[i] = vm4,
}, {i, Nz3 + 1, Nz3 + Nz4}]
Do[{
  vm0[i] = vm5,
}, {i, Nz3 + Nz4 + 1, Nz3 + Nz4 + Nz5}]
Do[{
  vm0[i] = vm6,
}, {i, Nz3 + Nz4 + Nz5 + 1, NzT}]

```

■ Superficial Gas and Liquid Velocities

```

Do[{
  A[i] = A3
}, {i, 1, Nz3}]
Do[{
  A[i] = A4
}, {i, Nz3 + 1, Nz3 + Nz4}]
Do[{
  A[i] = A5
}, {i, Nz3 + Nz4 + 1, Nz3 + Nz4 + Nz5}]
Do[{
  A[i] = A6
}, {i, Nz3 + Nz4 + Nz5 + 1, NzT}]

```

```

vls[i_] =  $\frac{q_b}{A[i]}$  /. Dados;
A[NzT] =  $\left( \left( \pi * \left( IDri^2 - ODdp^2 \right) \right) / 4 \right) /. \text{Dados};$ 
vgs[i_] =  $\frac{qr[n * \Delta t]}{A[i]}$  // N /. Dados;
vM[i_] = vls[i] + vgs[i];
vg[i_] =  $\begin{cases} 1.425 * vM[i] + 0.2125 & i \neq 0 \\ vg[0] & i == 0 \end{cases};$ 
Velfg = vg[1]; (*Leading Edge velocity*)

```

```
B[Hkmax_] =
```

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{Hkmax}{\Delta z[1]} & 0 < Hkmax \leq Nz3 * \Delta z[1] \\ Nz3 + \frac{Hkmax}{\Delta z[Nz3+1]} & Nz3 * \Delta z[1] < Hkmax \leq Nz3 * \Delta z[1] + Nz4 * \\ 31 + 66 + \frac{Hkmax}{\Delta z[31+67]} & Nz3 * \Delta z[1] + Nz4 * \Delta z[32] < Hkmax \leq Nz3 * \Delta z[1] + Nz4 * \\ 31 + 66 + 297 + \frac{Hkmax}{\Delta z[31+66+298]} & Nz3 * \Delta z[1] + Nz4 * \Delta z[32] + Nz5 * \Delta z[67] < Hkmax \leq Nz3 * \Delta z[1] + Nz4 * \end{array} \right.$$

```

; (*number of nodes per time step*)

```

Solution of the Diferential Equations

Continuity Liquid Equation

$$EqnVm[i_] = \frac{H[i] + H[i - 1] - H0[i] - H0[i - 1]}{2 * \Delta t} + \frac{vm[i] * H[i] - vm[i - 1] * H[i - 1]}{\Delta z[i]} == 0 /. Dados;$$

Continuity Gas Equation

$$Eqn\rho g[i_] = \frac{1}{2 * \Delta t} (\rho g[i] * (1 - H[i]) + \rho g[i - 1] * (1 - H[i - 1]) - \rho g0[i] * (1 - H0[i]) - \rho g0[i - 1] * (1 - H0[i - 1])) + \frac{1}{\Delta z[i]} (vg[i] * \rho g[i] * (1 - H[i]) - vg[i - 1] * \rho g[i - 1] * (1 - H[i - 1])) == 0 /. Dados;$$

State Equation

$$Pa[i_] = \frac{\rho g[i] * Ru * (TBH)}{M} /. Dados$$

$$196285. \rho g[i]$$

Momentum Balance Equation

■ Beggs and Brill Correlation

$$\lambda[qb_ , qr_] = \frac{qb}{qb + qr[n * \Delta t]} ;$$

$$\rho ns[i_] = \lambda[qb, qr[n * \Delta t]] * \rho m + (1 - \lambda[qb, qr[n * \Delta t]]) * \rho g[i] /. Dados;$$

$$vM2[i_] = vm[i] * H[i] + vg[i] * (1 - H[i]);$$

$$Z[i_] = \frac{\lambda[qb, qr[n * \Delta t]]}{H[i]^2};$$

$$s[i_] = \begin{cases} \frac{\log[2.2 * Z[i] - 1.2]}{\log[Z[i]]} & Z[i] > 1.2 \text{ || } Z[i] < 1 \\ \frac{-0.0523 + 3.182 * \log[Z[i]] - 0.8725 * (\log[Z[i]])^2 + 0.01853 * (\log[Z[i]])^4}{1} & Z[i] < 1.2 \text{ || } Z[i] > 1 \end{cases};$$

$$ftp[a_ , b_] = a * \text{Exp}[b];$$

```

ΔPf[0] = 0;
Do[{
  ΔPf[i] = (ftp[f3, s[i]] * ρns[i] * vM2[i]2) / (2 * Deff[IDoh, ODdc]) /. Dados
}, {i, 1, Nz3}]
Do[{
  ΔPf[i] = (ftp[f4, s[i]] * ρns[i] * vM2[i]2) / (2 * Deff[IDoh, ODdp]) /. Dados
}, {i, Nz3 + 1, Nz3 + Nz4}]
Do[{
  ΔPf[i] = (ftp[f5, s[i]] * ρns[i] * vM2[i]2) / (2 * Deff[IDca, ODdp]) /. Dados
}, {i, Nz3 + Nz4 + 1, Nz3 + Nz4 + Nz5}]
Do[{
  ΔPf[i] = (ftp[f6, s[i]] * ρns[i] * vM2[i]2) / (2 * Deff[IDri, ODdp]) /. Dados
}, {i, Nz3 + Nz4 + Nz5 + 1, NzT}]

```

```

ΔPh[i_] = (ρm * H[i] + ρg[i] * (1 - H[i])) /. Dados;

```

```

Pdist[i_] = P[i - 1] +  $\left( \frac{1}{2 * \Delta t} (vm[i] * \rho m * H[i] + vm[i - 1] * \rho m * H[i - 1] - \right.$ 
 $\left. vm0[i] * \rho m * H0[i] - vm0[i - 1] * \rho m * H0[i - 1]) \right) * \Delta z[i] +$ 
 $\Delta z[i] * \frac{1}{2 * \Delta t} * (vg[i] * \rho g[i] * (1 - H[i]) + vg[i - 1] * \rho g[i - 1] * (1 - H[i - 1]) -$ 
 $vg0[i] * \rho g0[i] * (1 - H0[i]) - vg0[i - 1] * \rho g0[i - 1] * (1 - H0[i - 1])) +$ 
 $\frac{\Delta z[i]}{2 * \Delta z[i]} (vm[i]^2 * \rho m * H[i] + vm0[i]^2 * \rho m * H0[i] - vm[i - 1]^2 * \rho m * H[i - 1] -$ 
 $vm0[i - 1]^2 * \rho m * H0[i - 1] + vg[i]^2 * \rho g[i] * (1 - H[i]) - vg0[i]^2 * \rho g0[i] * (1 - H0[i]) -$ 
 $vg0[i - 1]^2 * \rho g0[i - 1] * (1 - H0[i - 1]) - vg[i - 1]^2 * \rho g[i - 1] * (1 - H[i - 1])) +$ 
 $\Delta z[i] * 0.25 * (\Delta Pf[i] + \Delta Pf[i - 1] + \Delta Pf0[i] + \Delta Pf0[i - 1]) -$ 
 $0.25 * \Delta z[i] * (\Delta Ph[i] + \Delta Ph[i - 1] + \Delta Ph0[i] + \Delta Ph0[i - 1])$  /. Dados;

```

Program

```

eps = 0.01;
MAXITERATIONS = 10 000;
n = 1;
Nt = 20;
PGMAX = 30 * 0.159; (*Max pit gain *)
count2 = 0;
ΔSold = 0;
ΔPcold = 0;
While[(n < Nt),
  {If[n == 1, PG = qr[n * Δt]]; (*First pit gain value,
    this value is the volume gained after first time step*)

  If[PG <= PGMAX, CloseBOP = False, CloseBOP = True];
  (*Conditional for instruction after or before a kick is detected*)

  If[CloseBOP == False,
    {If[n == 1, ΔS = vg[0] * Δt * n, ΔS = vg[i] * Δt * n];

    Hk = ΔS + ΔSold;

    P[0] = BHP[n * Δt] /. Dados; (*Pressure @ Bottom hole*)

    BHPPSI = Convert[P[0] Pascal, Psia] / PSI; (*conversion from Pascal to PSI*)

    OutP3 = ToString[TableForm[Table[{n, BHPPSI}, {1}]]];
    (*Exportation for a .txt file*)
    WriteString[FP3, OutP3];
    WriteString[FP3, "\n"];
    If[P[0] < Pe,
      {qr[t_] = 
$$\frac{2 * h[t] * x * k * \pi}{\mu g} * \frac{Tstd}{Pstd * TBH} * \frac{(Pe^2 - P[0]^2)}{\text{Log}\left[\frac{4 * k * t}{cg * \tau w^2 * \gamma * \mu g * \phi}\right]} * Bg[P[0]] /. \text{Dados};$$


```

```

qstd[t_] = 
$$\frac{2 * h[t] * x * k * \pi}{\mu g} * \frac{Tstd}{Pstd * TBH} * \frac{(Pe^2 - P[0]^2)}{\text{Log}\left[\frac{4 * k * t}{cg * rw^2 * \gamma * \mu g * \phi}\right]}$$
 /. Dados

}, {qr[t_] = 0;
qstd[t_] = 0}];

If[n > 1, PG = qr[n * Δt] + qstd[(n - 1) * Δt] * Bg[P0[Ceiling[B[Hk]]]]];
Print["-----"];
Print["New Time Step ", n];
Print["Pit Gain= ", PG];
Print["BHP= ", P[0]];
(*Print["B[ΔS]= ", B[Hk]];*)
Print[(*)

*);

For[i = 1, i < Ceiling[B[Hk]], i++,
{
H[i] = 0.9999;
err = 1.0 * 10^3;
count1 = 0;
converge = False;
While[! converge,
{
If[count1 >= MAXITERATIONS, Break[]];
count1++;

If[i == 1, Soll1[i] = Solve[EqnVm[i], vm[i]],
Soll1[i] = Flatten[Solve[EqnVm[i], vm[i]] /. Soll1[i - 1], 1]];
(*Solve for mud velocity @ first iteration*)

If[i == 1, Sol2a[i] = Solve[Eqnρg[i], ρg[i]], Sol2a[i] = Flatten[Solve[Eqnρg[
i], ρg[i]] /. Sol2a[i - 1], 1]]; (*solve for nexts mud velocity*)

Pa[i] = 
$$\frac{\rho g[i] * Ru * (TBH)}{M}$$
 /. Sol2a[i] /. Dados; (*Theoretical Pressure*)

If[i > 2, P[i - 1] = Re[Part[Flatten[Pdist[i - 1] /. Soll1[i - 1] /. Sol2a[i - 1] /.

```



```

        Soll1a[i - 2] /. Sol2a[i - 2], ∞], 1]]]; (*This is the value for
        discrete pressure @ i-1 point. Pdist is a fuction of P[i-1]*)

H[i] = H[i] - 0.0001; (*Update for Holdup*)

If[i == 1, err = Part[Flatten[Abs[((Pdist[i] /. Soll1a[i] /. Sol2a[i]) - Pa[i] /.
        Sol2a[i]) / (Pa[i] /. Sol2a[i])], ∞], 1],
    err = Part[Flatten[Abs[((Pdist[i] /. Soll1a[i] /. Soll1a[i - 1] /. Sol2a[i] /.
        Sol2a[i - 1]) - Pa[i] /. Sol2a[i]) / (Pa[i] /. Sol2a[i])], ∞], 1]];

If[i == 1, P[i] = Part[Flatten[Pdist[i], ∞], 1]];
If[i == 2, P[i] = Part[Flatten[
    Pdist[i] /. Soll1a[i - 1] /. Sol2a[i - 1] /. Soll1a[i] /. Sol2a[i], ∞], 1]];

converge = If[err > eps, False, True];

}], (*end inner while*)
If[converge == True, {
    OutP = ToString[TableForm[Table[{n, i, H[i], Soll1a[i], vg[i], Pa[i]}, {1}]]];
    WriteString[FP, OutP];
    WriteString[FP, "\n"];
    (*Print["node ", i];
    Print["count1= ", count1];
    Print["next Holdup= ", H[i]];
    Print[Soll1a[i]];
    Print[Sol2a[i]];
    Print["Gas velocity =", vg[i]];
    Print["theoretical Pressure= ", Pa[i]];
    If[i==1, Print["Discrete Pressure= ", Re[Pdist[i] /. Soll1a[i] /. Sol2a[i]]],
        Print["Discrete Pressure= ", Re[Part[
            Flatten[Pdist[i] /. Soll1a[i] /. Soll1a[i - 1] /. Sol2a[i] /. Sol2a[i - 1], ∞], 1]]]];
    Print["err= ", err];
    Print["Conv= ", converge];*)
    H0[i] = H[i]; (*Update values*)
    vm0[i] = vm[i];
    ρg0[i] = ρg[i];
    vg0[i] = vg[i];
    ΔSold = Hk;
    count2++;
}];
If[i == Nz3 + Ceiling[L4 / Δz4[count2 * Δt] +  $\frac{(ROP * count2 * \Delta t)}{\Delta z4[count2 * \Delta t]}$  /. Dados], {

```

```

CasingPressurePSI = Convert [Part [Flatten [Pa[i], ∞], 1] Pascal, Psia] / PSI;
OutP4 = ToString [TableForm [Table [{n, CasingPressurePSI}, {1}]]];
WriteString [FP4, OutP4];
WriteString [FP4, "\n"]}]
}]] (*end first for*)
(*end first conditional*), {(*Begin second conditional*)
Print ["-----"];
Print ["BOP Closed"];
Print ["New Time Step ", n];
Print ["Pit Gain= ", PGMAX];
Print [(*)];
(*New Initial Conditions*)

$$\Delta z4[t_] = L4 / Nz4 + \frac{(ROP * t)}{Nz4} /. \text{Dados};$$
 (*height increased by drilling*)
Do[{
  
$$\Delta z[i] = \Delta z4[\text{count2} * \Delta t]$$

  }, {i, Nz3 + 1, Nz3 + Nz4}]; (*contribution in each Δz by height increase*)

If[Hk < L3 + L4 + L5, {ΔS = vg[i] * (n) * Δt; (*Gas Height*)
  Hk = ΔS + ΔSold;
}];
(*ΔS=vg[i]*(n)*Δt;(*Gas Height*)

Hk=ΔS+ΔSold;*)

(*Print ["Hk ", Hk];*)
(*Print ["ΔS ", ΔS];*)

If[Hk ≥ L3 + L4 + L5 + (ROP * count2 * Δt /. Dados),
  Hk = L3 + L4 + L5 + (ROP * count2 * Δt /. Dados)];

(*Print ["new Hk ", Hk];*)

BK[Hkmax_] =

$$\left[ \begin{array}{ll} \frac{Hkmax}{\Delta z[1]} & 0 < Hkmax \leq L3 \\ Nz3 + \frac{Hkmax-L3}{\Delta z[Nz3+1]} & L3 < Hkmax \leq L3 + \Delta z4[\text{count2} * \Delta t] * Nz4 \\ Nz3 + Nz4 + \frac{Hkmax-L3-L4}{\Delta z[Nz3+Nz4+1]} & L3 + \Delta z4[\text{count2} * \Delta t] * Nz4 < Hkmax \leq L3 + \Delta z4[\text{count2} * \Delta t] * Nz4 + L5 \\ Nz3 + Nz4 + Nz5 + \frac{Hkmax-L3-L4-L5}{\Delta z[Nz3+Nz4+Nz5+1]} & L3 + \Delta z4[\text{count2} * \Delta t] * Nz4 + L5 < Hkmax \leq L3 + \Delta z4[\text{count2} * \Delta t] * Nz4 + L5 + \Delta z4[\text{count2} * \Delta t] * Nz5 \end{array} \right.$$


```

```

;
(*number of max node per time step*)

(*Print["B[Hk] ",BK[Hk]];
Print["BK[ΔS]", BK[ΔS]];*)

ΔPc[t_] = (ρm) * g * 1.425 * t /. Dados; (*this rate can be found
in Shinititi's dissertation, but this expression must be improved*)

P[0] = Pw[count2 * Δt] - ρm * g * (Hk) + ΔPc[n * Δt] + ΔPcold /. Dados;
(*bottom hole pressure updated with shut-in pressure rise rate ΔPc*)

If[P[0] ≥ Pe, P[0] = Pe];

BHPPSI = Convert[P[0] Pascal, Psia] / PSI;

OutP3 = ToString[TableForm[Table[{n, BHPPSI}, {1}]]];
WriteString[FP3, OutP3];
WriteString[FP3, "\n"];

If[P[0] ≥ Pe, P[0] = Pe];

ρg[0] = 
$$\frac{P[0] * M}{(Ru * TBH)}$$
 /. Dados;
Print["BHP = ", P[0]];
Print["ρg @ bottom hole = ", ρg[0]];

If[P[0] < Pe,
{qr[t_] = 
$$\frac{2 * h[t] * x * k * \pi}{\mu g} * \frac{Tstd}{Pstd * TBH} * \frac{(Pe^2 - P[0]^2)}{\text{Log}\left[\frac{4 * k * t}{cg * rw^2 * \gamma * \mu g * \phi}\right]}$$
 * Bg[P[0]] /. Dados;

qstd[t_] = 
$$\frac{2 * h[t] * x * k * \pi}{\mu g} * \frac{Tstd}{Pstd * TBH} * \frac{(Pe^2 - P[0]^2)}{\text{Log}\left[\frac{4 * k * t}{cg * rw^2 * \gamma * \mu g * \phi}\right]}$$
 /. Dados

}, {qr[t_] = 0;
qstd[t_] = 0}];

vg[0] = 
$$\frac{qr[n * \Delta t]}{(2 * \pi * \frac{IDoh}{2} * h[count2 * \Delta t])}$$
 /. Dados; (*Gas velocity @ bottom hole*)
Print["vg @ bottom hole = ", vg[0]];

```

```

If[Ceiling[BK[Hk]] ≥ Nz3 + Nz4 + Nz5, Nhk = Nz3 + Nz4 + Nz5, Nhk = Ceiling[BK[Hk]]];

For[i = 1, i < Nhk, i++,
{
  vm[0] = 0;
  vm[Nz3 + Nz4 + Nz5 + 1] = 0;
  vg[Nz3 + Nz4 + Nz5 + 1] = 0;
  H[i] = 0.9999;
  err = 1.0 * 10^3;
  count1 = 0;
  converge = False;
  While[! converge,
  {

    If[count1 >= MAXITERATIONS, Break[]];
    count1++;

    If[i == 1, Sol1a[i] = Solve[EqnVm[i], vm[i]],
      Sol1a[i] = Flatten[Solve[EqnVm[i], vm[i]] /. Sol1a[i - 1], 1]];

    If[i == 1, Sol2a[i] = Solve[Eqnρg[i], ρg[i]],
      Sol2a[i] = Flatten[Solve[Eqnρg[i], ρg[i]] /. Sol2a[i - 1], 1]];

    Pa[i] = 
$$\frac{\rho g[i] * Ru * (TBH)}{M}$$
 /. Sol2a[i] /. Dados;

    If[i > 2, P[i - 1] = Re[Part[Flatten[Pdist[i - 1] /. Sol1a[i - 1] /.
      Sol2a[i - 1] /. Sol1a[i - 2] /. Sol2a[i - 2], ∞], 1]]];

    H[i] = H[i] - 0.0001;

    If[i == 1, err = Part[Flatten[Abs[((Pdist[i] /. Sol1a[i] /. Sol2a[i]) - Pa[i] /.
      Sol2a[i]) / (Pa[i] /. Sol2a[i])], ∞], 1],
      err = Part[Flatten[Abs[((Pdist[i] /. Sol1a[i] /. Sol1a[i - 1] /. Sol2a[i] /.
      Sol2a[i - 1]) - Pa[i] /. Sol2a[i]) / (Pa[i] /. Sol2a[i])], ∞], 1]];
  }
}

```

```

If[i == 1, P[i] = Part[Flatten[Pdist[i], ∞], 1]];
If[i == 2, P[i] = Part[Flatten[
    Pdist[i] /. Soll1a[i - 1] /. Sol2a[i - 1] /. Soll1a[i] /. Sol2a[i], ∞], 1]];

converge = If[err > eps, False, True];

}], (*end inner while*)
If[converge == True,
{OutP2 = ToString[TableForm[Table[{n, i, H[i], Soll1a[i], vg[i], Pa[i]}, {1}]]];
WriteString[FP2, OutP2];
WriteString[FP2, "\n"];
(*Print["node ", i];
Print["count1= ", count1];
Print["next Holdup= ", H[i]];
Print[Soll1a[i]];
Print[Sol2a[i]];
Print["Gas velocity =", vg[i]];
Print["theoretical Pressure= ", Pa[i]];
If[i==1, Print["Discrete Pressure= ", Re[Pdist[i]/.Soll1a[i]/.Sol2a[i]]],
Print["Discrete Pressure= ", Re[Part[
    Flatten[Pdist[i]/.Soll1a[i]/.Soll1a[i-1]/.Sol2a[i]/.Sol2a[i-1], ∞], 1]]];
Print["err= ", err];
Print["Conv= ", converge];*);
H0[i] = H[i];
vm0[i] = vm[i];
ρg0[i] = ρg[i];
vg0[i] = vg[i];
ΔPcold = ΔPc[n * Δt];
ΔSold = Hk;
}];

If[i == Ceiling[Nz3 + L4 / Δz4[count2 * Δt] +  $\frac{(ROP * count2 * \Delta t)}{\Delta z4[count2 * \Delta t]}$  /. Dados], {
    CasingPressurePSI = Convert[Part[Flatten[Pa[i], ∞], 1] Pascal, Psia] / PSI;
    OutP4 = ToString[TableForm[Table[{n, CasingPressurePSI}, {1}]]];
    WriteString[FP4, OutP4];
    WriteString[FP4, "\n"]];

}], (*end second for*)

If[P[0] ≥ Pe, Print["Well Stabilized!"]]
}], (*end second conditional*);

```

```

    } n++;
  ] (*end outer while*)

```

New Time Step 1

Pit Gain= 0.0905646

BHP= 3.5322×10^7

New Time Step 2

Pit Gain= 7.44986

BHP= 2.1177×10^7

BOP Closed

New Time Step 3

Pit Gain= 4.77

BHP = 1.11898×10^7

ρg @ bottom hole =57.0078

vg @ bottom hole = 1.20482

BOP Closed

New Time Step 4

Pit Gain= 4.77

BHP = 1.50077×10^7

ρg @ bottom hole =76.4585

vg @ bottom hole = 1.07201

BOP Closed

New Time Step 5

Pit Gain= 4.77

BHP = 1.69166×10^7

ρg @ bottom hole =86.1839

vg @ bottom hole = 1.1026

BOP Closed

New Time Step 6

Pit Gain= 4.77

BHP = 1.88255×10^7

ρ_g @ bottom hole =95.9092

vg @ bottom hole = 1.09589

BOP Closed

New Time Step 7

Pit Gain= 4.77

BHP = 2.07345×10^7

ρ_g @ bottom hole =105.635

vg @ bottom hole = 1.05986

BOP Closed

New Time Step 8

Pit Gain= 4.77

BHP = 2.26434×10^7

ρ_g @ bottom hole =115.36

vg @ bottom hole = 0.999648

BOP Closed

New Time Step 9

Pit Gain= 4.77

BHP = 2.45524×10^7

ρ_g @ bottom hole =125.085

vg @ bottom hole = 0.918719

BOP Closed

New Time Step 10

Pit Gain= 4.77

BHP = 2.64613×10^7

ρg @ bottom hole =134.811

vg @ bottom hole = 0.819477

BOP Closed

New Time Step 11

Pit Gain= 4.77

BHP = 2.83703×10^7

ρg @ bottom hole =144.536

vg @ bottom hole = 0.703659

BOP Closed

New Time Step 12

Pit Gain= 4.77

BHP = 3.02792×10^7

ρg @ bottom hole =154.261

vg @ bottom hole = 0.572545

BOP Closed

New Time Step 13

Pit Gain= 4.77

BHP = 3.21881×10^7

ρg @ bottom hole =163.987

vg @ bottom hole = 0.427105

BOP Closed

New Time Step 14

Pit Gain= 4.77

BHP = 3.40971×10^7

ρg @ bottom hole =173.712

vg @ bottom hole = 0.268086

BOP Closed

New Time Step 15

Pit Gain= 4.77

BHP = 3.6006×10^7

ρg @ bottom hole =183.438

vg @ bottom hole = 0.0960745

BOP Closed

New Time Step 16

Pit Gain= 4.77

BHP = 3.70158×10^7

ρg @ bottom hole =188.582

vg @ bottom hole = 0

Well Stabilized!

BOP Closed

New Time Step 17

Pit Gain= 4.77

BHP = 3.70158×10^7

ρg @ bottom hole =188.582

vg @ bottom hole = 0

Well Stabilized!

BOP Closed

New Time Step 18

Pit Gain= 4.77

BHP = 3.70158×10^7

ρg @ bottom hole =188.582

vg @ bottom hole = 0

Well Stabilized!

BOP Closed

New Time Step 19

Pit Gain= 4.77

$$\text{BHP} = 3.70158 \times 10^7$$

$$\rho g @ \text{bottom hole} = 188.582$$

$$vg @ \text{bottom hole} = 0$$

Well Stabilized!