



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – DPET

CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO – CEP

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DIDÁTICA
COMPUTACIONAL PARA O PLANEJAMENTO DE UM POÇO
DIRECIONAL**

Felipe Augusto Novaes da Silva

Orientador: Prof. Msc. Gustavo Lira

Novembro de 2014

FELIPE AUGUSTO NOVAES DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DIDÁTICA
COMPUTACIONAL PARA O PLANEJAMENTO DE UM POÇO
DIRECIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em ____ de _____ de 2014.

Prof. Msc. Gustavo Arruda Ramalho Lira
Orientador – UFRN

Prof. MSc. Sérgio José Gonçalves e Silva
Membro Examinador – UFRN

Eng. Juan de Medeiros Trindade
Membro Externo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida, por me dar forças nos momentos de maior dificuldade e as várias graças alcançadas no decorrer da caminhada.

A toda minha família, por todo suporte ao longo desses oito anos após minha despesa da Força Aérea.

Ao meu orientador, Prof. Gustavo Lira, por aceitar guiar meus passos no final da minha trajetória na graduação e pelo exemplo de competência profissional que eu almejo seguir.

Aos meus amigos Anderson Danilo, Dyego Queiroz, Erivaldo Junior, Fábio Santos, Franklin Victor, Gabriel Bessa, Juan Medeiros, Lucas Gurgel e Rafael Soares pela parceria e momentos de alegria e dificuldade compartilhados.

A querida Anaíra Silva, por todo apoio e companheirismo ao longo desse período.

A todos os professores do Departamento de Engenharia de Petróleo e a alguns da Escola de Ciências e Tecnologia, pelos valiosos ensinamentos.

E ao Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT/UFRN), por toda prestatividade desde o início da minha graduação.

RESUMO

A perfuração direcional é uma técnica de, intencionalmente, desviar a trajetória de um poço da vertical, para atingir objetivos que não se encontram diretamente abaixo da sua localização na superfície. Um adequado planejamento direcional é a chave do sucesso de um poço direcional. Este trabalho apresenta e descreve a modelagem matemática de um *software* didático para realizar o planejamento de um poço direcional. A metodologia adotada planeja poços para a trajetória do tipo I, podendo ser poços horizontais ou poços do tipo II, atingindo o reservatório perpendicularmente. A modelagem matemática permite a solução de sistemas matemáticos possíveis determinados e indeterminados, possibilitando ao usuário uma ferramenta para simular diferentes cenários de poço. Os dados obtidos foram comparados com os mesmos de um software comercial, validando o trabalho. Com resultados obtidos, o usuário dispõe de todos os dados relevantes do planejamento do poço, bem como uma tabela pronta para exportação contendo informações metro a metro de toda trajetória direcional.

Palavras-chave: *Software* de Perfuração de Poços, Perfuração Direcional, Planejamento Direcional.

ABSTRACT

The directional drilling is a technique used to bend the path of a vertical well in order to reach a goal which is not straight below of the coordinates on the surface. A proper well planning is the key of success of the directional drilling. This work presents and describes the mathematic modeling of a new didactic software, which designs the directional drilling planning. The methodology adopted plans well project of type I, allowing horizontal wells, and well project of type II, which reaches the target with an angle of 90° . The mathematic modeling allows the resolution of determined and undetermined systems, which gives the user a tool to simulate several different well sceneries. The output data were compared with a commercial software in order to approve the work. With these results, the user has all relevant data about the planning, as a table for exportation with all information of the directional path meter to meter.

Keywords: Drilling Software, Directional Drilling, Directional Planning.

Sumário

Sumário	6
1. Introdução.....	12
1.1. Motivação.....	13
1.2. Objetivos.....	13
2. Aspectos Teóricos.....	15
2.1. Perfuração Direcional.....	15
2.1.1. Aplicações de Poços Direcionais.....	15
2.1.2. Projeto de Poços Direcionais.....	16
2.1.3. Sistema de Referência	16
2.1.4. Planejamento Direcional	17
2.1.5. Definições Básicas	17
2.2. Trajetórias direcionais.....	20
2.2.1. Trajetória Tipo I (Build-Hold).....	20
2.2.2 Trajetória Tipo II (tipo S).....	22
2.2.3 Poços horizontais	23
2.3. Projeções	24
2.3.1. Projeção horizontal	24
2.3.2. Projeção vertical.....	24
2.4. Classificação do poço quanto ao afastamento	24
3. Metodologia e Desenvolvimento da Modelagem Matemática	26
3.1. Apresentação do <i>Software</i>	26
3.1.1. Dados de Entrada	27
3.1.2. Dados Calculados	29
3.2. Rotinas.....	30
3.2.1. Poço Tipo I: Rotina para determinar valor do Ângulo Central através do KOP.	31
3.2.2. Poço Tipo I: Rotina para determinar valor do KOP através do Ângulo Central	32
3.2.3. Poço Tipo II: Rotina para determinar o valor do Ângulo Central através dos valores de DOR e KOP	33
3.2.4. Poço Tipo II: Rotina para determinar o valor do KOP através dos valores de DOR e Ângulo Central.....	34
3.2.5. Poço Tipo II: Rotina para determinar o valor do DOR através dos valores de KOP e Ângulo Central.....	35

3.2.6. Poço Tipo II: Rotina para determinar valores de KOP e Ângulo Central através da DOR.	35
3.2.7. Poço Tipo II: Rotina para determinar os valores de DOR e Ângulo Central através do KOP	37
3.2.8. Poço Tipo II: Rotina para determinar os valores de DOR e KOP através do Ângulo Central	38
3.3. Saídas do Programa.....	39
3.3.1. Vistas Lateral e Superior.....	39
3.3.2. Informações Gerais do Poço	40
3.3.3. Alerta de incompatibilidade.....	42
3.3.4. Tabela de coordenadas do poço	43
3.4. Outras funcionalidades	45
3.4.1. Limpar dados.....	45
3.4.2. Consultar o afastamento.....	45
4. Resultados e Discussões.....	47
4.1. Comparação com Dados de Campo de Poços.....	47
4.2. Cenários relevantes.....	51
4.2.1. Máximo KOP	51
4.2.2. Poços Horizontais	53
4.3. Erro relativo.....	55
5. Conclusão	58
Referências Bibliográficas	60
6. ANEXOS	61
ANEXO I: TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i>	62
ANEXO II: DADOS REAIS DO POÇO PROJETADO EM UM SOFTWARE COMERCIAL	63
ANEXO III: FORMULÁRIO	64

Lista de Figuras

Figura 1. Causas de Poços Direcionais (Fonte: Thomas, 2001).	15
Figura 2. Desenho esquemático de um poço direcional (Fonte: Nogueira, 2013).	17
Figura 3. Whipstock (Fonte: Smartoiltool.net).....	19
Figura 4. Trajetória tipo I (Fonte: Rocha, 2011).	21
Figura 5. Trajetória tipo II (Fonte: Adaptado de Rocha,2011).	22
Figura 6. Poço Horizontal (Fonte: Adaptado de Rocha, 2011).	23
Figura 7. Interface gráfica do software.	27
Figura 8. Seção de Dados de Entrada.	28
Figura 9. (a) Seção de Dados Calculados para poços do tipo I e (b) para poços do tipo II.....	29
Figura 10. Vistas Laterais para DOR =4°/30m e diferentes valores de Ângulo Central.....	31
Figura 11. Fluxograma da rotina para poços do tipo I com entrada do valor do KOP.	32
Figura 12. Fluxograma da rotina para poços do tipo I com entrada do valor do Ângulo Central.	33
Figura 13. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada dos valores de DOR e KOP.	33
Figura 14. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada dos valores de DOR e Ângulo Central.....	34
Figura 15. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada dos valores de KOP e Ângulo Central.	35
Figura 16. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada apenas do valor da DOR. .	36
Figura 17. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada apenas do valor do KOP..	37
Figura 18. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada apenas do valor do Ângulo Central.	38
Figura 19. Vista Lateral do poço.	39
Figura 20. Vista Superior do poço.	40
Figura 21. Seção de Informações Gerais do poço obtidas.	40
Figura 22. Situação e Alerta de incompatibilidade.	42
Figura 23. Exemplo de um poço incompatível.	42
Figura 24. Tabela de pontos da trajetória do poço.	43
Figura 25. Tabela de dados exportados em arquivo em formato .txt	44
Figura 26. Botão de limpeza de dados.	45
Figura 27. Janela de consulta de afastamento.	45

Figura 28. Dados de entrada da simulação.	48
Figura 29. Dados Calculados da simulação.	48
Figura 30. Vista Lateral do poço simulado.	48
Figura 31. Vista superior do poço simulado.	49
Figura 32. Informações de saída do poço simulado.	49
Figura 33. Arquivo txt das coordenadas do poço.	50
Figura 34. Exemplo de poço tipo II com entrada apenas do valor de DOR = 2°/30m.	51
Figura 35. Exemplo de poço tipo II com entrada apenas do valor de DOR = 2°/30m e KOP= 1600m	52
Figura 36. Exemplo de poço tipo II com entrada apenas do valor de $\theta = 60^\circ$	53
Figura 37. Exemplo de um poço tipo I horizontal.	54
Figura 38. Exemplo de poço horizontal <i>ExtendedReach</i>	55
Figura 39. Área relacionada à Classificação de poço quanto ao afastamento.	55
Figura 40. Exemplo de um poço <i>Extended Reach</i>	56

Lista de Tabelas

Tabela 1. Classificação quanto ao afastamento (Fonte: Rocha, 2011).	24
Tabela 2. Tabulação dos resultados obtidos no software comercial e do software acadêmico.	50

Lista de Símbolos e Abreviaturas

AB – Trecho *Slant* (m);

Afast – Afastamento entre a cabeça do poço e o objetivo (m);

BUR – Buildup Rate taxa de ganho de ângulo ($^{\circ}/30\text{m}$);

DOR – Drop-off Rate taxa de perda de ângulo ($^{\circ}/30\text{m}$);

DLS – Dog-Leg Severity;

EOB – End of Buildup (Final do Build up);

EOD – End of Drop-off (Final do Drop-off);

KOP – Kick-Off Point (m);

M1 – Profundidade medida do poço na estação 1;

M2 – Profundidade medida do poço na estação 2;

K – Constante para o cálculo de *BUR* e *DOR* igual a 30;

PM – Profundidade medida (m);

Slant – Trecho tangente ou reto entre o *EOB* e o início do Drop-off (m);

TVD – True Vertical Depth (Profundidade Vertical) (m).

Letras gregas

α_1 – inclinação do poço na estação 1;

α_2 – inclinação do poço na estação 2;

θ – ângulo máximo do trecho central ($^{\circ}$);

ΔE – Distanciamento latitudinal entre as coordenadas UTM do objetivo e do poço (m);

ΔN – Distanciamento longitudinal entre as coordenadas UTM do objetivo e do poço

(m);

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

A perfuração direcional é uma técnica usada na exploração e na produção de petróleo para se desviar a trajetória de um poço intencionalmente, na qual o objetivo a ser atingido está localizado em coordenadas diferentes daquelas da cabeça do poço, necessitando que o poço saia de uma linha vertical. Quando essa técnica permite que vários poços de desenvolvimento sejam perfurados a partir de uma única plataforma, reduz custos com instalações submarinas e linhas de produção. Mesmo na perfuração vertical a broca move-se em direções que fogem a esse eixo por razões que podem ser causadas por: não uniformidade das formações, a disposição das camadas em relação umas às outras e fatores de ordem operacional.

A capacidade de produção de petróleo é relacionada à área de contato entre o poço e a formação, esta área pode ser maior com o sucesso da perfuração direcional, uma vez que essa tecnologia permite perfurar lateralmente ou horizontalmente, expondo dessa forma uma maior área do reservatório. Assim, consegue-se maximizar a recuperação através de um número menor de poços perfurados.

A perfuração direcional é uma das especialidades ligadas à construção de poços de petróleo que mais evoluiu ao longo dos últimos anos. Poços cada vez mais complexos são propostos a cada ano e o resultado disso é um número expressivo de recordes sistematicamente batidos. A perfuração direcional também tem sido vista como um método de se aumentar a produtividade de um poço, ao mesmo tempo em que se reduz o impacto ambiental, sendo esse um grande problema associado a operações ligadas à produção de óleo e gás (ROCHA, 2011).

Nesse contexto, ferramentas computacionais que auxiliam o planejamento do poço e o monitoramento da trajetória se mostram cada vez mais necessárias e cada vez mais aprimoradas, para que reservatório seja alcançado no local planejado com a menor margem de erro possível.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, o primeiro referente à introdução e objetivos, o segundo aborda os aspectos teóricos fundamentais para a realização do trabalho. Posteriormente, é apresentada a metodologia e o desenvolvimento da modelagem matemática, seguido dos resultados e discussões, conclusão e, por fim, as referências bibliográficas.

1.1. Motivação

O contexto brasileiro nas universidades de engenharia é diferente da situação das universidades americanas, por exemplo. Nos Estados Unidos, os estudantes têm acesso aos mesmos *softwares* que as empresas usam na indústria. Assim, a formação desses estudantes pode ser considerada melhor, nesse aspecto, pois a utilização de tais ferramentas auxilia o estudante a compreender melhor os fenômenos e as operações.

Na área de perfuração direcional, não se encontrou software gratuito no mercado que os estudantes possam utilizar para auxiliá-los na vida acadêmica. A Universidade Federal do Rio Grande do Norte também não possui a licença de nenhum software de perfuração direcional utilizados na indústria. Assim sendo, o objetivo desse trabalho foi criar uma ferramenta computacional gratuita, de fácil utilização, que poderá ser utilizada nas aulas da disciplina de Perfuração Direcional sobre o planejamento direcional de poços de petróleo.

1.2. Objetivos

Este trabalho teve como objetivos:

- Desenvolver um software de perfuração direcional que planeje alguns tipo de trajetória de poços direcionais.
- Explicar a lógica do algoritmo.
- Validar o software aplicando-o em dados reais com resultados conhecidos.
- Criar um fácil tutorial para os usuários de como utilizar o programa.
- Propor melhorias para futuras versões.

Capítulo 2

Aspectos Teóricos

2. Aspectos Teóricos

2.1. Perfuração Direcional

A perfuração direcional é uma técnica de, intencionalmente, desviar a trajetória de um poço da vertical, para atingir objetivos que não se encontram diretamente abaixo da sua localização na superfície (THOMAS, 2001).

2.1.1. Aplicações de Poços Direcionais

A aplicação de poços inclinados é capaz de atender a diversos objetivos, assim como contornar situações, onde problemas de locação de sonda se tornam fatores críticos. São diversas as razões que justificam uma perfuração deste tipo, dentre elas podemos citar restrições de ordem econômica e restrições ambientais (PORTO, 2009).

Um poço direcional é desenvolvido, geralmente, quando se deseja (Figura 1):

- Controlar um blowout através da perfuração de poços de alívio;
- Atingir formações produtoras que estejam abaixo de locações inacessíveis;
- Desviar a trajetória do poço de acidentes geográficos, tais como domos salinos e falhas;
- Perfurar vários poços no mesmo ponto, como é o caso da produção através de plataformas marítimas;
- Desviar poços que tiveram o trecho final perdido por problemas operacionais, como, por exemplo, a prisão da coluna de perfuração (THOMAS, 2001).

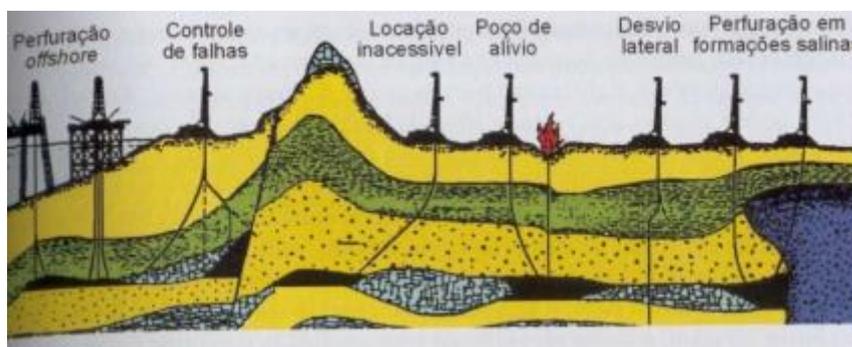


Figura 1. Causas de Poços Direcionais (Fonte: Thomas, 2001).

2.1.2. Projeto de Poços Direcionais

O projeto direcional é parte integrante do projeto de perfuração de um poço, consiste na determinação da trajetória que o poço deverá seguir para atingir o objetivo, além de criar ferramentas e procedimentos a serem usados ou seguidos. Para se elaborar o projeto do perfil de um poço direcional, devemos inicialmente coletar as informações necessárias ao cálculo e à adequação do perfil às diversas formações que serão atravessadas durante a perfuração. Como principais elementos para a definição do perfil direcional, podemos destacar:

- Coordenadas UTM da localização da Sonda e dos objetivos;
- Profundidade vertical dos objetivos, e do poço, geolocalizadas (riscos geológicos);
- Determinação do ponto e desvio orientado do poço (KOP) e a seção de crescimento da inclinação (buildup);
- Escolha do perfil do poço.

2.1.3. Sistema de Referência

O Sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) é um sistema de coordenadas baseado no plano cartesiano (eixo x,y) e usa o metro (m) como unidade para medir distâncias e determinar a posição de um objeto. Diferentemente das Coordenadas Geográficas (ou Geodésicas), o sistema UTM, não acompanha a curvatura da Terra e por isso seus pares de coordenadas também são chamados de coordenadas planas (Georeference.blogspot).

O estabelecimento de posição da locação do poço e dos objetivos em um mesmo sistema referencial geodésico é o primeiro passo para o traçado de sua trajetória. Dessa forma, usa-se o sistema de coordenadas UTM para poços de petróleo.

De posse das coordenadas UTM da locação do poço e dos objetivos, é possível calcular alguns elementos da trajetória como a distância em plano entre a cabeça do poço e do objetivo, chamado afastamento, explicado no item 2.1.5.

2.1.4. Planejamento Direcional

Entre as fases do projeto de um poço de petróleo estão a prospecção, o planejamento, a perfuração associada com a perfilagem, a completção e por fim o desenvolvimento.

Um adequado planejamento pode ser a chave do sucesso de um poço direcional, principalmente para aqueles mais complicados, como poços de grande afastamento. O planejamento envolve o estabelecimento da trajetória direcional, análises técnicas que irão auxiliar a definição da coluna de perfuração adequada e pesquisa sobre as melhores práticas operacionais para se perfurar em determinada região.

A trajetória direcional em si, além de atingir o objetivo geológico, deverá contemplar necessidades da equipe de geólogos interessada em passar por determinadas formações, bem como da equipe de perfuração preocupada com a exequibilidade da mesma. Análises de anticisão para evitar que o projeto não entre em região de colisão com outro poço já perfurado é também de grande relevância nessa etapa (ROCHA, 2011).

2.1.5. Definições Básicas

O caminho percorrido pela broca, partindo da cabeça do poço até atingir o objetivo, é chamado de trajetória direcional. Conforme ilustrado na Figura 2, a trajetória direcional engloba os seguintes conceitos:

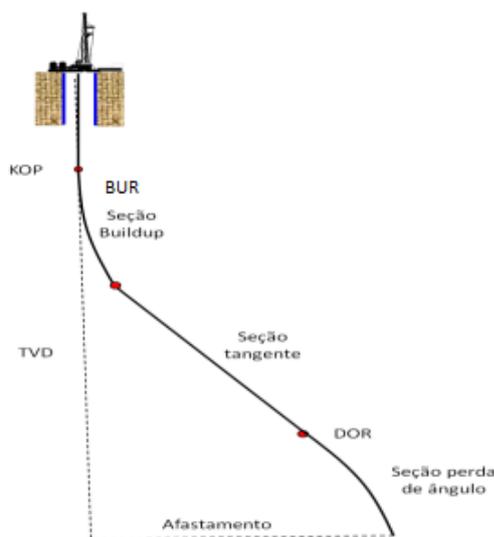


Figura 2. Desenho esquemático de um poço direcional (Fonte: Nogueira, 2013).

a) **Afastamento:** Determinado poço é caracterizado como direcional quando o objetivo está localizado a certa distância no plano horizontal da cabeça do poço. Esta distância horizontal é chamada de afastamento. De posse das coordenadas UTM o seu valor em metros é dado por:

Afastamento:

$$Afast = \sqrt{\Delta E^2 - \Delta N^2} \quad (1)$$

b) **TVD e PM:** A trajetória vertical entre a cabeça do poço a qualquer ponto do poço é chamada profundidade vertical (True Vertical Depth – TVD), enquanto a distância percorrida pela broca para atingir essa profundidade é chamada de profundidade medida (Measured Depth – MD) (THOROGOOD, 1980). Tais medidas são importantes para os cálculos de várias informações futuras necessárias no projeto do poço, como por exemplo, a TVD é necessária para calcular as geopressões a qualquer ponto de profundidade do poço, e a PM é usada para calcular o comprimento total da coluna de perfuração e revestimento e saber a quantidade de tubos necessária.

c) **Objetivo:** O objetivo é o local no espaço onde a trajetória deve atingir, possui coordenadas UTM e TVD. Geralmente é definido pelo geólogo ou pelo engenheiro de reservatório e pode ser um ponto em profundidade ou mesmo uma seção inteira de uma formação com diferentes inclinações.

d) **Direção:** A direção é definida pelo ângulo formado entre a projeção horizontal do poço e o norte de referência (norte verdadeiro, magnético ou grid norte). Pode ser representada de duas formas: em azimute ou em rumos, sendo que a primeira é a mais usual. O azimute varia de 0 a 360°, medindo-se no sentido horário a partir do norte de referência. Os quadrantes são formados por círculo trigonométrico em quatro seções de 90°, resultando nos quadrantes nordeste (NE), sudeste (SE), sudoeste (SW) e noroeste (NW). É importante lembrar que cada quadrante varia de 0 a 90°. A direção do azimute pode ser calculada pela equação 2.

Direção do Azimute:

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{\Delta E}{\Delta N}\right) \quad (2)$$

e) **KOP:** abreviação para kickoff point, é o começo da seção de ganho de ângulo. Provido por uma ferramenta de deflexão, que pode ser um *whipstock*, observado na Figura 3 abaixo.

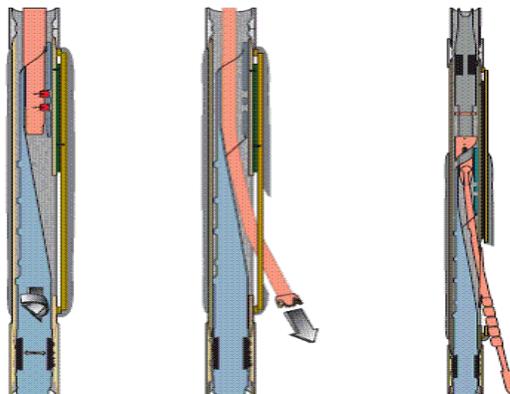


Figura 3. Whipstock (Fonte: Smartoiltool.net)

f) **Estação e Inclinação do poço a cada estação, α :** Estação é um ponto de medição de profundidade, inclinação e direção durante a execução do poço. Inclinação do poço a cada estação é o ângulo entre um vetor tangente à trajetória em um ponto e o vetor gravidade neste mesmo ponto. Será representada pelo símbolo α .

g) **Ângulo máximo central, θ :** A todo final de seção de ganho ou perda de ângulo, atinge-se um ângulo máximo que será mantido constante em trecho reto, chamado de seção tangente.

h) **Buildup:** é a seção onde acontece o ganho de ângulo, na qual α (inclinação do poço a cada estação) varia com a profundidade. O final do buildup é chamado End of Buildup (EOB) e ocorre quando o trecho reto é atingido.

i) **Trecho *Slant*:** é a seção onde a inclinação é mantida até atingir o objetivo ou até que haja uma nova seção de ganho ou perda de ângulo.

j) **Drop-off:** é o trecho do poço onde ocorre perda de ângulo, a taxa de perda é descrita por Drop-off rate (DOR) e o final drop-off, chamado de EOD, ocorre quando a inclinação de 0° é atingida.

k) **Dogleg β e Dogleg Severity DLS:** Dogleg severity é a medida da quantidade de mudança na inclinação de um poço, normalmente expressa em graus por 30 metros da medida do curso. (directionaldrilling.blogspot)

l) **Raio de Curvatura:** é o raio dos arcos de circunferência usados nos cálculos dos trechos de buildup e drop-off (ROCHA, 2011).

2.2. Trajetórias direcionais

O estabelecimento da trajetória que deverá ser seguida pelo poço é um dos itens mais importantes do planejamento. É interessante enfatizar que algumas trajetórias são difíceis, outras demandam equipamentos pouco convencionais e outras são simplesmente impossíveis de serem realizadas. De maneira geral, pode-se dizer que os vários fatores que afetam a trajetória direcional incluem:

- Profundidade total do poço e afastamento;
- Limitações de torque e arraste;
- Presença de formações rasas e inconsolidadas que dificultam o ganho de ângulo, resultando num aprofundamento do KOP;
- Aspectos geológicos, como direção, mergulho das camadas das formações e a presença de falhas;
- Existência de formações instáveis que podem limitar a inclinação do poço;
- Requisitos de reservatório, como profundidade de entrada, formato e direção do objetivo.

A evolução da perfuração direcional tem permitido que as mais complexas trajetórias sejam realizadas com sucesso. De modo geral, as trajetórias direcionais planejadas podem estar compreendidas em um único plano quando há apenas a mudança de inclinação, sem a mudança de direção (bidimensionais ou 2D) ou podem necessitar de mais uma dimensão até chegarem ao seu objetivo (3D) (ROCHA, 2011).

Neste capítulo, serão abordadas as chamadas trajetórias bidimensionais dos tipos I e II.

2.2.1. Trajetória Tipo I (Build-Hold)

Deve ser escolhida quando o afastamento horizontal é grande em relação à profundidade do poço e o KOP está situado normalmente próximo à superfície. A utilização de KOP's rasos é comum em poços de grande afastamento horizontal, de modo a minimizar o ângulo do poço.

Esta trajetória caracteriza-se por um trecho de crescimento de inclinação (Buildup), de taxa fixa, terminando com um trecho de manutenção de inclinação (*Slant*) passando pelo centro do alvo e prosseguindo até atingir a profundidade final. É

também mais comumente utilizada devido a maior facilidade de execução, economia no tempo de manobra e, conseqüentemente, no custo final do poço (PORTO, 2009).

A trajetória tipo I (Figura 4) é composta basicamente de três seções:

- Seção vertical finalizada pelo KOP (kickoff point);
- Uma seção de ganho de ângulo;
- Um trecho tangente (*Slant*);

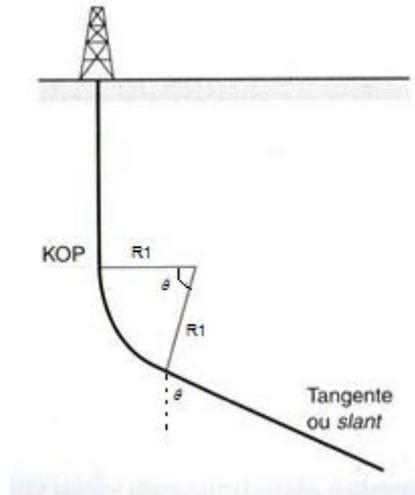


Figura 4. Trajetória tipo I (Fonte: Rocha, 2011).

As equações utilizadas para se encontrar os parâmetros de planejamento de poços do tipo I são:

Taxa de ganho de inclinação (BUR) pode ser calculada pela expressão:

$$BUR = \frac{K(\alpha_1 - \alpha_2)}{(M_1 - M_2)} \quad (3)$$

Raio do Buildup:

$$Raio1 = \frac{180}{\pi} \times \frac{30}{BUR} \quad (4)$$

Ângulo Central máximo para poços do tipo I:

$$\theta = \arcsen \left[\frac{Raio1}{\sqrt{(Raio1 - Afast)^2 + (TVD - KOP)^2}} \right] - \arctan \left[\frac{Raio1 - Afast}{TVD - KOP} \right] \quad (5)$$

2.2.2 Trajetória Tipo II (tipo S)

Pode ser escolhida sempre que o afastamento horizontal for pequeno em relação à profundidade do poço, com KOP localizado próximo a superfície. É preferível em situações nas quais, quando calculado para o tipo I, resulte em baixa inclinação final e difícil controle direcional.

Caracteriza-se por apresentar, após os intervalos de buildup e inclinação constante, um intervalo de perda de inclinação a uma taxa (drop-off), até atingir a vertical ou uma angulação próxima (PORTO,2009). Tem a opção de ter uma seção tangente após o EOB.

A trajetória tipo II (Figura 5) é composta por:

- Seção vertical finalizada pelo KOP raso;
- Uma seção de buildup;
- Um trecho tangente;
- Uma seção de drop-off;
- Seção tangente final (opcional).

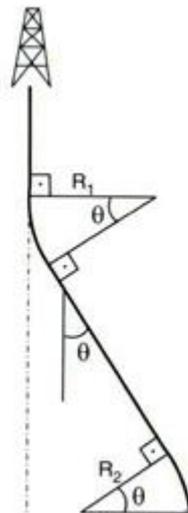


Figura 5. Trajetória tipo II (Fonte: Adaptado de Rocha,2011).

O raio do buildup (equação 4) e afastamento (equação 1) são calculados da mesma forma que poços do tipo I. As equações utilizadas para se encontrar os parâmetros de planejamento de poços do tipo II são:

Taxa de perda de ângulo:

$$DOR = \frac{K(\alpha_1 - \alpha_2)}{(M_1 - M_2)} \quad (6)$$

Raio do Drop-off:

$$Raio2 = \frac{180}{\pi} \times \frac{30}{DOR} \quad (7)$$

Ângulo Central máximo para poços d o tipo II:

$$\theta = Y - \arccos \left[\left(\frac{Raio1 + Raio2}{EOD_{TVD} - KOP} \right) \cdot \text{sen}Y \right] \quad (8)$$

Onde:

$$Y = \arctan \left(\frac{EOD_{TVD} - KOP}{Raio1 + Raio2 - Afast} \right) \quad (9)$$

2.2.3 Poços horizontais

Poços horizontais (Figura 6) são poços que atingem ângulos próximos de 90°. São, hoje, muito comuns, pois possibilitam a exposição de grandes trechos de reservatório, aumentando, assim, a vazão de óleo produzido (ROCHA, 2011).

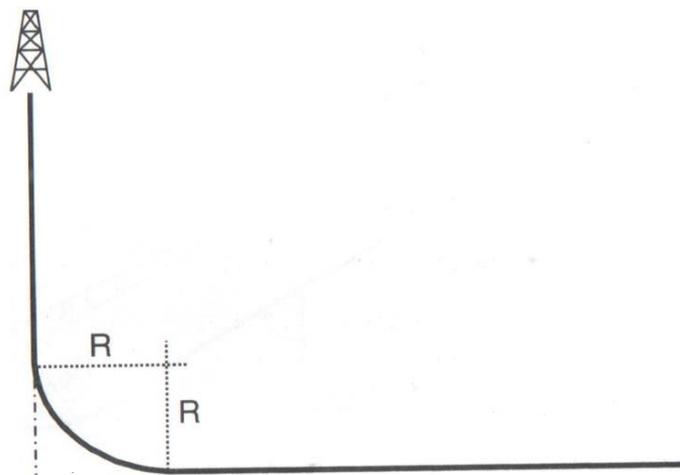


Figura 6. Poço Horizontal (Fonte: Adaptado de Rocha, 2011).

2.3. Projeções

Como é impossível perfurar um poço direcional sempre numa mesma direção (isto é, num mesmo plano vertical), devido a fatores mecânicos e geológicos que tendem a desviar lateralmente a broca, a trajetória de um poço direcional é uma curva no espaço. Para se obter uma representação gráfica dessa curva, ela é projetada em dois planos: um horizontal e outro vertical, que normalmente contêm a locação e o objetivo.

2.3.1. Projeção horizontal

A projeção horizontal possibilita uma visão do poço direcional. Na projeção horizontal os eixos são respectivamente as coordenadas locais Norte/Sul (N/S) e Leste/Oeste (L/O). Dessa forma, esta projeção é geralmente usada para visualizar e corrigir a direção durante a perfuração.

2.3.2. Projeção vertical

A seção vertical permite observar a projeção vertical do poço. Os eixos são, respectivamente, a profundidade vertical (TVD) e o afastamento horizontal em relação a um determinado azimute do plano de projeção. Este gráfico auxilia a correção de inclinação do poço caso não esteja de acordo com o projeto (ROCHA, 2011).

2.4. Classificação do poço quanto ao afastamento

Quanto ao afastamento do objetivo, os poços podem ser classificados em: convencional, de grande afastamento ou ERW (extended reach wells) e de afastamento severo ou S-ERW (severe extended reach well). Essa classificação está relacionada com a razão entre o afastamento e a profundidade vertical (TVD), descontando a lamina d'água quando presente. A classificação quanto ao afastamento é mostrada na tabela a seguir (ROCHA, 2011).

Tipo de Poço	Afastamento/(TVD – Lamina d'água)
Convencional	<2
<i>Extended Reach</i>	>=2 e <=3
<i>Severe Extended Reach</i>	>3

Tabela 1. Classificação quanto ao afastamento (Fonte: Rocha, 2011).

Capítulo 3

Metodologia e Desenvolvimento da Modelagem Matemática

3. Metodologia e Desenvolvimento da Modelagem Matemática

A metodologia adotada teve como objetivo modelar as equações de planejamento de poços direcionais e desenvolver um algoritmo para que se tivesse um *software* como produto final. Foi desenvolvida uma ferramenta computacional que promove o planejamento direcional de poços para trajetórias do tipo I com uma seção de buildup, e tipo II com uma seção de buildup e uma de drop-off, atingindo o alvo perpendicularmente. Em anexo (ANEXO I) apresenta-se um tutorial de como um novo usuário deve proceder para manusear o *software*. Saber todas possíveis geometrias é importante para que se possa aproveitar todas as vantagens da formação, e evitar todos os obstáculos geológicos.

3.1. Apresentação do *Software*

O Planejamento Direcional foi desenvolvido sobre a plataforma Microsoft Office Excel usando a linguagem de programação Visual Basic for Applications (VBA), uma plataforma de fácil acesso a todos, pois faz parte do sistema operacional Windows. Com o intuito de ser uma ferramenta didática, foi planejada de uma forma bem simples e fácil de operar. Na Figura 7, tem-se a interface do usuário.

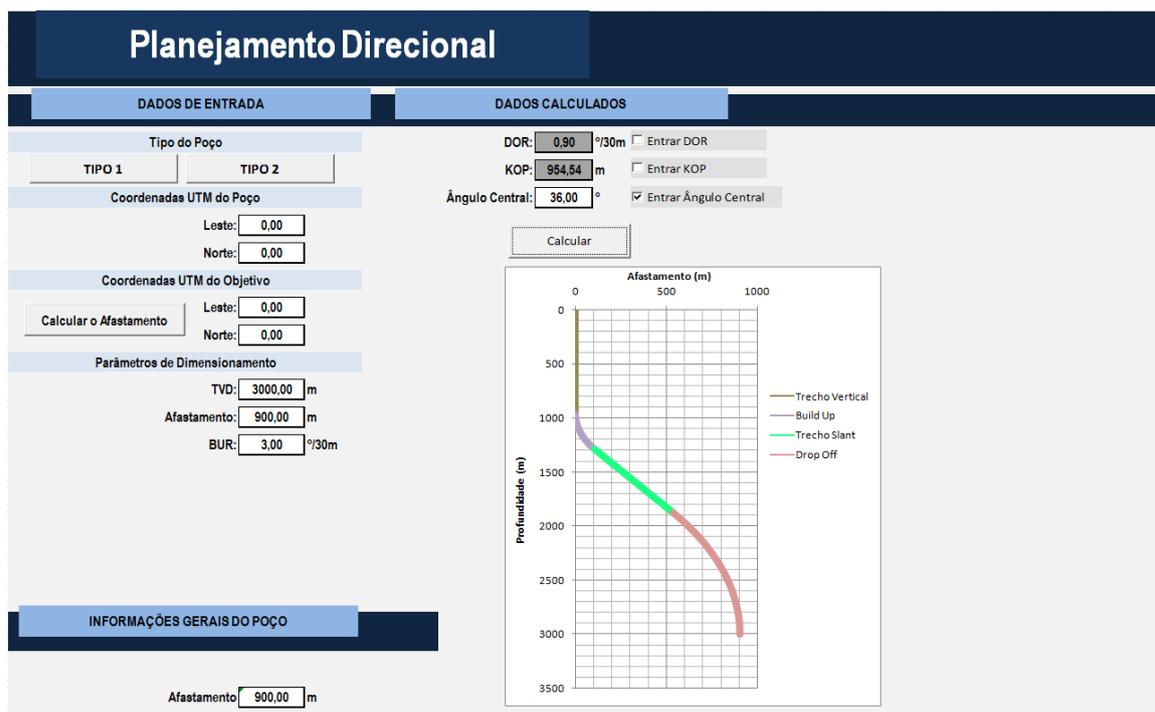


Figura 7. Interface gráfica do software.

O *software* permite ao usuário configurar os parâmetros de entrada de um poço direcional tanto do tipo I e do tipo II. Em poços do tipo II, o modelo considera que o poço atinja o objetivo na vertical. A partir da entrada de dados, o *software* fornecerá o adequado dimensionamento da trajetória, se a geometria for possível, pois em alguns casos há geometrias incompatíveis dependendo da entrada de parâmetros. Quando isto ocorrer, o usuário receberá um aviso e deverá repetir a entrada com outros dados.

A seguir serão apresentadas as principais partes da tela do programa, comentários a respeito da lógica realizada na utilização dos botões, além de comparações que demonstrem situações em que determinada configuração de poço esteja fora dos limites geométricos compatíveis, com aqueles em que eles estão bem configurados.

3.1.1. Dados de Entrada

Essa é a primeira seção (Figura 8) da tela do *software* que o usuário terá contato. Essa seção permite ao usuário selecionar qual é o tipo de planejamento, para um poço do tipo I ou um poço do tipo II.

DADOS DE ENTRADA	
Tipo do Poço	
TIPO 1	TIPO 2
Coordenadas UTM do Poço	
	Leste: <input type="text" value="0,00"/>
	Norte: <input type="text" value="0,00"/>
Coordenadas UTM do Objetivo	
<input type="button" value="Calcular o Afastamento"/>	Leste: <input type="text" value="0,00"/>
	Norte: <input type="text" value="0,00"/>
Parâmetros de Dimensionamento	
	TVD: <input type="text" value="0,00"/> m
	Afastamento: <input type="text" value="0,00"/> m
	BUR: <input type="text" value="0,00"/> °/30m

Figura 8. Seção de Dados de Entrada.

Posteriormente poderá ser obtido o afastamento entre a cabeça do poço e o objetivo caso o usuário conheça as coordenadas UTM, tanto do poço quanto do objetivo. Uma vez preenchidas, o usuário deverá usar o botão “Calcular o Afastamento”, que informará o afastamento conforme o seguinte procedimento:

$$\Delta N = \text{Coordenada Norte do objetivo} - \text{Coordenada Norte do poço} \quad (10)$$

$$\Delta E = \text{Coordenada Leste do objetivo} - \text{Coordenada Leste do poço} \quad (11)$$

$$\text{Afastamento} = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2} \quad (1)$$

Caso o usuário desconheça as coordenadas UTM, pode-se apenas entrar o valor do afastamento manualmente em Parâmetros de Dimensionamento. Os três parâmetros de entrada para o dimensionamento a serem informados são a TVD do objetivo (profundidade vertical total), a BUR (taxa de ganho de ângulo) e o afastamento, que pode também ser calculado.

3.1.2. Dados Calculados

Esta seção permitirá o usuário entrar o parâmetro que ele desejar, existem dois parâmetros para poços do tipo I (KOP e θ) e três parâmetros para poços do tipo II (DOR, KOP e θ). A Figura 9(a) mostra a tela de Dados Calculados para poços do tipo I, onde não é possível entrar a DOR, pois nesta geometria de poço não há perda de ângulo. Na Figura 9(b) mostra a tela de Dados Calculados para poços do tipo II. Para que o planejamento da trajetória seja realizado, o usuário deve informar ao menos um dos parâmetros.

The figure shows two side-by-side screenshots of a software interface titled "DADOS CALCULADOS".

Screenshot (a) is for well type I. It features three input fields: "DOR:" with the value "N/A" and a unit of "°/30m" and an unchecked checkbox "Entrar DOR"; "KOP:" with the value "0,00" and a unit of "m" and an unchecked checkbox "Entrar KOP"; and "Ângulo Central:" with the value "0,00" and a unit of "°" and an unchecked checkbox "Entrar Ângulo Central". A cyan "Calcular" button is positioned below the fields.

Screenshot (b) is for well type II. It features three input fields: "DOR:" with the value "0,00" and a unit of "°/30m" and an unchecked checkbox "Entrar DOR"; "KOP:" with the value "0,00" and a unit of "m" and an unchecked checkbox "Entrar KOP"; and "Ângulo Central:" with the value "0,00" and a unit of "°" and an unchecked checkbox "Entrar Ângulo Central". A cyan "Calcular" button is positioned below the fields.

Figura 9. (a) Seção de Dados Calculados para poços do tipo I e (b) para poços do tipo II.

É essa etapa do programa que realiza os cálculos dos tipo I ou tipo II de trajetória. Nela, o(s) parâmetro(s) digitado(s) pelo usuário são utilizados nas funções criadas em VBA para modelar o método. Para digitar um parâmetro, o usuário antes deve ativar a célula correspondente, marcando o *CheckBox* à direita. Após entrar os parâmetros desejados, o usuário deve clicar em “Calcular” para que os cálculos sejam realizados. Para cada combinação de *CheckBoxes* ativadas, há uma forma diferente de resolver as equações e planejar o poço, que é feita através de rotina no VBA. Para poços do tipo I, há duas combinações, enquanto em poços do tipo II há seis combinações diferentes. Para cada forma, foi criada uma rotina no algoritmo para solucioná-la, conforme explicado na seção 3.2 a seguir.

3.2. Rotinas

Como dito, antes de se iniciar qualquer rotina, o usuário deve fornecer os dados de TVD do objetivo, BUR e afastamento. Tais parâmetros são dados de entrada em todas as rotinas, juntamente com o outro fornecido pelo usuário.

Para ambos os tipos de poços, a entrada de apenas um parâmetro é suficiente, a diferença que para poços do tipo I com a entrada de apenas um parâmetro, tem-se um sistema possível e determinado com duas equações e duas incógnitas, então informando uma das variáveis é suficiente para obter-se a outra.

Já nos poços do tipo II, o fornecimento de apenas um dos parâmetros gera no modelo matemático um sistema possível e indeterminado, com duas equações e três incógnitas, como por exemplo:

$$\begin{cases} KOP = TVD + Raio1 \times \sin(\theta) - AB \times \cos(\theta) - Raio2 \\ \theta = \arctan\left(\frac{TVD - KOP}{Raio1 + Raio2 - Afast}\right) - \arccos\left[\left(\frac{Raio1 + Raio2}{TVD - KOP}\right) \times \sin\left[\arctan\left(\frac{TVD - KOP}{Raio1 + Raio2 - Afast}\right)\right]\right] \end{cases}$$

Onde são conhecidos os valores de Raio1, TVD e Afast, porém θ , Raio2 (dependente da DOR) e KOP são incógnitas para essas duas equações. Resolvendo esse sistema com o valor de apenas uma incógnita, irá gerar uma equação com duas incógnitas, originando um sistema possível e indeterminado.

Com isso, para um determinado valor de DOR, por exemplo, temos um determinado Raio2 e, portanto infinitas combinações de KOP e ângulo central para obter-se a mesma TVD e afastamento. A modelagem matemática do *software* resolve o sistema de forma a obter o maior valor de KOP possível, pois facilita o trabalho do projetista informando-o que o poço deverá ser projetado para valores menores ou igual àquele KOP.

A Figura 10 mostra que para um mesmo valor de DOR de 4°/30m, há inúmeras combinações positivas de KOP e θ que atendem a TVD de 3000 m e afastamento de 900 m. Como observação, note que para um maior valor KOP, o ângulo central também deverá também ser maior, e menor o trecho reto.

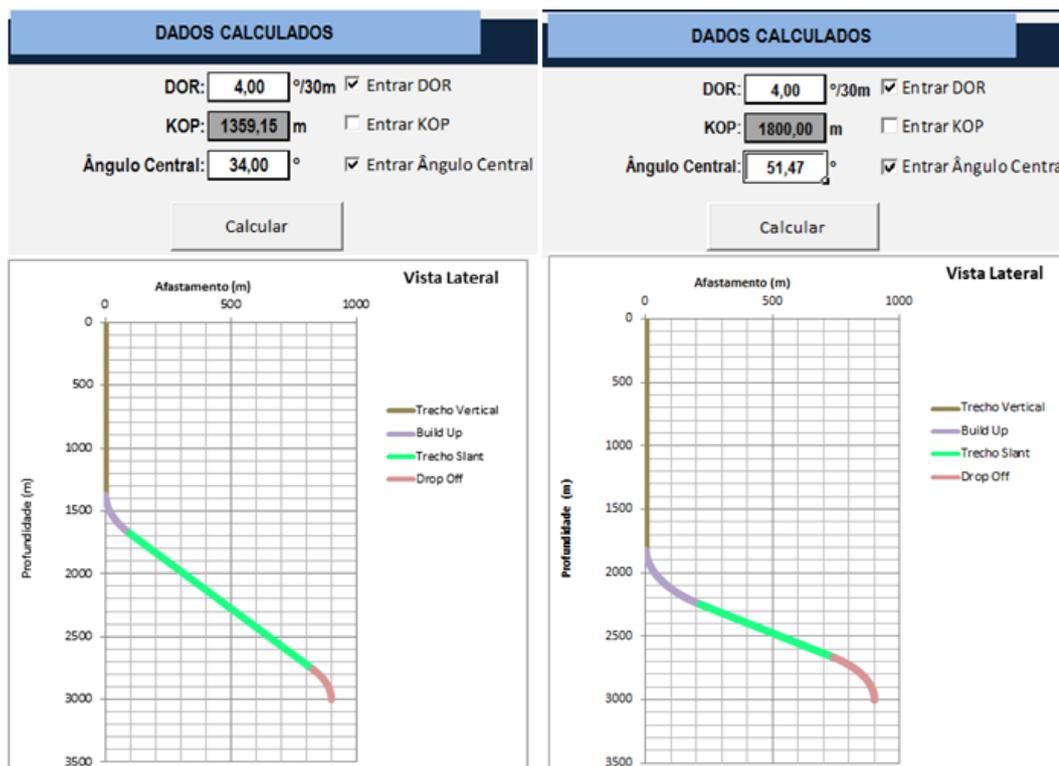


Figura 10. Vistas Laterais para DOR =4°/30m e diferentes valores de Ângulo Central.

O *software* apresenta oito rotinas diferentes, ou seja, oito formas de se obter o planejamento do poço. O poço tipo I oferece duas formas diferentes de ser calculado, enquanto o poço tipo II oferece seis formas distintas, que serão explicadas da seção 3.2.1 à 3.2.8.

3.2.1. Poço Tipo I: Rotina para determinar valor do Ângulo Central através do KOP.

Nessa rotina apresentada no fluxograma da Figura 11 se tem como entrada os valores de TVD, afastamento, Raio do Buildup e o usuário entra um valor de KOP. Com isso encontra-se o Ângulo Central em função do KOP através da Equação 5. Com essas informações o gráfico pode ser plotado e as outras informações referentes ao poço calculadas.



Figura 11. Fluxograma da rotina para poços do tipo I com entrada do valor do KOP.

3.2.2. Poço Tipo I: Rotina para determinar valor do KOP através do Ângulo Central

Nessa rotina (Figura 12) o usuário entra com o Ângulo central, e através dos outros parâmetros de entrada obrigatórios. Assim, encontra-se o trecho *Slant* por:

Trecho *Slant* no poço tipo I:

$$AB = \frac{Afast - (Raio1 - Raio1 \times \cos(\theta))}{\text{sen}(\theta)} \quad (12)$$

E o valor de KOP em função do trecho *Slant*:

$$KOP = TVD - Raio1 \times \text{sen}(\theta) - AB \times \cos(\theta) \quad (13)$$

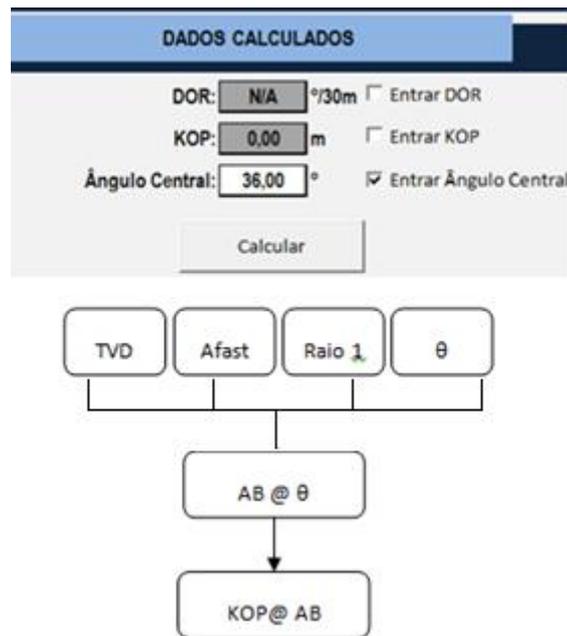


Figura 12. Fluxograma da rotina para poços do tipo I com entrada do valor do Ângulo Central.

3.2.3. Poço Tipo II: Rotina para determinar o valor do Ângulo Central através dos valores de DOR e KOP

Nesta situação (Figura 13), tem-se além dos parâmetros iniciais dois dos três parâmetros a serem calculados, isso gera um sistema possível e determinado. Através do valor informado de DOR, obtêm-se o Raio do drop-off através da equação 7. Com este valor é possível obter o Ângulo Central pela equação 8.

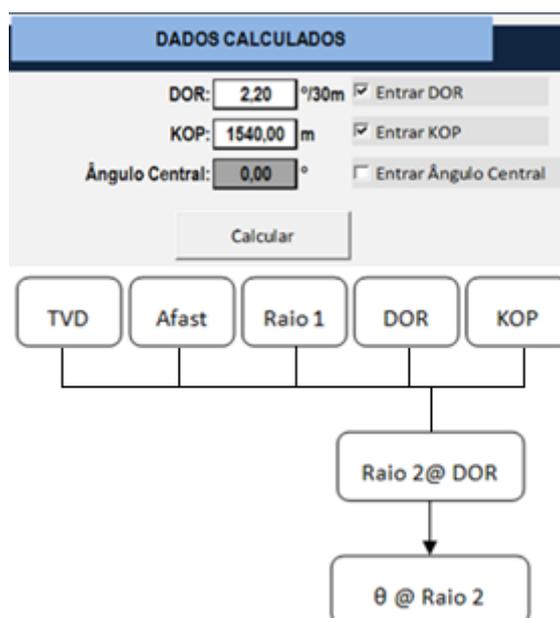


Figura 13. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada dos valores de DOR e KOP.

3.2.4. Poço Tipo II: Rotina para determinar o valor do KOP através dos valores de DOR e Ângulo Central

Nessa rotina (Figura 14) temos os valores dos parâmetros iniciais mais os valores de DOR e θ , então, encontra-se o Raio do drop-off em função da DOR pela equação 7. Prosseguindo, obtêm-se o trecho *Slant* em função do Raio do drop-off através da equação:

$$AB = \frac{Afast - [Raio1 - Raio1 \times \cos\theta] - [Raio2 - Raio2 \times \cos(\theta)]}{\text{sen}(\theta)} \quad (14)$$

E por fim encontrar KOP em função do trecho *Slant* por:

$$KOP = TVD - Raio1 \times \text{sen}(\theta) - AB \times \cos(\theta) - Raio2 \times \text{sen}(\theta) \quad (15)$$

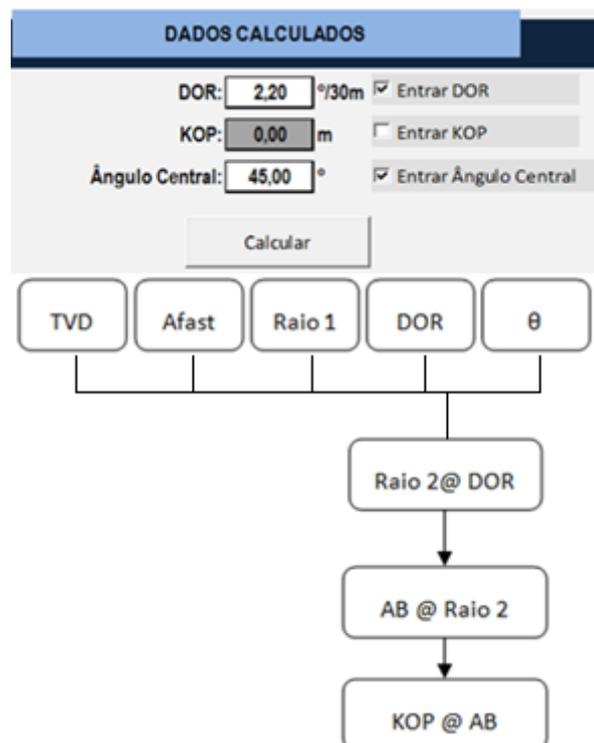


Figura 14. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada dos valores de DOR e Ângulo Central.

3.2.5. Poço Tipo II: Rotina para determinar o valor do DOR através dos valores de KOP e Ângulo Central

Para realizar esta rotina (Figura 15), foi necessário encontrar o valor do Raio do drop-off em função do valor do KOP e θ informados pelo usuário, por:

$$\text{Raio2} = \frac{\text{Afast} + \text{Raio1}(\cos\theta - 1) - \text{TVD} \frac{\text{sen}\theta}{\cos\theta} + \text{KOP} \frac{\text{sen}\theta}{\cos\theta} + \text{Raio1} \frac{\text{sen}^2\theta}{\cos\theta}}{1 - \frac{\text{sen}^2\theta}{\cos\theta} - \cos\theta} \quad (16)$$

E em seguida determinar o valor de DOR em função do Raio do drop-off pela equação 7.

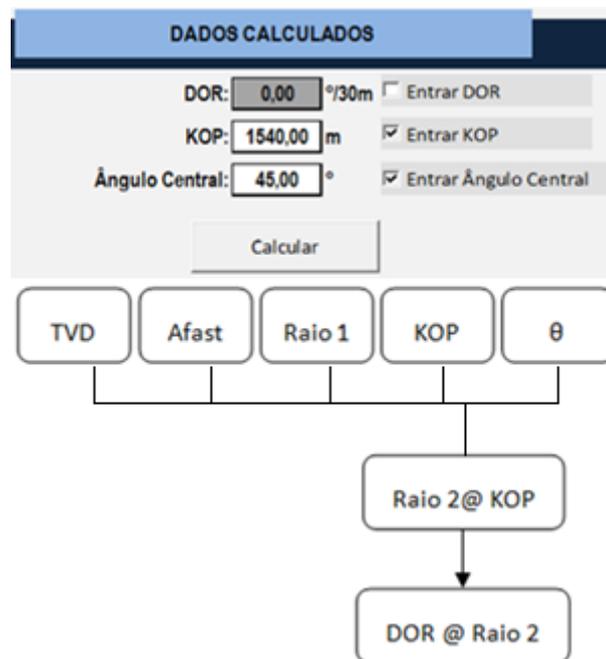


Figura 15. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada dos valores de KOP e Ângulo Central.

3.2.6. Poço Tipo II: Rotina para determinar valores de KOP e Ângulo Central através da DOR.

A partir desta rotina (Figura 16), todos os sistemas são possíveis e indeterminados, pois o usuário só informará um parâmetro, sendo necessária então, a utilização de um método iterativo para resolver o sistema. De posse dos dados de entrada e mais o valor de DOR, o método atribui o valor de 90° ao Ângulo Central e entra no método iterativo. Com o valor de θ e Raio2, encontra-se o trecho *Slant* pela

equação 14. Seguindo, encontra-se o valor de KOP em função do trecho *Slant* através da equação 15. Posteriormente, verifica pela equação 8 se o ângulo central obtido por tais valores atuais de Raio2 e KOP é igual ao ângulo central estimado, buscando a convergência dos ângulos, o estimado e o calculado.

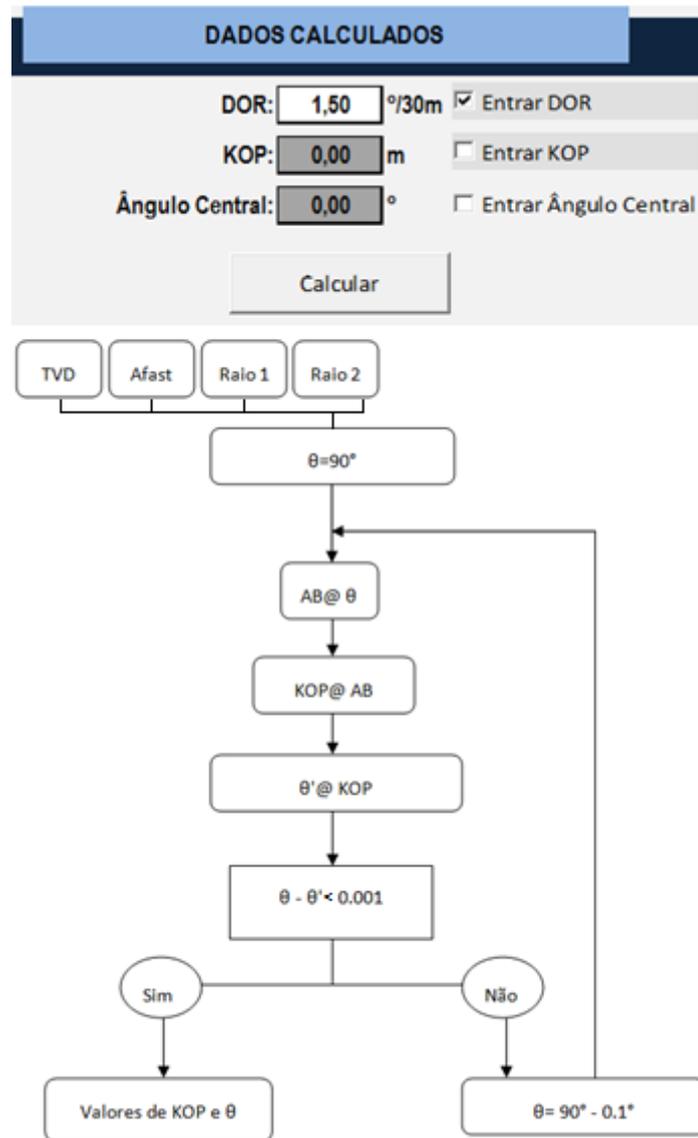


Figura 16. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada apenas do valor da DOR.

Quando a diferença dos valores atinge uma tolerância de 10^{-3} a rotina sai do método iterativo e informa os valores de KOP e θ no momento da convergência, isso significa que é uma possível geometria de poço. Com essas informações o gráfico pode ser plotado e as outras informações referentes ao poço calculadas.

3.2.7. Poço Tipo II: Rotina para determinar os valores de DOR e Ângulo Central através do KOP

Para esta rotina (Figura 17) temos apenas os valores de entrada e o do KOP. Com isso temos um sistema possível e indeterminado e necessita de um método iterativo para resolvê-lo. Atribuí o valor inicial de DOR em 0.0001 para não haver problemas de divisões por zero. Com esse valor entra-se no método iterativo e obtêm-se o Raio2 pela equação 7. No próximo passo é determinado o Ângulo Central em função do KOP informado e do Raio2 estimado, pela equação 8. Com o valor de estimados de θ , pode-se estimar o valor do trecho *Slant* pela equação 15.

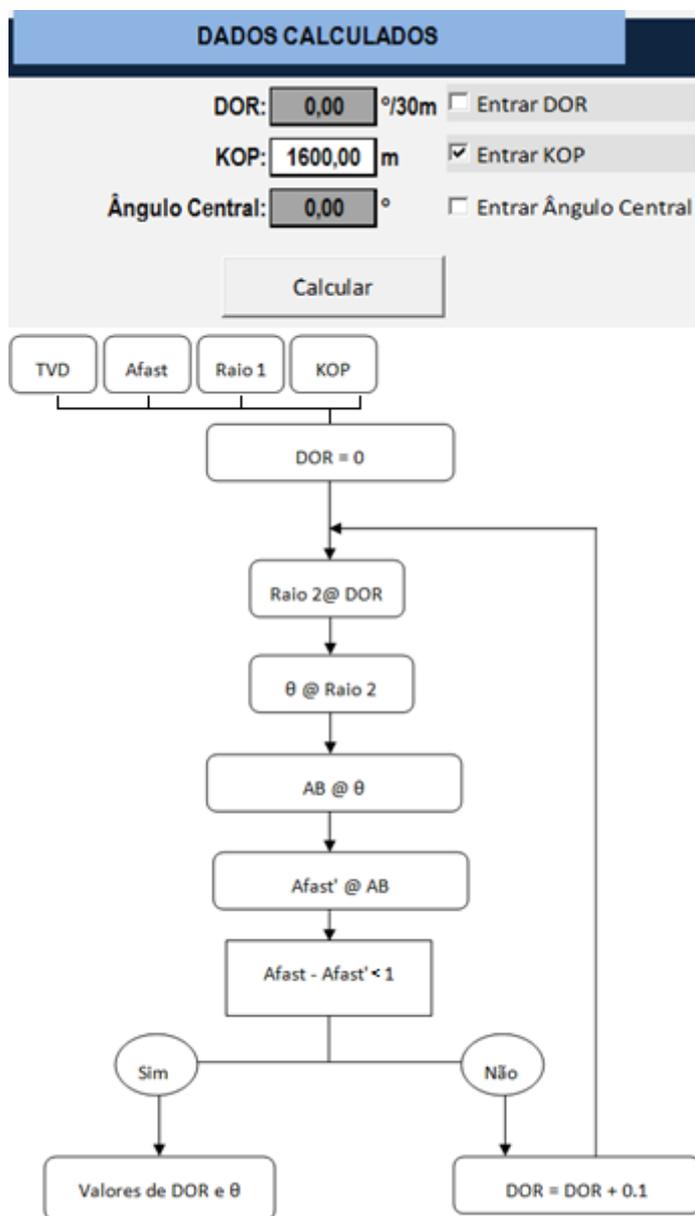


Figura 17. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada apenas do valor do KOP.

E por fim, estimar o valor de um afastamento pela equação 14. Com isso, realiza-se o processador interativo até que a diferença entre o afastamento estimado e o afastamento informado atinja a tolerância de 1. Neste momento a rotina sai do cálculo interativo e os valores de DOR e θ são de uma geometria possível.

3.2.8. Poço Tipo II: Rotina para determinar os valores de DOR e KOP através do Ângulo Central

Inicialmente para esta rotina (Figura 18) atribui o valor de DOR a um número muito próximo de zero, antes de entrar no método interativo. Obtém-se o Raio2 pela equação 7. É determinado o valor do Trecho *Slant* em função do Raio2 estimado pela equação 14, e posteriormente o valor de KOP em função do trecho *Slant* pela equação 15. Assim, pode encontrar um valor estimado para θ pela equação 8.

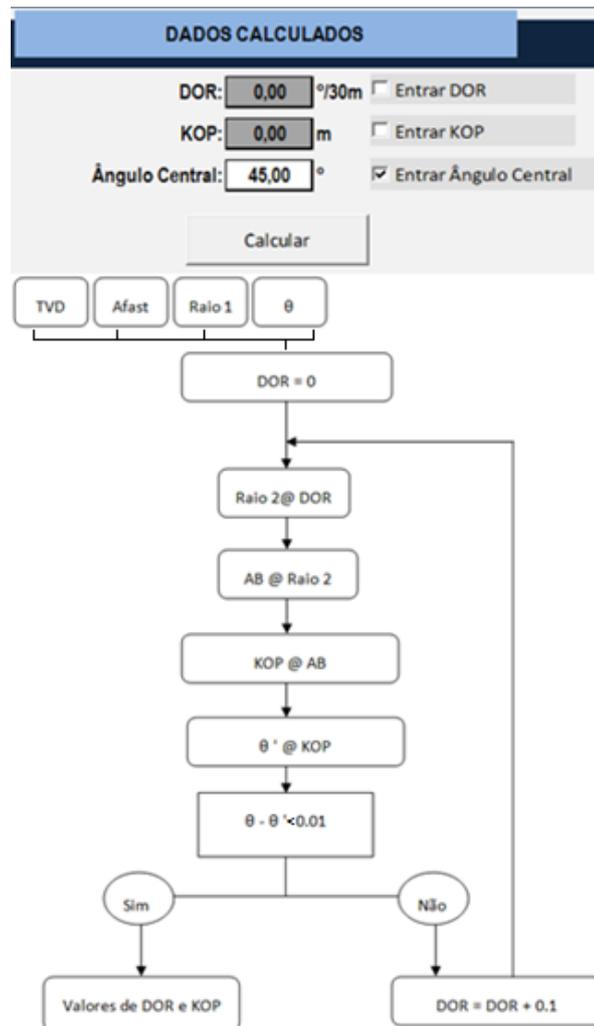


Figura 18. Fluxograma da rotina para poços do tipo II com entrada apenas do valor do Ângulo Central.

O processo se repete até que a diferença entre o valor do ângulo estimado obtido e o ângulo informado pelo usuário atinja a tolerância de 10^{-2} , significando que os valores de KOP e DOR no momento que a interação termina são condizentes para a geometria do poço.

3.3. Saídas do Programa

As saídas do programa tem o objetivo de ilustrar e informar os aspectos mais importantes do planejamento do poço.

3.3.1. Vistas Lateral e Superior

Os gráficos abaixo são a Vista Lateral (Figura 19) e Vista Superior (Figura 20) de um poço dimensionado para uma TVD de 3500m, uma taxa de ganho de ângulo de $3^\circ/30\text{m}$, taxa de perda de ângulo de $2^\circ/30\text{m}$, KOP 2000m, ângulo do trecho reto de $30,98^\circ$ e coordenadas UTM do poço N: 8783845 / E: 726850 e do objetivo N: 8783200 / E: 726700, com o afastamento calculado de 662,21 m. São calculados 10 pontos para o trecho da superfície até o KOP, e 20 pontos para os trechos de ganho de ângulo, *Slant* e de perda de ângulo, em pares ordenados de afastamento e TVD.

Na vista superior o gráfico é plotado em função do azimute, sendo o Norte o 0° , o Leste o 90° , o Sul o 180° e o Oeste o 270° . O poço teve azimute igual a 193° , de acordo com a equação 2.

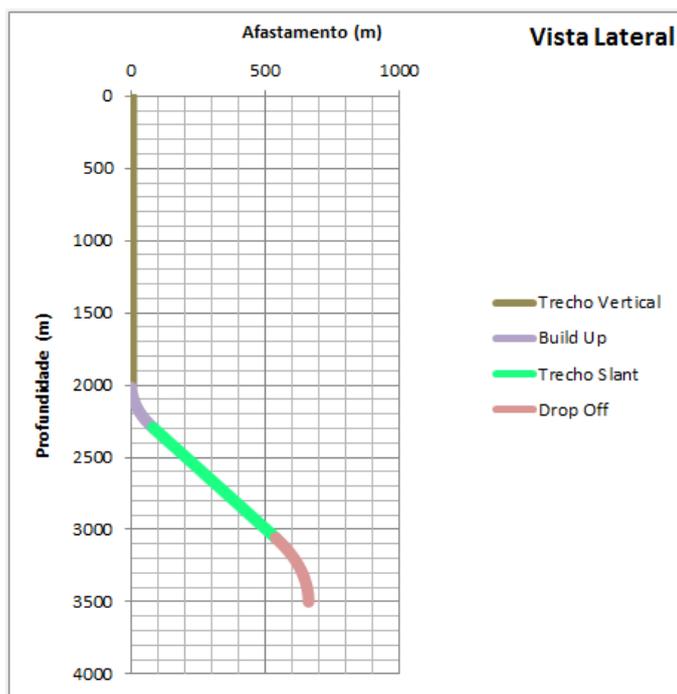


Figura 19. Vista Lateral do poço.

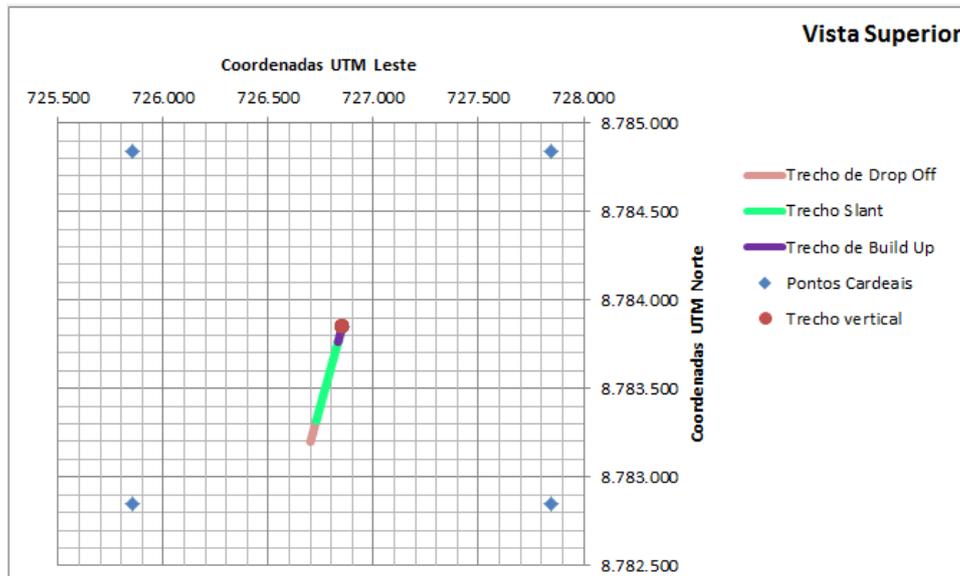


Figura 20. Vista Superior do poço.

3.3.2. Informações Gerais do Poço

Essa seção (Figura 21) traz todas as informações relevantes obtidas do poço. Inicialmente, é mostrado novamente os dados de entrada mais os valores de TVD, afastamento e BUR, juntamente com os dados calculados.

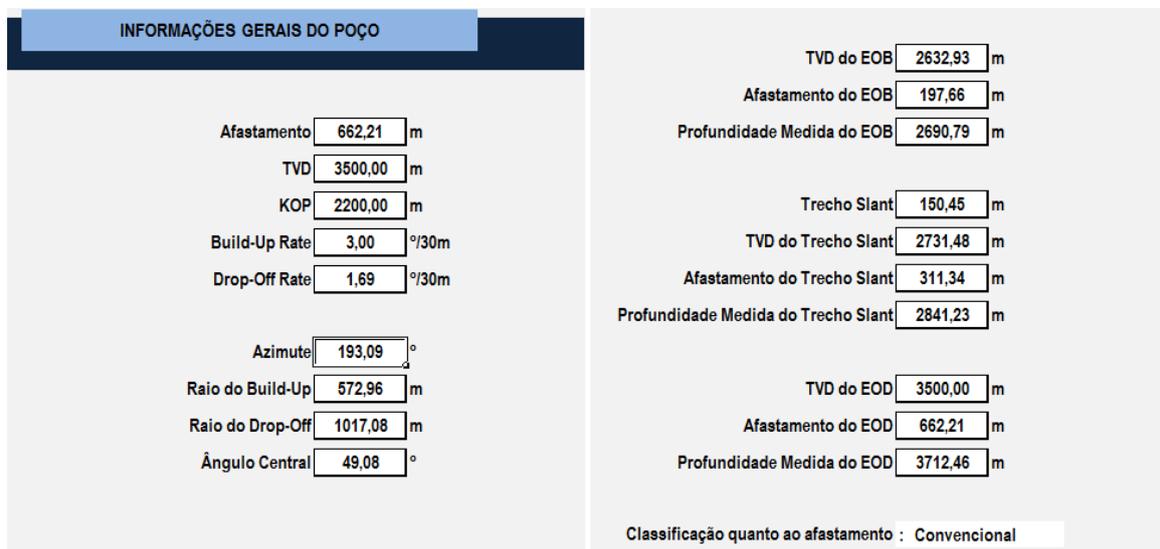


Figura 21. Seção de Informações Gerais do poço obtidas.

Em sequência, têm-se as informações de TVD, afastamento e Profundidade medida para os trechos de ganho de ângulo, trecho *Slant* e de perda de ângulo. Todos baseados nas equações do modelo matemático. Por último a seção informa a

classificação do poço quanto ao afastamento, determinando se é Convencional, *Extended Reach* e *Severy Extended Reach*.

A TVD do EOB foi calculada da seguinte forma (TVD_{EOB}):

$$TVD_{EOB} = KOP + \text{sen}(\theta) \times \text{Raio1} \quad (17)$$

O afastamento do EOB ($Afast_{EOB}$):

$$Afast_{EOB} = \text{Raio1} - \text{Raio1} \times \text{cos}(\theta) \quad (18)$$

A Profundidade Medida do EOB (PM_{EOB}):

$$PM_{EOB} = KOP + \frac{\pi}{180} \times \theta \times \text{Raio1} \quad (19)$$

A TVD do trecho *Slant* foi calculada da seguinte forma (TVD_{AB}):

$$TVD_{AB} = TVD_{EOB} + AB \times \text{cos}(\theta) \quad (20)$$

O afastamento do trecho *Slant* ($Afast_{AB}$):

$$Afast_{AB} = Afast_{EOB} + \text{sen}(\theta) \times AB \quad (21)$$

A Profundidade Medida do trecho *Slant* (PM_{AB}):

$$PM_{AB} = PM_{EOB} + AB \quad (22)$$

A TVD do EOD foi calculada da seguinte forma (TVD_{EOD}):

$$TVD_{EOD} = TVD_{AB} + \text{Raio2} \times \text{sen}(\theta) \quad (23)$$

O afastamento do EOD ($Afast_{EOD}$):

$$Afast_{EOD} = Afast_{AB} + \text{Raio2} - \text{Raio2} \times \text{cos}(\theta) \quad (24)$$

A Profundidade Medida do EOD (PM_{EOD}):

$$PM_{EOD} = PM_{AB} + \frac{\pi}{180} \times \theta \times \text{Raio2} \quad (25)$$

3.3.3. Alerta de incompatibilidade

A geometria de um poço direcional é sensível à seleção dos parâmetros de entrada. Em determinadas seleção dos parâmetros, ocorrerá que um dos trechos ou ângulos tenha medidas negativas, o que impossibilita a geometria. Assim, o *software* identifica quando esta situação ocorre e previne o usuário, obrigando-o entrar novos parâmetros de entrada.

Por exemplo, caso o usuário entre um valor um de DOR, há um valor máximo de KOP que existe compatibilidade para a DOR. Caso o usuário entre um valor de KOP acima do máximo possível, este alerta (Figura 22) aparecerá.

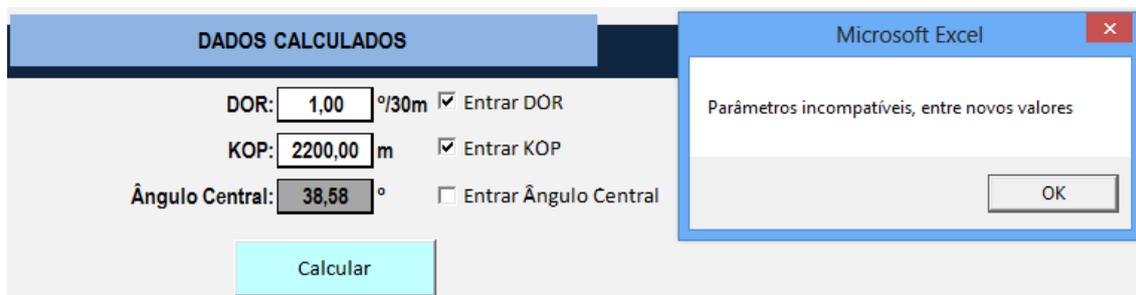


Figura 22. Situação e Alerta de incompatibilidade.

Note na Figura 23¹ que para esses valores de entrada, a geometria do poço foi incompatível, pois originou um valor negativo de trecho *Slant* para que a entrada de parâmetro atendesse a TVD e o afastamento informados pelo usuário.

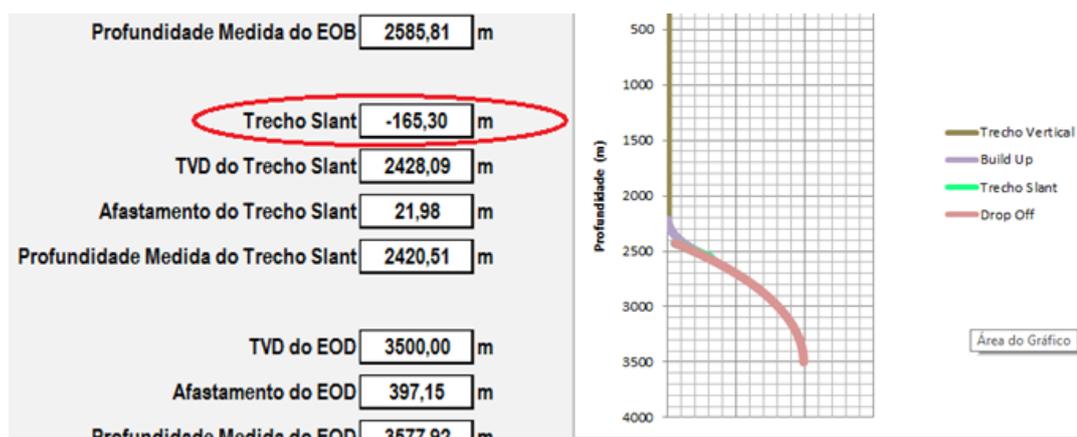


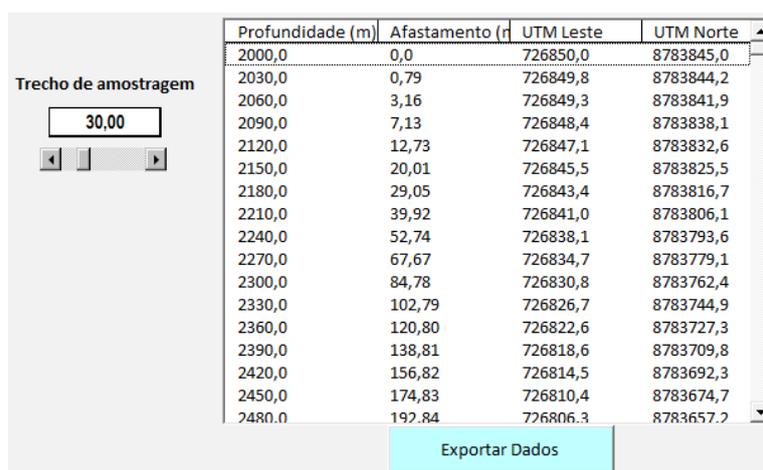
Figura 23. Exemplo de um poço incompatível.

¹ A Figura 23 é apenas ilustrativa para fins de explicação, pois na atual versão do *software*, quando a geometria é incompatível todos os valores calculados zeram e nenhum número negativo é obtido, obrigando o usuário entrar novos dados.

3.3.4. Tabela de coordenadas do poço

A última saída do *software* é uma tabela que informa ao usuário as coordenadas UTM do poço para um valor determinado de trecho de profundidade.

No exemplo da Figura 24, o trecho de amostragem escolhido pelo usuário foi de 30 em 30 metros. O usuário pode escolher um trecho de amostragem acima de 10 metros, variando de 1 em 1 metro ou de 10 em 10 metros pela barra de rolagem. Trecho de amostragem é o espaçamento de profundidade que a cada ponto será informado todos os dados. É importante que o software seja capaz de informar o trecho que o usuário deseje, para que se saibam as informações de um exato local da trajetória, quando for necessário intervir em algum problema pontualmente. O poço tomado como exemplo foi o mesmo descrito na seção 3.3.1. O primeiro ponto sempre é o KOP, onde o afastamento começará a aumentar.



Profundidade (m)	Afastamento (r)	UTM Leste	UTM Norte
2000,0	0,0	726850,0	8783845,0
2030,0	0,79	726849,8	8783844,2
2060,0	3,16	726849,3	8783841,9
2090,0	7,13	726848,4	8783838,1
2120,0	12,73	726847,1	8783832,6
2150,0	20,01	726845,5	8783825,5
2180,0	29,05	726843,4	8783816,7
2210,0	39,92	726841,0	8783806,1
2240,0	52,74	726838,1	8783793,6
2270,0	67,67	726834,7	8783779,1
2300,0	84,78	726830,8	8783762,4
2330,0	102,79	726826,7	8783744,9
2360,0	120,80	726822,6	8783727,3
2390,0	138,81	726818,6	8783709,8
2420,0	156,82	726814,5	8783692,3
2450,0	174,83	726810,4	8783674,7
2480,0	192,84	726806,3	8783657,2

Figura 24. Tabela de pontos da trajetória do poço.

O *software* também oferece a opção de exportar os dados. O usuário aciona o botão Exportar Dados, mostrado na Figura 24 e será gerado um documento do tipo texto (.txt), com o nome do arquivo escolhido pelo usuário, para que se possam imprimir os dados (Figura 25).

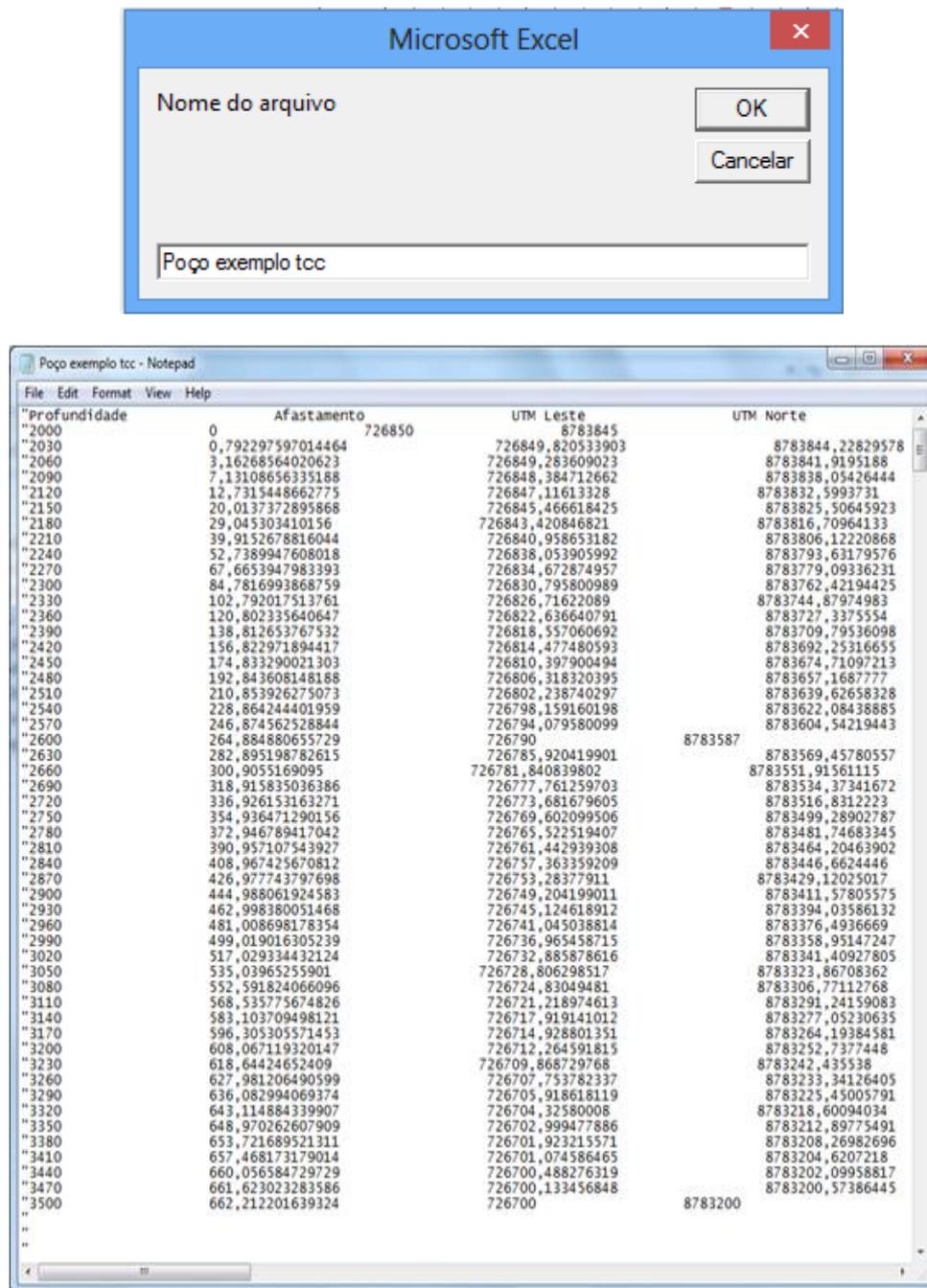


Figura 25. Tabela de dados exportados em arquivo em formato .txt

Como visto na Figura 25, o arquivo.txt oferece uma tabela de Profundidade(m), Afastamento(m), UTM Leste, UTM Norte em um espaçamento escolhido pelo usuário.

3.4. Outras funcionalidades

3.4.1. Limpar dados

O botão *Limpar Dados* (Figura 26) tem a funcionalidade de zerar todos os dados do *software* para que o usuário comece um planejamento totalmente novo.

The screenshot shows a software interface with the following sections:

- Tipo do Poço:** Two buttons labeled 'TIPO 1' and 'TIPO 2'.
- Coordenadas UTM do Poço:** Input fields for 'Leste:' (726850) and 'Norte:' (8783845).
- Coordenadas UTM do Objetivo:** Input fields for 'Leste:' (726700) and 'Norte:' (8783200), with a 'Calcular o Afastamento' button to the left.
- Parâmetros de Dimensionamento:** Input fields for 'TVD:' (3500,00 m), 'Afastamento:' (662,21 m), and 'BUR:' (3,00 °/30m).
- Limpar Dados:** A button at the bottom right, circled in red.

Figura 26. Botão de limpeza de dados.

3.4.2. Consultar o afastamento

Na margem inferior esquerda há essa pequena janela, vista na Figura 27, que permite ao usuário consultar o afastamento para qualquer profundidade do poço, usando o método de interpolação linear. Tal método não expressa os valores com erro nulo, mas com uma grande quantidade de pontos informa uma aproximação com um pequeno erro (HAZEWINKEL, 2001).

The screenshot shows a small window titled 'Consultar o Afastamento' with the following data:

TVD	3000,00	m
Afastamento	505,02	m

Figura 27. Janela de consulta de afastamento.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4. Resultados e Discussões

Tão importante quanto desenvolver a modelagem matemática do planejamento direcional é garantir que a mesma atenda aos requisitos para a qual foi projetada, apresentando valores coerentes e esperados para qualquer sistema submetido a diferentes cenários.

Com o objetivo de se obter a validação da modelagem matemática desenvolvida, optou-se por comparar os resultados obtidos por ela com os valores de dados obtidos com *software* comercial.

4.1. Comparação com Dados de Campo de Poços

De posse de dados de um projeto direcional real (ver ANEXO II), o programa foi testado. Os dados estavam contidos na tabela da trajetória direcional e tiveram de ser interpretados a fim de obter os valores desejados para a simulação.

Dados

- TVD: 258 m
- BUR: 9°/30 m
- DOR: 5,71°/30m
- θ : 25,25°
- UTM poço: N: 468,72 m / E: 287,64 m
- UTM objetivo: N:447,62 m / E: 339,03 m

Na Figura 28 foram entrados os dados de entrada interpretados da tabela dos dados reais. Na Figura 29 foram inseridos os valores de DOR = 5,71°/30m e $\theta = 25,25^\circ$, retirados da tabela do ANEXO II. Com isso, simulam-se os dados utilizando a rotina da subseção 3.2.4 e encontra-se que o KOP para este cenário deve estar a 30,01 m de profundidade.

DADOS DE ENTRADA	
Tipo do Poço	
TIPO 1	TIPO 2
Coordenadas UTM do Poço	
Leste:	288
Norte:	469
Coordenadas UTM do Objetivo	
Leste:	339
Norte:	448
Parâmetros de Dimensionamento	
TVD:	258,00 m
Afastamento:	55,55 m
BUR:	9,00 °/30m

Figura 28. Dados de entrada da simulação.

DADOS CALCULADOS	
DOR:	5,71 °/30m <input checked="" type="checkbox"/> Entrar DOR
KOP:	30,01 m <input type="checkbox"/> Entrar KOP
Ângulo Central:	25,25 ° <input checked="" type="checkbox"/> Entrar Ângulo Central
<input type="button" value="Calcular"/>	

Figura 29. Dados Calculados da simulação.

Sendo a Figura 30 e Figura 31 as vistas Lateral e Superior, respectivamente.

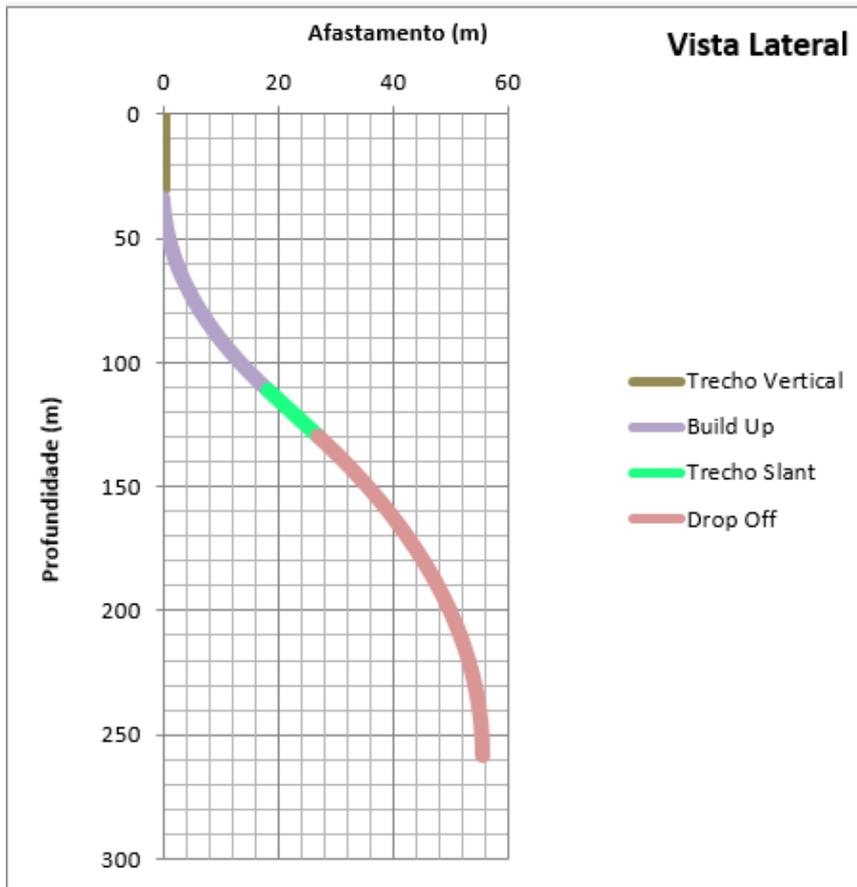


Figura 30. Vista Lateral do poço simulado.

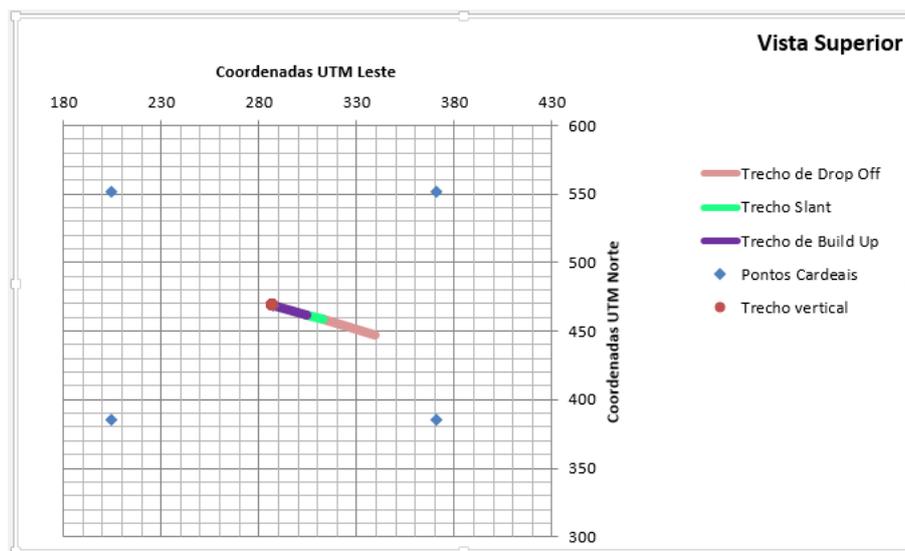


Figura 31. Vista superior do poço simulado.

O *software* além das vistas também calcula as informações mais relevantes do poço, mostradas na Figura 32 a seguir:

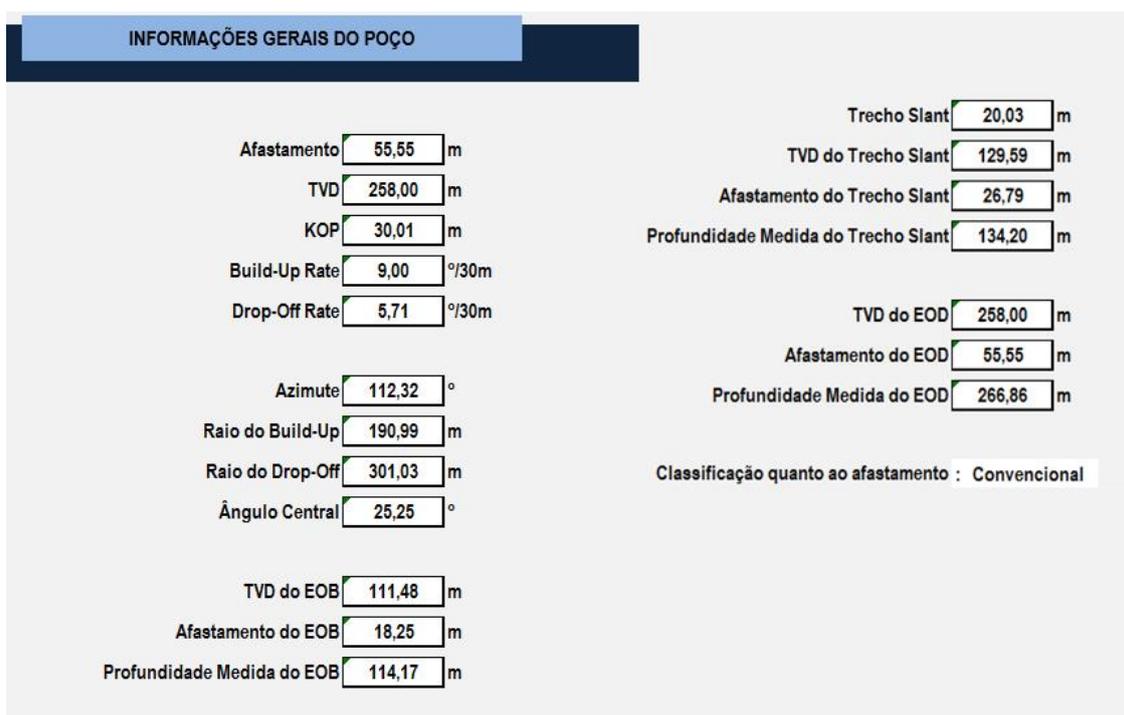


Figura 32. Informações de saída do poço simulado.

Como se pode observar, algumas informações são bastante valorosas, como a TVD do EOB, o comprimento do trecho *Slant*, a profundidade medida total e a TVD e afastamento do EOD (que são dados calculados pelas equações 23 e 24) o que mostra que o programa calculou corretamente a trajetória, pois são os mesmos dos obtidos pelo *software* comercial.

Por fim ainda pode-se ter acesso a tabela dos pontos da trajetória do poço através do botão exportar dados, para uma amostragem escolhida de 15 em 15 metros, e obter o arquivo .txt, conforme a Figura 33.

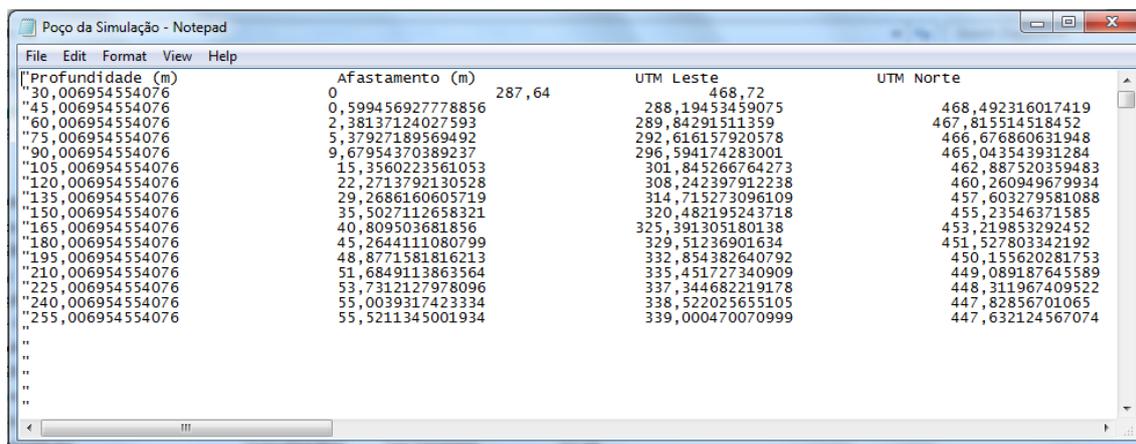


Figura 33. Arquivo txt das coordenadas do poço.

Com isso, os dados calculados do *software* coincidiram com os mesmo dados do *software* comercial, segundo a Tabela 2, validando o trabalho.

Dados informados no software comercial		Dados de entrada no software acadêmico	
UTM wellhead	N: 468,72 m / E:287,64 m	UTM wellhead	N: 468,72 m / E:287,64 m
UTM Objetivo	N: 447,62 m / E:339,03 m	UTM Objetivo	N: 447,62 m / E:339,03 m
TVD _{objetivo}	258 m	TVD _{objetivo}	258 m
BUR	9°/ 30 m	BUR	9°/ 30 m
DOR	5,71°/ 30 m	DOR	5,71°/ 30 m
θ	25,25 °	θ	25,25 °
Dados calculados		Dados calculados	
Afastamento	-	Afastamento	55,55 m
KOP	-	KOP	30,08
TVD _{EOD}	258,00 m	TVD _{EOD}	258,00 m
Afastamento _{EOD}	55,55 m	Afastamento _{EOD}	55,55 m
PM _{EOD}	266,86 m	PM _{EOD}	266,86 m
Direção	112,32 °	Direção	112,32 °

Tabela 2. Tabulação dos resultados obtidos no software comercial e no software acadêmico.

4.2. Cenários relevantes

4.2.1. Máximo KOP

Uma funcionalidade bastante útil do *software* é a determinação do máximo valor de KOP que determinada geometria de poço pode assumir. Quando o usuário informa os parâmetros de entrada, existe uma máxima profundidade que o poço deve ser desviado e se tornar direcional, para que os valores de profundidade vertical, afastamento e taxa de ganho de ângulo sejam atendidos. Valores de KOP acima desse valor máximo não atenderam as condições de entrada, o *software* então exibirá o alerta de incompatibilidade.

Uma importante ferramenta do programa é a capacidade de planejar o poço com apenas um dos parâmetros calculados, em poços do tipo II. Nas rotinas apresentadas nas subseções 3.2.6 (apenas informa a DOR) e 3.2.8 (apenas informa o Ângulo Central), foram modeladas para informar uma possível geometria para os parâmetros informados. Em ambos os casos o poço informado sempre é o de maior KOP. Observe o exemplo:

O poço demonstrado na Figura 34 possui as dimensões informadas na subseção 3.3.1.

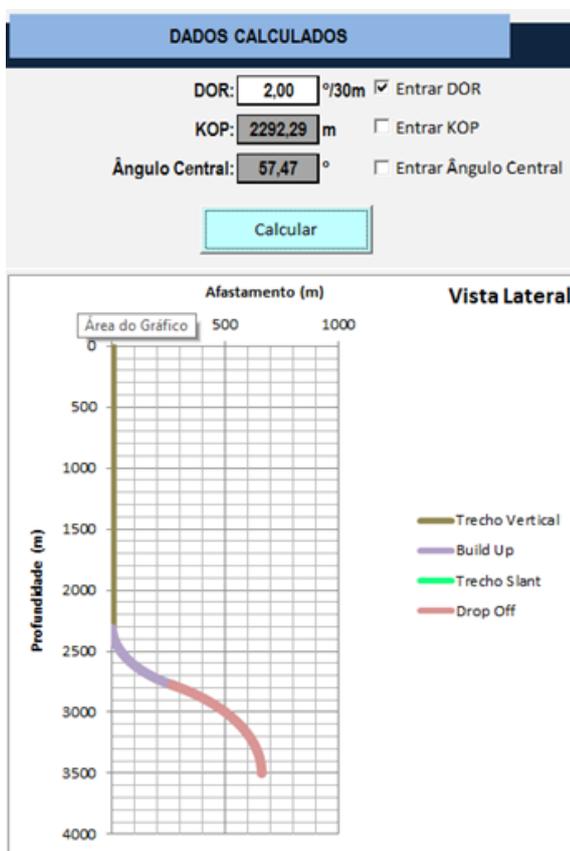


Figura 34. Exemplo de poço tipo II com entrada apenas do valor de DOR = 2°/30m

Nesse exemplo suponha um planejamento hipotético onde o usuário apenas informou que desejava um poço de DOR $2^\circ/30\text{m}$, pois a formação próxima ao objetivo possibilita essa taxa de perda de ângulo, hipoteticamente, e o algoritmo, realizando a rotina da subseção 3.2.6 informou o poço com o maior KOP possível, consequentemente maior ângulo central e menor trecho reto possíveis.

Essa é uma valiosa análise, pois o usuário agora sabe que pode informar um KOP menor do que este para continuar o planejamento do poço. Continuando o exemplo, o projetista desejando evitar obstáculos informados pela geologia necessita posicionar o KOP em um melhor local possível, porém o usuário sabe que não deve ser mais profundo que 2292,29 m. Supondo que ele escolha a profundidade de 1600 m, ele deve marcar a *CheckBox* do KOP e informar este valor, mostrado na Figura 35:

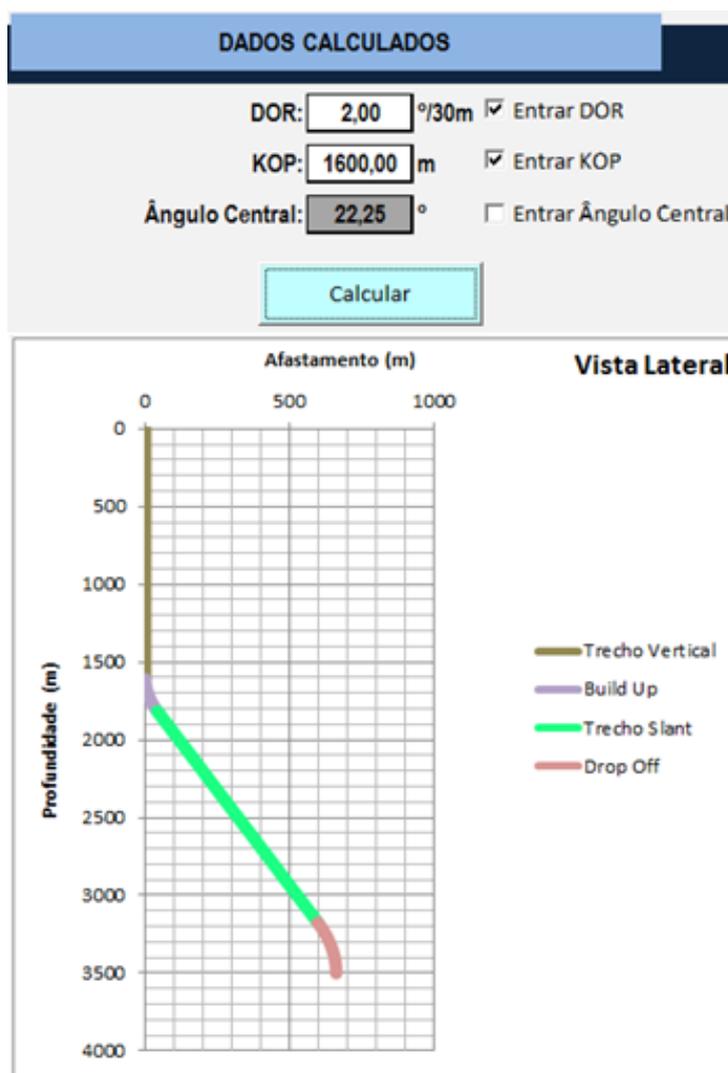


Figura 35. Exemplo de poço tipo II com entrada apenas do valor de DOR = $2^\circ/30\text{m}$ e KOP= 1600m

Agora, o usuário já possui todas as informações necessárias do poço. Analogamente é o mesmo raciocínio para a rotina da subseção 3.2.8, quando o usuário apenas informa o Ângulo Central. Como pode se observar na Figura 36, com a entrada de um ângulo de 60° , o maior KOP para possível é de 2511,21 m. Agora o usuário pode planejar o poço para algum fator limitante, já conhecendo a profundidade máxima que deve ser o KOP.

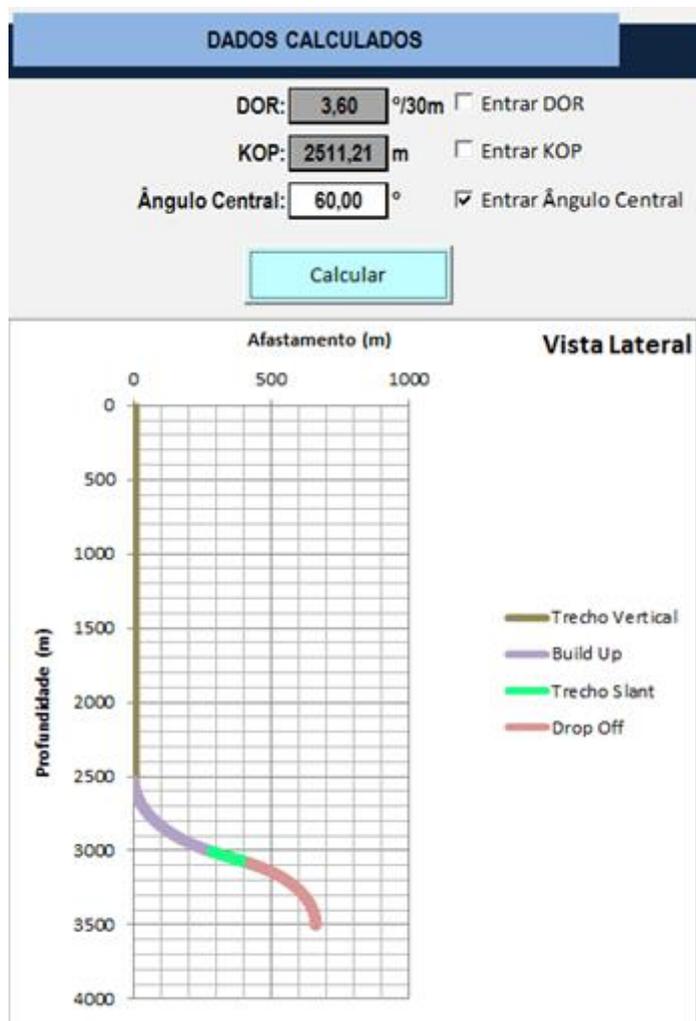


Figura 36. Exemplo de poço tipo II com entrada apenas do valor de $\theta = 60^\circ$.

Apenas lembrando que KOP profundos trazem algumas desvantagens relacionadas ao ganho de ângulo inicial que pode ser mais difícil de ser atingido já que as formações se tornam mais duras e consolidadas com a profundidade (ROCHA, 2011).

4.2.2. Poços Horizontais

Uma interessante função desse *software* é ter a possibilidade de projetar poços horizontais. No *software*, poços horizontais são necessariamente do tipo I, porém o

software não permite poços com dois trechos de buildup, apenas um. É possível ao usuário descobrir qual deverá ser o KOP do projeto se ele desejar atingir o alvo horizontalmente.

A Figura 37 abaixo ilustra um poço dimensionado para uma TVD de 2000 m, afastamento informado de 1000 m, uma taxa de ganho de ângulo de 3°/30 m e um ângulo do trecho reto de 90°, para o usuário descobrir onde será o KOP do projeto. Acionando o botão “Calcular” o *software* realiza a rotina da seção 3.2.2, onde o usuário entra com o valor de um ângulo para descobrir o referente KOP. Então observa-se que para esse projeto a ferramenta de reflexão deveria ser alocada na profundidade de 1427,04 m.

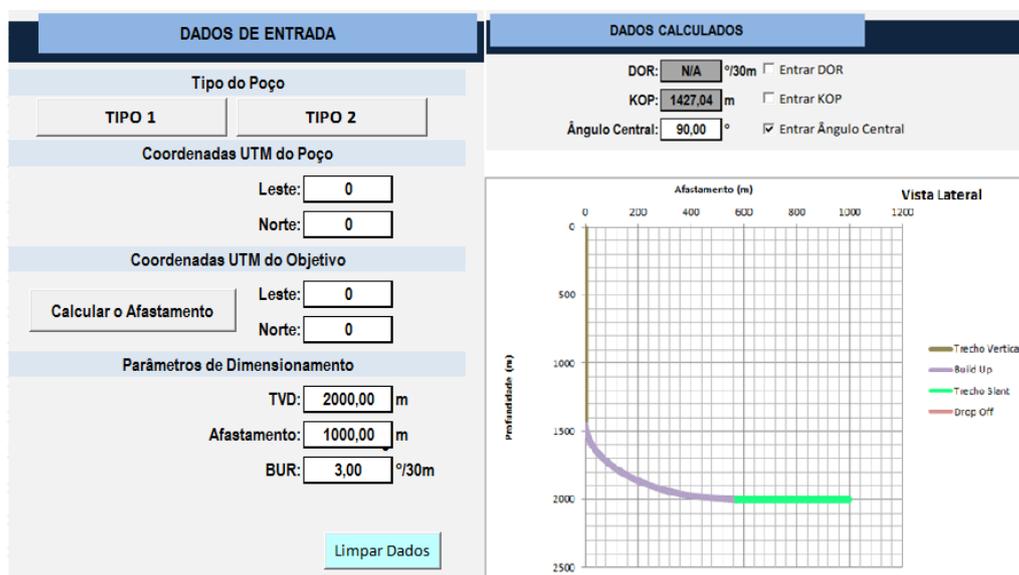


Figura 37. Exemplo de um poço tipo I horizontal.

Em poços horizontais também pode se projetar poços de grande afastamento (*Extended Reach*) e afastamento severo (*Severe Extended Reach*). Como mostra a Figura 38, abaixo:

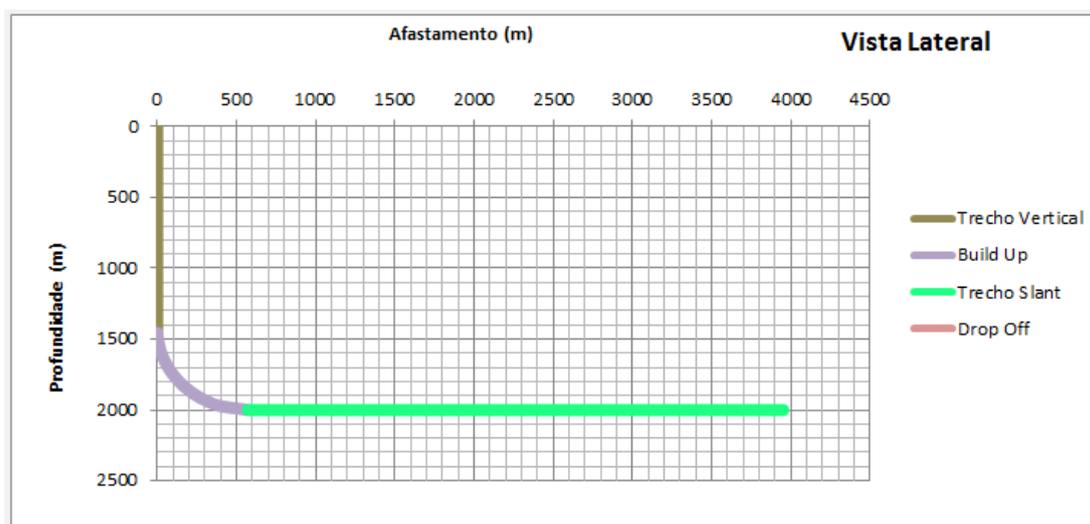


Figura 38. Exemplo de poço horizontal *Extended Reach*.

O poço da Figura 38 ilustra um exemplo de *Extended Reach*. O poço possui TVD de 2000 m e um afastamento de 4000 m. Na seção de Informações Gerais do Poço, apresentada na seção 3.3.2, em Classificação quanto ao afastamento tem-se, como pode ser observado na Figura 39.

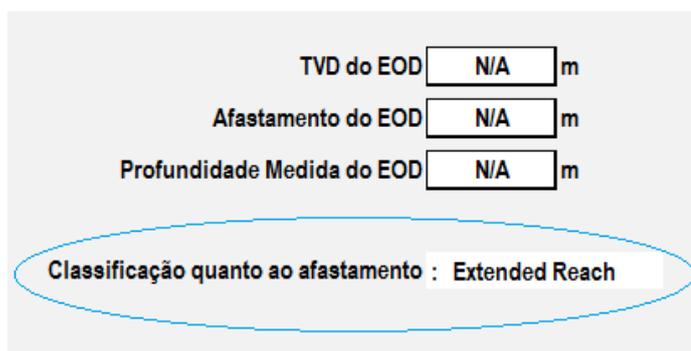


Figura 39. Área relacionada à Classificação de poço quanto ao afastamento.

4.3. Erro relativo

Métodos numéricos que trabalham por meio de aproximações possuem um erro relativo associado. No *software*, o erro relativo é perceptível apenas nos cálculos do afastamento. Quanto menor à distância, mais preciso é o método numérico.

Tomando o seguinte exemplo: Um poço horizontal do tipo I, de TVD 2000 m, afastamento 5000 m e taxa de ganho de ângulo de $2^\circ/30$ m. No desenvolvimento da modelagem, é esperado que a soma do afastamento de todas as etapas, equação 24, seja igual ao afastamento informado pelo usuário (5000 m). Porém na prática não ocorre, observe o exemplo:

No caso do poço da Figura 40, o esperado que o afastamento do trecho *Slant*, que é o somatório do afastamento do EOB mais o afastamento do trecho reto, fosse igual o afastamento informado pelo usuário.

DADOS DE ENTRADA		DADOS CALCULADOS															
Tipo do Poço <input type="button" value="TIPO 1"/> <input type="button" value="TIPO 2"/>		DOR: <input type="text" value="N/A"/> °/30m <input type="checkbox"/> Entrar DOR															
Coordenadas UTM do Poço Leste: <input type="text" value="0"/> Norte: <input type="text" value="0"/>		KOP: <input type="text" value="1427,04"/> m <input type="checkbox"/> Entrar KOP															
Coordenadas UTM do Objetivo Leste: <input type="text" value="0"/> Norte: <input type="text" value="0"/>		Ângulo Central: <input type="text" value="90,00"/> ° <input checked="" type="checkbox"/> Entrar Ângulo Central															
Parâmetros de Dimensionamento TVD: <input type="text" value="2000,00"/> m Afastamento: <input type="text" value="5000,00"/> m BUR: <input type="text" value="3,00"/> °/30m		<table border="1"> <tr> <td>Trecho Slant</td> <td><input type="text" value="4362,98"/> m</td> </tr> <tr> <td>TVD do Trecho Slant</td> <td><input type="text" value="2000,00"/> m</td> </tr> <tr> <td>Afastamento do Trecho Slant</td> <td><input type="text" value="4935,94"/> m</td> </tr> <tr> <td>Profundidade Medida do Trecho Slant</td> <td><input type="text" value="6690,02"/> m</td> </tr> <tr> <td>TVD do EOD</td> <td><input type="text" value="N/A"/> m</td> </tr> <tr> <td>Afastamento do EOD</td> <td><input type="text" value="N/A"/> m</td> </tr> <tr> <td>Profundidade Medida do EOD</td> <td><input type="text" value="N/A"/> m</td> </tr> </table>		Trecho Slant	<input type="text" value="4362,98"/> m	TVD do Trecho Slant	<input type="text" value="2000,00"/> m	Afastamento do Trecho Slant	<input type="text" value="4935,94"/> m	Profundidade Medida do Trecho Slant	<input type="text" value="6690,02"/> m	TVD do EOD	<input type="text" value="N/A"/> m	Afastamento do EOD	<input type="text" value="N/A"/> m	Profundidade Medida do EOD	<input type="text" value="N/A"/> m
Trecho Slant	<input type="text" value="4362,98"/> m																
TVD do Trecho Slant	<input type="text" value="2000,00"/> m																
Afastamento do Trecho Slant	<input type="text" value="4935,94"/> m																
Profundidade Medida do Trecho Slant	<input type="text" value="6690,02"/> m																
TVD do EOD	<input type="text" value="N/A"/> m																
Afastamento do EOD	<input type="text" value="N/A"/> m																
Profundidade Medida do EOD	<input type="text" value="N/A"/> m																
<input type="button" value="Calcular o Afastamento"/>		Classificação quanto ao afastamento : Extended Reach															

Figura 40. Exemplo de um poço *Extended Reach*.

Porém o *software* informa um valor de 4935,94 m. Tem-se um erro relativo de:

$$\epsilon = \frac{|valor\ esperado - valor\ medido|}{valor\ esperado} \times 100\% \quad (26)$$

Aplicando a equação 26 ao caso encontra-se um erro de 1,28% para casos de poços horizontais de elevados afastamentos. Então para poço *Extended Reach* e *Severe Extended Reach* o *software* não oferece resultados 100% confiáveis.

Capítulo 5

Conclusões

5. Conclusão

Os objetivos propostos por este trabalho foram alcançados. Foi apresentada a modelagem matemática e o tutorial de uma nova ferramenta computacional de planejamento de poços direcionais. Com ela será possível planejar poços do tipo I e tipo II, inclusive horizontais com um trecho de buildup, e receber como saída as vistas lateral e superior do poço, bem como todas as informações parciais de profundidade vertical, profundidade medida e afastamento. O programa também classifica o poço quanto ao afastamento e exporta uma tabela de profundidade, afastamento, coordenada UTM norte e UTM leste, em um trecho de amostragem determinado pelo usuário.

A metodologia de cálculo utilizada na modelagem matemática foi exposta, explicada e implementada no *software*. Tal metodologia permite a solução de sistemas indeterminados por meio de soluções interativas e cada rotina foi ilustrada e comentada. Todas as funcionalidades do programa foram mostradas e um tutorial explica como o *software* deve ser manipulado.

A fim de se obter a validação da modelagem desenvolvida, foram comparados os resultados obtidos com os dados reais de um poço projetado em um software comercial. Todos os resultados convergiram, bem como com os resultados resolvidos analiticamente em sala de aula. O *software* apenas apresenta um erro de 1,28% em situações de poço de grande afastamento, devido à solução por métodos numéricos.

Por fim, são muitas recomendações para o futuro, tais como:

- Reduzir o erro relativo do método numérico;
- Implantar o cálculo do Dogleg Severity;
- Implantar a opção de o usuário escolher o ângulo que o poço atinge o alvo para trajetórias do tipo II.
- Possuir a opção de ter mais de uma seção de buildup e drop-off.
- Possuir a opção de plotar mais de um poço.
- Implantar a análise de anticolisão.
- Saída ser um relatório único, a exemplo do *software* comercial, com cabeçalho, vistas, tabelas, entre outros.
- Se tornar um *software* utilitário no uso profissional.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

HAZEWINKEL, M., “**Linear interpolation**”, *Encyclopedia of Mathematics*, Springer, 2001.

NOGUEIRA, J.P.A., **Projeto de elevação artificial para um poço do tipo direcional no escoamento multifásico equipado com Bombeio Centrífugo Submerso**, UFRN, Natal, 2013.

PORTO, R. A. P., **Interferência Magnética em Equipamentos de Registro Direcional**, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

ROCHA, L. A. S. [et al]. **Perfuração Direcional**– 3. ed. – Rio de Janeiro: Interciência: Petrobras: IBP, 2011.

TAVARES, R. M., **Interpretação e Análise de Dados de Perfuração em Poços de Petróleo**, São Paulo, 2006.

THOROGOOD, J. L. **Instrument Performance Models and Their Application to Directional Survey Operations**, SPEDE, 1990.

THOMAS, J.E., **Fundamentos de Engenharia de Petróleo** -2 ed. - Rio de Janeiro, 2001.

(SmartOilTool) <http://www.smartoiltool.net/Upload/Product/201010814093328.gif> Acesso em 14 de novembro de 2014.

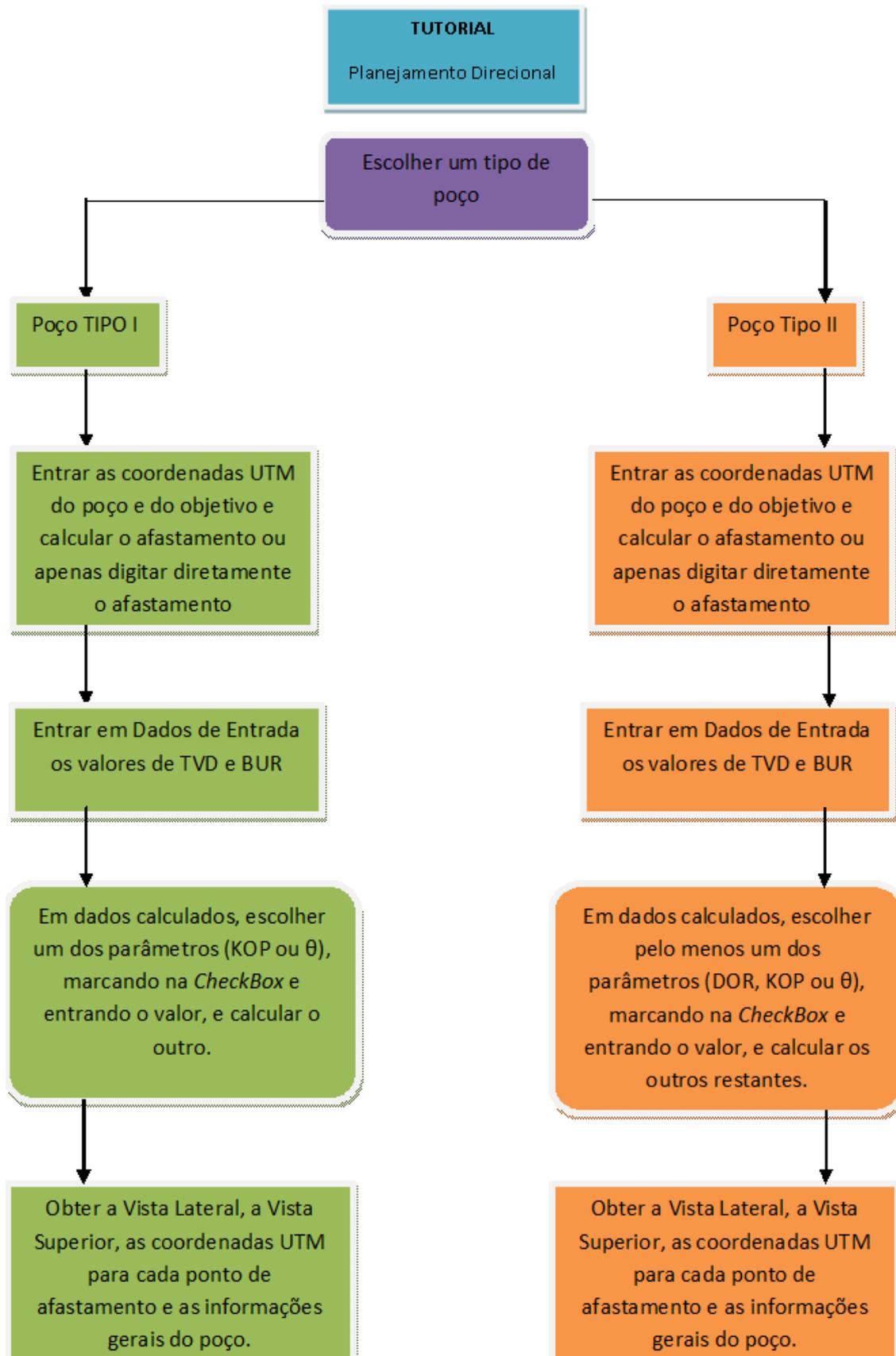
(Fernaslm) <http://fernaslm.files.wordpress.com/2013/03/shale3.jpg?w=480&h=480>. Acesso em 15 de novembro de 2014.

(DirectionalDrilling.blogspot) <http://directionaldrilling.blogspot.com.br/2011/07/dog-leg-severity-dls.html>. Acesso em 19 de novembro de 2014.

(Nupeg) http://www.nupeg.ufrn.br/downloads/deq0375/palestra_do_luciano_primeira_parte.pdf. Acesso em 20 de novembro de 2014.

6. ANEXOS

ANEXO I: TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE



ANEXO II: DADOS REAIS DO POÇO PROJETADO EM UM SOFTWARE COMERCIAL

Survey Report - Geographic

Company:		Local Co-ordinate Reference:	
Project:		TVD Reference:	
Site:		MD Reference:	
Well:		North Reference:	
Wellbore:		Survey Calculation Method:	
Design:		Database:	

Project			
Map System:	Universal Transverse Mercator	System Datum:	Mean Sea Level
Geo Datum:	SIRGAS 2000		
Map Zone:	Zone 24S (42 W to 36 W)		

Site			
Site Position:		Northing:	
From:	Map	Easting:	
Position Uncertainty:	0,00 m	Slot Radius:	
		Latitude:	
		Longitude:	
		Grid Convergence:	

Well					
Well Position	+N-S	0,00 m	Northing:	468,72 m	Latitude:
	+E-W	0,00 m	Easting:	287,64 m	Longitude:
Position Uncertainty		0,00 m	Wellhead Elevation:	m	Ground Level:

Wellbore					
Magnetics	Model Name	Sample Date	Declination (°)	Dip Angle (°)	Field Strength (nT)
	IGRF2010	14/06/2013	-21,68	-21,50	25.143

Design				
Audit Notes:				
Version:	Phase:	PROTOTYPE	Tie On Depth:	0,00
Vertical Section:	Depth From (TVD)	+N-S (m)	+E-W (m)	Direction (°)
	0,00	0,00	0,00	112,32

Planned Survey										
Measured Depth (m)	Inclination (°)	Azimuth (°)	Vertical Depth (m)	Sys TVD(m)	V. Sec(m)	+N-S (m)	+E-W (m)	DLeg *100m	Map Northing (m)	Map Easting (m)
0,00	0,00	0,00	0,00	-40,89	0,00	0,00	0,00	0,00	468,72	287,64
30,00	0,00	0,00	30,00	-10,89	0,00	0,00	0,00	0,00	468,72	287,64
60,00	9,00	112,32	59,88	18,99	2,35	-0,89	2,18	9,00	467,83	289,82
90,00	18,00	112,32	89,02	48,13	9,35	-3,55	8,65	9,00	465,17	296,29
106,96	23,09	112,32	104,89	64,00	15,30	-5,81	14,15	9,00	462,91	301,79
Fm. AÇU										
114,17	25,25	112,32	111,47	70,58	18,25	-6,93	18,88	9,00	461,79	304,82
120,00	25,25	112,32	116,74	75,85	20,74	-7,88	19,18	0,00	460,84	306,82
134,17	25,25	112,32	129,56	88,67	26,78	-10,17	24,77	0,00	458,55	312,41
150,00	22,24	112,32	144,05	103,16	33,15	-12,59	30,67	5,71	456,13	318,31
159,49	20,43	112,32	152,89	112,00	36,61	-13,90	33,86	5,71	454,82	321,50
AÇU40										
180,00	16,53	112,32	172,34	131,45	43,11	-16,37	39,88	5,71	452,35	327,52
182,66	16,02	112,32	174,89	134,00	43,85	-16,85	40,57	5,71	452,07	328,21
AÇU50										
191,98	14,25	112,32	183,89	143,00	46,29	-17,58	42,62	5,71	451,14	330,46
AÇU80										
201,23	12,49	112,32	192,89	152,00	48,43	-18,39	44,80	5,71	450,33	332,44
AÇU100										
210,00	10,62	112,32	201,47	160,58	50,20	-19,06	46,44	5,71	449,66	334,08
240,00	5,11	112,32	231,17	190,28	54,35	-20,64	50,28	5,71	446,08	337,32
266,86	0,00	0,00	258,00	217,11	55,55	-21,10	51,39	5,71	447,62	339,03

ANEXO III: FORMULÁRIO

Afastamento:

$$Afast = \sqrt{\Delta E^2 - \Delta N^2} \quad (1)$$

Direção do Azimute:

$$\varepsilon = \arctan\left(\frac{\Delta E}{\Delta N}\right) \quad (2)$$

Taxa de ganho de inclinação (BUR):

$$BUR = \frac{K(\alpha_1 - \alpha_2)}{(M_1 - M_2)} \quad (3)$$

Raio do Buildup:

$$Raio1 = \frac{180}{\pi} \times \frac{30}{BUR} \quad (4)$$

Ângulo Central máximo para poços do tipo I:

$$\theta = \arcsen\left[\frac{Raio1}{\sqrt{(Raio1 - Afast)^2 + (TVD - KOP)^2}}\right] - \arctan\left[\frac{Raio1 - Afast}{TVD - KOP}\right] \quad (5)$$

Taxa de perda de ângulo:

$$DOR = \frac{K(\alpha_1 - \alpha_2)}{(M_1 - M_2)} \quad (6)$$

Raio do Drop-off:

$$Raio2 = \frac{180}{\pi} \times \frac{30}{DOR} \quad (7)$$

Ângulo Central máximo para poços do tipo II:

$$\theta = Y - \arccos \left[\left(\frac{\text{Raio1} + \text{Raio2}}{\text{EOD}_{\text{TVD}} - \text{KOP}} \right) \cdot \text{sen} Y \right] \quad (8)$$

Onde:

$$Y = \arctan \left(\frac{\text{EOD}_{\text{TVD}} - \text{KOP}}{\text{Raio1} + \text{Raio2} - \text{Afast}} \right) \quad (9)$$

$$\Delta N = \text{Coordenada Norte do objetivo} - \text{Coordenada Norte do poço} \quad (10)$$

$$\Delta E = \text{Coordenada Leste do objetivo} - \text{Coordenada Leste do poço} \quad (11)$$

Trecho *Slant* no poço tipo I:

$$AB = \frac{\text{Afast} - (\text{Raio1} - \text{Raio1} \times \cos(\theta))}{\text{sen}(\theta)} \quad (12)$$

KOP para poços do tipo I:

$$\text{KOP} = \text{TVD} - \text{Raio1} \times \text{sen}(\theta) - AB \times \cos(\theta) \quad (13)$$

Trecho *Slant* poço tipo II:

$$AB = \frac{\text{Afast} - [\text{Raio1} - \text{Raio1} \times \cos(\theta)] - [\text{Raio2} - \text{Raio2} \times \cos(\theta)]}{\text{sen}(\theta)} \quad (14)$$

KOP para poço do tipo II:

$$\text{KOP} = \text{TVD} - \text{Raio1} \times \text{sen}(\theta) - AB \times \cos(\theta) - \text{Raio2} \times \text{sen}(\theta) \quad (15)$$

Raio do drop-off em função de θ e KOP:

$$\text{Raio2} = \frac{\text{Afast} + \text{Raio1}(\cos\theta - 1) - \text{TVD} \frac{\text{sen}\theta}{\cos\theta} + \text{KOP} \frac{\text{sen}\theta}{\cos\theta} + \text{Raio1} \frac{\text{sen}^2\theta}{\cos\theta}}{1 - \frac{\text{sen}^2\theta}{\cos\theta} - \cos\theta} \quad (16)$$

A TVD do EOB:

$$TVD_{EOB} = KOP + \text{sen}(\theta) \times \text{Raio1} \quad (17)$$

O afastamento do EOB:

$$\text{Afast}_{EOB} = \text{Raio1} - \text{Raio1} \times \text{cos}(\theta) \quad (18)$$

A Profundidade Medida do EOB:

$$PM_{EOB} = KOP + \frac{\pi}{180} \times \theta \times \text{Raio1} \quad (19)$$

A TVD do trecho *Slant* foi calculada da seguinte forma:

$$TVD_{AB} = TVD_{EOB} + AB \times \text{cos}(\theta) \quad (20)$$

O afastamento do trecho *Slant*:

$$\text{Afast}_{AB} = \text{Afast}_{EOB} + \text{sen}(\theta) \times AB \quad (21)$$

A Profundidade Medida do trecho *Slant*:

$$PM_{AB} = PM_{EOB} + AB \quad (22)$$

A TVD do EOD foi calculada da seguinte forma:

$$TVD_{EOD} = TVD_{AB} + \text{Raio2} \times \text{sen}(\theta) \quad (23)$$

O afastamento do EOD:

$$\text{Afast}_{EOD} = \text{Afast}_{AB} + \text{Raio2} - \text{Raio2} \times \text{cos}(\theta) \quad (24)$$

A Profundidade Medida do EOD:

$$PM_{EOD} = PM_{AB} + \frac{\pi}{180} \times \theta \times \text{Raio2} \quad (25)$$