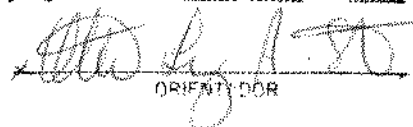


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica
como Requisito Parcial para a Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

**PLANEJAMENTO E ACOMPANHAMENTO
DE POÇOS DE ALÍVIO**

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Humberto
de Lucena Lira e aprovada
pela comissão julgadora em 20 12 19 93


ORIENTADOR

Autor: Humberto de Lucena Lira
Orientador: Otto Luiz Alcântara Santos

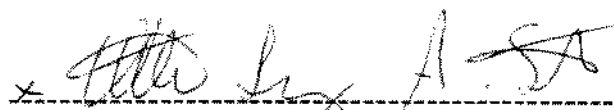
Dezembro de 1993

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

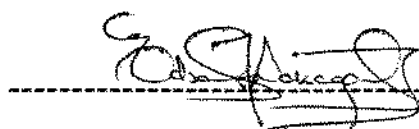
A dissertação "Planejamento e Acompanhamento de Poços de Alívio" elaborada por Humberto de Lucena Lira foi aceita pela Subcomissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 20 de Dezembro de 1993.

Banca Examinadora



Otto Luiz Alcântara Santos, Ph.D.



Edson Yoshihito Nakagawa, Ph.D.



Maurício de Aguiar Almeida, Ph.D.

Agradeço a todos que me proporcionaram esta oportunidade, mas não posso deixar de registrar a minha dívida com a maioria da população brasileira que não dispõe dos requisitos básicos tais como alimentação, saúde e educação para se ter uma vida mais digna.

Agradecimentos

Ao Prof. Otto, pela dedicação, bom relacionamento e permanente incentivo durante a realização deste trabalho.

À Carla Germana, pela paciência e pelos inúmeros erros de português apontados durante as revisões.

Ao estagiário Maurício Vieira, pelo auxílio na elaboração da parte gráfica dos programas desenvolvidos.

Ao colega Roberto Barraghan, pelas sugestões dadas durante o transcorrer desta dissertação.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio e incentivo constante em todos os momentos da vida.

Aos colegas e professores do mestrado em Engenharia de Petróleo da Unicamp, pela amizade e companheirismo nestes dois anos de convivência.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Petróleo e do Cepetro, pelo apoio e auxílios prestados.

Aos colegas da PETROBRÁS/GPNE, pelo estímulo em fazer o mestrado e voltar a estudar.

Aos colegas da PETROBRÁS/DPSE, pela presteza na obtenção dos dados de perfuração.

À PETROBRÁS, pela oportunidade e pelas condições oferecidas para a realização deste mestrado.

Resumo

O poço de alívio tem por objetivo interceptar o poço em erupção e efetuar o controle de subsuperfície através da injeção de um fluido de amortecimento.

Neste trabalho são apresentadas as etapas necessárias ao planejamento e acompanhamento do poço de alívio. Um enfoque maior é dado ao projeto da trajetória levando em consideração as incertezas na posição dos poços, sua localização na superfície, e a profundidade inicial de pesquisa onde serão utilizadas as ferramentas de detecção. São utilizados programas gráficos que auxiliam a visualização dos poços.

Para o cálculo das incertezas foi utilizado o modelo dos erros sistemáticos. Foi feita a análise da influência das diversas fontes de erros no resultado final. Para o cálculo da trajetória foi usado um algoritmo que gera os poços direcionais em 3 dimensões passando por pontos pré-determinados (ponto inicial de pesquisa e ponto de intersecção). Um caso hipotético prático é apresentado para ilustrar todos os passos.

Abstract

The objective of a relief well is to intercept a blowing well and to provide ways to control the blowing well from the surface by pumping kill fluid.

This work presents the necessary steps for planning and drilling the relief well. Special attention is given to the relief well path and its location on the surface, the uncertainty position of the two wells, and the searching depth where the detection tool will be used. Graphics softwares are used for helping the visualization of the wells.

The systematic errors model was used for calculating the well position uncertainty. The effects of some sources of errors on the final results were analyzed. To calculate the relief well trajectory, it was used an algorithm for generating directional wells passing through pre-stabilished points. A hypothetical field cases is presented to illustrate all steps including calculations and graphical displays.

Conteúdo

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS, EQUIPAMENTOS E CÁLCULOS UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO E ACOMPANHAMENTO DOS POÇOS DE ALÍVIO	4
2.1 Registros Direcionais.....	4
2.1.1 Registros Magnéticos ou Giroscópicos Simples e Múltiplos	5
2.1.2 Equipamentos de Medição Contínua sem Cabo (MWD).....	6
2.1.3 Giroscópios Rate Gyro ou North Seeker.....	7
2.1.4 Sistema Steerable	7
2.2 Precisão dos Instrumentos	8
2.2.1 Modelo de Probabilidade	8
2.2.2 Modelo de Erros Sistemáticos	10
2.2.2.a Fonte dos Erros Sistemáticos	11
2.2.2.b Classificação dos Erros segundo a Qualidade dos Registros	12
2.2.2.c Programa para Tratamento dos Erros Sistemáticos.....	12
2.3 Equipamentos para Detecção dos Poços em Blowout.....	22
2.3.1 Métodos Elétricos	22
2.3.2 Métodos Eletromagnéticos.....	24
2.3.2.a MAGRANGE	27
2.3.2.b WELLSPOT	30
2.3.3 Método Acústico	31
2.4 Cálculos da Trajetória.....	32
2.5 Projeto da Trajetória	33
2.6 Métodos Hidráulicos Utilizados para Amortecer o Poço em Blowout	35
2.6.1 Alagamento	35
2.6.2 Controle Dinâmico	36

3. PLANEJAMENTO DOS POÇOS DE ALÍVIO	39
3.1 Localização do Poço na Superfície.....	39
3.2 Estabelecimento do Método Utilizado para Amortecer o Poço em Erupção	41
3.3 Profundidade do Ponto de Amortecimento	43
3.3.1 Intersecção no Fundo do Poço	44
3.3.2 Intersecção Intermediária.....	45
3.4 Estabelecimento da Comunicação entre os Poços.....	45
3.4.1 Injeção a Poço Aberto	45
3.4.2 Injeção a Poço Revestido	45
3.5 Projeto do Revestimento.....	46
3.6 Profundidade do Ponto Inicial de Pesquisa	47
3.7 Fases da Perfuração do Poço de Alívio	48
3.7.1 Fase I.....	48
3.7.2 Fase II.....	49
3.7.3 Fase III	52
3.8 Incerteza na Posição Relativa entre o Poço em Erupção e o Poço de Alívio.....	54
3.9 Geometria do Poço de Alívio	59
 4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E EXEMPLO PRÁTICO DE SUA UTILIZAÇÃO	 61
4.1 Comentários Gerais sobre os Programas.....	61
4.2 Fluxograma para o Planejamento e Execução do Poço de Alívio.....	63
4.3 Exemplo Prático e Utilização dos Programas Desenvolvidos.....	64
4.3.1 Características do Poço em Blowout.....	64
4.3.2 Posicionamento da Sonda.....	66
4.3.3 Planejamento para Atingir o Alvo.....	67
5. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

APÊNDICE A: Erro devido a Magnetização da Coluna	78
APÊNDICE B: Mapa Magnético do Brasil	86
APÊNDICE C: Dados dos Poços Utilizados na Elaboração dos Gráficos e no Exemplo Prático	87

Lista de Figuras

1.1: Poço de Alívio e os Cones de Incerteza do Poço em Blowout.....	2
2.1: Elipses de Incerteza para o Modelo de Probabilidade	9
2.2: Definição dos Eixos do Elipsóide de Incerteza	10
2.3: Gráfico para o Erro de Magnetização da Coluna.....	13
2.4: Gráfico para o Erro de Referência da Bússola.....	15
2.5: Gráfico para o Erro devido ao Desalinhamento	16
2.6: Gráfico para o Erro devido à Inclinação Verdadeira	17
2.7: Gráfico para o Erro relativo à Profundidade.....	18
2.8: Gráfico para os Instrumentos Magnéticos com o Poço na Direção Norte.....	19
2.9: Gráfico para os Instrumentos Magnéticos com o Poço na Direção Leste	20
2.10: Gráfico para os Instrumentos com Giroscópios.....	21
2.11: Esquema dos Eletrodos da Ferramenta "ULSEL"	23
2.12: Fluxo de Corrente no Revestimento de um Poço em Erupção	25
2.13: Campo Magnético Radial Externo a uma Junta de Revestimento.....	26
2.14: Medição do Gradiente Axial Magnético.....	27
2.15: Diagrama Vetorial para Obtenção da Direção	29
2.16: Princípio de Funcionamento da Ferramenta de Detecção	30
2.17: Vista em Corte das Trajetórias Típicas dos Poços Direcionais	34
2.18: Desenho Esquemático dos Poços de Alívio/Blowout para Controle Dinâmico ..	37
3.1: Curva IPR e as curvas TPR do sistema para várias vazões	42
3.2: As Fases da Perfuração do Poço de Alívio	48
3.3: Fluxograma para a Fase I do Poço de Alívio.....	49
3.4: Ângulo de Aproximação entre o Poço de Alívio e o Poço em Blowout	50
3.5: Fluxograma para a Fase II do Poço de Alívio	51
3.6: Fluxograma para a Fase III do Poço de Alívio	52
3.7: Profundidade de Intersecção do Poço em Blowout.....	54
3.8: Cones de Incerteza Antes e Depois da Detecção.....	55

3.9: Localização do Poço em Blowout com a Ferramenta de Detecção	58
4.1 Fluxograma para o Planejamento e Execução do Poço de Alívio	63
4.2 Vista em 3 Dimensões dos 20 Poços Utilizando o Programa INTDIR	64
4.3 Corte Vertical do Poço de Alívio e do Poço em Blowout	65
4.4 Posicionamento da Sonda para a Perfuração do Poço de Alívio	66
4.5 Vista Horizontal dos 20 Poços e do Poço de Alívio	67
4.6 Vista Horizontal das Elipses de Incerteza do Poço em Blowout (poço N° 1)	68
4.7 Vista em 3 Dimensões dos Poços de Alívio e do Poço em Blowout	69
4.8 Vistas Vertical e Horizontal das 3 Trajetórias dos Poços de Alívio	69
4.9 Vista Horizontal das Elipses de Incerteza dos Poços em Blowout e de Alívio	70
4.10 Vista Horizontal das Elipses de Incerteza Antes e Após a Detecção	71
A.1 Posição dos Pólos Magnéticos na Coluna de Perfuração	78
A.2 Orientação dos Pólos Magnéticos no Hemisfério Norte	79
A.3 Orientação dos Pólos Magnéticos no Equador Magnético	80
A.4 Orientação dos Pólos Magnéticos no Hemisfério Sul	81
A.5 Campo Magnético Interferente	82
A.6 Diagrama Vetorial do Erro do Azimute	84

Lista de Tabelas

C.1 Dados dos Poços na Direção Norte e Leste, e do Poço em Blowout	87
C.2 Dados das Trajetórias do Poço de Alívio	90
C.3 Valores Típicos para os Erros Medidos	92

1 - INTRODUÇÃO

Durante as operações de perfuração e completação de poços de petróleo pode ocorrer a entrada não controlada de fluidos da formação para o poço. Um influxo (*kick*) é a entrada de fluidos mantida sob controle através do fechamento dos equipamentos do sistema de segurança da cabeça do poço (E.S.C.P.). Caso se perca o controle através do E.S.C.P. e os fluidos da formação extravasem à superfície ou se propaguem pela subsuperfície devido ao rompimento do revestimento ou da formação, tem-se uma erupção (*blowout*).

Diversas técnicas de controle são utilizadas, podendo ser divididas em técnicas de controle pela superfície (*capping*) cujo objetivo é o acesso direto ao poço para posteriormente se efetuar o amortecimento, ou o controle de sub-superfície que é obtido através da comunicação do poço em erupção por um ou mais poços de alívio e a injeção de um fluido de amortecimento.

A erupção causa danos elevados de ordem material, humana e ao meio ambiente, sendo de importância vital obter este controle tão rápido quanto possível.

Estatísticas indicam que, para o combate da erupção, as técnicas de controle pela superfície são mais rápidas do que os poços de alívio, principalmente em poços terrestres. No controle dos poços em erupção marítimos, a perfuração dos poços de alívio torna-se uma alternativa viável, já que as operações de controle pela superfície são mais complexas e podem levar semanas ou meses quando ocorrem problemas mecânicos ou mudanças nas situações da erupção.

Em diversas situações o poço de alívio pode ser o único método efetivo de se conseguir o controle de um poço em erupção, tais como :

- Erupção submarina em águas profundas, devido a dificuldade de se efetuar uma intervenção através da cabeça do poço no fundo do mar;
- Erupção de superfície que deve ser mantida queimando para evitar a poluição do meio ambiente ou devido presença de gás tóxico (exemplo H_2S);

- Erupção onde não é possível o acesso pela superfície, como por exemplo crateras na superfície.

Distinguem-se seis princípios para a recuperação do controle nos poços de alívio :

- a) Alívio da pressão do reservatório;
- b) Injeção de fluido adensado;
- c) Injeção de água com altas vazões;
- d) Alagamento com água;
- e) Injeção de cimento;
- f) Indução de desmoronamento.

Frequentemente estes princípios são usados em combinação. O poço de alívio pode ser perfurado com o objetivo de acessar o poço em erupção através da formação produtora ou acima desta, sendo que a escolha dependerá do tempo gasto para a sua execução, como também da vazão e pressões requeridas para o amortecimento do poço em erupção.

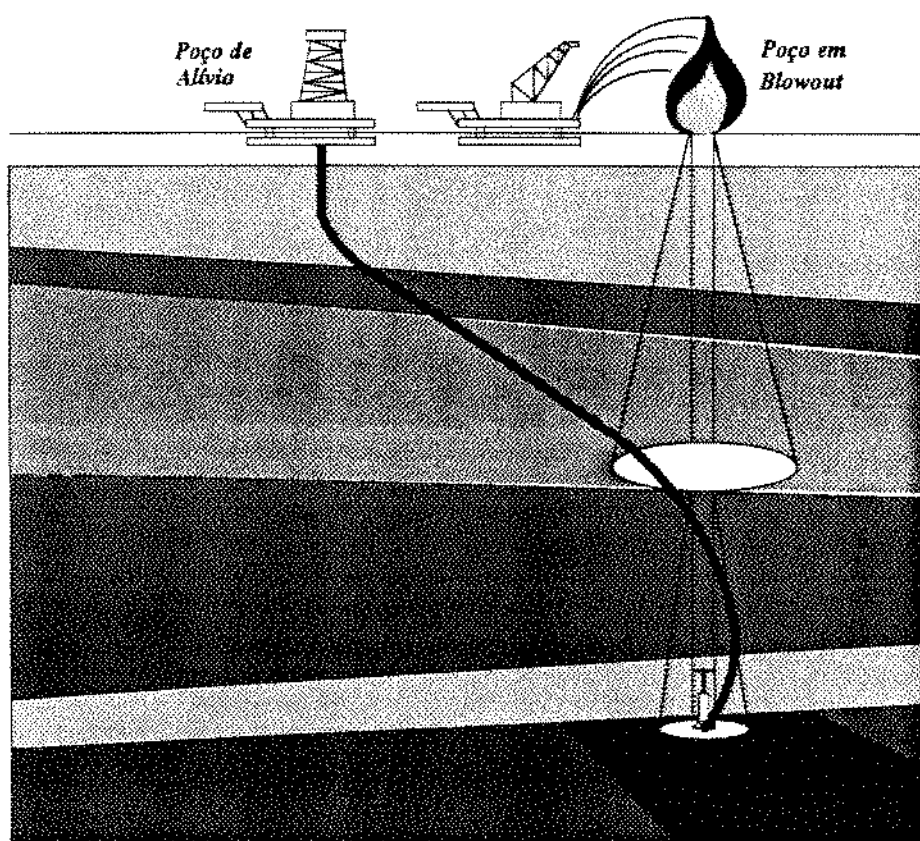


Figura 1-1 : Poço de Alívio e os cones de incerteza do poço em erupção

Motivaram o desenvolvimento deste trabalho as seguintes situações :

- 1) Inexistência de equipamentos e procedimentos para combate pela superfície nos poços perfurados em lâminas d'água profundas;
- 2) Inexistência de procedimentos para o planejamento e acompanhamento de poços de alívio.

Este trabalho tem por objetivo apresentar os passos necessários para o planejamento e perfuração dos poços de alívio de uma maneira sistematizada. Atenção especial é dada a trajetória do poço de alívio e sua locação na superfície, a incerteza na posição dos poços em erupção e de alívio, e a profundidade onde a ferramenta de detecção será usada. Programas gráficos foram desenvolvidos para ajudar a visualização dos poços em erupção e de alívio, as projeções das elipses de incerteza e o projeto da trajetória do poço de alívio em 3 dimensões. Um caso hipotético prático é apresentado para ilustrar todos os passos.

2 - REVISÃO DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS, EQUIPAMENTOS E CÁLCULOS UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO E ACOMPANHAMENTO DOS POÇOS DE ALÍVIO

Uma revisão dos procedimentos dos poços de alívio foi conduzida por *Flak e Goins* [1], onde eles comentam que a probabilidade de sucesso de controlar um poço em erupção com um único poço de alívio tem aumentado significativamente nos últimos anos, devido ao desenvolvimento de novas tecnologias nos instrumentos de registro direcional, nos equipamentos de detecção dos poços em erupção e nas técnicas de amortecimento utilizadas no combate à erupção.

2.1) REGISTROS DIRECIONAIS

O cálculo da trajetória do poço é baseado em três medições efetuadas em diferentes profundidades (estações). Estas medições são o comprimento do poço, a inclinação e o azimute. Adicionalmente, correções do curso enquanto perfurando requerem o conhecimento da orientação no poço do instrumento de registro direcional (*tool-face*), que é comparável a uma medida do azimute. Podemos definir estas medições da seguinte maneira :

- Medida de Comprimento

Dois métodos são normalmente usados nos poços para determinar a profundidade do instrumento de medição :

- a) Comprimento da coluna de perfuração até o ponto onde o instrumento de medição está alojado;
- b) Comprimento do cabo utilizado para a descida e retirada do instrumento de registro durante as medições.

- Medida da Inclinação

A inclinação do poço em uma determinada profundidade é o ângulo entre a vertical e o eixo do poço nesta profundidade. A medição da inclinação é baseada na detecção da direção da gravidade por um pêndulo ou acelerômetros.

- Medida do Azimute

O azimute do poço em um ponto é o ângulo entre o plano vertical ao eixo do poço e o plano vertical de referência passando através do norte magnético (direção magnética) ou norte geográfico (direção verdadeira).

A referência do azimute magnético é a direção do campo magnético da Terra em uma dada locação, e raramente, coincide com o norte verdadeiro.

A discrepância entre o norte verdadeiro e o norte magnético é chamada de declinação magnética, variando de acordo com o tempo e a posição.

Um registro direcional usando um giroscópio é um registro relativo. O instrumento serve para detectar mudanças na direção de uma posição de referência tomada na superfície, geralmente pela visada ou alinhamento com uma referência direcional conhecida. O princípio de funcionamento do giroscópio é um disco ou rotor girando em alta rotação que mantém uma direção fixa no espaço, que não é perturbada por qualquer torque.

Estas medições são feitas pelos instrumentos direcionais que incluem : Registros magnéticos ou giroscópicos simples (*Single-shots*) e múltiplos (*Multi-shots*), MWD (*Measurement While Drilling*) e giroscópios "*North Seekers*". No cálculo da trajetória do poço, é necessário saber ou estimar a precisão destes instrumentos de medição.

2.1.1. REGISTROS MAGNÉTICOS OU GIROSCÓPICOS SIMPLES E MÚLTIPLOS

Antes de 1970, os equipamentos para medições da inclinação e direção do poço registravam fotografias do fundo do poço através de pêndulos e bússolas magnéticas ou giroscópios. Eles atualmente ainda são usados devido a seu baixo custo. Comandos não magnéticos são necessários para as medições feitas por instrumentos magnéticos devido a interferência magnética dos componentes da coluna de perfuração. O giroscópio diferencia-se basicamente do equipamento magnético por utilizar uma bússola giroscópica, não necessitando portanto do magnetismo terrestre para indicar a direção do poço. Deve ser usado sempre que houver interferência magnética do revestimento do poço ou dos poços adjacentes, de jazidas de minerais ferrosos, etc., durante a perfuração.

Os instrumentos de registro simples basicamente consta de uma bússola magnética, um inclinômetro e uma câmera fotográfica. A câmera fotográfica fornece uma foto da bússola e do inclinômetro na estação desejada.

Os instrumentos de registro múltiplo constam basicamente de uma bússola giroscópica descida a cabo ou magnética alojada na coluna de perfuração e uma câmera fotográfica equipada com um filme de rolo que pode registrar até 1000 fotografias ao longo do poço (*Bourgoyne et al.*[2]). São utilizados normalmente após o término da perfuração de cada fase do poço com a finalidade de se obter com maior precisão a trajetória do mesmo.

Os dados do giroscópio requerem uma interpretação complexa e tediosa. Para diminuir esta dificuldade, os giroscópios operados com cabos elétricos e computadorizados podem fornecer dados de direcionais em estações e calcular a trajetória do poço (*Guillory* [3]).

2.1.2) EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO CONTÍNUA SEM CABO (M.W.D.)

O MWD usa as mesmas técnicas dos instrumentos descritos acima, sendo o MWD composto por 3 acelerômetros servo-controlados usados para medir a inclinação do poço, e 3 magnetômetros montados em 3 eixos perpendiculares entre si usados para medir a orientação do campo magnético da Terra (*Russel* [4]). Os seis dados medidos são usados em um programa de computador para determinar a inclinação, a direção com respeito ao norte magnético, a orientação necessária da ferramenta defletora, caso um sub torto seja usado, e as possíveis perturbações magnéticas normalmente causadas pelos elementos da coluna de perfuração (comandos, tubos de perfuração, brocas, motores de fundo, subs) (*Russel et al.*[5] e *Grindod e Wolff*[6]). As medições são obtidas durante a perfuração e a transmissão de dados é feita sob a forma de pulsos de pressão emitidos através da lama no interior da coluna, captados e transcodificados na superfície.

Equipamentos tipo registros múltiplos usando acelerômetros e magnetômetros e registrando dados digitais estão atualmente disponíveis para substituir os registros múltiplos convencionais.

2.1.3) GIROSCÓPIOS RATE GYRO OU NORTH SEEKER

São instrumentos que medem a taxa de rotação absoluta da Terra em torno de um eixo sensível. No poço eles detectam a rotação da terra e conseqüentemente são imunes a qualquer perturbação. Dois sistemas são atualmente utilizados :

i) Um sistema onde um eixo gira lentamente e 2 ou 3 eixos do giroscópio são estacionários para determinar o vetor rotação da terra. Em ambos os exemplos o alojamento do instrumento deve estar estacionário no poço enquanto as medições das estações são realizadas.

Quando a plataforma contendo o único eixo do giroscópio gira lentamente ao longo do eixo do poço o giroscópio indicará o máximo sinal, no momento em que seu eixo sensível estiver alinhado com o norte geográfico. Um acelerômetro montado na mesma plataforma indicará o sinal máximo quando seu eixo sensível estiver no plano vertical. A orientação do poço pode então ser calculada da diferença de fase entre os 2 sinais (*Wright [7]*).

ii) Em um giroscópio com sistema de 3 eixos, cada eixo sensível mede uma das componentes de rotação. As 3 componentes podem ser usadas para definir o vetor rotação da terra. Este vetor pode ser usado, ao invés do vetor campo magnético, em uma ferramenta de orientação ou programa de computador do *MWD*, se as medições do acelerômetro estiverem disponíveis (*Gibbons e Hense[8]*). Deve ser observado que cada medição é feita com respeito ao norte geográfico sem nenhuma perturbação possível.

Outros giroscópios usam plataformas inerciais. Um deles usa um giroscópio de 2 eixos e um acelerômetro de 2 eixos (*Camden et al.[9]*), enquanto o outro é uma plataforma que é utilizada na aviação comercial (*Morgan[10]*), que faz medições em 3 dimensões e define a trajetória sem usar inclinação, azimute ou profundidade do poço.

2.1.4) SISTEMA STEERABLE

É um sistema que utiliza na coluna de perfuração um motor de fundo cujo corpo tem uma pequena deflexão na altura da junta universal, diminuindo ou eliminando a necessidade de usar um sub torto. Em conjunto com o *MWD*, permite que se possa ter a perfuração rotativa ou orientada para fazer correções de direção ou inclinação sempre que se fizer necessário.

Essa possibilidade de alternar a perfuração rotativa com a orientada, traz a vantagem de perfurar o poço na trajetória desejada sem necessidade de manobrar para correção.

Durante a perfuração, a rotação da broca é função do motor de fundo, sendo a mesa rotativa utilizada para que a coluna perfure preferencialmente numa única direção, modificando constantemente a posição da face da ferramenta defletora.

Devido aos maiores esforços exigidos dos motores de fundo durante a perfuração com este sistema, é necessário que os mesmos sejam mais resistentes dos que os utilizados na perfuração convencional, fornecendo maior torque a broca e com tempo de operação do motor mais prolongado devido principalmente ao sistema de rolamentos nele contido.

2.2) PRECISÃO DOS INSTRUMENTOS

Devido a necessidade de se ter o poço de alívio o mais próximo possível do poço em erupção, ou interceptando-o fisicamente, a precisão da trajetória é um fator muito importante. Como três parâmetros (profundidade, inclinação e azimuth) são medidos em cada estação, e vários tipos de erros podem alterar as medições, a precisão final resultará da combinação destes erros. Uma combinação de erros não obedecerá as mesmas regras se forem separados em erros sistemáticos e erros randômicos. Os erros sistemáticos se repetem da mesma maneira em cada estação do registro, sendo cumulativos quando as medições são usadas para calcular a trajetória do poço. Por outro lado, os erros randômicos podem ser pouco diferentes, ou mesmo com sinais opostos em estações de registros vizinhos, e quando combinados, eles tendem a se cancelarem. Portanto, os erros sistemáticos devem ser tratados mais rigorosamente do que os erros randômicos, já que eles causam maiores incertezas na trajetória dos poços.

São propostos, na literatura, dois modelos para o tratamento dos erros : modelo de probabilidade e modelo dos erros sistemáticos.

2.2.1) MODELO DE PROBABILIDADE

Em 1969, *Walstrom et Alli* [11] propuseram um modelo para prever a incerteza da posição do fundo do poço assumindo que os erros dos ângulos de inclinação e azimuth são uniformemente distribuídos entre 2 limites. Assume também que não existe nenhuma

correlação entre os erros registrados em diferentes estações. Com este modelo, definem-se elipses de incertezas que são calculadas para definir uma probabilidade numérica do poço estar localizado a uma certa distância da posição calculada. *Truex* [12] descreveu algumas discrepâncias observadas nos registros no campo de East Wilmington na Califórnia, onde ele encontrou para poços de alta inclinação, um erro possível de ± 6 m verticalmente e ± 34 m horizontalmente para um poço de 1829 m de profundidade, sendo estes erros maiores do que o esperado utilizando o modelo proposto por *Walstrom et Alli*[11]. Assim o mesmo só foi aceito e colocado em uso por um curto período de tempo, por prever uma menor dimensão da elipse de incerteza para uma probabilidade de 99.99 % dela ser atingida.

Na figura 2-1 são apresentadas as "Elipses de Incerteza" para a posição do fundo do poço com uma profundidade de 1646 m para as diversas probabilidades :

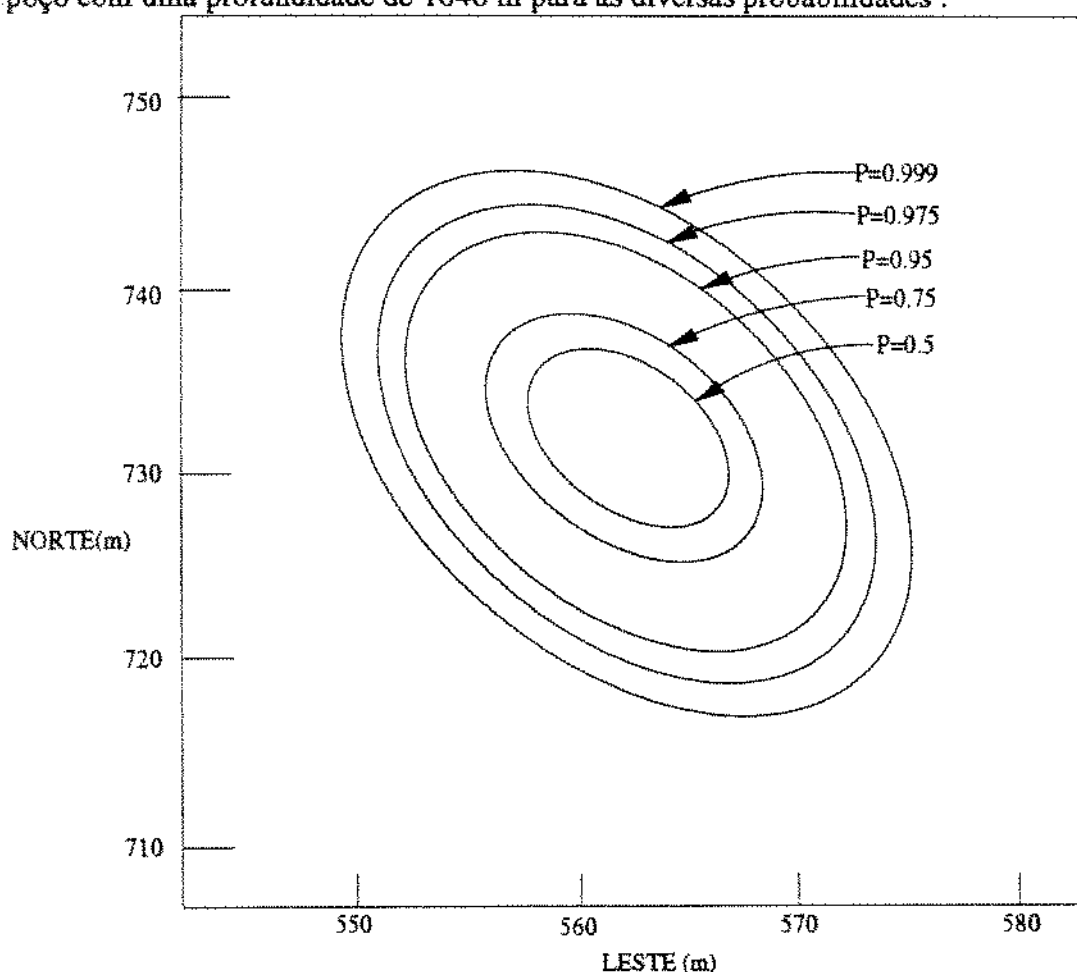


Figura 2-1 : Elipses de incerteza para o modelo de probabilidade

Os mesmos resultados obtidos pelo modelo de probabilidades podem ser conseguidos utilizando-se o algoritmo de simulação de Monte-Carlo para o erro, com os dados

das várias estações. As elipses podem ser definidas ao proceder diversas vezes os cálculos das trajetórias.

2.2.2) MODELO DE ERROS SISTEMÁTICOS

Neste modelo, *Wolff e De Wardt* [13] sugerem que os erros em um registro particular são sistemáticos e levam a um erro total maior do que o erro do modelo de Walstrom. Levando-se em conta os valores de erros típicos para as boas e más medidas (registros), eles desenvolveram equações para as incertezas nas posições que resultam em elipsóides, cujas projeções no plano horizontal revelaram-se maiores do que as obtidas por *Walstrom et al.* [11] e mais confiáveis. Este trabalho aplica-se a medições tipo registros múltiplos e define incertezas na posição do poço em relação à vertical, ao norte e ao leste.

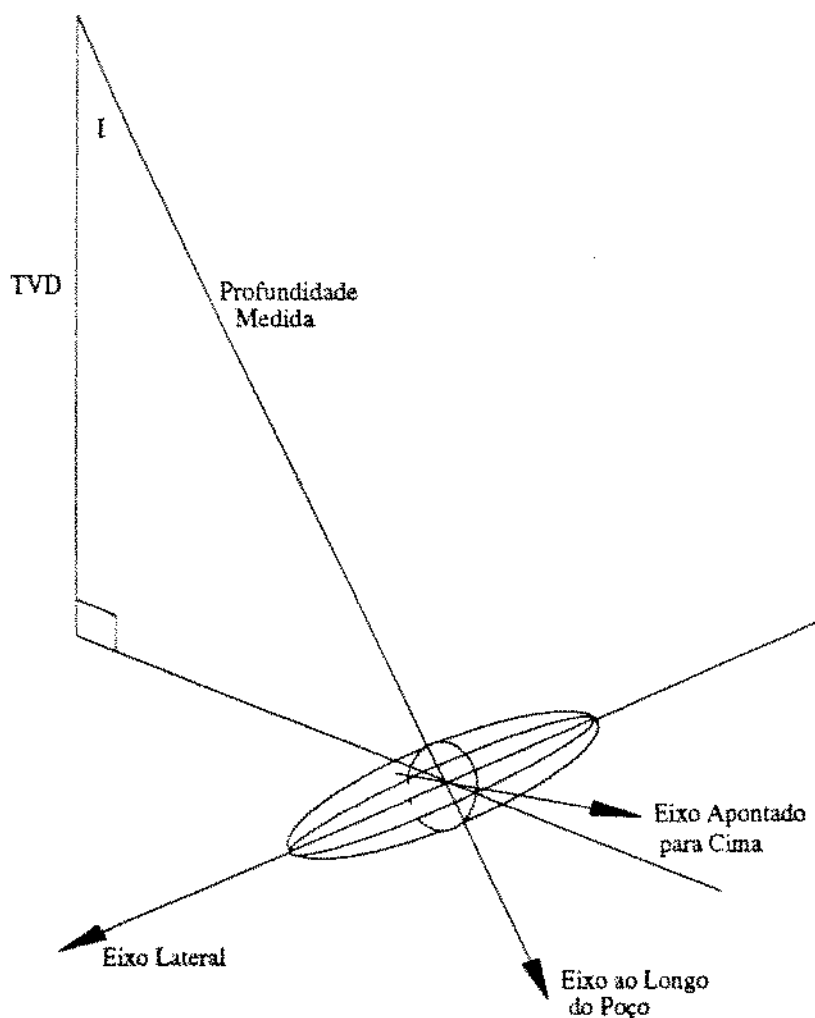


Figura 2-2 : Definição dos eixos do elipsóide de incerteza

2.2.2.a) Fontes dos Erros Sistemáticos

Para determinar a incerteza dos poços em erupção e de alívio, usando o modelo dos erros sistemáticos, os erros são separados em várias fontes:

- Erro de Referência do Instrumento

Compreende as incertezas devido aos instrumentos, sua precisão e seus defeitos, como também a precisão da declinação magnética usada, que afeta os resultados.

- Erro devido a Magnetização da Coluna

São os causados pela interferência devido a magnetização das componentes da coluna de perfuração, que influencia a componente horizontal do campo magnético da terra.

- Erro devido ao Giroscópio

Erro introduzido devido a variação do norte da bússola do giroscópio (*drift*) ser corrigido linearmente apesar de sua variação não linear, além do que quando as inclinações aumentam o giroscópio fica menos efetivo.

- Erro da Inclinação Verdadeira

A medida da inclinação tem variação devido ao instrumento não estar centralizado, já que os centralizadores não compensam igualmente a força da gravidade.

- Erro no Comprimento do Poço

É causado pela imprecisão do aparelho de medida de profundidade do cabo, a fricção com o revestimento, a imprecisão nas medidas da coluna de perfuração e o efeito da elongação da coluna ou do cabo.

- Erro devido ao Desalinhamento

Para poços próximos a vertical, o azimuth é muito influenciado pela inclinação e qualquer desalinhamento da ferramenta pode dar resultados bem diferentes na direção. Já para

poços com altas inclinações o erro do desalinhamento pode ser considerado pequeno em comparação ao erro total da bússola.

2.2.2.b) Classificação dos Erros segundo a Qualidade dos Registros

Os valores dos erros dependem do tipo de instrumento e do controle de qualidade dos procedimentos utilizados nas corridas; sendo os registros direcionais classificados em "Registros de Alta Qualidade", quando os mesmos são realizados com equipamentos e procedimentos adequados, e "Registros de Baixa Qualidade", quando o equipamento e as técnicas utilizadas durante os registros direcionais não são boas.

2.2.2.c) Programa Computacional para Tratamento dos Erros Sistemáticos

Foi elaborado um programa que calcula os semi-eixos da elipse de incerteza, e de posse destes dados pode-se definir qual será a profundidade inicial de pesquisa do poço em erupção com as ferramentas de detecção, assim como a profundidade de intersecção. O programa também foi utilizado para fazer uma análise de sensibilidade dos valores típicos dos erros para verificar qual a influência de cada fonte no cálculo da elipse de incerteza. Os dados dos poços usados na elaboração dos gráficos abaixo encontram-se no Apêndice I e os valores típicos para os erros medidos foram obtidos da tabela B-1.

- Análise para o Erro de Magnetização da Coluna

Analisando a figura 2-3, verifica-se que para o poço na direção Norte a área da elipse de incerteza se mantém constante, apesar da variação do Erro de Magnetização da Coluna e para o poço na direção Leste com o aumento do erro tem-se o aumento da área da elipse de incerteza.

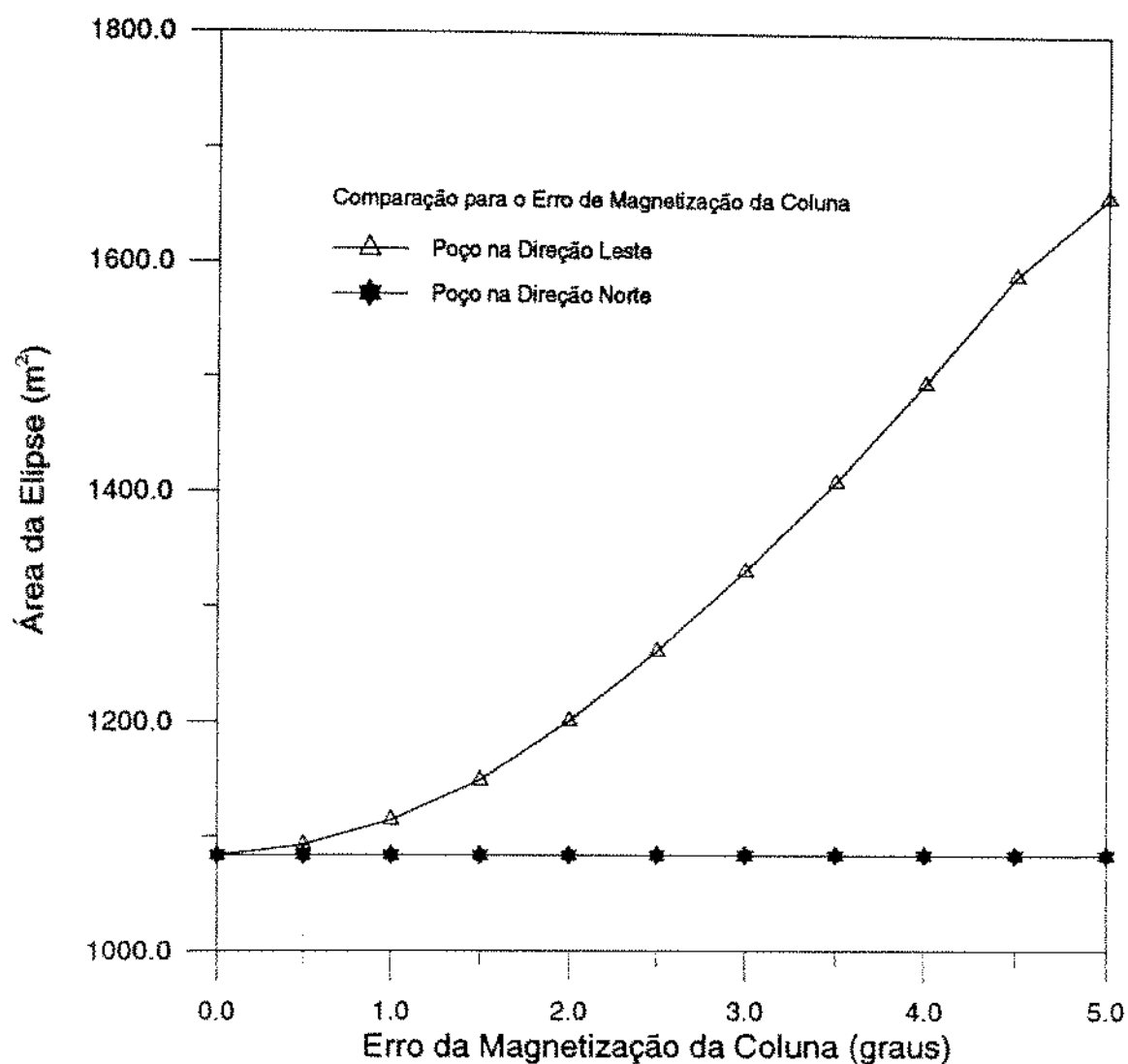


Figura 2-3 - Gráfico para o Erro de Magnetização da Coluna

Isto pode ser justificado ao se analisar a equação (E-4) do Apêndice E dada a seguir, que calcula o erro no azimute :

$$\Delta A = \frac{\sin I \sin A \Delta B_z 180}{\cos(DIP) |B| \pi}$$

Onde :

- $\Delta A \rightarrow$ erro no azimute em graus;
- $I \rightarrow$ inclinação do poço em graus;

- $A \rightarrow$ azimuth em graus;
- $DIP \rightarrow$ ângulo de mergulho do campo magnético da Terra em graus;
- $|B| \rightarrow$ intensidade total do campo magnético da Terra em microtesla (μT);
- $B_N = \cos(DIP) |B| \rightarrow$ componente horizontal do campo magnético da Terra em microtesla (μT);
- $\Delta B_z \rightarrow$ campo magnético interferente em microtesla (μT);

Para as condições brasileiras o erro de magnetização da coluna pode ser calculado com a equação (E-4), utilizando o valor da intensidade total do campo magnético da Terra e do ângulo de mergulho obtidos de Cartas Magnéticas ou do programa em FORTRAN, fornecido pelo Observatório Nacional, conforme Apêndice B.

- Análise para o Erro de Referência da Bússola

Analisando a figura 2-4, verifica-se que a área da elipse de incerteza é maior para o poço na direção Leste, porém em ambas as direções a área de incerteza cresce com o aumento do valor do erro de referência da bússola.

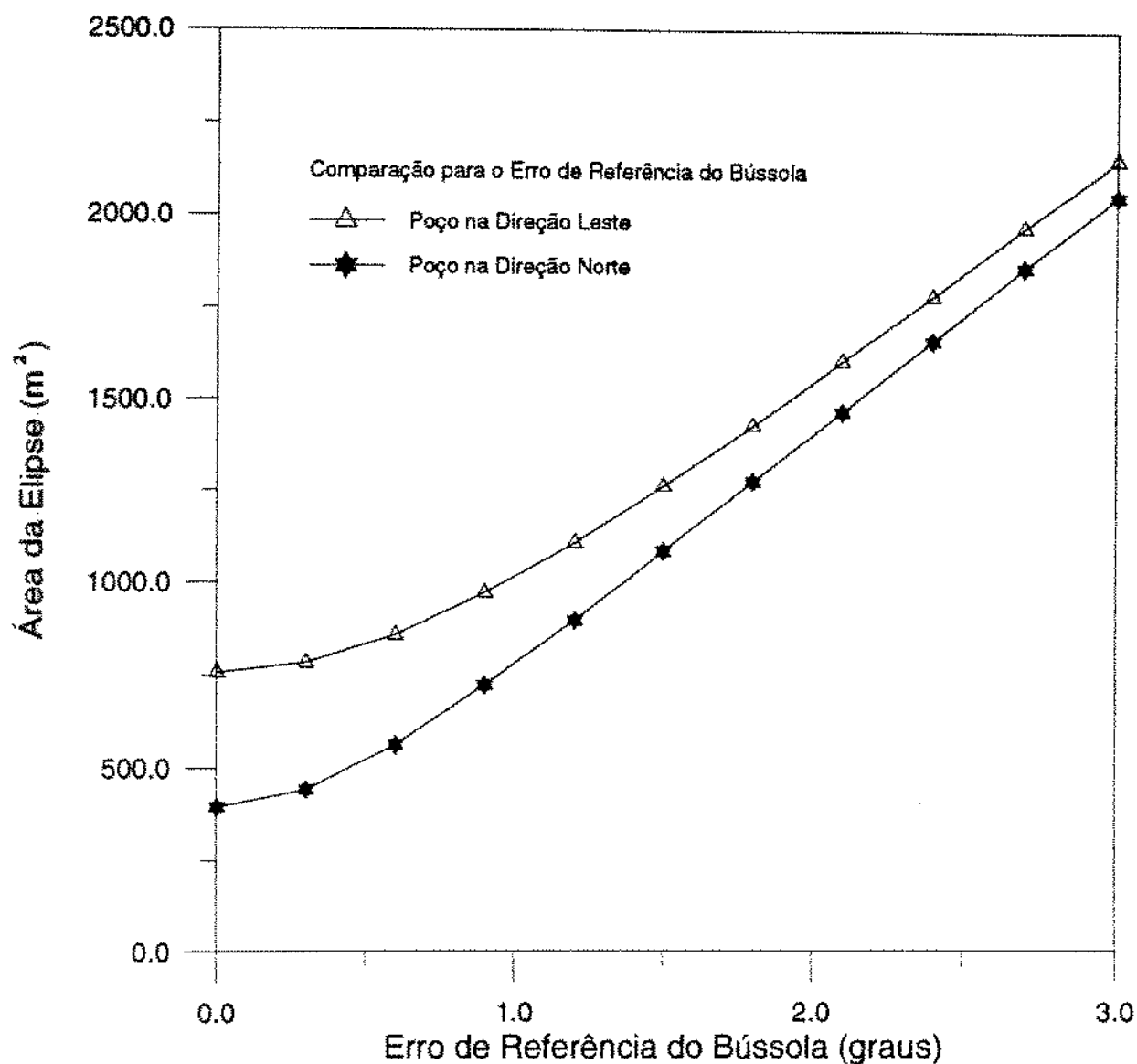


Figura 2-4 - Gráfico para o Erro de Referência da Bússola

- Análise para o Erro devido ao Desalinhamento

Analisando a figura 2-5, verifica-se que em ambas as direções a área da elipse de incerteza aumenta com o aumento do valor do erro devido ao desalinhamento e que as curvas se comportam de forma similar chegando a serem paralelas, porém o erro tem maior influência no poço na direção leste, visto que este apresenta maior área de incerteza.

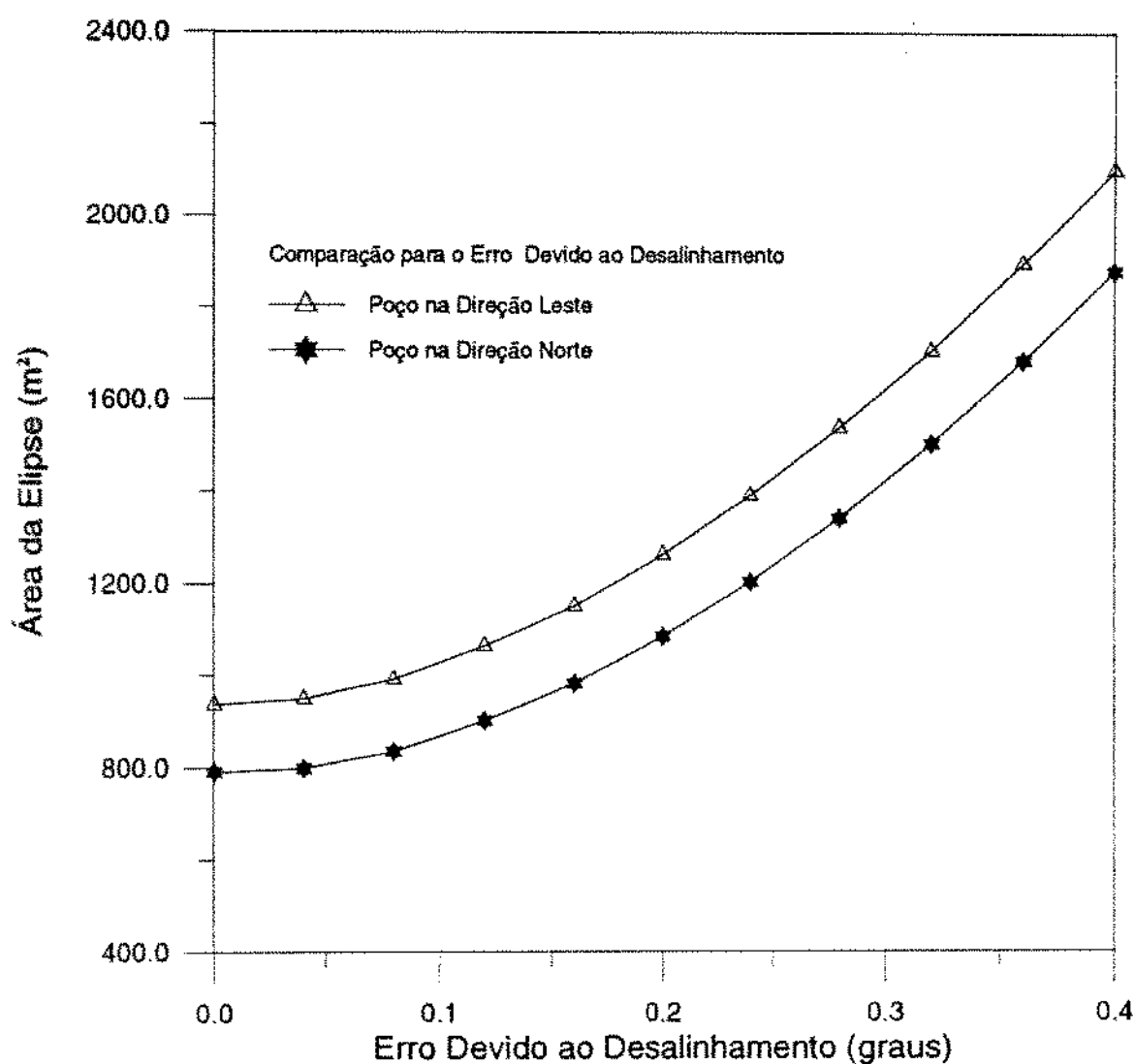


Figura 2-5 - Gráfico para o Erro devido ao Desalinhamento

- Análise para o Erro da Inclinação Verdadeira

Analisando a figura 2-6, verifica-se que em ambas as direções a área da elipse de incerteza cresce com o aumento do erro da inclinação verdadeira, porém a área da incerteza é maior para os poços na direção Leste e para valores do erro próximos a 1.5 graus a separação entre as curvas dos poços na direção Leste e Norte é maior do que para valores do erro próximos de zero.

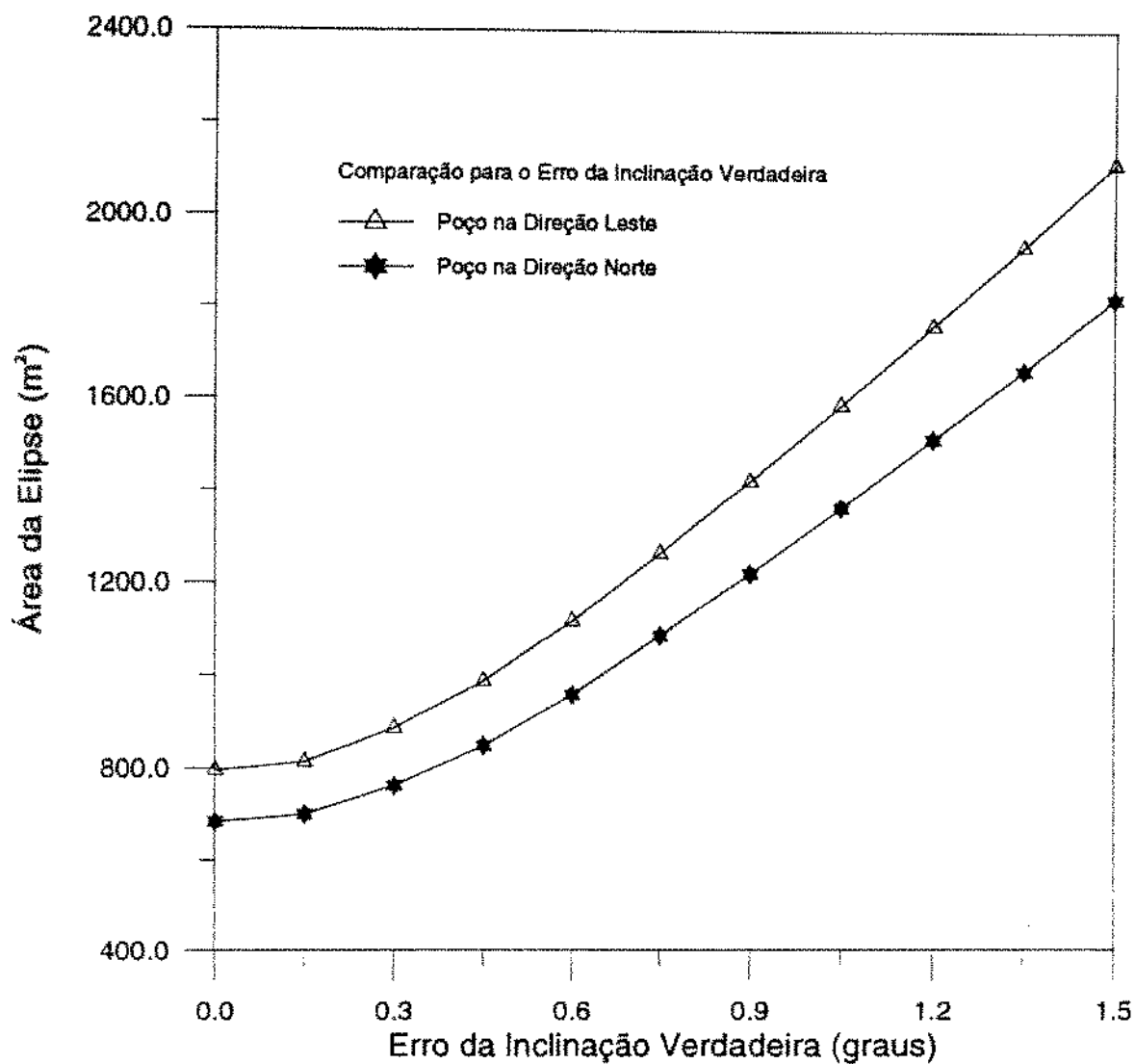


Figura 2-6 - Gráfico para o Erro devido à Inclinação Verdadeira

- Análise para o Erro Relativo a Profundidade

Analisando a figura 2-7, verifica-se que não há grande variação da área da elipse de incerteza com o aumento do erro relativo a profundidade para ambas as direções, porém para o poço na direção Leste a área de incerteza é bem maior do que para o poço na direção Norte.

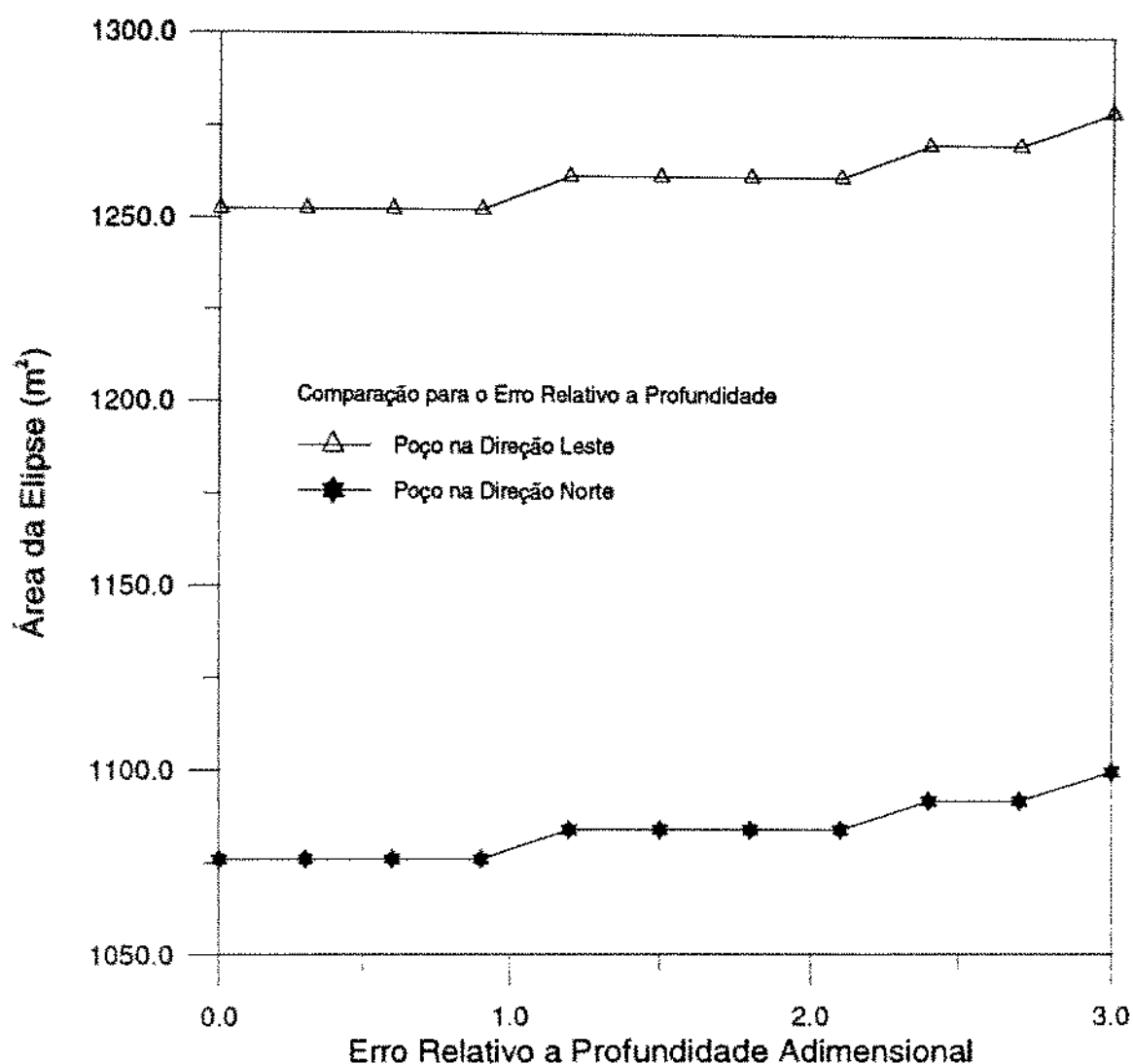


Figura 2-7 - Gráfico para o Erro Relativo à profundidade

Através da análise dos gráficos para os instrumentos magnéticos de registro conclui-se que os poços direcionais na direção Norte/Sul tem uma incerteza menor do que os poços na direção Leste/Oeste, para as fontes de erro sistemático.

- Análise Adimensional para os Instrumentos Magnéticos

Analisando a figura 2-8, verifica-se que para o poço na direção Norte as fontes de erro sistemático que têm maior influência na área da elipse de incerteza no plano horizontal são, pela ordem, o erro de referência da bússola, o erro da inclinação verdadeira, o erro devido ao desalinhamento, o erro de magnetização da coluna e o erro relativo a profundidade.

Observa-se também que para os poços nesta direção tanto o erro de magnetização da coluna como o erro relativo a profundidade não tem muita influência na área da elipse de incerteza.

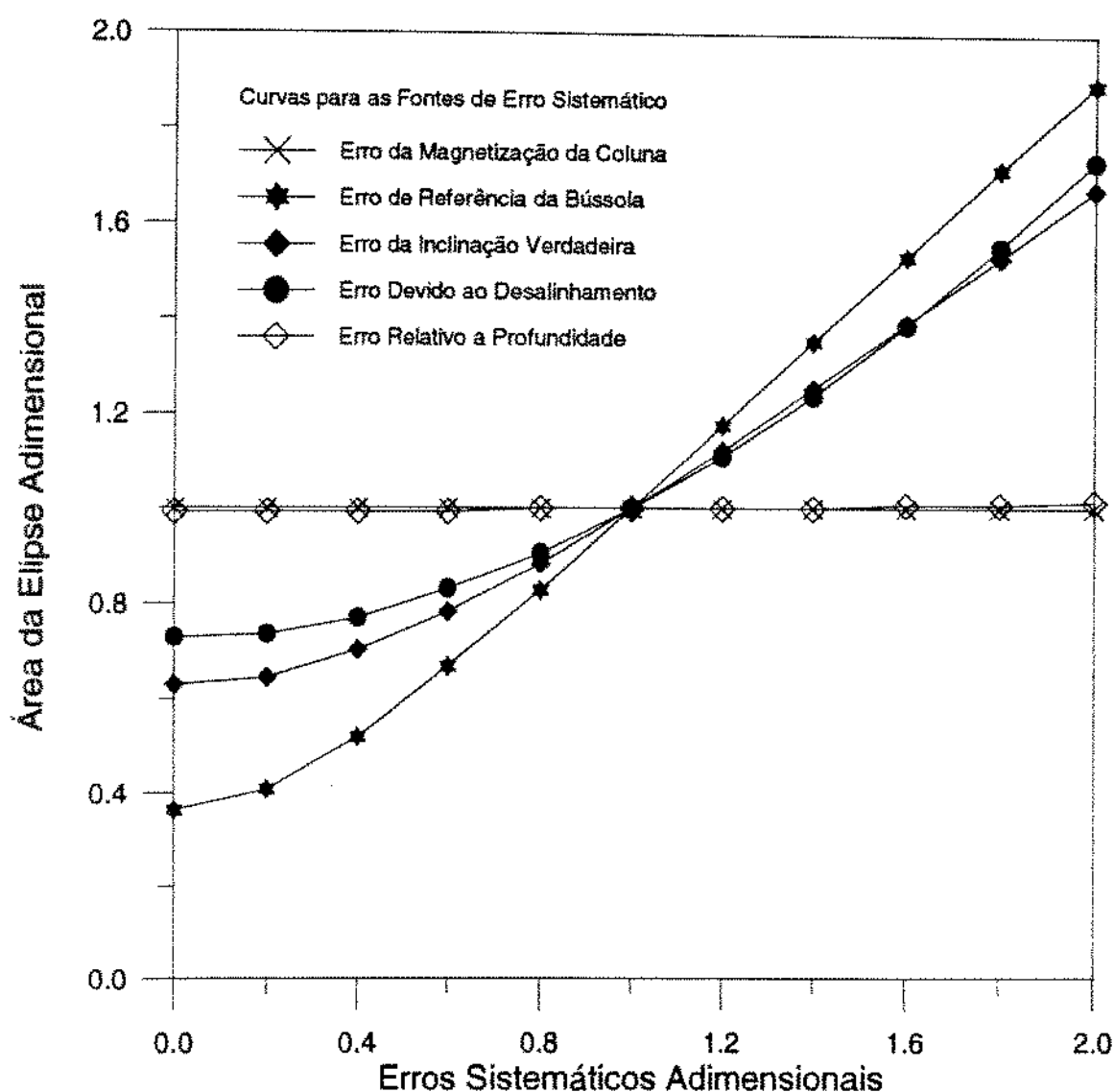


Figura 2-8 - Gráfico para os Instrumentos Magnéticos com o Poço na Direção Norte

Para os poços na direção Leste, analisando a figura 2-9 verifica-se que a ordem de influência das fontes de erro sistemático na área da elipse de incerteza no plano horizontal tem um comportamento semelhante a dos poços na direção Norte, porém o erro de magnetização da coluna já causa maior variação na área de incerteza e apenas o erro relativo a profundidade não causa praticamente nenhuma variação.

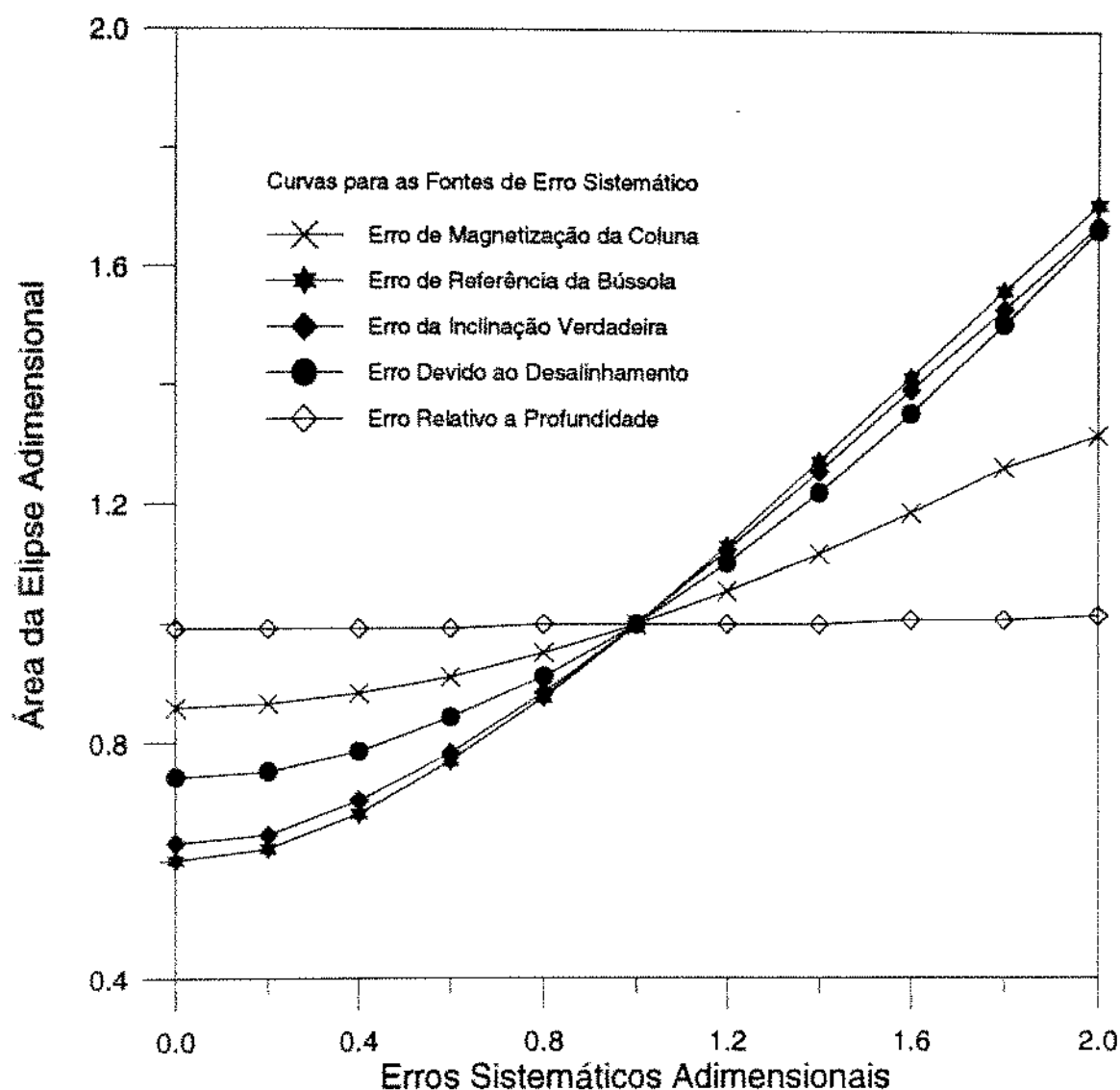


Figura 2-9 - Gráfico para os Instrumentos Magnéticos com o Poço na Direção Leste

- Análise Adimensional para os Instrumentos com Giroscópios

Na análise dos resultados dos instrumentos com giroscópios, verifica-se que a área da elipse de incerteza é igual para os poços na direção Norte e Leste, para cada fonte de erro sistemático investigada individualmente. Já a influência das mesmas em conjunto pode ser observada na figura 2-10, onde observa-se que as fontes de erro que têm maior influência na área de incerteza são pela ordem, o erro da bússola do giroscópio, o erro da inclinação

verdadeira, o erro devido ao desalinhamento, o erro de referência do giroscópio e o erro relativo a profundidade, sendo que esta última fonte de erro causa pouca variação na área da elipse de incerteza no plano horizontal.

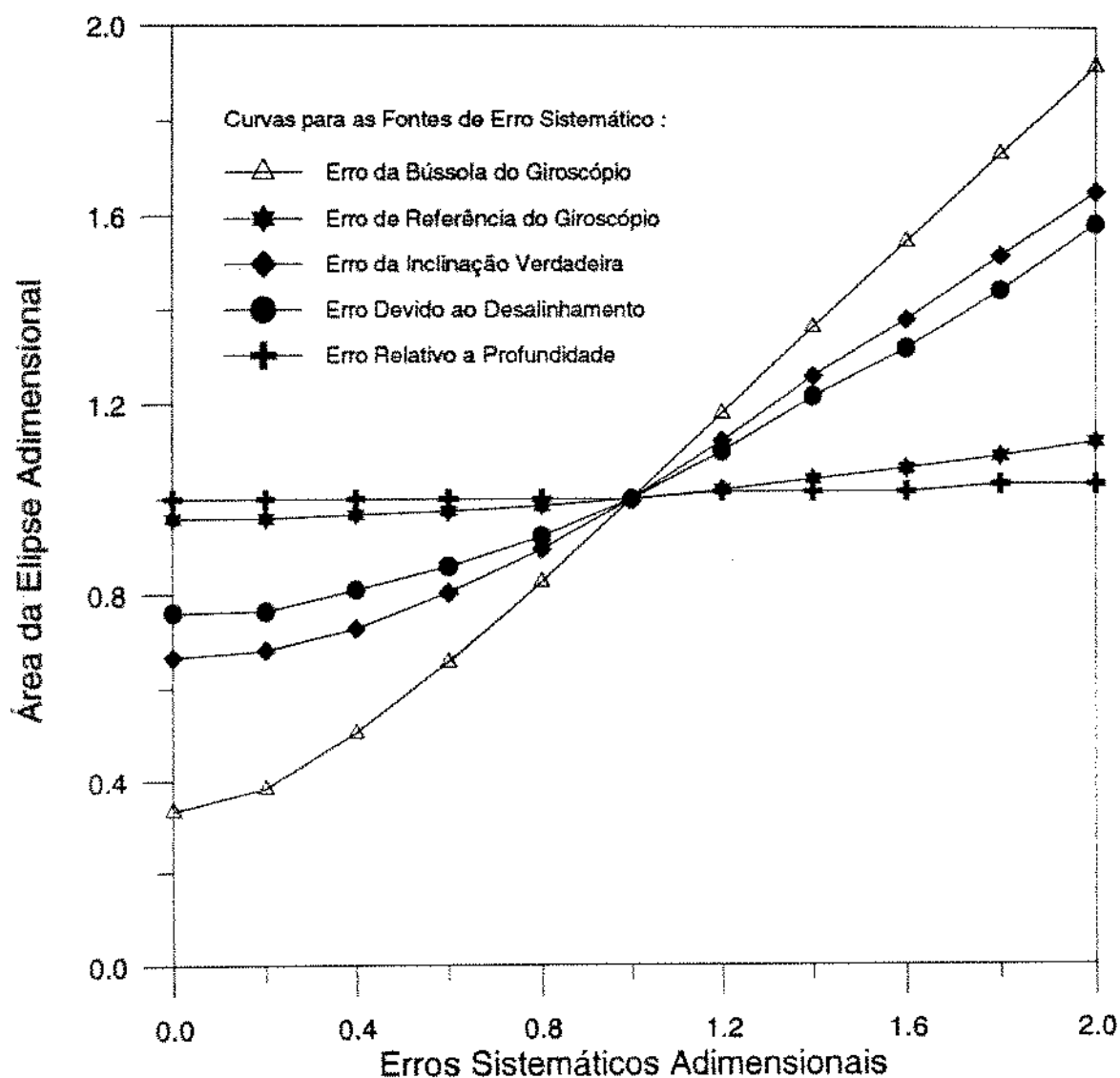


Figura 2-10 - Gráfico para os Instrumentos com Giroscópios

Um estudo realizado por *Dubrule e Nelson* [14], em Prudhoe Bay, onde vários poços tiveram mais de uma corrida de fotos com diferentes equipamentos, comparou as discrepâncias observadas com o modelo de *Wolff e De Wardt*[13] e chegaram as mesmas conclusões, isto é :

a) A maioria dos erros era sistemático;

- b) Comprovou que o centro da elipse para corridas magnéticas era diferente do centro para corridas com o giroscópio;
- c) A maior diferença entre as medidas com corridas magnéticas e com corridas de giroscópio ocorre na direção leste-oeste;

Outros trabalhos foram desenvolvidos, dentre os quais alguns tentando definir e quantificar os erros que agem nos instrumentos magnéticos. *Thorogood* [15] preferiu atacar o problema dos erros dos registros através de cuidadoso planejamento, supervisão e descidas de registros redundantes, e utilizando um modelo de desempenho do instrumento onde os parâmetros de incerteza são calculados, verificou que resultados próximos podem ser obtidos com diferentes instrumentos.

Para instrumentos que utilizam acelerômetros e magnetômetros ou giroscópios "*North Seekers*" um novo método foi proposto por *Holmes* [16], levando em conta os erros obtidos nas componentes do vetor do instrumento sem correções. Os erros exibem uma distribuição gaussiana, porém eles também são altamente correlacionados de uma estação para a outra. Atualmente os resultados disponíveis são bastante limitados.

2.3) EQUIPAMENTOS PARA DETECÇÃO DOS POÇOS EM ERUPÇÃO

Apesar do grau de confiabilidade dos registros direcionais ter aumentado nos últimos anos, ferramentas de detecção são necessárias para localizar os poços em *erupção* a partir dos poços de alívio, permitindo a orientação para obter-se uma boa comunicação entre os poços. Com colunas no poço (coluna de perfuração ou revestimentos), dois métodos são aplicáveis: o método elétrico e o método eletromagnético. Para um poço aberto e sem coluna é disponível o registro do ruído acústico.

2.3.1) MÉTODOS ELÉTRICOS

O método usa a técnica do "*Ultra Long Spaced Electric Log (ULSEL)*" (*Runge et Al*[17]) sendo originalmente projetado para detectar e mapear domos salinos e outras grandes

anomalias na resistividade. A técnica é usada no caso da perfuração de poços de alívio, para detectar revestimentos ou coluna de perfuração no poço em *erupção*, através da anomalia ao fluxo de corrente. As ferramentas usam equipamentos para obterem leituras de raios de investigações profundas que são influenciadas pela anomalia. Basicamente a sonda elétrica é uma ferramenta longa, com o arranjo de eletrodos típicos na armadura de isolamento, conforme figura 2-11(*Haanschoten* [18] e [19]). Estes arranjos são denominados na literatura 75/350 ou 150/350.

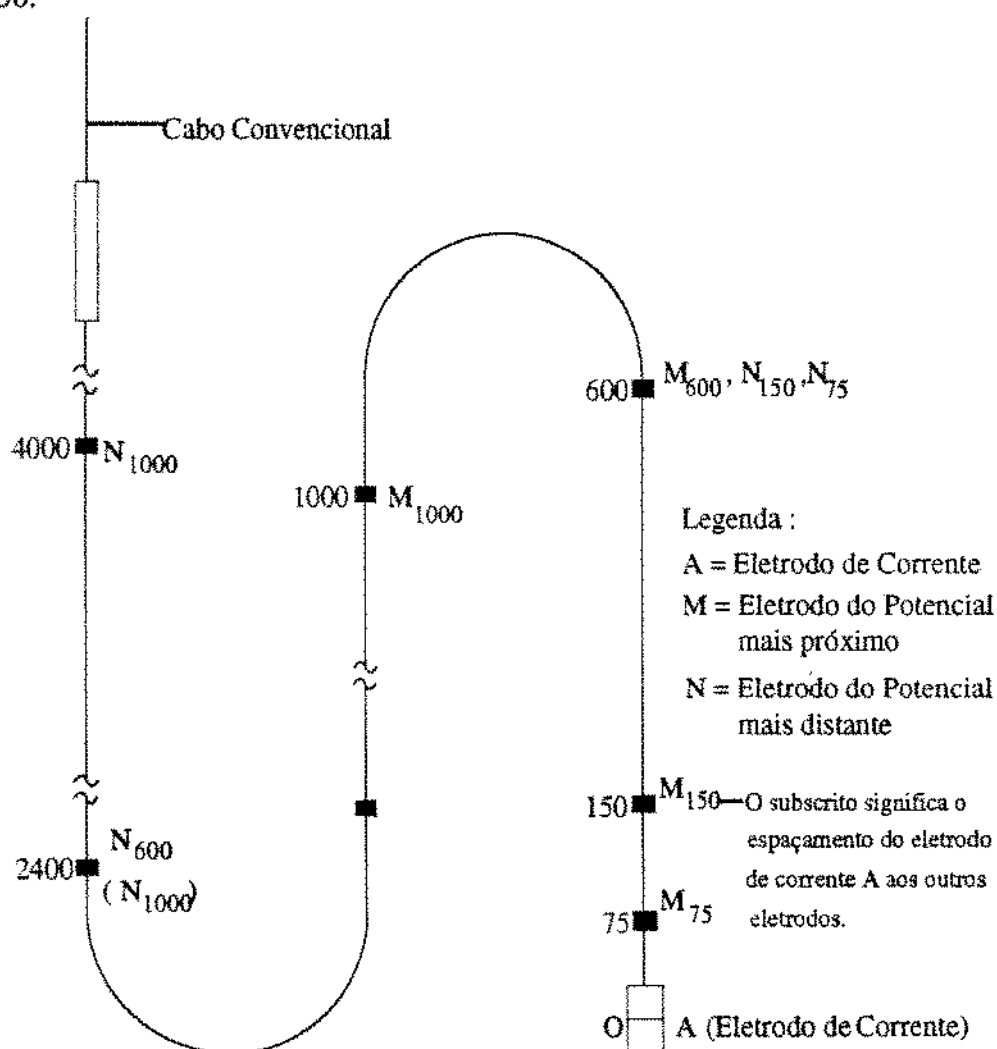


Figura 2-11 : Esquema dos eletrodos da ferramenta "ULSEL"

Previamente são feitas medições com sondas de resistividade com pequenos espaçamentos, e com estes dados são calculadas as medições de resistividade esperadas nas formações, para espaçamentos AM_1 e AM_2 . Quando um revestimento condutor está na vizinhança, a resistividade medida com estes espaçamentos é menor do que a esperada. A razão da resistividade real e a resistividade esperada é uma função da distância do

revestimento, do ângulo de aproximação, de valores de resistividade e do tamanho do revestimento. Cartas têm sido calculadas para várias condições (*Mitchell et al.*[20]).

Os equipamentos ULSEL detectam um revestimento de 244 mm (9 5/8") a distância de até 24.38 m. Se a distância ao revestimento é definitivamente conhecida ser menor do que 6.096 m, somente a ferramenta com espaçamento normal entre os eletrodos (AM=6.096 m, AN=21.34 m, 254 mm) é necessária.

Esta técnica somente mede distâncias , não tem a capacidade por si só para detectar a direção do revestimento e atualmente está em desuso. Um procedimento para determinar a direção por detecção do magnetismo do revestimento foi descrito por *Robinson e Vogiatzis* [21]. O método requer que o magnetismo do revestimento seja conhecido antes do revestimento ser assentado.

2.3.2) MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS

Os métodos eletromagnéticos podem ser passivos ou ativos e as atuais ferramentas geralmente usam os dois métodos acoplados.

O método eletromagnético ativo é similar ao método elétrico, porém o campo magnético induzido pela corrente fluindo no revestimento é medido. A figura 2-12 mostra a corrente que flui no revestimento do poço em *erupção* devido a corrente emitida pelo eletrodo A. O magnetômetro localizado em M a 91.44 m abaixo do eletrodo de corrente no poço de alívio, mede o campo magnético induzido pela corrente do revestimento (*West et al.*[22]).

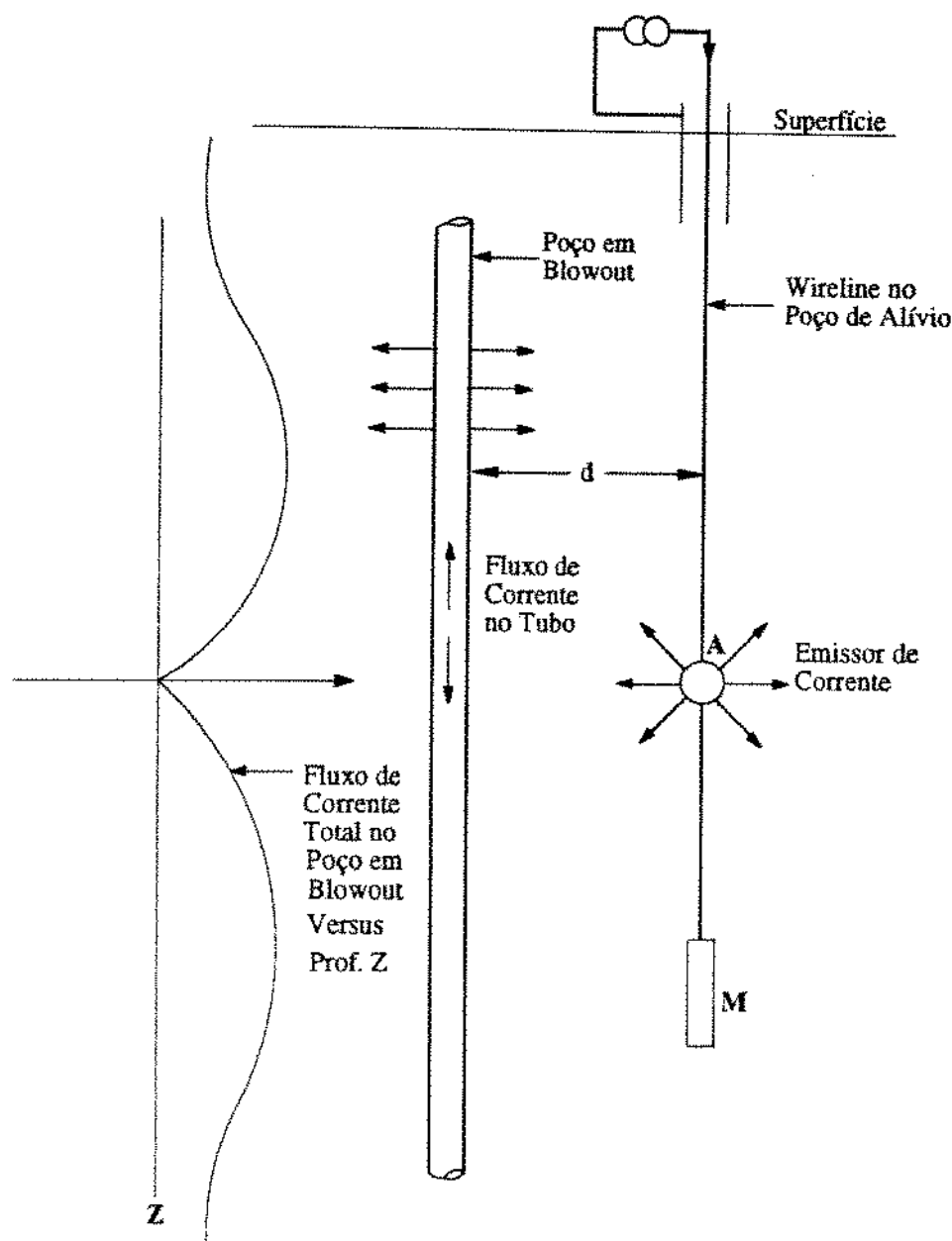


Figura 2-12 : Fluxo de corrente no revestimento de um poço em erupção

A intensidade do campo está relacionada a distância do poço de alívio ao poço em erupção. A técnica foi utilizada com sucesso para interceptar um poço em erupção a 4893 m (Grace[23]).

O método eletromagnético passivo utiliza magnetômetros sensíveis que detectam os campos produzidos por materiais ferromagnéticos (comandos, tubos de perfuração, revestimentos) usados nos poços. Esses campos são devido aos processos de fabricação, à inspeção e à magnetização induzida pelo campo magnético da Terra.

Um modelo típico de magnetização é mostrado na figura 2-13 (Robinson e Vogiatzis[21]) :

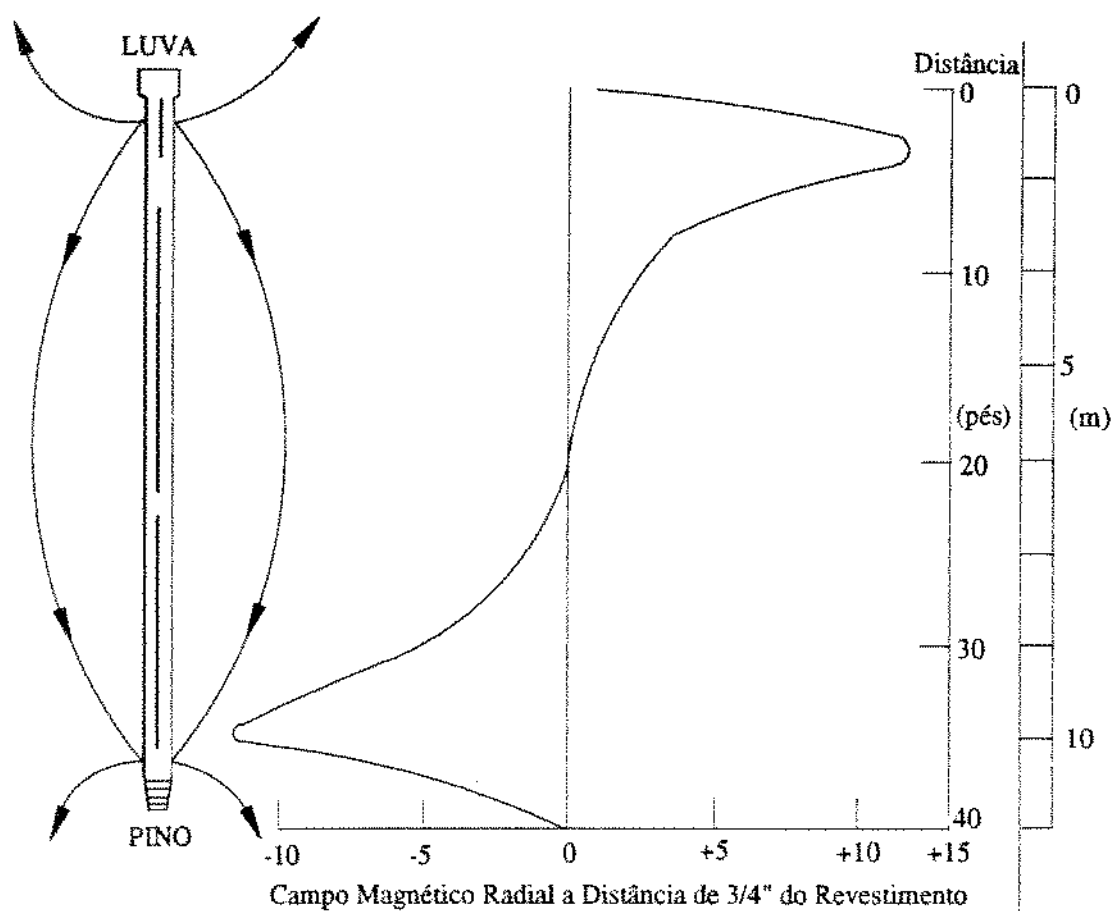


Figura 2-13 : Campo magnético radial externo a uma junta de revestimento

Uma sonda equipada com magnetômetros foi construída para detectar o magnetismo do revestimento até 30.5m de distância (Morris et al.[24]). O magnetismo do revestimento deve ser detectado na presença do campo magnético da Terra. Um campo vertical diferencial é medido, sendo ele função da distância.

A figura 2-14 mostra um registro típico do gradiente vertical que indica um dipolo e um monopolo incluindo uma interpretação esquemática do desenho (Morris et al.[24]). A técnica magnética passiva tem sido largamente utilizada apresentando bons resultados.

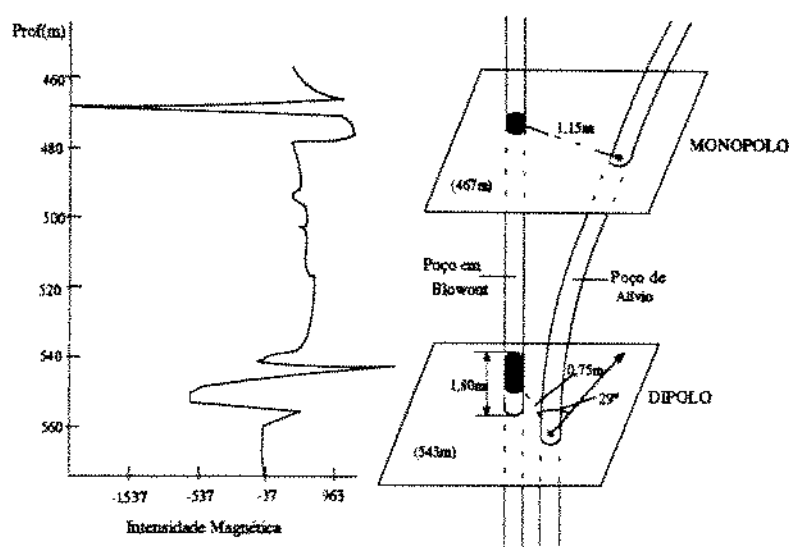


Figura 2-14 : Medição do gradiente axial magnético

Atualmente são usadas ferramentas que utilizam os métodos eletromagnéticos para a detecção dos poços em erupção, sendo as mais usuais :

2.3.2.a) MAGRANGE (*Magnetic Gradient Ranging*)

Utiliza os dois sistemas eletromagnéticos combinados para determinar a distância e a direção do poço em erupção :

- i) Um sistema eletromagnético passivo detecta perturbações no campo magnético da Terra, causadas pelo aço magnético do revestimento ou pela coluna de perfuração do poço em erupção;
- ii) Um sistema eletromagnético de baixa frequência, chamado *Downhole Current Injection* (D.C.I.), injeta ou induz corrente alternada no poço em erupção, produzindo um campo magnético de baixa frequência que é detectado por sensores magnéticos na ferramenta.

Os métodos são operacionais simultaneamente e podem ser usados durante uma única manobra. Os dados de ambos são disponíveis em tempo real, permitindo informações preliminares enquanto perfilando.

O D.C.I. permite um maior raio de detecção, em torno de 60 m. Isto ajuda particularmente em situações onde a incerteza na posição do poço em erupção na profundidade da primeira aproximação é grande, e pode evitar correções.

O método magnético passivo é preciso em raios de investigações mais curtos. Em raios de investigações intermediários a comparação dos resultados dos dois métodos aumenta a confiabilidade.

O raio de detecção depende do tipo de coluna que se encontra no poço em erupção. As colunas de perfuração compostas de tubos de perfuração, comandos, etc. devido terem maiores espessuras de parede, e serem submetidas a maiores tensões desenvolvem campos magnéticos mais fortes, podendo serem em geral detectadas a maiores distâncias.

Colunas de diâmetros menores, mais leves, revestimentos sem luvas tem baixos campos magnéticos e são normalmente não detectáveis em raios de investigações comparáveis com a coluna de perfuração.

Para o D.C.I., revestimentos de grande diâmetro, ou tubos de maior secção transversal situados em formações de alta resistividade são mais fáceis de serem detectados.

O sistema MAGRANGE é composto de 4 sensores do campo magnético arranjados em pares. O par gradiométrico tem seus eixos sensíveis paralelo ao eixo longitudinal do instrumento de fundo na qual eles estão montados e medem a componente da intensidade do campo magnético ao longo do eixo do poço de alívio, sendo chamado de sensores axiais. O segundo par de sensores do campo magnético são montados no instrumento tal que seus eixos sensíveis são posicionados radialmente em relação ao eixo longitudinal do instrumento de fundo e estão em ângulos retos um em relação ao outro e são chamados sensores radiais e estão localizados entre os sensores axiais que se encontram na extremidade do instrumento. Os dois sensores axiais e os 2 sensores radiais formam um sistema ortogonal.

Para a determinação da direção do poço de alívio em relação ao poço em erupção são utilizadas as medições dos sensores radiais individuais, primeiro determinando a orientação do instrumento no fundo do poço enquanto ele está na seção do poço de alívio não revestido que está suficientemente longe do alvo não sendo afetada pelo campo magnético do poço em erupção, sendo esta chamada de "Área livre do Alvo", e é assumido que o único campo magnético significativo é o campo magnético da Terra. Descendo ao longo da seção não revestida do poço de alívio ao se aproximar do alvo, o campo magnético do poço em erupção se tornará detectável, sendo chamada de "Área alvo" e o campo magnético é o vetor

combinação do campo magnético da Terra e o campo magnético do poço em erupção. Se os valores de cada um dos sensores radiais observados na área livre do alvo são subtraído de seus respectivos valores na área alvo, os resultados irão conter somente as componentes vetorial do campo magnético do alvo no plano dos sensores radiais. A componente do campo magnético da Terra sendo do mesmo valor em cada caso será subtraída do problema. A direção do alvo com respeito a orientação do instrumento é determinada pelo cálculo vetorial conforme figura 2-15 onde são mostradas estas relações vetoriais, a equação para a sua solução. A orientação da ferramenta em relação a direção do norte magnético é determinada das medições feitas na área livre.

Se o poço de alívio não é essencialmente vertical, informações dos registros do poço de alívio é usado para determinar sua orientação. Em operação, o instrumento é fixado para restringir a rotação e os resultados obtidos são relativos ao sistema de coordenadas do instrumento de fundo cuja direção axial coincide com o eixo do poço de alívio.

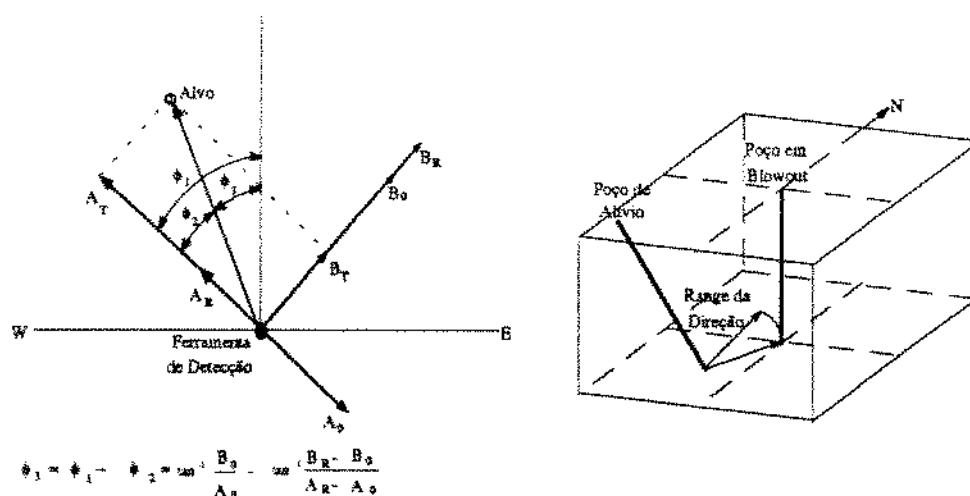


Figura 2-15 : Diagrama vetorial para obtenção da direção

2.3.2.b) WELLSPOT

Assim como o *MAGRANGE*, esta ferramenta possui dois componentes, sendo um injetor de corrente no fundo do poço, e um sensor do campo magnético separado por uma armação isolante. Em formações de condutividade uniforme, o injetor produz um fluxo de corrente que na presença de um revestimento no poço alvo sofre perturbações produzindo um campo magnético flutuante ao longo do revestimento, que é detectado pelos sensores. A intensidade do sinal é diretamente proporcional a quantidade de corrente do revestimento e inversamente a distância do sensor ao revestimento, sendo a direção determinada pelo ângulo entre o campo magnético da Terra ou o campo gravitacional e o sinal do revestimento.

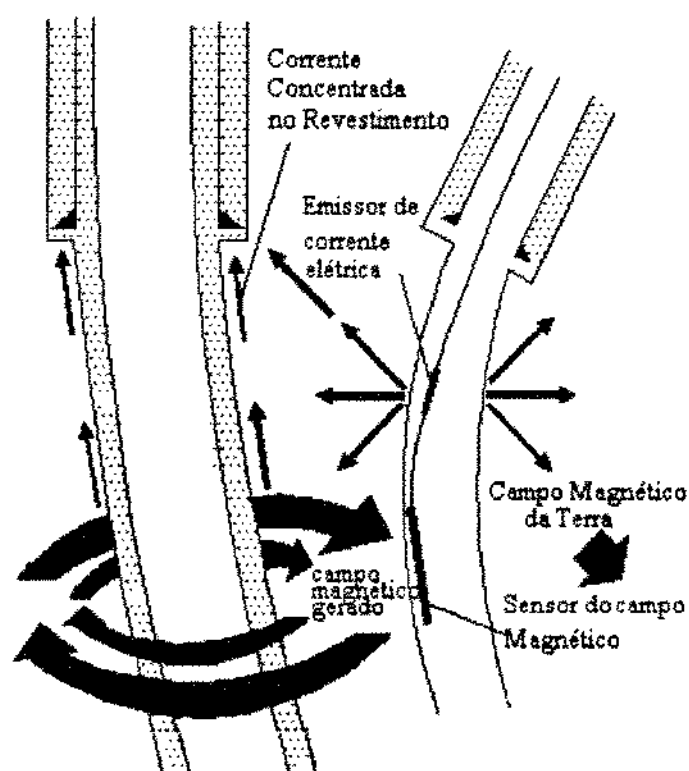


Figura 2-16 : Princípio de funcionamento da ferramenta de detecção

O *WELLSPOT*, para determinar a direção e a distância do poço em *erupção*, requer que o mesmo tenha algum condutor elétrico tal como a coluna de perfuração ou de

revestimento na região a ser detectada. O raio de investigação máximo da ferramenta está sujeito a diversos fatores. Entre os fatores que determinam o raio de detecção temos a condição do revestimento ou coluna de perfuração no poço, o tipo de fluido de perfuração usado no poço em erupção e no poço de alívio, a resistividade e a homogeneidade das formações ao redor dos poços. Para poços perfurados com fluidos de perfuração a base água em rochas homogêneas com uma resistividade em torno de 1ohm-m , distâncias e direções ao poço alvo podem ser obtidas a até 60 m. O detector do campo gravitacional permite determinação da distância e direção mesmo dentro do raio de investigação onde a interferência magnética normalmente perturbaria os resultados, quando a distância for inferior a 2 m.

Devido às propriedades isolantes elétricas do fluido de perfuração a base óleo, o raio de investigação da ferramenta é reduzido quando a mesma é utilizada. Se utilizada no poço de alívio este tipo de fluido inibe a corrente transmitida do eletrodo, e menor fluxo de corrente será emitido para o poço alvo. Em testes de campo foi observado que o fluido a base óleo, quando utilizado no poço de alívio, reduz o raio de detecção pela metade.

Se o poço em erupção foi perfurado com fluido de perfuração a base óleo, o fator crítico na determinação do sinal pela ferramenta é a resistência no contato entre a coluna de perfuração ou o revestimento e a formação vizinha. Isto pode variar largamente dependendo das circunstâncias individuais. Na pior situação, o sinal pode ser reduzido por um fator de cinco vezes. Em certos casos, o uso de um sistema de excitação de superfície produz sinais de intensidades suficientes quando o sistema de eletrodos do fundo do poço não consegue.

Heterogeneidade da formação ao redor pode perturbar a determinação da ferramenta devido a reflexões do sinal. Porém este efeito somente é importante em sinais de baixa intensidade. Dentro de 30 m a intensidade dos sinais são suficientes para que a detecção possa ser feita com precisão.

2.3.3) MÉTODO ACÚSTICO

Em um poço sem coluna (revestimento ou coluna de perfuração), técnicas magnéticas ou elétricas não podem ser usadas. Medição do ruído acústico é a única

possibilidade. Um microfone sensível é descido no poço e o espectro de frequência do ruído é gravado em várias profundidades (*Mckinley et al.*[25] e *Britt*[26]). As amplitudes máximas são gravadas no ponto mais próximo ao poço em erupção. Nenhuma informação publicada relata a aplicação desta medida para a procura da distância do poço em erupção, todavia esta técnica tem sido usada. Uma estimativa da intensidade da fonte de ruído pode ser feita se a vazão de escoamento é conhecida. De acordo com *Mckinley* [1987] e *Britt* [1987] a amplitude decresce aproximadamente com o quadrado da distância até 30.5 m, assim a distância pode ser estimada, porém a direção não pode. Perfis de ruído acústico também são usados para ter certeza de que o poço em erupção foi definitivamente amortecido e de que nenhum fluxo no fundo do poço está persistindo (*Bruist*[27]).

Até novas tecnologias tornarem-se disponíveis somente poços revestidos ou poços contendo coluna de perfuração podem ser localizados com certeza.

2.4) CÁLCULOS DA TRAJETÓRIA

Em cada estação de registro, a inclinação e o azimuth definem um vetor tangente ao curso do poço neste ponto. Os diferentes métodos de cálculos da trajetória envolvem hipóteses com relação a forma do poço entre os dois pontos do registro. A diferença principal entre os diversos métodos é que um grupo usa aproximações por segmentos retos e outros assumem o poço como uma curva que é aproximada por segmentos curvados.

Muitos algoritmos são usados para o cálculo da trajetória de poços direcionais. Os três mais comuns são o método do raio de curvatura, o método dos ângulos médios e o método da mínima curvatura (*Bourgoyne et al.*[2]).

No método do raio de curvatura a secção perfurada é tratada como uma curva inscrita em uma superfície cilíndrica com um eixo vertical. As projeções vertical e horizontal desta curva são assumidas serem arcos de círculos cujos raios são calculados como função da taxa de ganho de ângulo e da taxa de mudança de direção.

Com o somatório obtêm-se as coordenadas Norte/Sul e Leste/Oeste totais, como também a profundidade vertical total.

No método dos ângulos médios a secção perfurada é tratada como um segmento de reta, com uma inclinação e direção igual a média dos ângulos medidos no começo e no final do trecho perfurado, entre duas estações.

O método da mínima curvatura usa os ângulos em ambas as estações e assume um poço curvado tangente aos vetores definidos pelos ângulos de inclinação em cada estação. Este método é um dos mais precisos (*Taylor[28]*). Muitos outros métodos têm sido comumente usados, porém com uma melhoria mínima na precisão. A precisão também depende da distância entre os pontos do registro que não deve exceder 30 m.

2.5 PROJETO DA TRAJETÓRIA

Os poços de alívio são normalmente posicionados a uma distância segura do poço em erupção, e por razões de segurança a favor do vento. Geralmente têm-se utilizado um afastamento horizontal do poço de alívio ao poço em erupção entre 400 m a 900 m que atende às condições de segurança e de projeto da trajetória.

O ângulo de inclinação do poço de alívio é outra consideração importante na localização do poço de alívio. A experiência tem mostrado que os poços com inclinações entre 20° e 40° são mais fáceis para controle através das técnicas de perfuração direcional.

Quatro tipos de trajetórias de poço podem ser selecionadas conforme mostra a figura 2-17 :

- (a) Ganho Crescente de Ângulo (*Continuous Build*);
- (b) Ganho e Manutenção do Ângulo (*Build and Hold*);
- (c) Ganho, Manutenção e Perda de Ângulo (*tipo S*);
- (d) Ganho, Manutenção, Perda de ângulo e Manutenção (*tipo S modificado*).

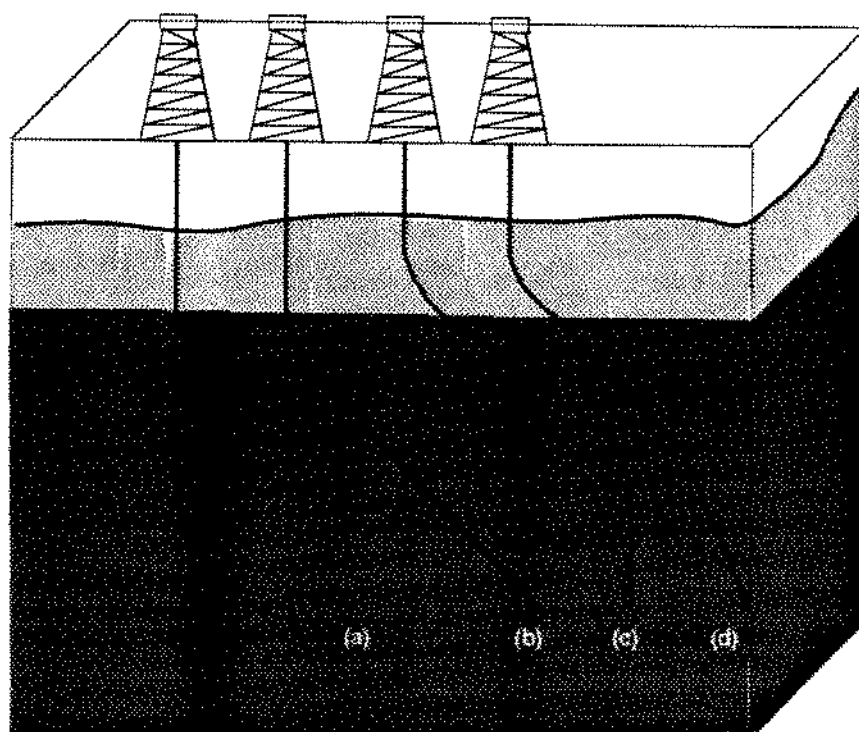


Figura 2-17 : Vista em corte das trajetórias típicas dos poços direcionais

As trajetórias normalmente preferidas são o poço tipo "S" e o poço tipo Ganho e Manutenção do Ângulo. Normalmente o poço de alívio com Ganho e Manutenção do Ângulo é perfurado para passar próximo do poço em erupção, para se detectar anomalias magnéticas causadas pelo mesmo.

Após a distância e a orientação do poço em erupção serem medidas, um tampão de cimento é colocado no poço de alívio e um desvio (*sidetrack*) é efetuado, iniciando a seção de queda de ângulo no poço de alívio. Às vezes, vários desvios são necessários especialmente se for preciso um contato ou a abertura de uma janela no revestimento do poço em erupção (*Grace[23]*).

2.6) MÉTODOS HIDRÁULICOS UTILIZADOS PARA AMORTECER O POÇO EM ERUPÇÃO

A efetiva comunicação hidráulica entre os poços de alívio e em erupção é a chave para o controle do mesmo. Uma vez que o poço de alívio é posicionado dentro da distância desejada do poço em erupção, um projeto hidráulico para o amortecimento é executado. Assim o projeto do poço de alívio e a proximidade do poço em erupção requerida dependem do procedimento utilizado para amortecer (*Flak e Goins*[29]). As duas técnicas mais utilizadas atualmente são: Alagamento e Controle Dinâmico.

2.6.1) ALAGAMENTO

Técnica utilizada especialmente em formações de alta permeabilidade (maior do que $0.4935 \mu\text{m}^2$ (500 md)) e que consiste em :

- 1) Pré-amortecer o poço em erupção pelo alagamento da formação com água;
- 2) Quando o poço em erupção estiver produzindo 100% de água, injetar fluido adensado tal que a sua hidrostática seja maior que a pressão do reservatório, concluindo a operação de amortecimento;

Esta técnica foi usada com sucesso pela Shell durante a erupção em Bay Marchand -Louisiana, onde a plataforma "B" projetada para 36 poços, estava com 21 poços produtores com completação múltipla e 1 poço com completação simples. Duas sondas estavam perfurando em torno de 3658 m quando a erupção ocorreu. O intervalo produtor estava entre 3353 m e 4115 m. Para controlar os 11 poços em erupção foram perfurados 10 poços de alívio em 136 dias (*Miller e Clements*[30]). A operação de injeção foi feita com um modelo de simulação simples baseado na lei de Darcy para fluxo radial de um fluido incompressível.

Durante a operação de alagamento é importante não fraturar a formação criando um caminho direto até o poço em erupção. Se o fraturamento acontecer, o alagamento será impossível (*Lehner e Williamson*[31]). Uma preocupação importante é com a alta pressão durante a perfuração e cimentação do poço de alívio da zona produtora.

Durante a erupção em Bay Marchand observou-se que :

- 1) Uma pressão diferencial elevada é geralmente possível desde que não haja perda de circulação no poço de alívio, ao menos que ele intercepte o poço em erupção;
- 2) O escoamento da água do poço de alívio é basicamente radial, saturando o reservatório em torno do poço;
- 3) Fluido de fraturamento é requerido como um passo final para criar um caminho direto ao poço em erupção e permitir o controle de formações com pressões anormais com a injeção de fluido adensado.

Dos onze poços em erupção em Bay Marchand, oito foram controlados sem problemas significativos, dois com grande dificuldade, e um teve de ser controlado por operações na superfície. O sucesso da técnica depende da distância entre os poços, devendo a mesma ser a menor possível. Barreiras de permeabilidade, anisotropia, e grandes espessuras de injeção podem prejudicar o sucesso da operação de amortecimento. Este método foi usado com sucesso em outros poços em erupção, como o poço N° 3, *West Cameron*, bloco 165, *Offshore Louisiana* (*Barnett*[32]).

2.6.2) CONTROLE DINÂMICO

É uma técnica onde o poço em erupção é amortecido pela injeção de um fluido que estabelece um escoamento pelo poço de alívio, pela comunicação entre os poços e pelo poço em erupção. A vazão de injeção deve ser tal que a pressão estática da formação seja superada pela pressão resultante da coluna hidrostática mais a perda de carga no poço em erupção, fazendo com que a formação pare de produzir (*Blount e Soeimah*[33]). O escoamento é multifásico durante o amortecimento e imediatamente após torna-se monofásico, isto é, só o fluido utilizado flui nos poços. A vazão deve ser mantida tal que a pressão resultante exceda a pressão estática da formação, até que um fluido de amortecimento mais pesado possa substituir o fluido mais leve.

Para se efetuar o projeto hidráulico do amortecimento são necessárias várias informações, tais como, a vazão do fluido produzido (gás, óleo, etc.), a pressão do reservatório, seus comportamentos com o tempo de produção, vazões de injeção necessárias para o amortecimento dinâmico para vários pesos e viscosidades de fluidos, a pressão de bombeio para não fraturar a formação e uma análise dos volumes e tempos necessários para o amortecimento estático em função da distância do poço de alívio ao poço em erupção.

A figura 2-18 mostra o princípio do Controle Dinâmico :

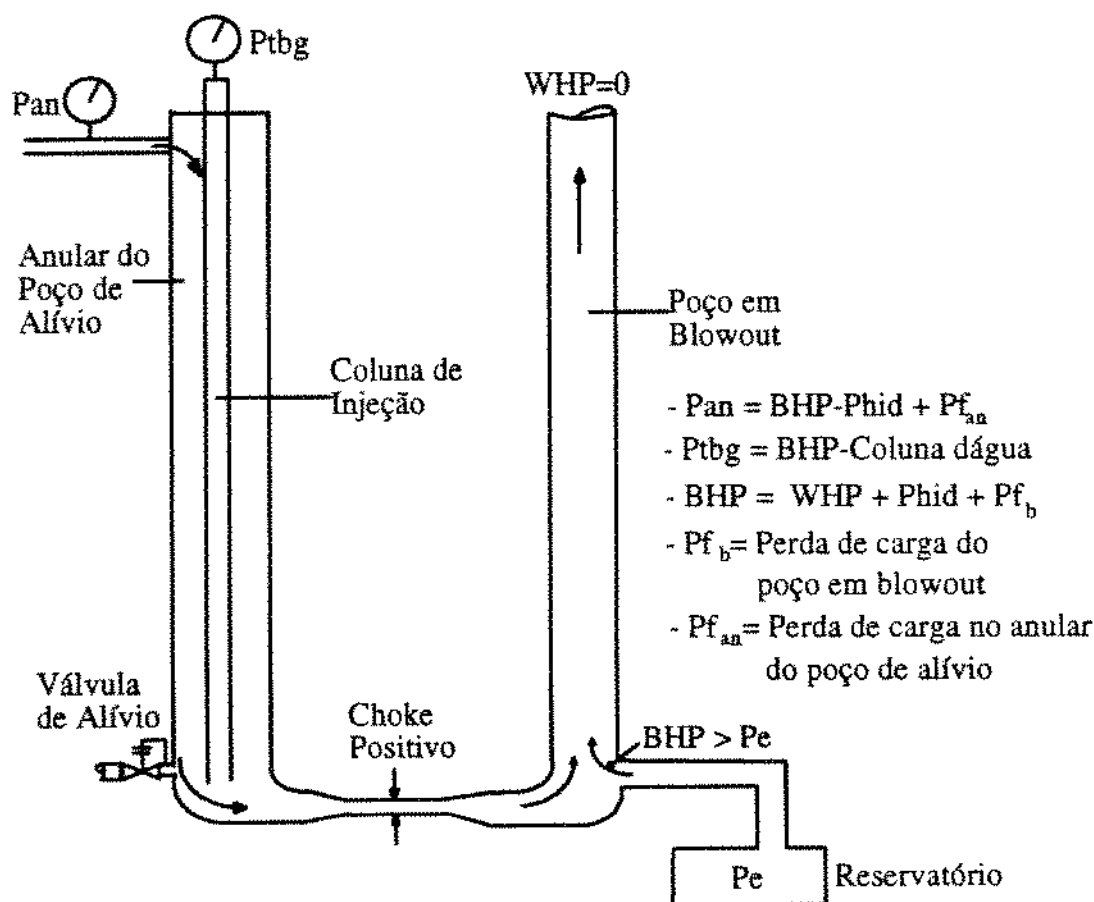


Figura 2-18 : Desenho esquemático dos poços de alívio/erupção para o Controle Dinâmico

A pressão de fundo do poço de alívio deve ser monitorada para manter a pressão da formação sob controle. Uma coluna preenchida com fluido conhecido é usada para este propósito e o anular do poço de alívio é usado para injeção nos poços em lâminas d'água rasas ou terrestres.

Para poços em lâminas d'águas profundas, se a injeção for feita pelo anular, as perdas de cargas geradas com as altas vazões serão elevadas, devido a utilização das linhas de matar de pequeno diâmetro ($d=76.2$ mm). Para minimizar estas perdas de carga deve-se também injetar pelo interior da coluna mesmo sem a monitoração das pressões no fundo do poço.

Ao contrário da técnica de alagamento a comunicação pode ser obtida por acidificação. Os dois poços devem estar tão próximos quanto possível para se obter a mínima queda de pressão na comunicação. A técnica pode também ser usada para controlar um poço revestido em erupção, orientando o poço de alívio para passar bem próximo ao poço em erupção e estabelecer a comunicação através de uma operação de canhoneio. Vários poços em erupção foram controlados com sucesso usando o Controle Dinâmico.

3 - PLANEJAMENTO DOS POÇOS DE ALÍVIO

No planejamento dos poços de alívio segurança, rapidez e flexibilidade são considerações muito importantes. O poço de alívio deve ser projetado para conseguir o controle do poço em erupção o mais cedo possível, não provocar condições inseguras para o homem e os equipamentos e poder ser ajustado de acordo com os problemas e novos dados que vão surgindo durante a sua execução.

As várias etapas necessárias ao planejamento serão apresentadas na sequência da execução :

3.1) LOCALIZAÇÃO DO POÇO NA SUPERFÍCIE

O posicionamento da locação do poço de alívio é a primeira decisão importante. As sondas dos poços de alívio devem ser posicionadas de maneira que se tenha uma distância segura do poço em erupção aos poços de alívio, e por outro lado devem estar próximo o bastante para que se consiga amortecer o poço em erupção num curto espaço de tempo. Durante o projeto de cada poço a ser perfurado deve ser estabelecida uma possível locação para um poço de alívio com o seu projeto preliminar, além de se analisar a disponibilidade da sonda que atenda aos critérios exigidos para a perfuração do poço de alívio.

Em campos cujo desenvolvimento resultará em áreas congestionadas com dutos, cabeças de poços, linhas de ancoragem, um estudo preliminar deverá ser feito com todas as partes envolvidas, para que sejam definidas áreas livre de restrições para o posicionamento do poço de alívio na superfície.

Os itens que influenciam a localização do poço na superfície são :

- a) Direção dos ventos, correntezas e ondas predominantes de acordo com as condições ambientais da área;

- b) Perímetro de segurança ao redor da locação do poço na superfície baseado nos níveis mínimos de poluição, radiação de calor, pluma de bolhas e concentração de gases tóxicos contidos nos fluidos da formação;
- c) Considerações na perfuração do poço de alívio e nos registros direcionais, tais como, localização do alvo do poço em erupção e a incerteza na sua posição, o grau de confiabilidade da trajetória para intersecção, a profundidade na qual a intersecção deverá ocorrer, o ângulo de aproximação desejado, a direção no ponto de intersecção do alvo, e a manutenção da trajetória tão simples quanto possível, minimizando as mudanças de trajetórias, já que se estas variações forem muito bruscas podem acarretar problemas mecânicos sérios para o poço;
- d) Áreas congestionadas no fundo do mar como proximidade da cabeça de outros poços, dutos, linhas de ancoragem de outras sondas, etc.;
- e) Existência de áreas de riscos com gases rasos;
- f) Obtenção da batimetria da área para evitar obstáculos no fundo do mar;
- g) Raio de investigação e características das ferramentas de detecção do revestimento ou colunas de perfuração (comandos, tubos);
- h) Localização de subsuperfície da trajetória dos outros poços da área para evitar colisões indesejadas;
- i) Características das formações a serem perfuradas que influenciam o controle direcional;
- j) Tipo de sonda a ser utilizada : jackup, semi-submersível, navio-sonda, etc.

De posse de informações preliminares, tais como, qual o tipo de erupção, onde o mesmo ocorreu, quais as condições ambientais da área, a localização do poço na superfície deve ser escolhida de maneira que se atenda aos itens relacionados acima.

3.2) ESTABELECIMENTO DO MÉTODO UTILIZADO PARA AMORTECER O POÇO EM ERUPÇÃO

Existem dois tipos de amortecimento para um poço em erupção através do reservatório, que são o estático e o dinâmico.

- **AMORTECIMENTO ESTÁTICO** : Consiste em saturar de fluido o reservatório em torno do poço e encher o poço com um fluido de peso tal que sua hidrostática seja maior que a pressão do reservatório.

- **AMORTECIMENTO DINÂMICO** : Consiste em se injetar uma vazão no poço em erupção, tal que a pressão resultante da coluna hidrostática mais a perda de carga no poço seja maior que a pressão do reservatório.

Em qualquer um dos dois tipos de amortecimento existe a preocupação de não fraturar a formação para não se perder o controle do direcionamento do fluido injetado, a não ser quando se consegue uma comunicação direta do poço de alívio com o poço em erupção.

Na determinação da vazão do fluido necessária para amortecer dinamicamente o poço em erupção, simula-se o comportamento de um poço produtor, que vai perdendo a surgência natural até morrer completamente devido ao aumento gradativo da vazão da água.

Nesta análise são considerados os seguintes fatores:

- As características do reservatório, como por exemplo a curva de produtividade IPR;
- As propriedades do fluido do poço em erupção e do fluido de amortecimento;
- As características da formação no ponto de amortecimento, como por exemplo a pressão de fratura;

- Os requisitos de superfície e previsão de equipamentos e ferramentas especiais, como bombas de alta pressão e vazões elevadas;

A figura 3-1 mostra esquematicamente o que acontece :

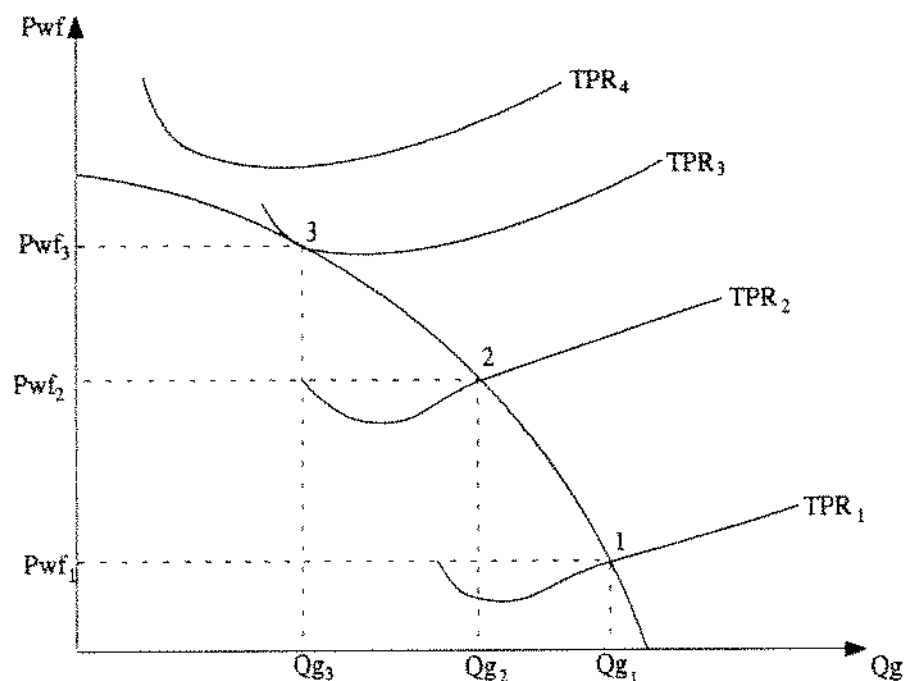


Fig. 3-1 - Curva IPR e as curvas TPR do sistema para várias vazões

A curva de IPR (*Inflow Performance Ratio*) representa a Pressão Disponível no Fundo do Poço X Vazão de Produção, ou seja, simula o comportamento do reservatório nas vizinhanças do poço.

A curva de TPR (*Tubing Performance Ratio*) representa a pressão requerida no fundo do poço para permitir a elevação dos fluidos até a superfície para cada vazão de produção desejada e levando em conta as condições mecânicas do poço e propriedades dos fluidos produzidos.

Assim o encontro destas duas curvas fornece o ponto onde é possível se estabelecer uma vazão de produção, já que as pressões requerida e disponível no fundo do poço se igualam.

Na figura 3-1, o ponto 1 pode representar por exemplo o comportamento inicial do poço durante o erupção, quando a vazão de água poderia ser considerada nula.

Após a água injetada nos poços de alívio atingir o poço em erupção e começar a ser produzida juntamente com o gás, os valores de pressão requerida no fundo do poço vão aumentando, acarretando então uma redução na vazão de gás produzida (Q_{g2}). Isto pode ser visto no ponto 2 da figura 3-2.

Com a continuação da injeção de água, ou seja, com o aumento da vazão de água no poço em erupção, será atingido o ponto 3, quando o poço estará então amortecido dinamicamente, ou seja, a soma das perdas de carga por fricção no revestimento mais a hidrostática dos fluidos produzidos é igual ou maior que a pressão disponível no fundo do poço.

Para o cálculo dessa vazão são usados simuladores de fluxo multifásico que utiliza correlações levando em conta os efeitos da distribuição das fases líquida e gasosa com a queda de pressão ou pode ser determinada através de cálculos simplificados considerando um escoamento homogêneo.

Cálculos simplificados da vazão, o número de poços de alívio a serem perfurados, o diâmetro do último revestimento, o diâmetro da coluna de injeção, procedimentos e dados utilizados são apresentados por *Blount e Soeiinah* [ref.33] para a operação de amortecimento do poço C-II-2, no campo de Arun, Indonésia.

3.3) PROFUNDIDADE DO PONTO DE AMORTECIMENTO

Para a determinação da profundidade do ponto de amortecimento são considerados os seguintes elementos :

- Situação do revestimento do poço em erupção e da cabeça do poço;
- Curva de produtividade "IPR" e características do reservatório;
- Configuração do escoamento no poço em erupção;
- Propriedades do fluido do poço em erupção e do fluido de amortecimento;
- Propriedades físicas da formação no ponto de amortecimento;

- Perfurabilidade da formação e tempo para atingir o ponto de amortecimento;
- Limites da perfuração direcional e controle;
- Requisitos de superfície e previsão de equipamentos especiais;

Durante a perfuração do poço de alívio, após a detecção do poço em erupção, o mesmo deve ser orientado para o ponto de intersecção, devendo-se analisar se este ponto pode ser atingido sem a necessidade de efetuar algum tampão de cimento e desvio da trajetória do poço de alívio para um novo alvo.

Antes de se atingir a intersecção, deve-se definir a profundidade de assentamento do revestimento no poço de alívio, devido o risco de fratura da formação, como também qual a coluna de injeção a ser utilizada durante a fase de circulação, partindo-se do pressuposto que os equipamentos de bombeio e os fluidos de amortecimento estão preparados.

Em relação ao alvo do poço de alívio existem duas possibilidades distintas no poço em erupção. A primeira é que a coluna de perfuração esteja no fundo do poço e a segunda é que a coluna esteja fora do poço ou dentro do revestimento. É essencial que haja a presença de metal (revestimento ou coluna de perfuração) no poço em erupção a fim de que as ferramentas de detecção funcionem.

Se nenhuma coluna estiver presente no intervalo do poço aberto, o alvo será a sapata do revestimento mais profundo. Se a coluna de perfuração estiver no fundo, o alvo pode ser o ponto onde o poço em erupção penetrou o reservatório produtor.

Podemos analisar duas alternativas para a intersecção :

3.3.1) Intersecção no Fundo do Poço

Este tipo de intersecção apresenta como vantagens :

- Maior coluna hidrostática do fluido de amortecimento;
- Menores vazões de injeção e pressões na superfície.

As desvantagens são :

- - A incerteza do poço em erupção aumenta com a profundidade;
- - A dificuldade do controle da perfuração direcional aumenta com a profundidade;
- - O tempo para a perfuração do poço de alívio é maior.

3.3.2) Intersecção Intermediária

Este tipo de intersecção apresenta como vantagens :

- Diminuição da incerteza do poço em *erupção*;
- Redução do tempo de perfuração do poço de alívio.

As desvantagens são :

- Requer maior vazão de injeção para se conseguir o amortecimento;
- Pode acontecer da pressão resultante das perdas de cargas e hidrostática no poço em *erupção* não seja suficiente para o amortecimento dinâmico.

3.4) ESTABELECIMENTO DA COMUNICAÇÃO ENTRE OS POÇOS PARA A INJEÇÃO DO FLUIDO DE AMORTECIMENTO

A intersecção entre os poços deve ser a mais direta possível, já que assim teremos menores perdas de carga na comunicação, como também maior eficiência do fluxo que entra no poço em *erupção*, sendo desejável que a intersecção ocorra dentro da zona produtora.

A injeção pode ser feita a poço aberto ou com o poço revestido, apresentando as seguintes características :

3.4.1) Injeção a Poço Aberto

- Injeção antecipada, por não necessitar a descida e cimentação do revestimento;
- Injetividade maior do que a poço revestido por injetar direto na formação;
- Possibilidade de desmoronamento do poço de alívio e perda de comunicação com o poço em *erupção*, ou prisão da coluna;
- Perda da eficiência na injeção pelo fato de injetar em todas as direções e em todos os reservatórios porosos expostos;
- Impossibilidade de melhorar a injetividade através de lavagem ácida ou fraturamento, devido à heterogeneidade das formações expostas (folhelhos, margas e arenitos).

3.4.2) Injeção a Poço Revestido :

- Devido ao canhoneio, a injeção se dá apenas na zona desejada;

- Não existe o problema do desmoronamento do poço;
- O poço pode ser reaproveitado para a produção de hidrocarbonetos, se necessário;
- Pode haver perda de injetividade por injetar somente pelos canhoneados;
- Tempo adicional para descer o revestimento, cimentação, canhoneio e descida da coluna para monitorar a injeção.

Ao se perfurar o poço de alívio, pode ocorrer a perda de circulação total ao se penetrar no reservatório produtor, ou na caverna do poço em erupção, implicando na injeção a poço aberto.

3.5) PROJETO DO REVESTIMENTO

No poço de alívio, a escolha do tipo de revestimento e a profundidade de assentamento deve satisfazer tanto aos requisitos da operação de amortecimento como as condições de perfuração normais da área. O objetivo principal do poço de alívio é interromper e amortecer o fluxo no poço em erupção. As condições impostas por este objetivo são requisitos adicionais além do projeto do revestimento normal. Condições especiais ocorrem no poço de alívio que não são comuns aos poços normais. Por exemplo num erupção de subsuperfície pode haver pressurização de formações superiores ou depleção de formações mais profundas. Isto pode alterar significativamente as condições observadas anteriormente e apresentar novos problemas durante o processo de perfuração.

No projeto do revestimento, deve-se levar em consideração os seguintes fatores :

- Efeitos da configuração do revestimento do poço nas vazões e fricções requeridas durante a operação de amortecimento, já que existe a necessidade de se concluir o poço com o mínimo diâmetro possível que permita bombear o fluido inicial com grandes vazões sem gerar pressões elevadas;
- Prever a possibilidade do assentamento de uma coluna de revestimento adicional para combater problemas no fundo do poço, encontrados durante a perfuração, sem inviabilizar

o objetivo do poço de alívio, já que uma redução no diâmetro do poço restringirá o fluxo, causando pressões de injeção mais altas durante a operação de amortecimento;

- Prever a possibilidade de encontrar zonas de subsuperfície artificialmente pressurizadas ou depletadas, e existam informações para confirmar esta situação, assegurando que elas não representam uma área de risco;
- Posicionar os revestimentos intermediários de maneira que se aumente a segurança da perfuração, principalmente ao se cruzar poços já existentes, como também assentar a sapata o mais próximo possível do ponto de intersecção devido ao risco de fratura ou desmoronamento do poço em erupção e a ocorrência de influxo no poço de alívio;
- Prever a possibilidade de reaproveitar o poço de alívio para a produção de hidrocarbonetos, após o amortecimento do poço em erupção, neste caso requisitos futuros para produção e estimulação devem também ser levados em consideração no projeto final;

3.6) PROFUNDIDADE DO PONTO INICIAL DE PESQUISA DO REVESTIMENTO DO POÇO EM ERUPÇÃO

Os elementos considerados na escolha da profundidade de detecção são :

- Tipo do instrumento de pesquisa a ser utilizado;
- Profundidade do revestimento ou coluna de perfuração deixada no poço em *erupção*;
- Características químicas e físicas da formação;
- Tipo de fluido de perfuração utilizado no poço em erupção e no poço de alívio;
- Incerteza na posição relativa dos poços;
- Perfurabilidade da formação próxima ao ponto de detecção;
- Considerações da trajetória do poço e tortuosidades;

Uma vez definido o cone de incerteza para o poço em erupção e o cone de incerteza do poço de alívio, determina-se a profundidade inicial de pesquisa, quando as elipses de incerteza calculadas indicarem que o poço de alívio está dentro do raio de investigação das ferramentas de detecção. A partir desta profundidade são efetuadas descidas destas ferramentas, com o objetivo de determinar a posição relativa entre os poços.

3.7) FASES DA PERFURAÇÃO DO POÇO DE ALÍVIO

O poço de alívio deve ser perfurado em três grandes fases:

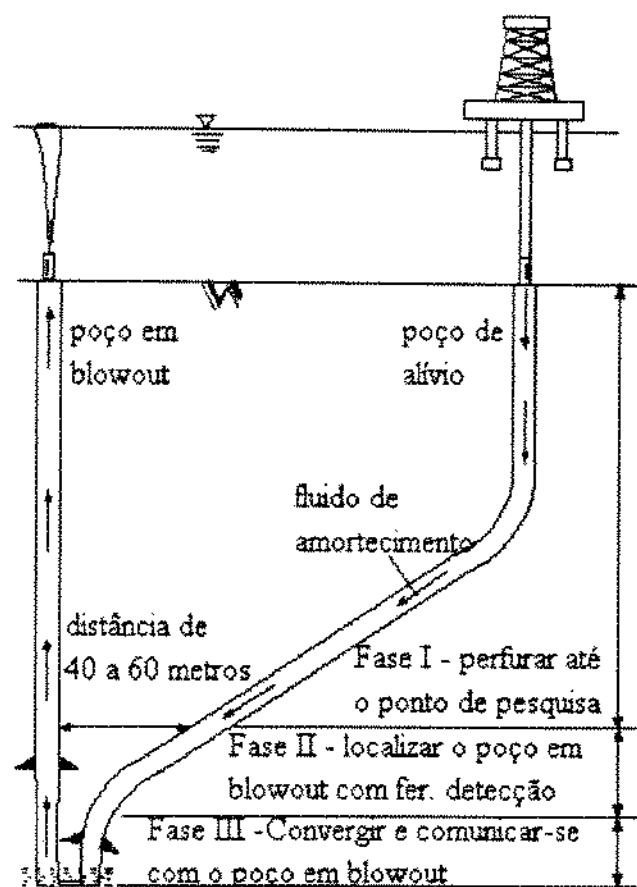


Figura 3-2 : As fases da perfuração do poço de alívio

3.7.1) FASE I : Perfura-se direcionalmente a um ponto que esteja próximo ao revestimento ou coluna de perfuração do poço em erupção, dentro do raio de investigação das ferramentas de detecção.

Esta fase deve ser perfurada de maneira similar a de qualquer outro poço perfurado na área. Atenção especial deve ser dada a localização na superfície do poço e ao controle direcional preciso. Após a locação de superfície dos poços de alívio e em erupção terem sido definidas é necessário uma precisão de 2 metros entre as locações.

A figura 3-3 mostra o fluxograma para a Fase I :

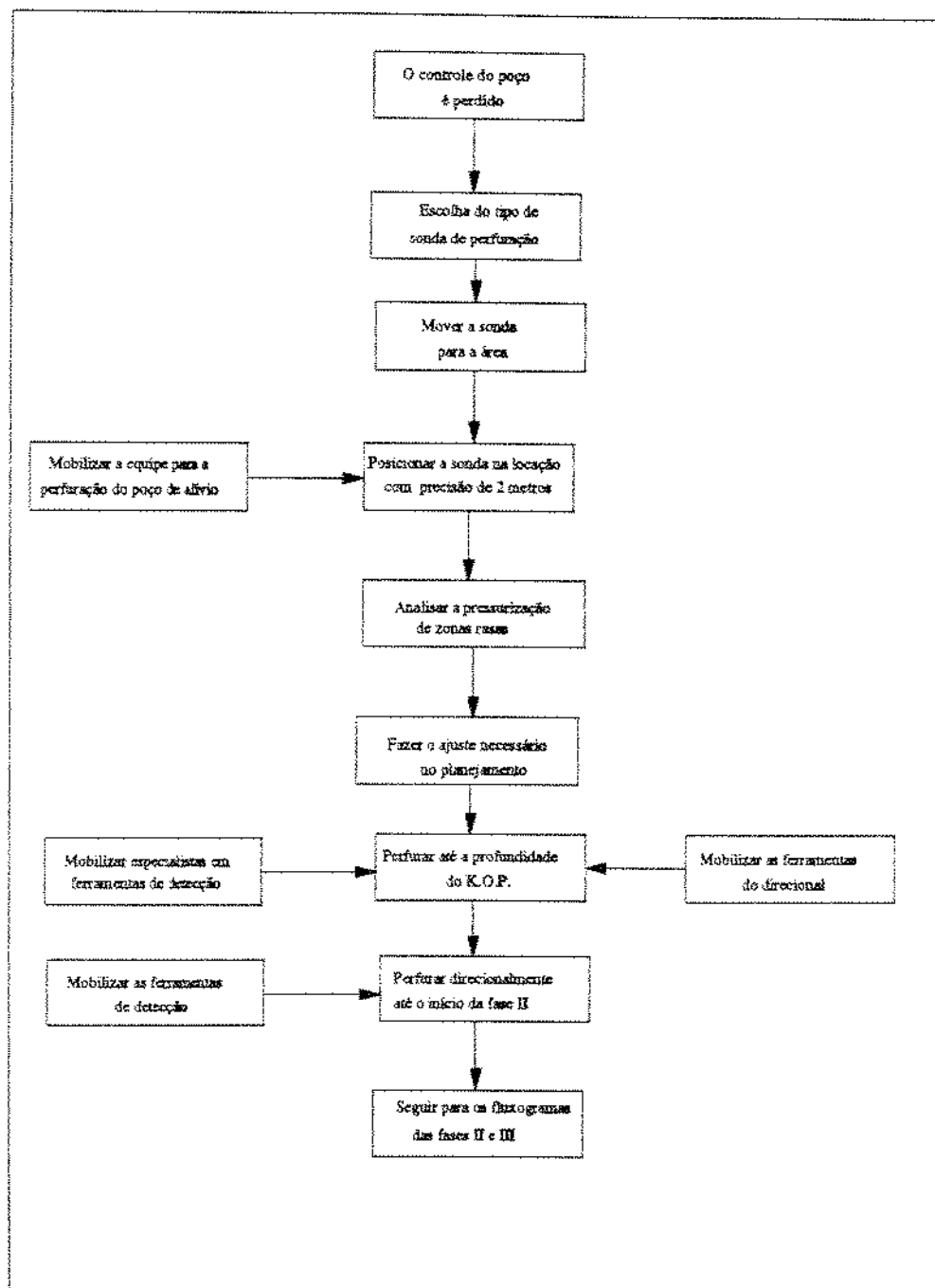


Figura 3-3 : Fluxograma para a fase I do poço de alívio

3.7.2) FASE II : Localiza-se a posição relativa do poço de alívio ao poço em erupção usando as ferramentas de detecção. Para determinar as localizações exatas dos poços em erupção e de alívio, um em relação ao outro, é importante obter a elevação da mesa rotativa usada para perfurar o poço em erupção, a fim de que se estabeleça uma profundidade de subsuperfície comum a ser utilizada nos cálculos dos registros direcionais dos poços de alívio

A Fase II começará quando os cálculos mostrarem que o poço de alívio está entre 50 e 60 metros de distância horizontal do poço em erupção. O poço de alívio, conforme mostra a figura 3-4, deve estar aproximadamente alinhado (dentro de 7 a 10 graus na inclinação e azimuth combinado) na profundidade de interesse, devido às ferramentas de detecção atuarem com um raio de investigação maior quando o poço de alívio se encontra em paralelo com o poço em erupção.

É importante ressaltar que as ferramentas de detecção medem distâncias entre os dois poços em um plano perpendicular ao poço a ser rastreado, portanto poços de alto ângulo de inclinação podem necessitar de ajustes destes critérios.

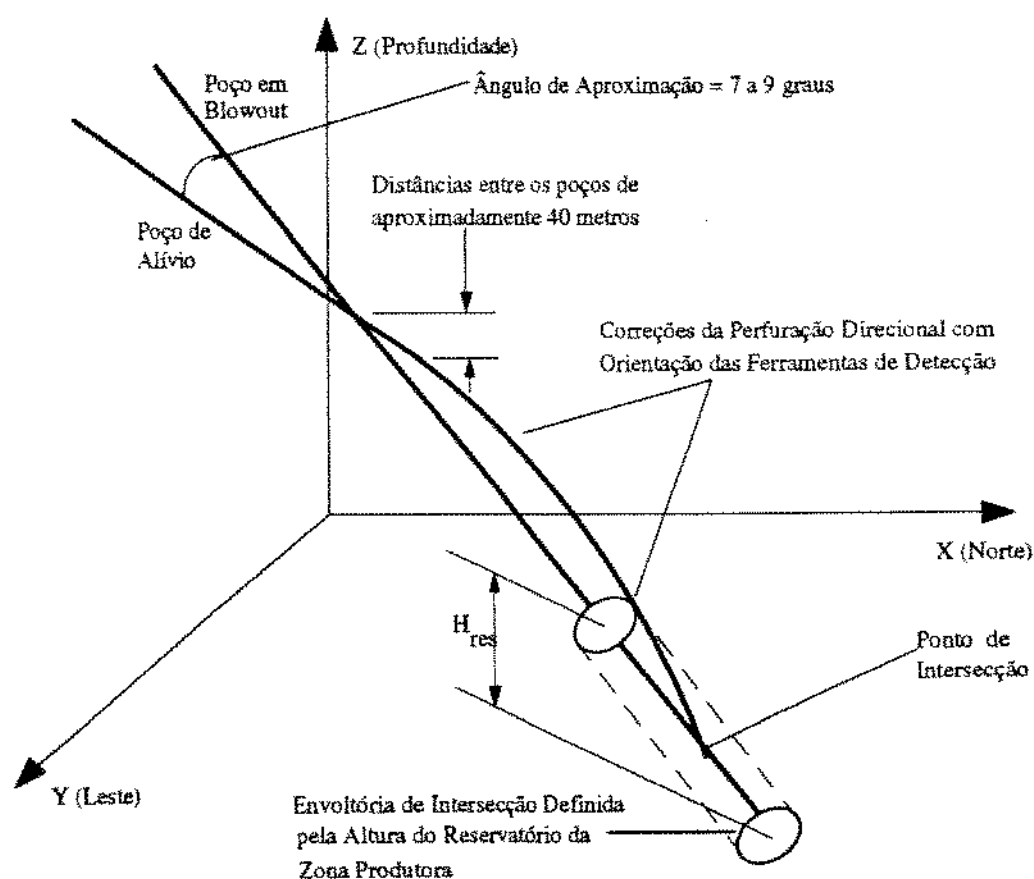


Figura 3-4 : Ângulo de aproximação entre o poço de alívio e o poço em erupção

O perfil de proximidade pode ser feito no raio de investigação de 50 a 60 metros, porém não se deve esperar receber informações definitivas até que a distância entre os poços

esteja entre 15 a 30 metros e informação mais confiável no raio de investigação de 1 a 15 metros.

Não devem ser feitas correções na trajetória, a menos que os dados dos perfis de proximidade estejam no raio de investigação de 10 a 20 metros e a confiança nos dados coletados seja alta.

A figura 3-5 mostra o fluxograma para a Fase II :

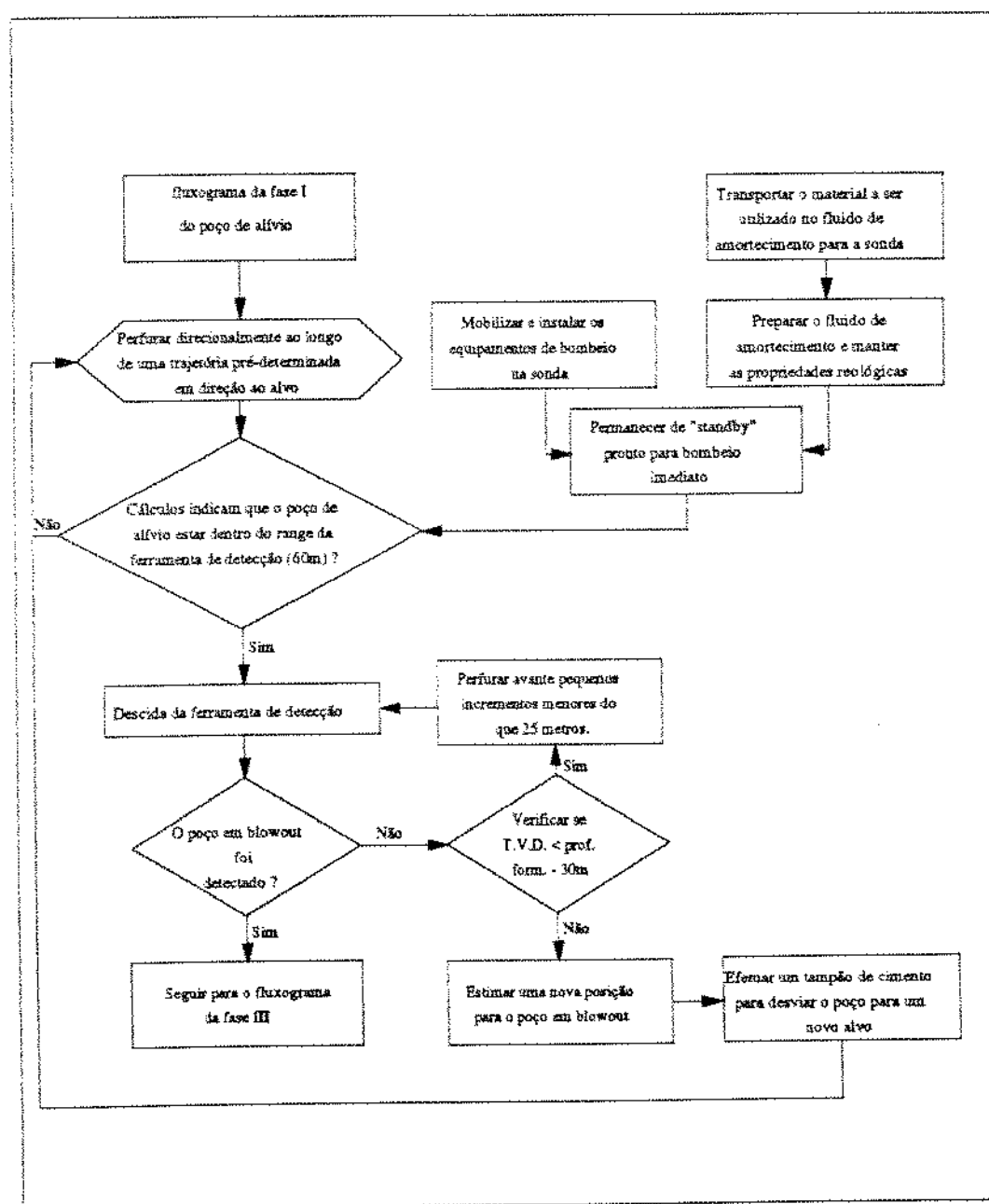


Figura 3-5 : Fluxograma para fase II do poço de alívio

3.2.3) FASE III : Perfura-se direcionalmente convergindo para o ponto de intersecção ou um ponto próximo estabelecendo a necessária comunicação para amortecer o poço em erupção.

A figura 3-6 mostra o fluxograma para a Fase III :

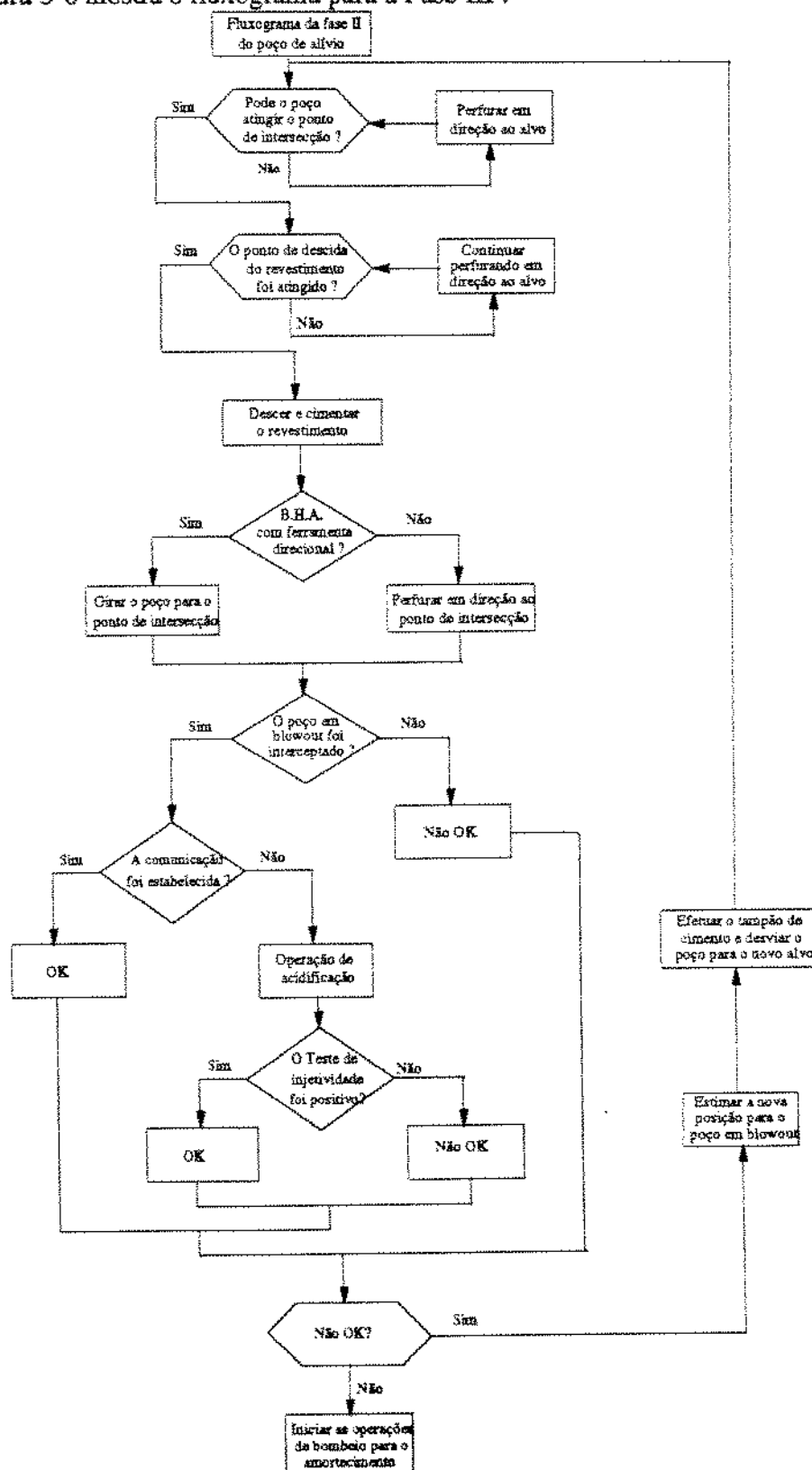


Figura 3-6 : Fluxograma para a fase III do poço de alívio

A Fase III é o estágio mais crítico do projeto do poço de alívio, já que se fará a perfuração para interceptar o poço em erupção. Uma vez que a trajetória do poço em erupção seja determinada, uma trajetória precisa pode ser definida para uma intersecção.

Quando o poço for interceptado, a tarefa será comunicar-se diretamente com o poço em erupção. Esta comunicação normalmente ocorrerá por uma via direta entre o poço de alívio e o poço em erupção, quando os poços estiverem a uma distância entre 0.2 a 1 metro, dependendo da pressão de fluxo e das condições mecânicas da formação. Neste caso a comunicação entre os poços deve estabelecer-se por si só muito rapidamente, oferecendo pouca restrição ao fluxo.

Uma vez que a comunicação tenha sido estabelecida, procura-se amortecer e interromper o fluxo de hidrocarbonetos do intervalo produtor, através da injeção de um fluido de amortecimento no poço em erupção com uma vazão adequada.

Ao se conseguir o controle durante a operação inicial de amortecimento, os poços precisam permanecer estáveis até que operações de abandono ou completação possam ser realizadas.

Em nenhum caso deve a operação de amortecimento expor o poço a riscos adicionais de problemas não gerenciáveis, provocando uma situação que agrave o controle do poço. Decisões e práticas racionais devem ser tomadas na escolha da operação de amortecimento, a fim de que o amortecimento não seja irreversível ou elimine a utilização de outras alternativas racionais de amortecimento, caso as tentativas iniciais falhem. Um exemplo de uma operação irreversível seria a tentativa de amortecer o poço com cimento ao invés de fluido de perfuração.

Existe a possibilidade do poço de alívio perder o poço em erupção apesar dos melhores esforços e passar próximo cerca de 1 a 2 metros fora. Se uma comunicação direta não é possível, pode ser necessário um desvio para a intersecção. Dependendo da distância entre os poços, uma acidificação pode ser considerada, no caso de uma formação calcárea, para estabelecer a comunicação, aumentando as chances de sucesso caso o poço de alívio esteja posicionado na zona de drenagem (*drawdown*) do intervalo produtor. O ácido passaria naturalmente através da matriz do intervalo produtor, criando uma porosidade secundária e

entraria no poço em erupção, permitindo a comunicação direta entre os dois poços. Apesar de ser tecnicamente viável esta opção necessita ser cuidadosamente estudada antes de sua implementação, já que o fraturamento da rocha deve ser evitado.

Outras opções seriam o canhoneio ou técnicas de abrir janelas, se a comunicação é para ser feita através do revestimento.

3.8) INCERTEZA NA POSIÇÃO RELATIVA ENTRE O POÇO EM ERUPÇÃO E O POÇO DE ALÍVIO

O objetivo do poço de alívio é interceptar o poço em erupção em algum ponto pré-determinado (geralmente o topo da formação produtora). Deve ser considerado que várias fontes de erro influenciam sobre a habilidade para se alcançar o ponto desejado com precisão, e esta influência é descrita como o Cone de Incerteza.

Isto é mostrado graficamente na figura 3-7:

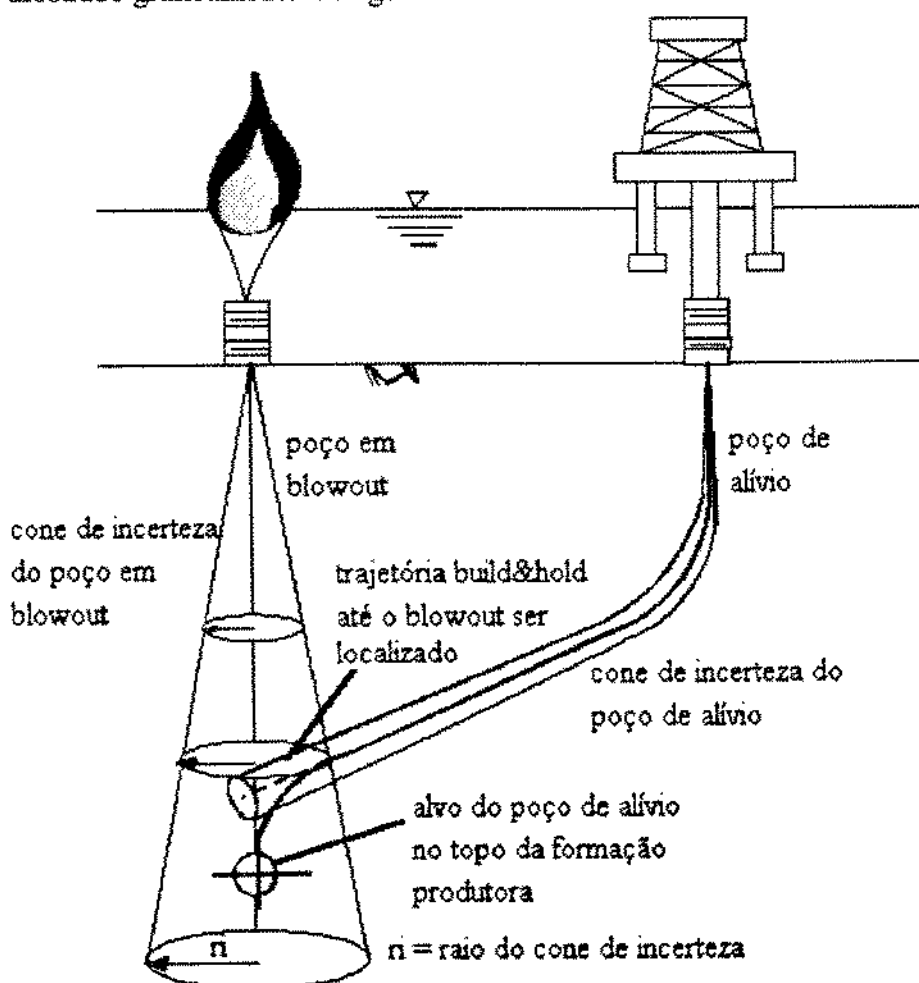


Figura 3-7 : Profundidade de intersecção do poço em erupção

Os alvos dos poços direcionais normais são geralmente um círculo ou um retângulo na projeção horizontal. O poço de alívio deve ser visto através de uma trajetória em 3 dimensões e considerações são feitas a possíveis imprecisões ou falta de dados dos registros direcionais, tendo como resultado não um ponto específico para o alvo do poço de alívio e sim uma elipse no plano ou um elipsóide de incerteza no espaço.

A projeção deste elipsóide de incerteza como uma superfície de revolução gera um cone de incerteza, conforme a figura 3-8. A razão para esta geometria é que as imprecisões causadoras da incerteza são crescentes com o aumento da profundidade.

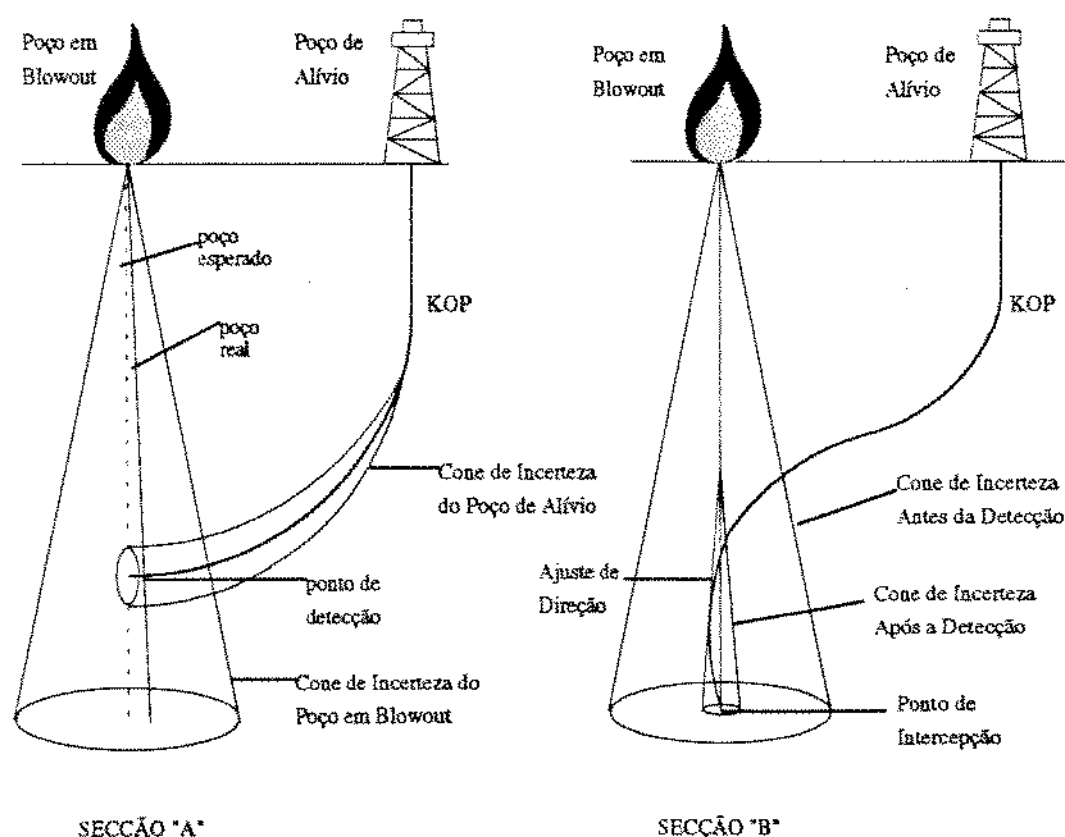


Figura 3-8 : Cones de incerteza antes e depois da detecção

Haverá também um cone de incerteza para o poço de alívio definido pelas imprecisões dos seus registros direcionais. A existência dos duplos cones de incerteza complicam o objetivo da intersecção, no entanto esta geometria cônica pode ser reduzida a um valor mínimo uma vez que seja feita uma passagem próxima ao poço alvo e que perfis de proximidade possam localizar o poço em erupção em relação ao poço de alívio. Se a

trajetória do poço de alívio é planejada adequadamente será possível fazer uma correção direcional e convergir para o poço em erupção fazendo a intersecção.

Baseado no que foi descrito, é importante entender os fatores que influenciam esta incerteza no poço de alívio. Existem basicamente três fatores maiores, porém pode haver muitos componentes contribuindo para a incerteza total. Estes fatores são :

- a) Precisão da locação na superfície;
- b) Tipo de equipamento de registro direcional empregado e suas imprecisões inerentes;
- c) Habilidade para confirmar a trajetória do poço usando os registros direcionais e as medições obtidas com as ferramentas de detecção;

Como solução para os fatores descritos acima, os seguintes critérios têm sido usados para o planejamento dos poços de alívio :

- O posicionamento da sonda na locação do poço de alívio deve ser preciso, a tolerância usual é cerca de 2 metros da posição desejada;
- Ferramentas de registro direcional com princípio de funcionamento diferentes tais como instrumentos magnéticos ou giroscópios devem ser usadas, pois o uso de múltiplas ferramentas de registro direcional em ambos os poços aberto e revestido servirá para verificar a precisão e repetibilidade dos mesmos;
- Ferramentas de proximidade determinarão a posição relativa dos poços um com o outro, desde que o poço em erupção esteja dentro do raio de investigação destas ferramentas.

A confiabilidade do planejamento do poço de alívio não só depende da habilidade para medir com precisão a posição do poço, como também do programa de

perfuração direcional prescrito. Várias considerações estão envolvidas na seleção do melhor plano e a influência delas são baseadas em :

- Procurar minimizar o tempo de perfuração necessário, planejando uma trajetória que minimize os requisitos de registros direcionais, elimine descidas adicionais de motor de fundo e não haja a necessidade de correções da trajetória para obter a intersecção;
- Evitar as mudanças de direção ou aproximações difíceis minimizando a possibilidade de falhas;
- Disponibilidade de registros direcionais razoavelmente precisos do poço em erupção, para que se planeje uma trajetória para o poço de alívio com uma definição exata da profundidade inicial para detecção do poço alvo.

A trajetória requerida para a intersecção é fortemente influenciada pela localização do poço em erupção. Os fatores gerais do ângulo de aproximação e limitações de proximidade devem ser levados em conta enquanto posicionando os poços de alívio.

O primeiro passo no cálculo da área do alvo de um poço em erupção é a obtenção de todos os registros direcionais disponíveis do poço, sendo estes dados informações precisas das medições efetuadas durante a perfuração, eles produzirão elipses de incertezas relativamente pequenas; enquanto informações parciais resultarão em elipses de incertezas relativamente maiores.

Será obtido um cone de incerteza que projeta as elipses de incerteza ao longo do poço inteiro, e o tamanho deste cone será dependente da quantidade e precisão dos registros direcionais. Os poços mais difíceis para se encontrarem são aqueles que foram perfurados verticalmente e foram feitos registros apenas da inclinação com inclinômetros, resultando apenas o ângulo do poço com a vertical, sem dar indicação da direção do poço. Com estes dados o cone de incerteza é bem maior.

O alvo da Fase II escolhido para o poço de alívio é um ponto no espaço com a profundidade acima da sapata do revestimento do poço em erupção. Para encontrar o revestimento sem múltiplos desvios e riscos desnecessários de perda do poço, o raio de

incerteza do poço em erupção deve ser menor do que o raio de investigação da ferramenta de proximidade, conforme figura 3-9.

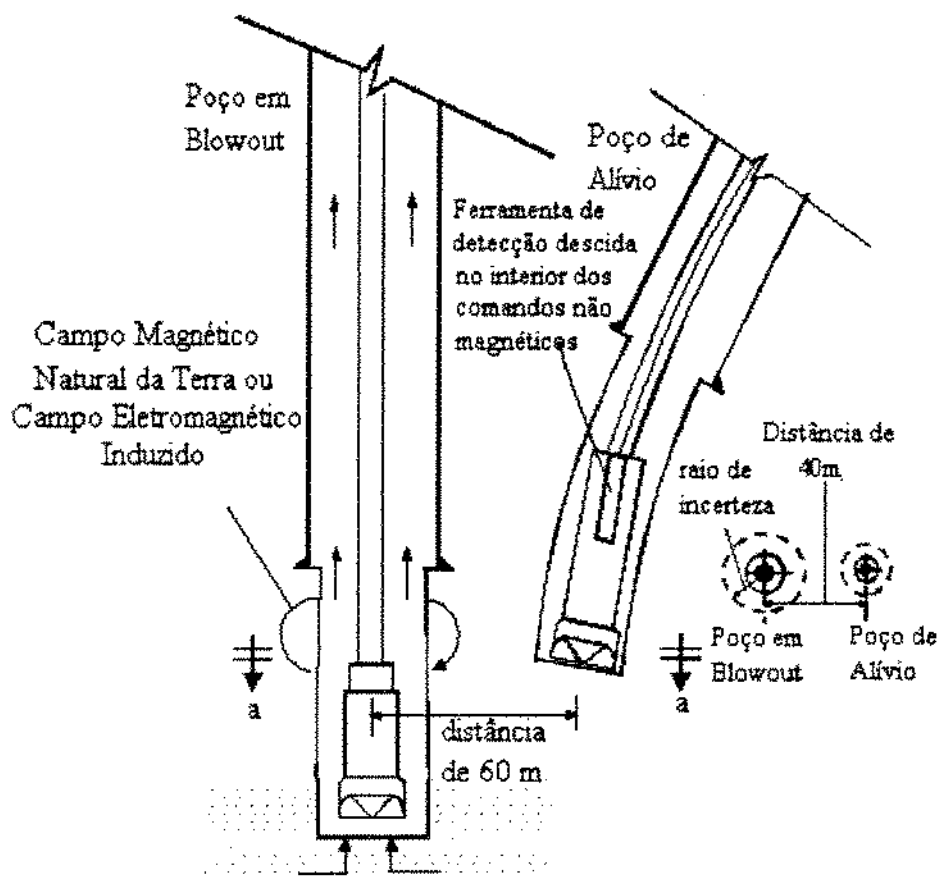


Figura 3-9 : Localização do poço em erupção com a ferramenta de detecção

O sucesso do poço de alívio depende muito da precisão da locação na superfície e dos registros direcionais de subsuperfície. Programas inadequados de registros direcionais podem aumentar a dificuldade de localização do poço em erupção. Ao assumir que um poço direcional é vertical até o ponto do início do desvio (*KOP*) pode-se introduzir imprecisões nos cálculos da posição do poço e aumentar a elipse de incerteza. Assim, um adequado programa de registro direcional deve incluir registros direcionais magnéticos das partes do poço sem interferência magnética e registros direcionais com giroscópios das partes do poço onde a bússola magnética seja imprecisa. Por exemplo, num poço marítimo o programa de registros direcionais deve incluir medições com o giroscópio do condutor e revestimento de

superfície e registros direcionais magnéticos no restante do poço, antes da descida do revestimento. Portanto todas as precauções devem ser tomadas para assegurar que o alto grau de precisão será mantido quando perfurando o poço de alívio.

Para os poços de alívio a localização de subsuperfície deve ser determinada através de cálculos precisos. Normalmente o revestimento será detectado antes do cruzamento ocorrer e uma correção no meio do curso é feita para intersecção do poço no intervalo produtor. Todavia se o revestimento não é detectado no momento em que a profundidade do alvo é alcançado, o poço de alívio deve ser perfurado adiante até que o revestimento seja localizado ou uma profundidade total pré-determinada seja atingida.

Se o revestimento não for localizado na profundidade total o poço deve ser tamponado e desviado para um novo alvo. Cuidados devem ser tomados para não se perfurar mais profundo do que o revestimento permite para uma perfuração segura.

Uma vez que o revestimento tenha sido detectado com as ferramentas de proximidade, o poço de alívio será desviado e orientado para fazer uma intersecção no ponto médio ou próximo do intervalo produtor.

3.9) GEOMETRIA DO POÇO DE ALÍVIO

Nesta etapa deve-se levar em conta os seguintes itens :

- Profundidade do início do desvio (*K.O.P.*);
- Tipo de trajetória;
- Taxas de ganho e queda de ângulo (*build-up rate* e *drop-off*);
- Taxas de giro do poço (*walk rate*);
- Litologia;
- Considerações de controle do poço;
- Considerações de detecção do poço em erupção;
- Considerações da precisão dos instrumentos de medição;

Como um poço direcional é perfurado da superfície para atingir um alvo com uma trajetória menor possível e mais econômica, os poços de alívio geralmente seguem um

dos 2 tipos básicos de poços direcionais no plano vertical que são: Ganho e Manutenção do ângulo ou tipo "S".

O projeto preliminar é normalmente feito em 2 dimensões (Seção Vertical e Horizontal) onde são definidas a profundidade do início do desvio (*KOP*), o afastamento horizontal, a profundidade vertical e o ângulo de aproximação do poço de alívio, sendo o projeto mais refinado feito em 3 dimensões (*Nicholson[41]*), tendo como características mais importantes :

- A capacidade de prever as cargas de fricção na coluna e usar o torque e o arraste como um critério para selecionar a trajetória mais adequada do poço ;
- A trajetória do poço de alívio deve ser escolhida de maneira a evitar a colisão com poços já existentes, quando o poço em erupção se encontra em um *template* ou plataforma de produção;
- A trajetória deve garantir uma condição de paralelismo entre os poços, de modo a facilitar a detecção do poço em erupção.

4- IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E EXEMPLO PRÁTICO DE SUA UTILIZAÇÃO

4.1) COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE OS PROGRAMAS

Foram desenvolvidos e utilizados neste trabalho os seguintes programas :

- Programa INCERTEZA que utilizando como dados de entrada os registros dos poços direcionais (profundidade medida, inclinação e direção) permite através do *MENU* fazer a opção para os seguintes cálculos :
 - A) Acompanhamento Direcional :
 - A.1) Ângulos médios;
 - A.2) Raio de Curvatura;
 - A.3) Mínima Curvatura;
 - E) Erros sistemáticos : Calcula os semi-eixos da elipse de incerteza utilizando o modelo dos erros sistemáticos;
 - R) Erros Aleatórios : Calcula os semi-eixos da elipse de incerteza utilizando o modelo de probabilidade;
- Programa gráfico ELIPSE que utilizando os dados de saída do programa INCERTEZA traça a vista horizontal das elipses de incerteza.
- Programas TRAJ2D e TRAJ3D que calculam a trajetória dos poços em 2 e 3 dimensões.
- Programa já existente INTDIR [ref. 37] que mostra a trajetória dos poços em 3 dimensões e permite a análise de colisões.
- Programa DDRAG7 da *Maurer Engineering* que calcula o torque e o arraste em poços direcionais.

Os programas apresentados acima, podem ser utilizados conforme a seguinte sequência :

- Inicialmente determina-se as trajetórias do poço em erupção e dos poços vizinhos através dos registros direcionais destes e utilizando o programa INTDIR (*Santos et al.*[37]) pode-se ter uma melhor visualização das trajetórias dos poços em 3 dimensões;
- Para o poço em erupção determina-se o cone de incerteza utilizando o programa INCERTEZA e escolhendo no *MENU* a opção ERROS SISTEMÁTICOS, cujo arquivo de saída fornece como resultado os semi-eixos da elipse de incerteza, o centro da elipse e o ângulo que o semi-eixo maior faz com a direção Norte.
- Este arquivo de dados pode ser utilizado no programa gráfico ELIPSE, a partir do qual obtém-se a vista horizontal das elipses de incerteza;
- Definida a posição do poço em erupção determina-se a trajetória do poço de alívio, que permita o maior paralelismo possível entre este e o poço em erupção, para facilitar a localização do mesmo com o uso da ferramenta de detecção. Neste caso pode-se utilizar o programa em 2 dimensões TRAJ2D e para um refinamento maior o programa em 3 dimensões TRAJ3D;
- Com o programa TRAJ3D pode-se gerar diversas trajetórias e utilizando o programa DDRA7 seleciona-se a melhor trajetória do ponto de vista do torque e arraste mínimo;
- Durante a execução do poço de alívio, para um melhor acompanhamento do mesmo, pode-se utilizar o programa INTDIR para traçar as trajetórias dos poços em 3 dimensões e determinar a distância e a direção entre o poço de alívio e o poço em erupção, confrontando com os resultados obtidos utilizando-se as ferramentas de detecção;

4.2) FLUXOGRAMA PARA O PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DO POÇO DE ALÍVIO

Para o planejamento e execução do poço de alívio pode-se utilizar o fluxograma da figura 4.1, seguindo as diversas etapas :

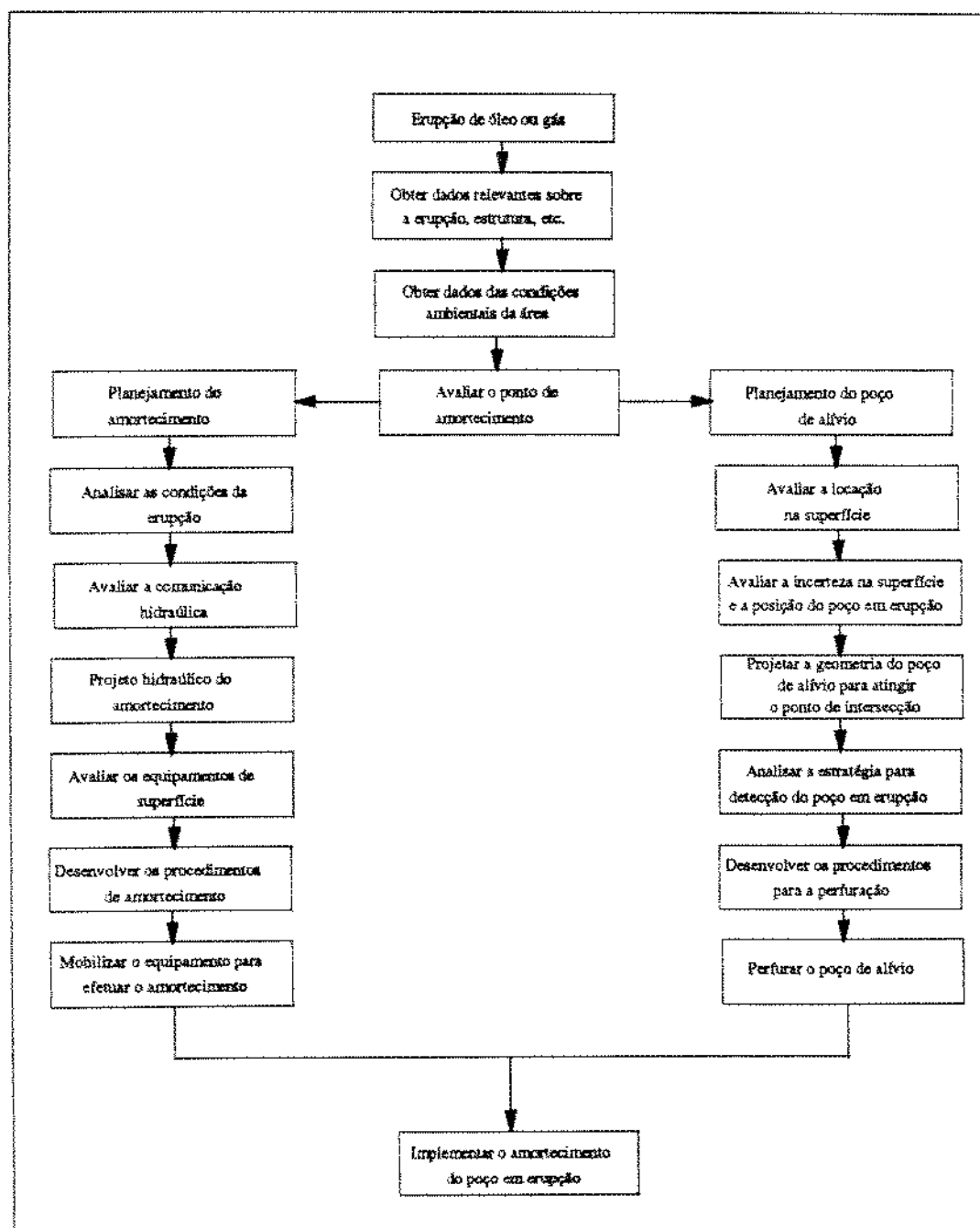


Figura 4.1 - Fluxograma para o planejamento e execução do poço de alívio

4.3) EXEMPLO PRÁTICO E UTILIZAÇÃO DOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

A seguir, através de um exemplo prático, será mostrada a utilização dos programas descritos :

4.3.1) Características do Poço em erupção

Considere o poço N° 1 fazendo parte de um conjunto de 20 poços, localizados numa plataforma fixa, tendo sido perfurados por uma sonda de perfuração modulada, conforme figura 4.2.

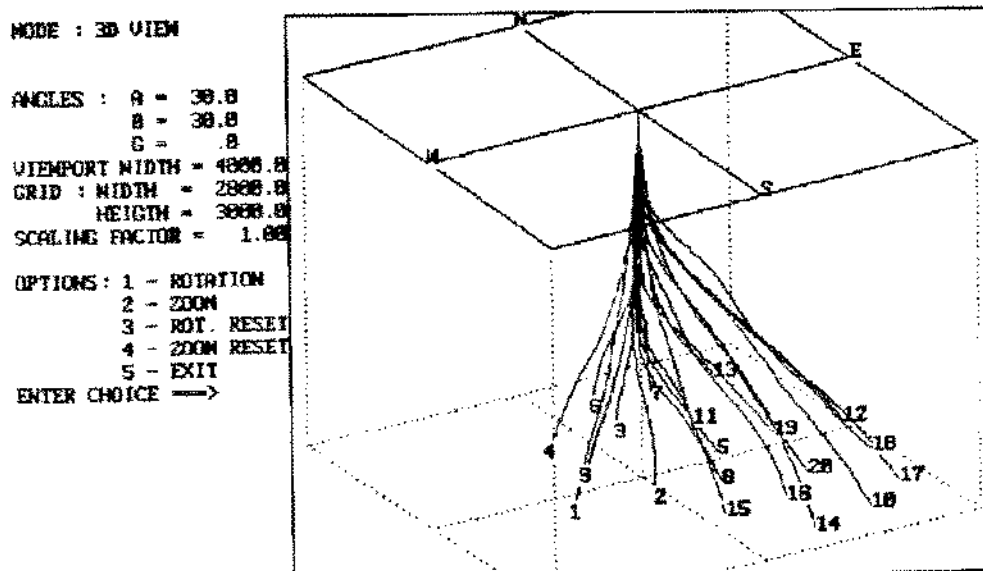


Figura 4.2 - Vista em 3 dimensões dos 20 poços utilizando o programa INTDIR

Supondo que o poço estava sendo recompletado quando começou a fluir sem controle, apresentando como características principais :

- Alta produtividade e produtor de gás, que devido a sua mobilidade e baixa densidade exige altas vazões de injeção de água para ser controlado e boa comunicação do poço de alívio com o poço em erupção;
- Poço produtor revestido, impedindo que com a produção da formação se reduza ou bloqueie o fluxo de gás;

- Pequena profundidade do reservatório produtor (em torno de 2000m), o que facilita o controle da trajetória do poço de alívio;

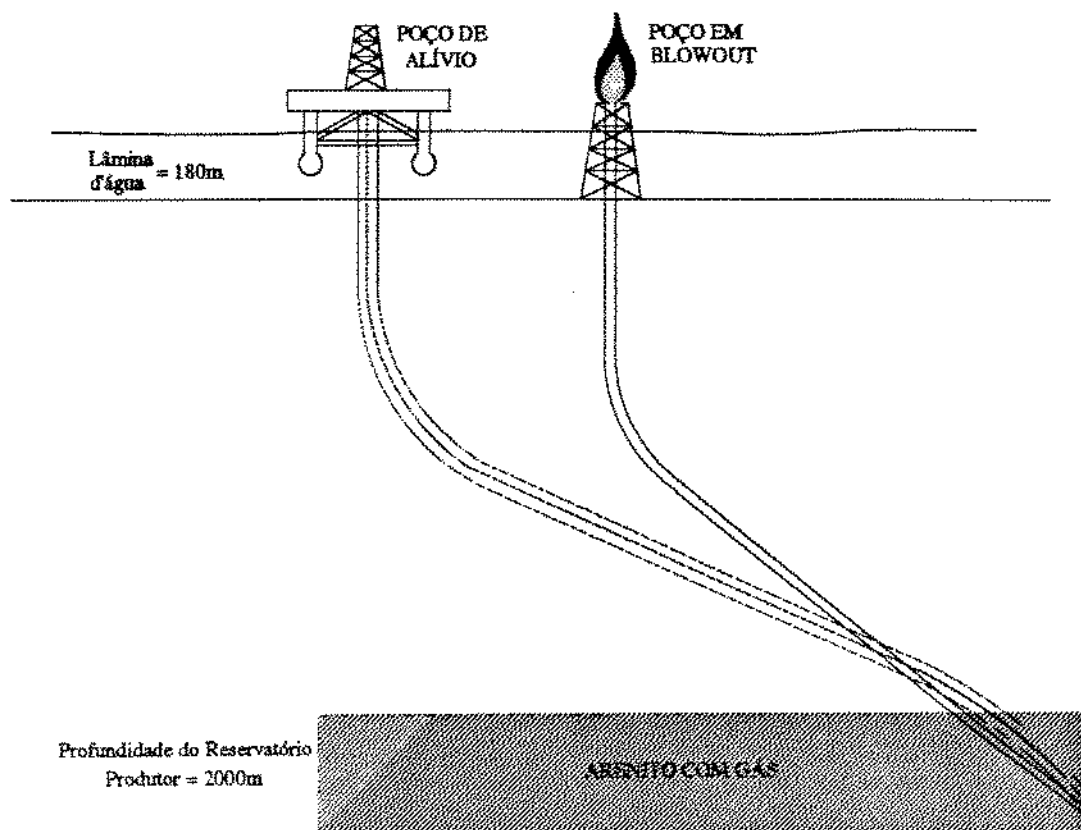


Figura 4.3 - Corte vertical do poço de alívio e do poço em erupção

Tendo o poço em erupção estas características foi feita a opção para a perfuração do poço de alívio, sendo escolhida uma sonda com posicionamento dinâmico, devido aos seguintes fatores:

- Como a lâmina d'água é de 180m e não tendo sondas auto-eleváveis com esta capacidade fez-se a opção por uma unidade flutuante de perfuração;
- Devido as restrições de linhas de fundo (gasodutos, oleodutos) foi feita a opção por uma sonda com posicionamento dinâmico;
- Foi escolhida uma semi-submersível, devido a mesma possuir maior estabilidade do que o navio-sonda, sendo menos susceptível as condições de tempo;

4.3.2) Posicionamento da Sonda

O posicionamento da sonda para os poços de alívio deve ser definido previamente, principalmente em áreas congestionadas, em função dos seguintes aspectos :

- Direção predominante dos ventos na área, que sopra de nordeste para sudoeste, não permitindo a localização da sonda a sudoeste do poço em erupção;
- Posicionamento dos barcos de combate a incêndio e da balsa guindaste que efetua os trabalhos de combate pela superfície, impedindo a localização da sonda a nordeste do poço em erupção;
- Manutenção de uma distância mínima de segurança em relação a plataforma (aproximadamente 400 metros);
- Direção das correntezas no caso de perda de posição da sonda DP.

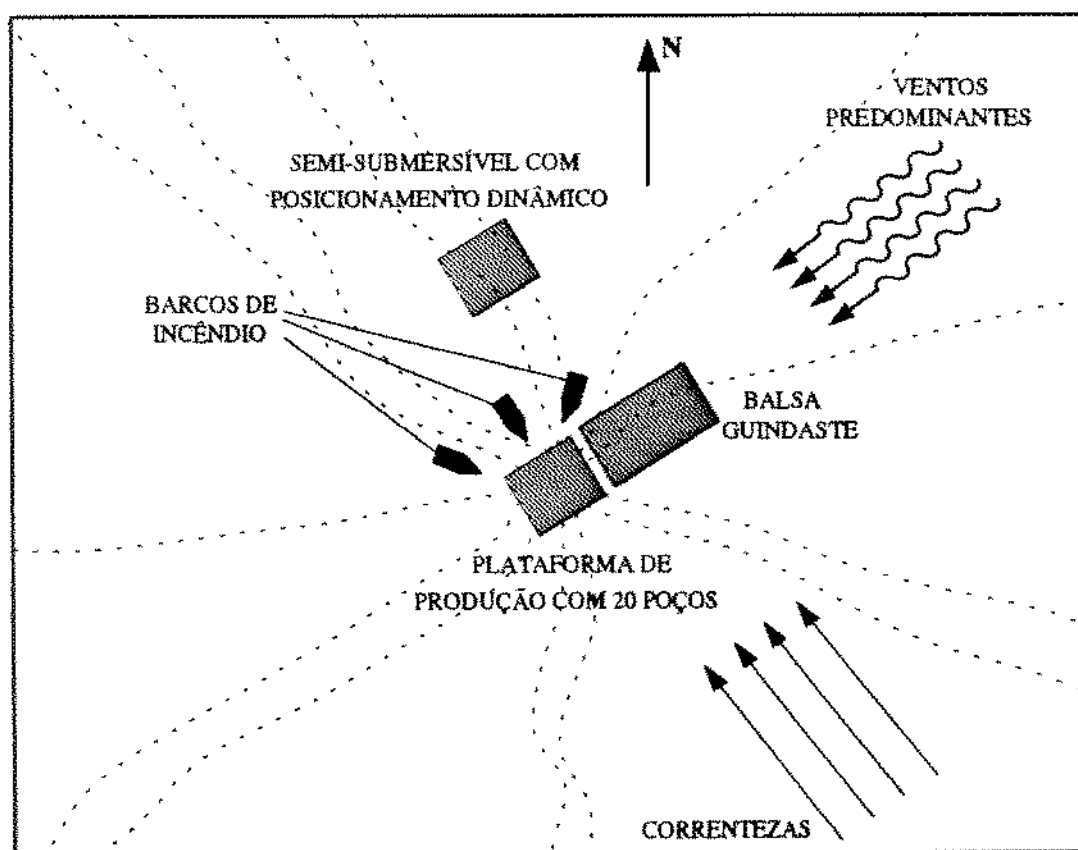


Figura 4.4 - Posicionamento da sonda para a perfuração do poço de alívio

4.3.3) Planejamento para Atingir o Alvo

Nesta fase, deve-se definir a trajetória do poço para que atinja a formação produtora com a menor margem de erro possível. Sendo assim, utiliza-se o seguinte procedimento :

- Através do programa INTDIR obtem-se a projeção horizontal das trajetórias do poço em erupção (poço nº 1), dos poços vizinhos e do poço de alívio (poço nº 21), utilizando os registros direcionais, conforme figura 4.5;

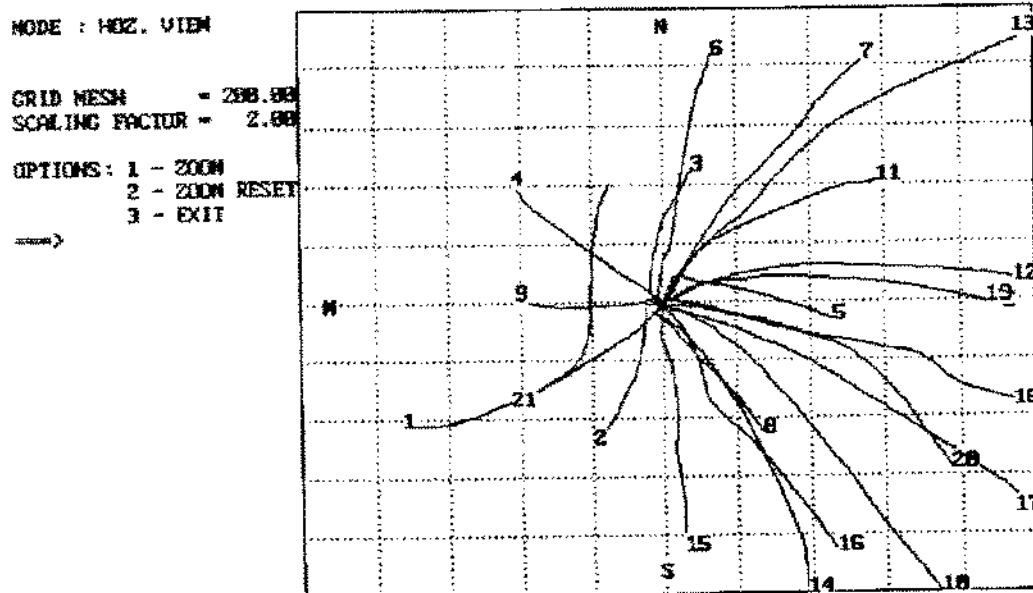


Figura 4.5 - Vista horizontal dos 20 poços e do poço de alívio

- Analisando a projeção horizontal e levando em consideração as diversas restrições impostas a localização da sonda, escolhe-se uma posição que satisfaça as exigências, e defina a trajetória do poço de alívio que atinja o poço em erupção, conforme a figura 4.5;

- Para o poço em erupção determina-se o cone de incerteza, utilizando o modelo dos erros sistemáticos, obtendo-se a vista horizontal das elipses de incerteza, conforme figura 4.6 :

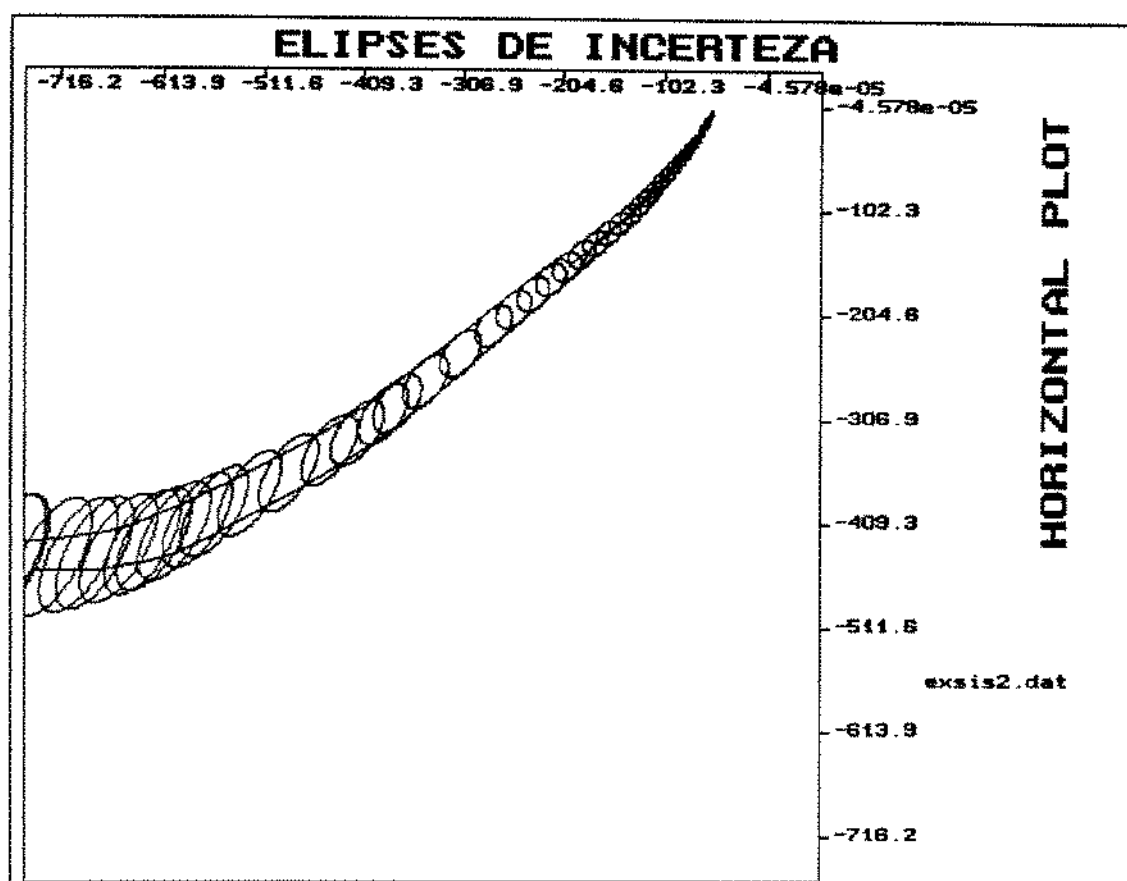


Figura 4.6 - Vista horizontal das elipses de incerteza do poço em erupção (poço nº 1)

- Com a posição do poço em erupção definida, utilizando os programas que calculam as trajetórias em 2 e 3 dimensões obtém-se 3 poços cujas trajetórias passam por pontos pré-determinados de maneira que os poços são paralelos entre si na profundidade de interesse, a fim de facilitar a detecção do poço em erupção e posteriormente a intersecção na profundidade de injeção. As 3 trajetórias podem ser vistas conforme figura 4.7 utilizando o programa INTDIR, ou na figura 4.8;

MODE : 3D VIEW

ANGLES : A = 30.0

B = 30.0

C = .0

VIEWPORT WIDTH = 4000.0

GRID : WIDTH = 1000.0

HEIGHT = 3000.0

SCALING FACTOR = 1.00

OPTIONS: 1 - ROTATION

2 - ZOOM

3 - ROT. RESET

4 - ZOOM RESET

5 - EXIT

ENTER CHOICE ==>

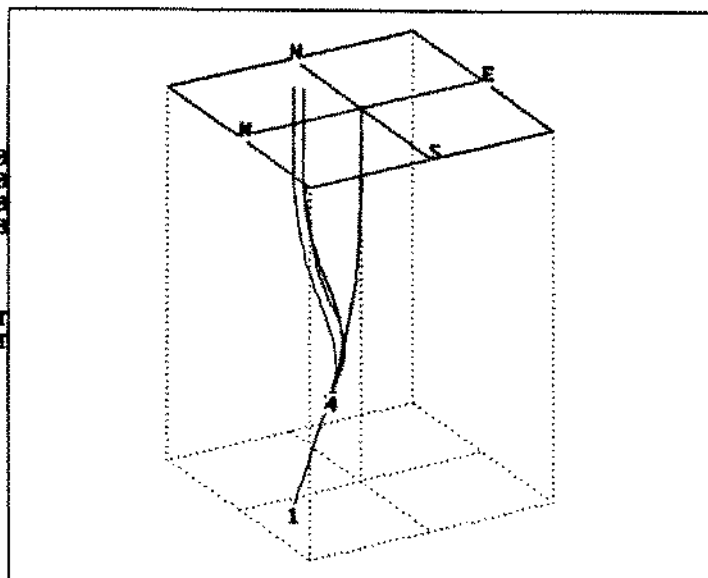


Figura 4.7 - Vista em 3 dimensões dos poços de alívio e o poço em erupção

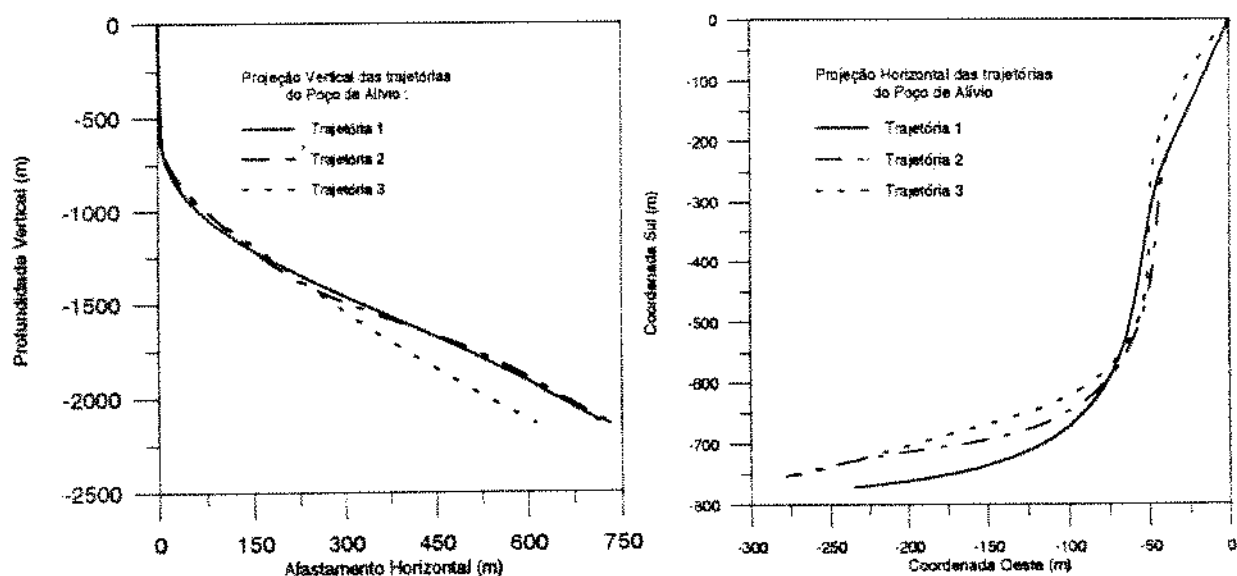


Figura 4.8 - Vistas vertical e horizontal das 3 trajetórias dos poços de alívio

- Analisando as 3 trajetórias (ver figura 4.8) obtidas, seleciona-se a que apresenta menores tortuosidades, e menores valores no torque e arraste calculados pelo programa DDAG7, sendo escolhida a trajetória do poço de alívio 3;

- Seleccionada a trajetória do poço de alvivo nº3, pode-se determinar as elipses de incerteza do poço de alvivo e do poço em erupção, obtendo-se a vista horizontal através do programa ELIPSE, conforme figura 4.9;

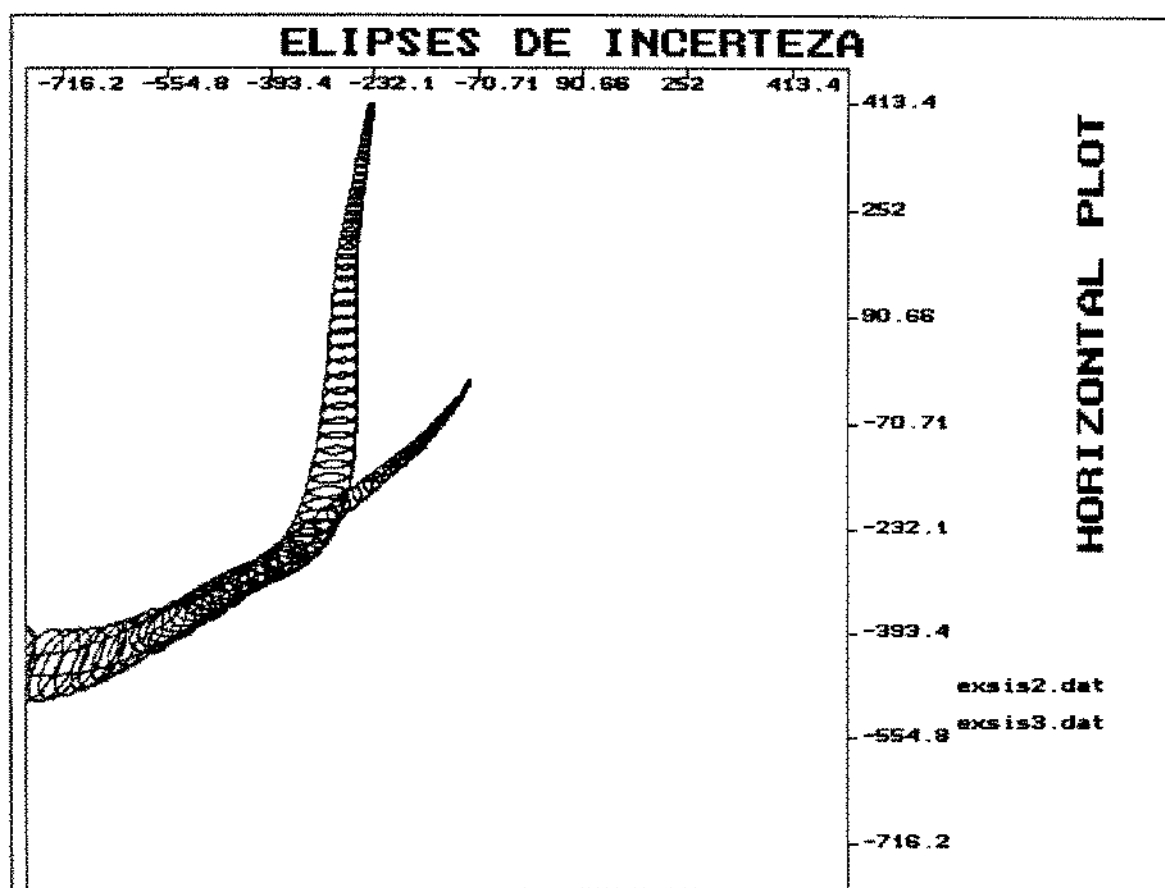


Figura 4.9 - Vista horizontal das elipses de incerteza do poço em erupção e de alvivo

- Supondo que a profundidade de detecção do poço em erupção seja 1850m (profundidade vertical), a partir deste ponto teremos novo cone de incerteza, conforme mostrado na figura 4.10;

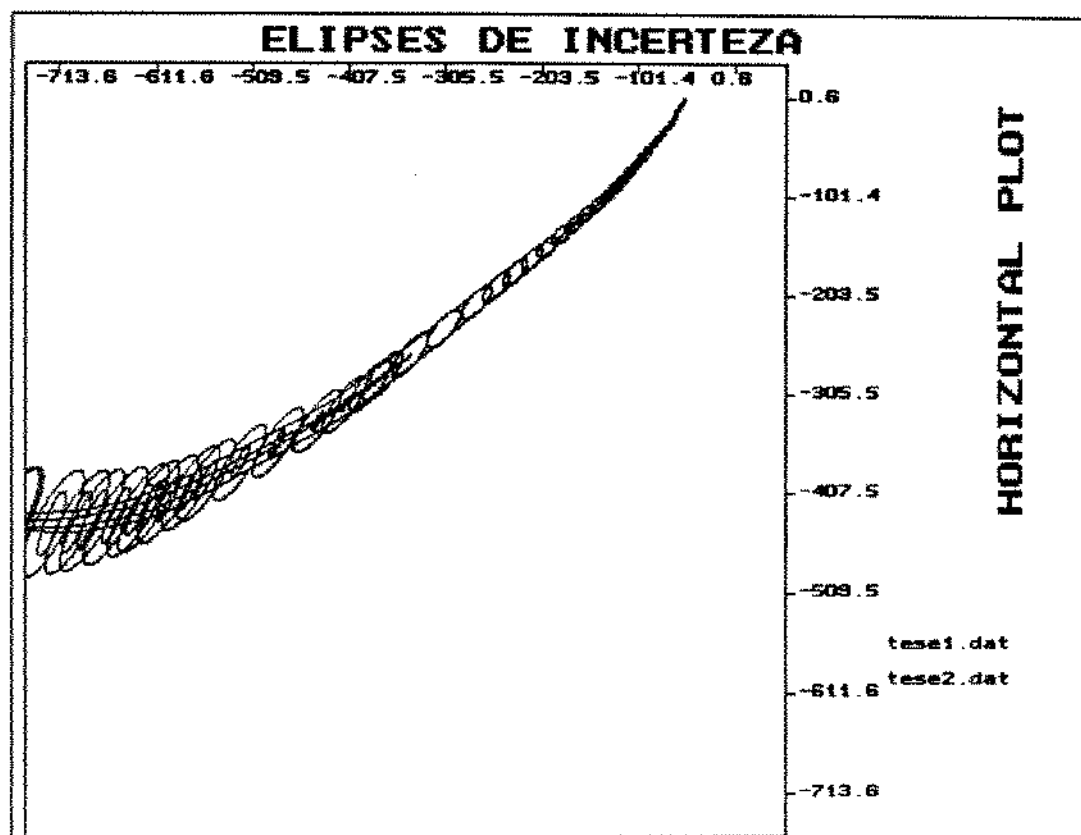


Figura 4.10 - Vista horizontal das elipses de incerteza antes e após a detecção

- No projeto do revestimento leva-se em consideração a necessidade de se concluir o poço com o mínimo diâmetro de revestimento que permita bombear o fluido de amortecimento com a vazão de injeção estimada;

5 - RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

No planejamento e execução dos poços de alívio recomenda-se que:

- Para cada poço a ser perfurado, deve existir no seu programa um projeto preliminar para o poço de alívio e sua provável localização na superfície;
- Devido as particularidades de cada erupção, uma análise de risco e a probabilidade de sucesso do poço de alívio em comparação com outras técnicas disponíveis deve ser estudada, além de um estudo de viabilidade econômica, para que se forneça subsídios para uma tomada de decisão;
- É importante que se considere o poço de alívio como um meio primário para se controlar o poço em erupção, mesmo que estejam sendo efetuadas operações de controle pela superfície;
- É importante ter um cadastro atualizado de especialistas e fornecedores de equipamentos especiais para as operações de bombeio e das ferramentas de detecção;
- Na perfuração do poço de alívio utilizar equipamentos de registro contínuo, tais como o MWD, que permitem obter informações em tempo real, reduzindo sensivelmente o tempo de perfuração do poço direcional;
- Ao se aproximar do poço em blowout, utilizar um equipamento de giroscópio, já que com a presença do revestimento o MWD sofre interferência magnética;
- Deve-se utilizar um giroscópio de alta precisão, já que o mesmo aferirá e corrigirá as informações obtidas do MWD durante a perfuração, além de registrar a inclinação e direção quando próximo do poço em blowout;
- Para a perfuração do poço de alívio deve-se utilizar os sistemas de navegação (*Steerable System*), que permitem definir a trajetória do poço direcional ou mesmo corrigi-la, sem que seja necessário interromper a perfuração para alterar a coluna de perfuração;

- Durante a perfuração pode-se utilizar o programa INTDIR e através dos registros direcionais obtidos fazer o acompanhamento do poço de alívio, assim como determinar a distância e direção entre o poço de alívio e o poço em erupção confrontando com os resultados obtidos com a ferramenta de detecção eletromagnética;

As sugestões para futuros trabalhos são :

- Metodologia para a definição de locações dos poços de alívio principalmente em áreas congestionadas;
- Projeto hidráulico para o amortecimento utilizando o método dinâmico, calculando as vazões e pressões requeridas, e o equipamento de superfície a ser utilizado no bombeio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS :

- [1] - Flak, L.H. e Goins, W.C.: "New Relief Well Technology is Improving Blowout Control", World Oil, December 1983.
- [2] - Bourgoyne, A.T.; Milheim, K.K.; Chevenert, M.E. e Young, F.S.: "Applied Drilling Engineering", SPE Textbook Series - 1986.
- [3] - Guilory Jr., C. : "Surface Recording Gyroscope System Saves Rigtime", Oil & Gas Journal, May 8, 1978.
- [4] - Russel, M.K. : "The Design and Development of a Surface Reading Orienting Survey", Paper 801-46R, API Prod. Div. Pacific Coast District Meeting, Los Angeles, California, May 12 - 14, 1970.
- [5] - Russel, M.K. e Russel, A.W. : "Surveying of Boreholes", U.S. Patent Nº 4,163,324, August 7, 1979.
- [6] - Grindod, S.J. e Wolff, J.M.: "Calculation of N.M.D.C. Length Required for Various Latitudes Developed from Field Measurements of Drill String Magnetisation", SPE 11382, apresentado no "IADC/SPE 1983 Drilling Conference", New Orleans, Louisiana, Feb. 20-23, 1983.
- [7] - Wright, J.W. : Rate Gyro Surveying of Wellbores in the Rocky Mountais", SPE 11841, apresentado no "SPE Rocky Mountain Regional Meeting", Salt Lake City, UT, May 23-25, 1983.
- [8] - Gibbons, F.L. e Hense, U.: "A Three-Axis Laser Gyro System for Borehole Wireline Surveying", SPE 16679, apresentado no SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Sept. 27-30, 1987.
- [9] - Camden, D.J.; Gartner, J.E. e Moulin, P.A. : "A New Continuous Guidance Tool Used for High Accuracy Directional Surveys", SPE 10057, apresentado no SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Oct. 4-7, 1981.

- [10] - Morgan, D.G. e Howe, N. : "High Accuracy Directional Surveying of Wells Employing Inertial Techniques", SPE 8156, apresentado no Offshore Europe Conference, Aberdeen, Scotland, September 3-7, 1979.
- [11] - Walstrom, J.E.; Brown, A.A. e Harvey, R.P.: "An Analysis of Uncertainty in Directional Surveying", JPT, April 1969.
- [12] - Truex, J.N. : "Directional Survey Problems, East Wilmington Oil Field, California", AAPG Bulletin, April 1971, 55, No. 4, 621-28.
- [13] - Wolff, C.J.M. e De Wardt, J.P.: "Borehole Position Uncertainty - Analysis of Measuring Methods and Derivation of Systematic Error Model", JPT - December 1981.
- [14] - Dubrule, O. e Nelson, P.H.: "Evaluation of Directional Survey Errors at Prudhoe Bay", SPE 15462, apresentado no "61st Annual Technical Conference and Exhibition", New Orleans, Louisiana, Oct. 5-8, 1986.
- [15] - Thorogood, J.L.: "Instrument Performance Models and Their Application to Directional Surveying Operations", SPE 18051, apresentado no "SPE Annual Technical Conference and Exhibition", Houston, Oct. 2-5, 1988.
- [16] - Holmes, A.: "A Method to Analyze Directional Surveying Accuracy", SPE 16680, apresentado no "SPE Annual Technical Conference and Exhibition", Dallas, Sept. 27-30, 1987.
- [17] - Runge, R.J. e Lucas, D.R. : "Ultra-Long Spaced Electric Log (ULSEL)", Paper H. SPWLA Symposium, Houston, Texas, May 25-28, 1969.
- [18] - Haanschoten, G.W. : "Logging Tool Offers Greater Depth of Investigation for Relief Well", Oil & Gas Journal, Jan. 10, 1977.
- [19] - Haanschoten, G.W. : "ULSEL Systems Performs on Brunei Blowout under Tough Conditions", Oil & Gas Journal, Jan. 17, 1977.
- [20] - Mitchell, F.R.; Ronbison, J.D.; Vogiatzis, J.P.; Pehoushek, F.; Moran, J.H.; Ausburn, B.E. e Berry, L.N.: "Using Resistivity Measurements to Determine Distance Between Wells", JPT, June 1972.

- [21] - Robinson, J.D. e Vogiatzis, J.P.: "Magnetostatic Methods for Estimating Distance and Direction from a Relief Well to a Cased Wellbore", JPT, June 1972.
- [22] - West, C.L.; Kuckles, A.F. e Ritch, H.J. : "Succesful ELREC Logging for Casing Proximity in an Offshore Louisiana Well", SPE 11996, apresentado no "SPE Annual Fall Meeting", San Francisco, California, Oct. 5-8, 1983.
- [23] - Grace, R.D.: "Case History of Texas Largest Blowout Shows Successful Techniques on Deepest Relief Well", Oil & Gas Journal, May 20, 1985.
- [24] - Morris, F.J.; Costa, J.P.; Waters, R.L. e Roberts, G.F.: "A New Method of Determining Range and Direction from a Relief Well to a Blowout Well", SPE 6781, apresentado no "SPE Annual Fall Meeting", San Francisco, California, Oct. 5-8, 1983.
- [25] - McKinley, R.M., et al. : "The Structure and Interpretation of Noise from Flow behind Cemented Casing", JPT, March 1973.
- [26] - Britt, E.L. : "Theory and Aplication of the Borehole Audio Tracer survey", Paper BB, SPWLA Symposium, Denver, Colorado, 1976, June 9-12.
- [27] - Bruist, E.H. : "A New Approach in Relief Well Drilling", JPT, June 1972.
- [28] - Taylor, H.L. e Mason, C.M.: "A Systematic Approach to Well Surveying Calculations", JPT, August 1972.
- [29] - Flak, L.H. e Goins, W.C.: "New Techniques, Equipment Improve Relief Well Success", World Oil, January 1984.
- [30] - Miller, R.T. e Clements, R.L. : "Reservoir Engineering Techniques Used to Predict Blowout Control during the Bay Marchand Fire", JPT, March 1972.
- [31] - Lehner, F. e Williamson, A.S. : "Gas Blowout Control by Water Injection through Relief Wells - A Theoretical Analysis", SPE Journal, August 1974.
- [32] - Barnett, R.D.: "A Logical Approach to Killing an Offshore Blowout West Cameron 165 Well no. 3 - Offshore Louisiana", SPE 6903, apresentado no "Annual Fall Meeting", Denver, Colorado, Oct. 9-12, 1977.
- [33] - Blount, E. M. e Soeiinah, E.: "Dynamic Kill : Controlling Wild Wells a New Way", World Oil, October 1981.

- [34] - William Abel, L. e Campbell, P.J.: "Blowout Contingency Planning : Preparing for the Worst Case Event", Wild Well Control Inc. - 1993.
- [35] - Leraand, F.; Wright, J.W.; Zachary, M.B.; Thompson, B.G.: "Relief-Well Planning and Drilling for a North Sea Underground Blowout", JPT, March 1992.
- [36] - Fruhwirth, R. e Lorbach, M.: "Error Analysis of Directional Survey Calculation Models", SPE 16477, 1987.
- [37] - Santos, O.L.; Maidla , E.E. e Langlinais, J.P.: "Field Application of Computer Graphics for Monitoring Borehole Trajectories", JPT, December 1989.
- [38] - Linhares, S.T.X.; Maduro, W.P. e Sobreiro, A.C.S.: "Operações dos Poços de Alívio para Combate ao Blowout do Poço 7-EN-19D-RJS", Relatório Técnico Petrobrás.
- [39] - Warriner, R.A. e Cassity, T.G. : "Relief-Well Requirements to Kill a High-Rate Gas Blowout from a Deepwater Reservoir", JPT, December 1988.
- [40] - Tarr, B.A.; Kuckes, A.F. e Ac, M.V. : "Use of New Ranging Tool to Position a Vertical Well Adjacent to a Horizontal Well", SPE Drilling Engineer, June 1992.
- [41] - Nicholson, J.T. : "Algorithm Facilitates Preplanning Wellbore Trajectories", Oil & Gas Journal, Feb. 4, 1991.

APÊNDICE A - ERRO DEVIDO A MAGNETIZAÇÃO DA COLUNA

De acordo com o trabalho de *Grindod e Wolff* [6], uma possível fonte de erro em registros direcionais magnéticos é a causada pela interferência devido a magnetização dos componentes da coluna, já que as leituras dos instrumentos magnéticos são sensíveis as partes de aço da coluna de perfuração tais como brocas, motores de fundo, estabilizadores, D.C.'s.

Quando em uso, uma coluna de perfuração está em orientação essencialmente estática relativa ao campo magnético da terra e torna-se magnetizada. Como a coluna é um cilindro longo que é girado, esta magnetização é orientada ao longo do eixo da coluna.

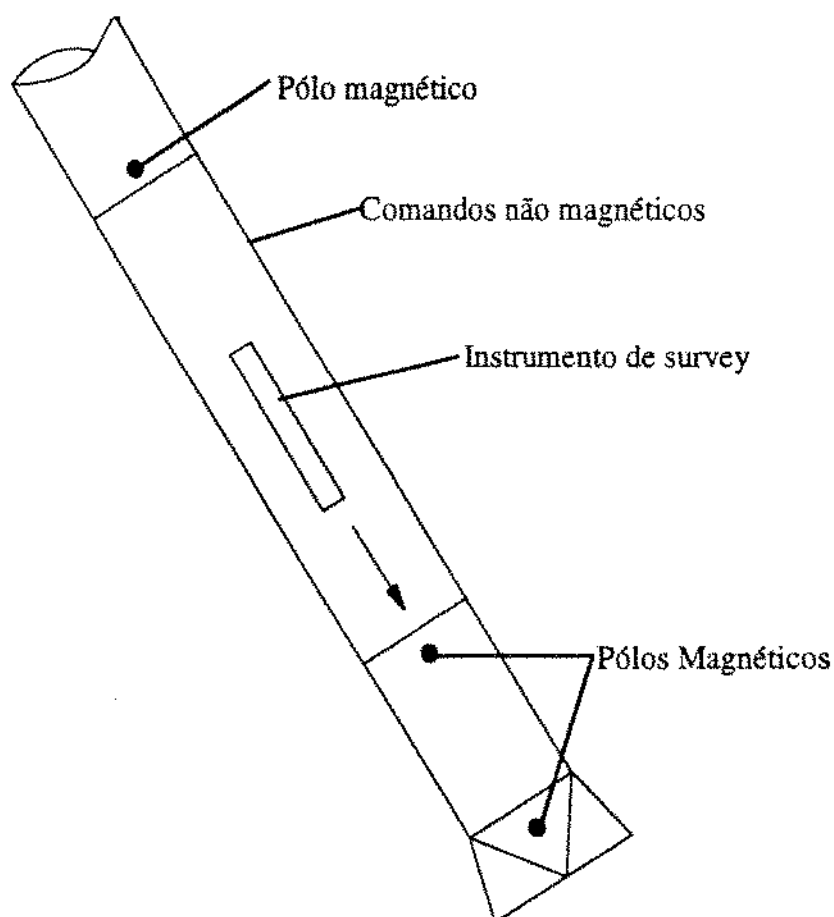
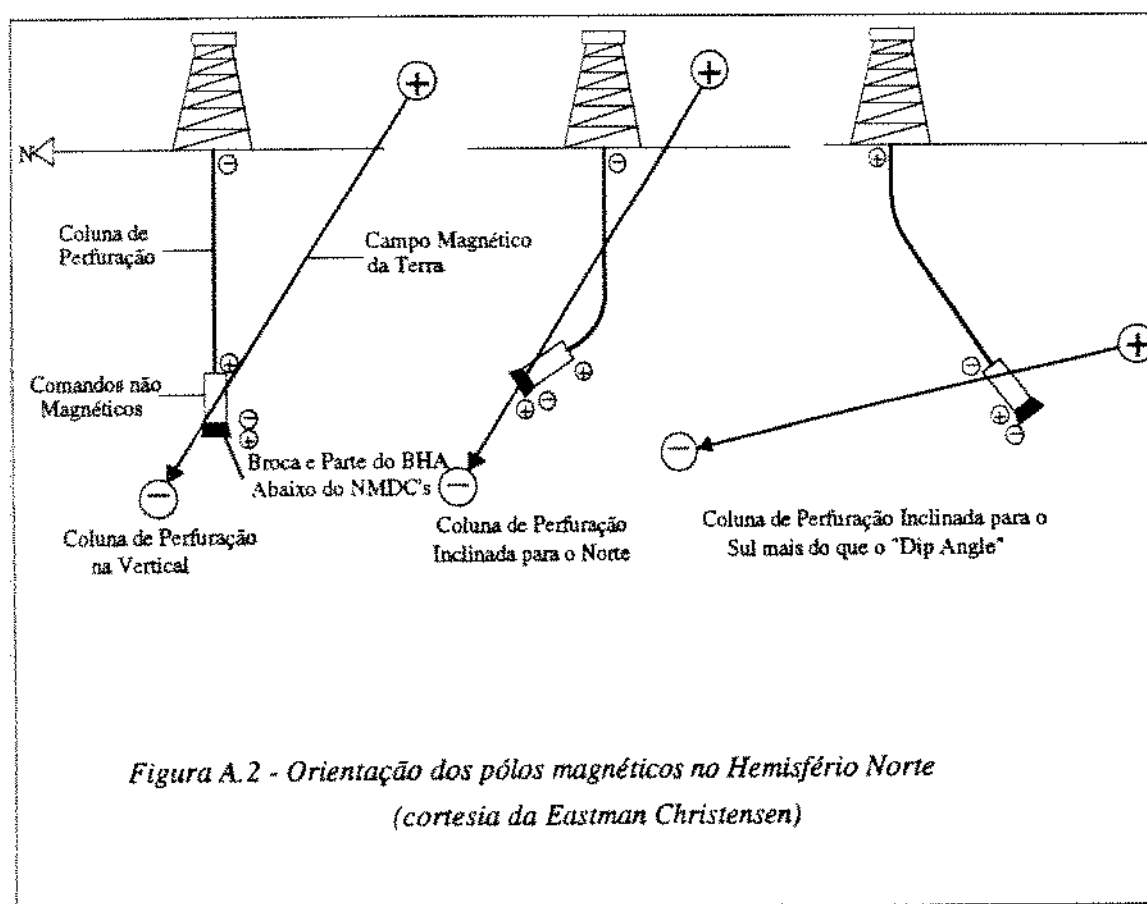


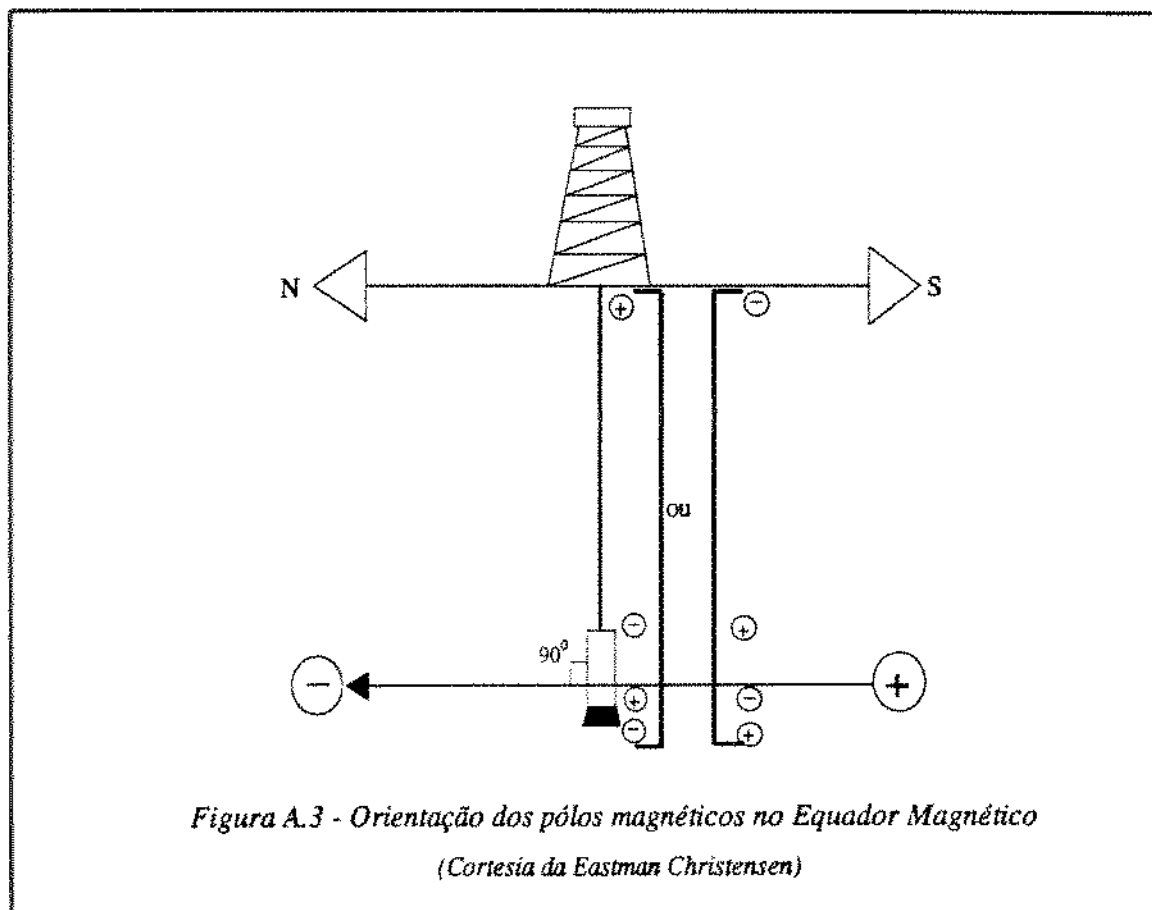
Figura A.1 - Posição dos pólos magnéticos na coluna de perfuração

Na broca e nas partes da coluna de perfuração acima e abaixo da seção de comandos não magnéticos (monéis), o fluxo magnético é forçado a deixar o aço, isto é, os pólos magnéticos ocorrem. A intensidade de um pólo magnético é definido como igual ao fluxo magnético que deixa o material na posição do pólo e é expresso em Weber (Wb). Em latitudes norte, como por exemplo na área do Mar do Norte, o pólo superior acima da seção dos comandos não magnéticos é normalmente positivo e o pólo inferior é negativo.

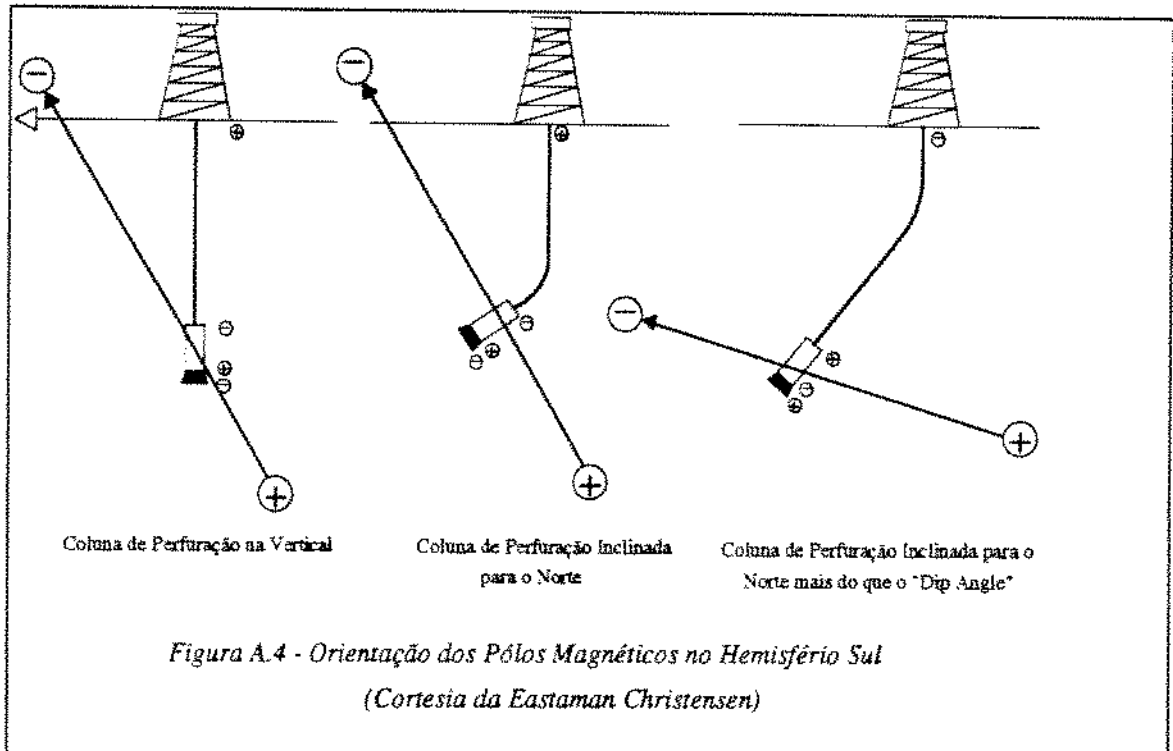
A intensidade e posições relativas dos pólos negativos e positivos são dependentes da orientação da coluna de perfuração com respeito ao campo magnético da terra. Como a orientação dos pólos depende da posição na terra, no hemisfério norte geralmente o pólo superior é positivo, ao menos que a perfuração seja na direção sul em uma inclinação maior do que o "dip angle" do campo magnético terrestre, quando o pólo superior será normalmente negativo.



Próximo ao equador magnético o pólo superior pode ser ou positivo ou negativo dependendo da direção do poço.



No hemisfério sul, o pólo superior é geralmente negativo, ao menos que perfurando em uma direção norte onde a inclinação é maior do que o "*dip angle*" do campo magnético terrestre, conforme figura A.4 :



Uma bússola magnética posicionada próxima a um corpo magnético, alinha-se de acordo ao campo magnético total, que é a soma vetorial do campo magnético da terra e do campo magnético do corpo. A intensidade do campo magnético (densidade de fluxo) em uma distância r de um monopolo magnético é igual ao quociente do fluxo, ou intensidade do pólo P e da área de uma esfera de raio r , em torno do pólo, isto é :

$$B(r) = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (A-1)$$

No sistema internacional, B é expresso em Tesla (T), porém na prática é usado o microtesla (μT).

Em uma seção não magnetizada de uma coluna de perfuração o campo magnético interferente é causado pelas seções magnéticas acima e abaixo, e é orientado na direção axial, conforme figura E.4. Levando em consideração os 3 pólos na parte inferior da coluna de perfuração, o campo magnético interferente (ΔB_z) é dado por :

$$\Delta B_z(z) = \frac{|P_u|}{4\pi(L-z)^2} + \frac{|P_l|}{4\pi z^2} - \frac{|P_l|}{4\pi(z+L_{broca})^2} \quad (A-2)$$

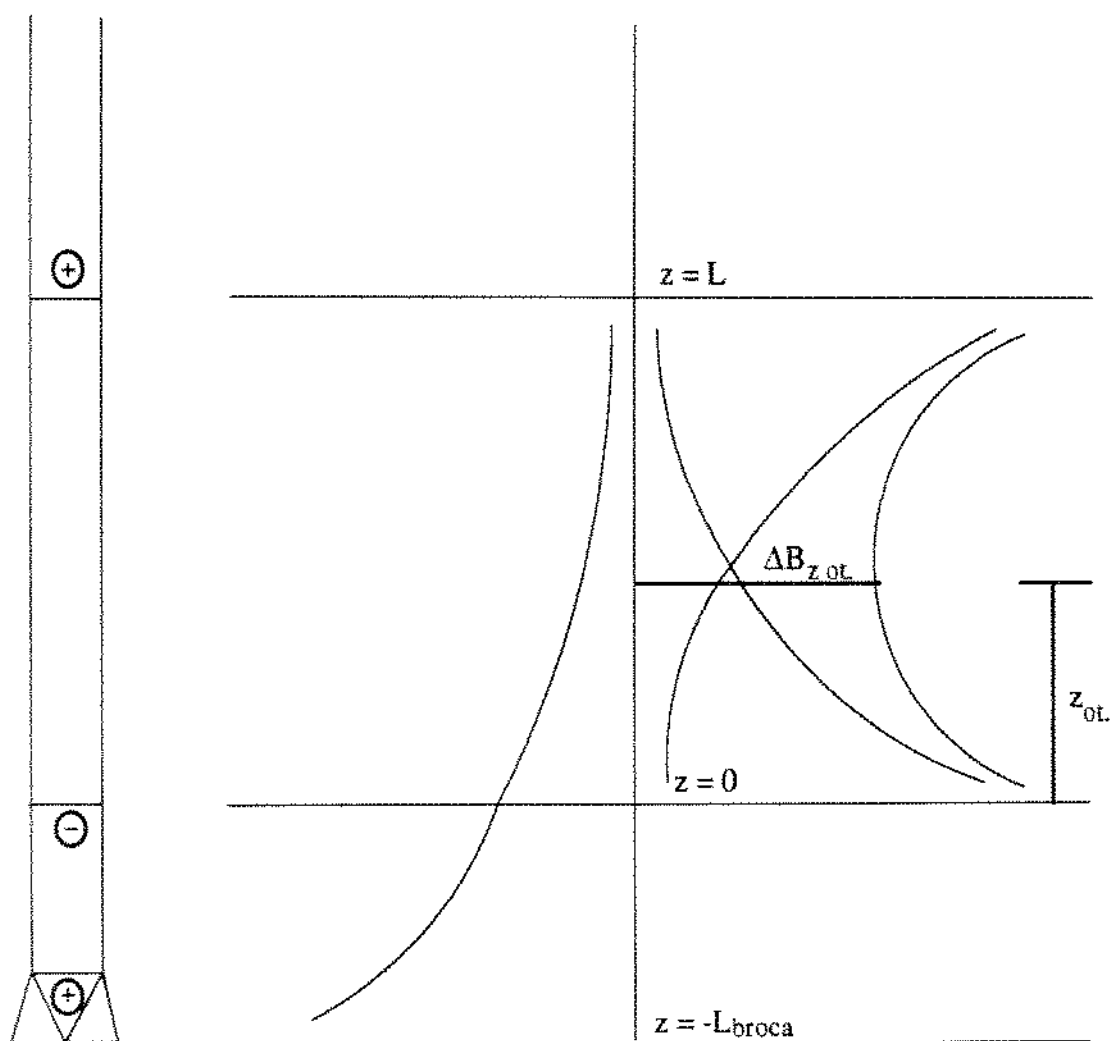


Figura A.5 - Campo Magnético Interferente

Onde $|P_u|$ e $|P_l|$ são os módulos das intensidades dos pólos, imediatamente acima e abaixo da seção dos comandos não magnéticos, respectivamente, L é o comprimento da seção dos comandos não magnéticos e $(L - z)$ e z são as distâncias entre a posição observada z e os pólos superior e inferior respectivamente, enquanto L_{broca} é o comprimento da parte da coluna abaixo da seção de comandos não magnéticos.

Da figura A.5, pode ser visto que há um espaçamento ótimo Z_{ot} , onde o erro no campo magnético é mínimo. Esta deve ser a posição onde o instrumento deve ser colocado.

A.1 - VALORES DAS INTENSIDADES DOS PÓLOS

Medidas de campo foram feitas na superfície e no fundo do poço em vários poços na Holanda. As seguintes intensidades de pólos foram observadas e são usadas nos cálculos :

Pólo Superior (PU) :

- | | |
|---|------------------------|
| - Comandos (pino) | até 900 μWb |
| - Cabos auxiliares usados na descida do instrumento | até 20 μWb |

Pólo Inferior (PL) :

- | | |
|---|-------------------------|
| - Estabilizadores e broca (caixa) | até 90 μWb |
| - 10 m de comandos abaixo do NMDC's (caixa) | até 300 μWb |
| - Turbinas ou Motores de Fundo (caixa) | até 1000 μWb |

A intensidade do pólo magnético num elemento da coluna de perfuração é função do campo magnético terrestre, que varia com a latitude. No Brasil o campo magnético terrestre é menor do que no Mar do Norte. Como os valores acima foram obtidos no Mar do Norte, eles devem ser considerados como um limite conservativo superior, pois a superestimativa da intensidade do pólo magnético na equação (A-2) resulta num campo magnético interferente maior.

A.2 - ERRO NO AZIMUTE

Em instrumentos de registros direcionais magnéticos convencionais, a leitura do azimuth pela bússola é determinada pela componente horizontal do campo magnético da Terra. A magnetização da coluna de perfuração influencia a componente horizontal. Como a coluna de perfuração é um cilindro longo que gira, o campo magnético interferente ΔB_z estará orientado ao longo do eixo da coluna. Portanto, um instrumento com uma bússola convencional responderá a componente horizontal do campo magnético da terra. Logo o erro

do azimute do instrumento depende de $\Delta B_z \cdot \text{sen} I$ (componente horizontal do erro), conforme figura A.6 :

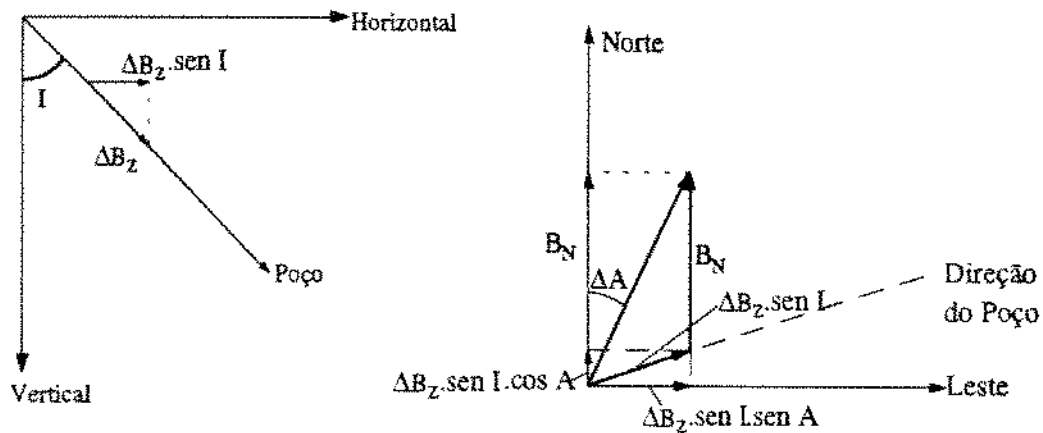


Figura A.6 - Diagrama vetorial do erro do azimute

A figura A.6 mostra como a componente horizontal do campo magnético interferente e a componente horizontal da Terra (B_N) produzem o erro no azimute (ΔA). Conforme a figura, temos que :

$$\tan(\Delta A) = \frac{\text{sen} I \text{sen} A \Delta B_z}{\text{sen} I \cos A \Delta B_z + B_N} \quad (\text{A-3})$$

Para pequenos erros, o que normalmente ocorre no campo, duas aproximações podem ser feitas :

- 1) Para pequenos ângulos temos que :

$$\tan(\Delta A) = \Delta A \quad \text{e}$$

- 2) O termo $\Delta B_z \cdot \text{sen} I \cdot \cos A$ pode ser desprezado ;

Assim o erro do azimute passa a ser igual a razão da componente Leste/Oeste do vetor erro ($\text{sen} I \cdot \text{sen} A \cdot \Delta B_z$) e o campo horizontal da Terra (B_N) :

$$\Delta A = \frac{\text{sen} I \text{sen} A \Delta B_z 180}{\cos(\text{DIP}) |B| \pi} \quad (\text{A-4})$$

Onde :

$\Delta A \rightarrow$ erro no azimuth em graus;

$I \rightarrow$ inclinação do poço em graus;

$A \rightarrow$ azimuth em graus;

$DIP \rightarrow$ *Dip angle* do campo magnético da Terra em graus;

$|B| \rightarrow$ Intensidade Total do campo magnético da Terra em microtesla (μT);

$B_N = \cos(DIP) |B| \rightarrow$ Componente horizontal do campo magnético da Terra em microtesla (μT);

Assim pode-se observar, pela equação (A-4), que o erro do compasso para o azimuth (ΔA) aumenta com a inclinação e também para uma direção do poço no sentido leste ou oeste.

APÊNDICE B - MAPA MAGNÉTICO DO BRASIL

Nos Mapas Magnéticos do Brasil 1990.0, os componentes Declinação (**D**), Inclinação (**I**) e Intensidade Total (**F**) são modelos obtidos através do ajuste polinomial nas variáveis latitude, longitude e tempo, dos dados magnéticos medidos nas 100 estações da Rede Magnética Brasileira e em Observatórios Magnéticos Sul-Americanos. Estes Mapas Magnéticos devem ser utilizados para datas entre 1985.0 e 1995.0, pois os resultados fora deste período são imprecisos.

Mesmo levando-se em conta a grande variação diária do campo magnético terrestre e a possibilidade de perturbações locais, pode-se considerar que o erro do modelo em um determinado local e data não deve geralmente exceder 30' para as componentes **D** e **I** e cerca de 200 nT para **F**. Os erros quadráticos médios (rms) são respectivamente 9' para **D**, 11' para **I** e 72 nT para **F**.

Pode-se também utilizar o programa **ELEMAG**, desenvolvido pelo Observatório Nacional que calcula os valores e a variação anual das componentes Declinação (**D**), Inclinação (**I**), Intensidade Total (**F**) e as componentes cartesianas Norte (**X**), Leste (**Y**) e Vertical (**Z**) do campo geomagnético no território brasileiro. Trata-se de um modelo polinomial do 4º. grau, em latitude, longitude e tempo. O programa é interativo, necessitando como dados de entrada : a data e as coordenadas do local (latitude e longitude) onde se deseja conhecer o campo. A data deve ser fornecida em ano e fração decimal (por exemplo 1985.5, para 1º de julho de 1985). Valores da latitude são considerados negativos abaixo do equador geográfico e os valores da longitude são adotados negativos. O programa foi escrito em linguagem FORTRAN - 77, sendo fornecidos os seguintes arquivos :

- ELEMAG.EXE - Versão executável;
- ELEMAG.FOR - Programa fonte;
- CD4-ON90, CI4-ON90 e CF4-ON90 arquivos contendo os coeficientes do modelo polinomial que representam o campo geomagnético das componentes **D**, **I** e **F** respectivamente.

APÊNDICE C - DADOS DOS POÇOS UTILIZADOS NA ELABORAÇÃO DOS GRÁFICOS E NO EXEMPLO PRÁTICO

Abaixo são apresentados os dados dos poços Norte e Leste, usados na obtenção dos gráficos para a análise de sensibilidade, do poço em blowout e das trajetórias calculadas para o poço de alívio:

POÇO NORTE	POÇO LESTE	POÇO EM BLOWOUT
P.M.(m) INC. DIR.	P.M.(m) INC. DIR.	P.M.(m) INC. DIR.
51.00 0.75 N0.00E	51.00 0.75 N90.00E	106 0.00 S67.00E
80.00 0.75 N0.00E	80.00 0.75 N90.00E	120 0.50 S67.00E
110.00 1.75 N0.00E	110.00 1.75 N90.00E	140 0.50 S25.00E
140.00 2.75 N0.00E	140.00 2.75 N90.00E	160 0.75 S40.00E
170.00 3.00 N0.00E	170.00 3.00 N90.00E	210 2.25 S00.00E
200.00 2.75 N0.00E	200.00 2.75 N90.00E	270 5.00 S37.00W
230.00 2.75 N0.00E	230.00 2.75 N90.00E	330 5.25 S35.00W
245.00 3.25 N0.00E	245.00 3.25 N90.00E	390 5.75 S28.00W
284.00 7.00 N0.00E	284.00 7.00 N90.00E	450 6.00 S25.00W
312.00 8.00 N0.00E	312.00 8.00 N90.00E	520 6.25 S42.00W
340.00 9.75 N0.00E	340.00 9.75 N90.00E	580 6.25 S39.00W
368.00 9.75 N0.00E	368.00 9.75 N90.00E	640 6.75 S42.00W
396.00 10.00 N0.00E	396.00 10.00 N90.00E	700 7.50 S41.00W
424.00 9.75 N0.00E	424.00 9.75 N90.00E	760 8.00 S39.00W
452.00 10.00 N0.00E	452.00 10.00 N90.00E	820 8.75 S42.00W
480.00 12.00 N0.00E	480.00 12.00 N90.00E	880 9.25 S42.00W
508.00 15.00 N0.00E	508.00 15.00 N90.00E	940 9.75 S42.00W
536.00 16.75 N0.00E	536.00 16.75 N90.00E	1000 10.00 S41.00W
564.00 20.00 N0.00E	564.00 20.00 N90.00E	1060 10.75 S45.00W
592.00 23.75 N0.00E	592.00 23.75 N90.00E	1120 11.00 S45.00W
620.00 27.00 N0.00E	620.00 27.00 N90.00E	1180 12.25 S49.00W
648.00 27.25 N0.00E	648.00 27.25 N90.00E	1240 14.00 S52.00W
676.00 25.75 N0.00E	676.00 25.75 N90.00E	1300 15.50 S52.00W
704.00 26.00 N0.00E	704.00 26.00 N90.00E	1360 16.00 S53.00W
732.00 25.25 N0.00E	732.00 25.25 N90.00E	1420 18.00 S53.00W
760.00 25.00 N0.00E	760.00 25.00 N90.00E	1480 19.25 S52.00W
788.00 24.50 N0.00E	788.00 24.50 N90.00E	1540 21.00 S54.00W

POÇO NORTE	POÇO LESTE	POÇO EM BLOWOUT	
P.M.(m) INC. DIR.	P.M.(m) INC. DIR.	P.M.(m) INC.	DIR.
816.00 23.50 N0.00E	816.00 23.50 N90.00E	1600 23.75	S54.00W
844.00 23.00 N0.00E	844.00 23.00 N90.00E	1660 25.00	S55.00W
871.00 22.25 N0.00E	871.00 22.25 N90.00E	1720 26.75	S52.00W
899.00 21.75 N0.00E	899.00 21.75 N90.00E	1815 27.40	S54.90W
927.00 21.75 N0.00E	927.00 21.75 N90.00E	1910 28.30	S54.60W
955.00 21.50 N0.00E	955.00 21.50 N90.00E	1986 28.80	S56.00W
983.00 21.25 N0.00E	983.00 21.25 N90.00E	2022 28.70	S55.60W
1011.00 21.50 N0.00E	1011.00 21.50 N90.00E	2088 30.30	S59.20W
1039.00 21.75 N0.00E	1039.00 21.75 N90.00E	2154 30.90	S63.70W
1067.00 21.75 N0.00E	1067.00 21.75 N90.00E	2248 29.40	S64.80W
1095.00 21.75 N0.00E	1095.00 21.75 N90.00E	2344 26.70	S65.50W
1123.00 22.00 N0.00E	1123.00 22.00 N90.00E	2438 23.90	S65.50W
1151.00 22.25 N0.00E	1151.00 22.25 N90.00E	2485 22.90	S65.80W
1179.00 22.50 N0.00E	1179.00 22.50 N90.00E	2551 22.70	S68.60W
1207.00 22.75 N0.00E	1207.00 22.75 N90.00E	2607 22.50	S72.90W
1235.00 22.75 N0.00E	1235.00 22.75 N90.00E	2638 22.70	S76.00W
1247.00 23.00 N0.00E	1247.00 23.00 N90.00E	2702 22.20	S79.90W
1256.00 22.75 N0.00E	1256.00 22.75 N90.00E	2769 20.30	S83.10W
1284.00 22.50 N0.00E	1284.00 22.50 N90.00E	2817 18.80	S86.20W
1312.00 22.50 N0.00E	1312.00 22.50 N90.00E	2903 16.60	S89.40W
1340.00 22.50 N0.00E	1340.00 22.50 N90.00E	3062 15.00	S86.50W
1368.00 22.75 N0.00E	1368.00 22.75 N90.00E	3076 15.00	S86.50W
1396.00 22.75 N0.00E	1396.00 22.75 N90.00E		
1424.00 22.75 N0.00E	1424.00 22.75 N90.00E		
1452.00 23.00 N0.00E	1452.00 23.00 N90.00E		
1480.00 23.50 N0.00E	1480.00 23.50 N90.00E		
1508.00 23.75 N0.00E	1508.00 23.75 N90.00E		
1536.00 23.75 N0.00E	1536.00 23.75 N90.00E		
1565.00 23.50 N0.00E	1565.00 23.50 N90.00E		
1593.00 24.00 N0.00E	1593.00 24.00 N90.00E		
1621.00 25.00 N0.00E	1621.00 25.00 N90.00E		
1649.00 25.50 N0.00E	1649.00 25.50 N90.00E		
1677.00 25.25 N0.00E	1677.00 25.25 N90.00E		
1705.00 25.00 N0.00E	1705.00 25.00 N90.00E		
1733.00 25.00 N0.00E	1733.00 25.00 N90.00E		

POÇO NORTE	POÇO LESTE	POÇO EM BLOWOUT
P.M.(m) INC. DIR.	P.M.(m) INC. DIR.	
1761.00 25.00 N0.00E	1761.00 25.00 N90.00E	
1789.00 24.50 N0.00E	1789.00 24.50 N90.00E	
1817.00 24.75 N0.00E	1817.00 24.75 N90.00E	
1845.00 24.75 N0.00E	1845.00 24.75 N90.00E	
1873.00 24.75 N0.00E	1873.00 24.75 N90.00E	
1901.00 24.75 N0.00E	1901.00 24.75 N90.00E	
1929.00 24.75 N0.00E	1929.00 24.75 N90.00E	
1957.00 25.50 N0.00E	1957.00 25.50 N90.00E	
1985.00 26.50 N0.00E	1985.00 26.50 N90.00E	
1992.00 26.50 N0.00E	1992.00 26.50 N90.00E	
2043.00 26.50 N0.00E	2043.00 26.50 N90.00E	
2098.00 26.25 N0.00E	2098.00 26.25 N90.00E	
2154.00 25.25 N0.00E	2154.00 25.25 N90.00E	
2210.00 25.00 N0.00E	2210.00 25.00 N90.00E	

Tabela C.1 - Dados dos Poços na Direção Norte e Leste, e do Poço em Blowout

Trajatória 1 do Poço de Alfvio	Trajatória 2 do Poço de Alivio	Trajatória 3 do Poço de Alivio
P.M.(m) INC. DIR.	P.M.(m) INC. DIR.	P.M.(m) INC. DIR.
580 0.50 S10.00W	580 0.50 S10.00W	594 0.50 S10.00W
660 3.24 S10.00W	610 2.35 S10.00W	625 2.12 S21.18W
700 5.08 S10.00W	640 4.17 S10.00W	655 3.82 S21.81W
740 6.94 S10.00W	671 5.94 S10.00W	684 5.58 S21.46W
779 8.81 S10.00W	701 7.66 S10.00W	713 7.39 S20.82W
819 10.69 S10.00W	731 9.33 S10.00W	742 9.26 S20.06W
859 12.59 S10.00W	762 10.93 S10.00W	770 11.16 S19.24W
898 14.51 S10.00W	792 12.45 S10.00W	800 13.11 S18.39W
938 16.46 S10.00W	823 13.90 S10.00W	828 15.09 S17.53W
978 18.42 S10.00W	853 15.27 S10.00W	857 17.10 S16.67W
1017 20.40 S10.00W	884 16.56 S10.00W	885 19.12 S15.81W
1057 22.40 S10.00W	914 17.75 S10.00W	914 21.15 S14.95W
1096 24.43 S10.00W	945 18.86 S10.00W	942 23.18 S14.10W
1136 26.49 S10.00W	975 19.87 S10.00W	971 25.20 S13.26W
1176 28.56 S10.00W	1006 20.80 S10.00W	1000 27.19 S12.43W
1215 30.66 S10.00W	1036 21.63 S10.00W	1030 29.17 S11.61W
1255 32.78 S10.00W	1066 22.36 S10.00W	1059 31.10 S10.40W
1295 34.92 S10.00W	1097 23.01 S10.00W	1097 33.00 S10.00W
1340 36.80 S09.00W	1128 23.56 S10.00W	1158 33.90 S08.27W
1380 38.28 S07.00W	1158 24.02 S10.00W	1188 34.77 S06.72W
1420 39.56 S05.36W	1188 24.39 S10.00W	1217 35.60 S05.35W
1461 40.64 S04.60W	1219 24.68 S10.00W	1246 36.38 S05.16W
1500 41.51 S03.85W	1250 24.87 S10.00W	1275 37.11 S03.14W
1541 42.17 S03.39W	1280 24.98 S10.00W	1303 37.76 S02.28W
1582 42.63 S03.20W	1310 25.00 S10.00W	1331 38.34 S01.58W
1622 42.87 S03.86W	1341 28.53 S07.18W	1358 38.84 S01.02W
1662 42.90 S03.60W	1372 31.87 S05.19W	1386 39.25 S00.62W
1702 42.71 S04.19W	1402 34.97 S03.79W	1413 39.57 S00.37W
1742 42.32 S05.06W	1432 37.77 S02.82W	1440 39.79 S00.27W
1782 41.73 S06.24W	1463 40.26 S02.20W	1466 39.91 S00.32W
1822 40.93 S07.75W	1493 42.42 S01.85W	1493 39.93 S00.52W
1880 39.37 S10.76W	1524 44.25 S01.74W	1519 39.84 S00.88W
1919 38.11 S13.34W	1554 45.75 S01.85W	1545 39.65 S01.40W

Trajatória 1 do Poço de Alívio	Trajatória 2 do Poço de Alívio	Trajatória 3 do Poço de Alívio
P.M.(m) INC. DIR.	P.M.(m) INC. DIR.	P.M.(m) INC. DIR.
1958 36.70 S16.48W	1585 46.92 S02.14W	1571 39.36 S02.09W
1996 35.20 S20.28W	1615 47.78 S02.63W	1597 38.96 S02.96W
2034 33.65 S24.82W	1646 48.31 S03.31W	1622 38.46 S04.02W
2073 32.13 S30.22W	1676 48.54 S04.19W	1648 37.87 S05.29W
2111 30.75 S36.54W	1707 48.45 S05.30W	1673 37.20 S06.77W
2150 29.63 S43.77W	1737 48.05 S06.64W	1699 36.45 S08.48W
2210 28.70 S56.00W	1768 47.35 S08.25W	1724 35.63 S10.45W
2251 29.18 S63.29W	1798 46.35 S10.18W	1750 34.76 S12.68W
2295 29.74 S68.82W	1829 45.05 S12.49W	1775 33.86 S15.19W
2340 30.24 S73.01W	1859 43.48 S15.23W	1801 32.95 S18.01W
2387 30.62 S76.21W	1890 41.66 S18.51W	1827 32.05 S21.13W
2435 30.84 S78.63W	1920 39.65 S22.41W	1853 31.18 S24.56W
2484 30.89 S79.61W	1951 37.50 S27.06W	1880 30.37 S28.30W
2533 30.74 S81.74W	1981 35.33 S32.59W	1907 29.65 S32.32W
2583 30.39 S82.58W	2011 33.26 S39.08W	1934 29.04 S36.59W
2631 29.81 S82.99W	2042 31.43 S46.59W	1962 28.56 S41.07W
2679 28.97 S82.83W	2073 30.00 S55.00W	1991 28.22 S45.67W
2726 27.84 S82.33W	2103 29.55 S60.93W	2020 28.03 S50.35W
2771 26.35 S81.04W	2133 29.40 S65.69W	2050 28.00 S55.00W
2814 24.44 S78.74W	2164 29.41 S68.93W	2100 28.00 S55.00W
2845 22.70 S76.00W	2194 29.48 S70.59W	2148 28.00 S55.00W
	2225 29.53 S70.27W	2178 28.75 S54.42W
	2255 29.59 S68.34W	2208 29.38 S54.19W
	2286 29.71 S64.83W	2237 29.88 S54.33W
	2316 30.00 S60.00W	2265 30.21 S54.82W
	2347 28.35 S58.76W	2294 30.39 S55.66W
	2377 26.93 S57.84W	2322 30.40 S56.82W
	2407 25.84 S57.53W	2351 30.26 S58.28W
	2438 25.16 S57.84W	2381 30.00 S60.00W

Tabela C.2 - Dados das Trajetórias do Poço de Alívio

	Erro Relativo a profundidade $\varepsilon(10^{-3})$	Erro devido o Desalinhamento ΔI_m (graus)	Erro da Inclinação Verdadeira ΔI_{10} (graus)	Erro de Referência ΔC_{10} (graus)	Erro devido a Magnetização da Coluna ΔC_{20} (graus)	Erro do Compasso do Giroscópio ΔC_{30} (graus)
Registro com o Giroscópio de Alta Qualidade	0.5	0.03	0.2	0.1	-	0.5
Registro com Giroscópio de Baixa Qualidade	2.0	0.2	0.5	1.0	-	2.5
Registro Magnético com Alta Qualidade	1.0	0.1	0.5	1.5	0.25	-
Registro Magnético com Baixa Qualidade	2.0	0.3	1.0	1.5	5.0	-
Peso	1	1	$\sin I$	$\sin I \sin A$	$\sin I \sin A$	$(\cos I)^{-1}$

Tabela C.3 - Valores Típicos para os Erros Medidos