

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

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Manoel Tavares
Dória e aprovada
pela comissão julgadora em 25/10/1996.


ORIENTADOR

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

DETERMINAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES NA VAZÃO
DE RETORNO PROVOCADAS PELO MOVIMENTO
DE *HEAVE* EM UNIDADES FLUTUANTES DE PER-
FURAÇÃO.

Autor : Manoel Tavares Dória
Orientador : Dr. Celso Kazuyuki Morooka

Outubro de 1996

D733d

31630/BC



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	TI UNICAMP
	D 733 d
V	Ex.
T. MENS BC/	3,1630
PROD.	28/1/97
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	16/09/97
N.º CPD	

CM-00100563-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D733d

Dória, Manoel Tavares

Determinação das flutuações na vazão de retorno provocadas pelo movimento de *heave* em unidades flutuantes de perfuração / Manoel Tavares Dória.-- Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Celso Kazuyuki Morooka.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica .

1. Vazão - Medidores de. 2. Medidores de fluxo. 3. Poços de petróleo - Fluidos de perfuração. 4. Poços de petróleo - Perfuração. 5. Plataformas de perfuração. 6. Engenharia do petróleo - Métodos de simulação. 7. Controle automático. 8. Reologia. I. Morooka, Celso Kazuyuki. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

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

A dissertação “ Determinação das Flutuações na Vazão de Retorno provocadas pelo Movimento de *Heave* em Unidades Flutuantes de Perfuração” elaborada por Manoel Tavares Dória 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, 25 de Outubro de 1996.

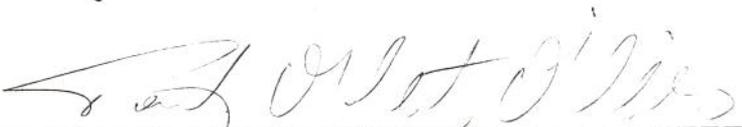
Banca Examinadora



Celso Kazuyuki Morooka, Ph.D.



João Carlos Ribeiro Plácido, Ph.D.



Paulo Roberto Ribeiro, Ph.D.

Para meus pais,

Manoel

e

Rosa.

Para minha esposa,

Maria Assunção.

Para minha filha,

Rosa Marina.

Agradecimentos

Ao Dr. Celso Kazuyuki Morooka, pela dedicação, paciência, bom relacionamento e permanente incentivo durante a realização deste trabalho.

À Maria Assunção, pelo auxílio na elaboração dos programas em linguagem FORTRAN.

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 durante os dois anos de convivência.

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

Aos colegas da PETROBRÁS/DPSE, pela presteza na obtenção dos dados monitorados a bordo do navio sonda NS-14.

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

RESUMO

A detecção rápida de um ganho de fluido da formação para dentro do poço, conhecido como influxo, é uma consideração chave para a segurança das equipes e dos equipamentos de uma sonda de perfuração, assim como do próprio poço. Muitos influxos são detectados ainda no seu início através do parâmetro diferencial de vazão, que é a diferença entre a vazão de retorno e a vazão de injeção do poço que está sendo perfurado.

Medidas de vazões precisas são, portanto, de importância crucial para os sistemas de detecção de influxos. O movimento de *heave* de uma sonda flutuante, entretanto, causa grandes perturbações nas medições da vazão de retorno. Através dos anos, vários sistemas foram desenvolvidos numa tentativa de minimizar este problema.

Neste trabalho, é apresentada uma nova abordagem para se quantificar estas variações com o objetivo de se obter uma melhor indicação do valor do diferencial de vazão, por meio dos registros da vazão de injeção, da vazão de retorno e do movimento de *heave* monitorados em tempo real em um navio sonda.

Um estudo detalhado do estado da arte é apresentado e sugestões para futuras pesquisas são fornecidas.

ABSTRACT

Early detection of fluid influx from the formation, generally known as a “kick”, is a major concern for the safety of the crew and rig equipment, and for the well itself. Many kicks have been detected at its very beginning by the delta flow parameter, which is simply the return mud flow rate minus the circulating rate.

Accurate flow measurements in this case are of great importance for the kick detection systems. Floating rig heaving causes large instantaneous variation in flow-out. Various methods have been investigated as an attempt to overcome this problem.

A new approach is presented in order to obtain a better delta flow measurement, by means of records of pumping, returning rates and heaving as well, monitored on a drill ship.

A comprehensive study of the state of art is presented and suggestions for future research is furnished.

CONTEÚDO

Página

1-INTRODUÇÃO.....	01
2-MÉTODOS DE DETECÇÃO DE INFLUXOS -	
O ESTADO DA ARTE.....	04
2.1-Métodos Convencionais de Detecção de Influxos.....	05
2.1.1-Volume nos Tanques de Lama.....	05
2.1.2-Volume nos Tanques de Manobra.....	07
2.1.3-Diferencial de Vazão	08
2.2-Métodos Que Utilizam Novas Técnicas para	
Detecção de Influxos.....	12
2.2.1-Diferencial de Vazão com Medidores de Alta Precisão	12
2.2.1.1-Vazão de Injeção.....	12
2.2.1.2-Vazão de Retorno.....	14
2.2.2-Aplicação de Pulsos de Ultra-som para Detecção de	
Gás no Anular.....	17
2.2.2.1-Método Acústico baseado nos Pulsos Gerados pelas	
Bombas de Perfuração	17
2.2.2.2-Método Acústico por Atenuação e Ângulo de Fase	20

2.2.2.3-Método Acústico por Ressonância	21
2.2.2.4-Método de Medição da Resistividade da Lama	24
2.3-Sistemas Computacionais para Detecção de Influxos ...	25
3-SISTEMAS DE DETECÇÃO DE INFLUXOS EM	
SONDAS FLUTUANTES	28
3.1-O Problema da Vazão de Retorno em Sondas	
Flutuantes.....	29
3.2-Métodos para Detecção de Influxos Investigados.....	34
3.2.1-Sistemas Físicos-Mecânicos	34
3.2.2-Sistemas Computacionais e Eletrônicos	37
3.3-Método Proposto.....	38
3.3.1-Equacionamento do Método	39
3.3.2-Determinação de $Q(t)$	40
3.4-Dados de Campo	41
3.4.1-Sistema de Medição de Vazões	41
3.4.2-Sistema de Medição do <i>Heave</i>	41
3.4.3-Informações Adicionais	42
4-RESULTADOS	44
5-CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	52
BIBLIOGRAFIA.....	54

APÊNDICES

APÊNDICE A-Resposta da Dinâmica de Estruturas Flutuantes	
Submetidas ao Estado do Mar - Determinação do	
Movimento de <i>Heave</i>.....	58
APÊNDICE B-Amostra dos Dados de Vazão de Injeção e de Retorno	
Coletados na Unidade de <i>Mud Logging</i> Instalada no	
Navio Sonda <i>Discoverer Seven Seas</i> (NS-14)	62
APÊNDICE C-Amostra dos Dados do Movimento Vertical (<i>Heave</i>)	
do Navio Sonda NS-14 Adquiridos através dos	
Registros Decodificados do seu Sensor de <i>Heave</i>	63
APÊNDICE D-Resultado dos Valores de Vazão de Retorno do	
Método Proposto (Vazão Simulada) Determinados	
a partir do Monitoramento do Movimento de <i>Heave</i>	
do Navio Sonda NS-14	64

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2-1. Medidor Sônico do Nível de Fluido nos Tanques de Lama.....	06
2-2. Esquema do Diferencial de Vazão	08
2-3a. Esquema do Medidor de Vazão de Retorno Tipo Pá	10
2-3b. Localização do Medidor de Vazão Tipo Pá no NS-14.....	10
2-4. Medidor de Vazão de Retorno do Tipo Rolete Flutuante	17
2-5. Comparação entre os Métodos de Detecção de Influxos.....	19
2-6. Interferômetro Sônico.....	21
2-7. Definição de Frequência Central e Largura da Banda.....	22
3-1. Os Movimentos de uma Estrutura Flutuante no Mar	28
3-2. Junta Telescópica Convencional.....	29
3-3. Perturbação no Fluxo Induzida pelo <i>Heave</i>	30
3-4. “Tolerância ao Influxo” versus Volume Ganho	33
3-5. Junta Telescópica com CVR.....	34
3-6. <i>Riser</i> com o Topo Modificado	36
3-7. Esquema do Método Proposto	38
3-8. Sensor de <i>Heave</i> de um Navio Sonda.....	42
4-1. Registros de <i>Heave</i> e de Vazão de Retorno	44
4-2. Valores de Vazão de Retorno Simulada	46
4-3. Valores de Vazão de Retorno do Medidor Tipo Pá	46

4-4. Comparação entre os Valores Normalizados da Vazão	
de Retorno Medida e os da Vazão de Retorno Simulada.....	47
4-5. Detecção de uma Perda de Circulação no Poço	49
4-6. Poço em Situação de Perfuração Normal.....	50
4-7. Detecção de um Influxo no Poço	51
A-1. Sistema Mola-Massa Amortecido.....	58
A-2. Movimento de <i>Heave</i> de um Corpo Flutuante.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
2-1. Comparação do Desempenho dos Medidores de Vazão de Injeção	13
2-2. Comparação do Desempenho dos Medidores de Vazão de Retorno	16
2-3. Sensibilidade dos Sensores de Medição de Volume nos Tanques de Lama	26

NOMENCLATURA

Alfabeto Romano

a	amplitude da onda do mar
A	coeficiente de massa adicional
B	coeficiente da força de amortecimento
C	coeficiente da força restauradora
c	velocidade de propagação do som no fluido
$\frac{dV}{dt}$	quantificação do efeito da variação do movimento de <i>heave</i> sobre a vazão de retorno
F(t)	força harmônica de excitação
F _a	amplitude da força externa de excitação
f(t)	amplitude da onda acústica
G	ganho (atenuação ou amplificação)
g(t)	sinal recebido dos pulsos
L	distância entre as placas do interferômetro sônico
m	massa de um corpo flutuante
Q _i (t)	vazão de injeção medida
Q _M (t)	vazão simulada
Q _R (t)	vazão de retorno medida
Q _T (t)	variações de fluxos na vazão de retorno devido ao efeito do movimento de <i>heave</i>

$Q_v(t)$	somatório das variações de vazões que ocorrem durante a operação de perfuração de um poço
R_1	resistividade do fluido de perfuração
S	área da seção transversal do anular entre o <i>riser</i> e a coluna de perfuração
t	tempo
U	amplitude máxima do pulso
$V(t)$	volume no interior do anular entre o <i>riser</i> e a coluna de perfuração
V_{tg}	fração volumétrica de gás
w	freqüência da onda do mar
y	elevação da onda do mar
\dot{y}	primeira derivada da elevação da onda do mar
\ddot{y}	segunda derivada da elevação da onda do mar
z	movimento de <i>heave</i> de um corpo flutuante
\dot{z}	primeira derivada do movimento de <i>heave</i>
\ddot{z}	segunda derivada do movimento de <i>heave</i>
z_a	amplitude do movimento de <i>heave</i>
z_o	valor do movimento de <i>heave</i> na situação inicial
$z(t)$	movimento do <i>heave</i> em função do tempo
z_1	solução transiente ou função complementar
z_2	solução permanente ou solução particular

Alfabeto Grego

α	fração volumétrica do gás
β	atenuação do som no fluido
Δf	diferença entre a frequência central de dois picos de ressonância adjacentes
ΔQ	diferencial de vazão
ΔR_1	variação de resistividade do fluido de perfuração
δf	largura da banda do pico de ressonância
δQ	ganho ou perda de fluido de perfuração dentro do poço
ϕ	ângulo de fase entre o movimento vertical do corpo e a força externa atuando sobre ele
φ	ângulo de fase do sinal de pulso recebido
Ω	frequência angular do gerador de pulso
$\Omega.m$	resistividade do fluido de perfuração

SISTEMA MÉTRICO INTERNACIONAL E FATORES DE CONVERSÃO

bbbl	* 1.589 873	E-01	= m ³
bbbl/min	* 2.649 789	E-03	= m ³ /s
ft ou pé	* 3.048	E-01	= m
ft ²	* 9.290 304	E-02	= m ²
ft ³	* 2.831 685	E-02	= m ³
gal	* 3.785 412	E-03	= m ³
gal/min ou gpm	* 6.309 020	E-02	= l/s
in ou pol.	* 2.54	E+01	= mm
lbm ou lb.	* 4.535 924	E-01	= kg
lbm/gal ou ppg	* 1.198 264	E+02	= kg/m ³
psi ou lb./pol ²	* 6.894 757	E+00	= kPa
°F	* (°F-32)/1.8		= °C

1- INTRODUÇÃO

Durante as duas últimas décadas foi observado na indústria do petróleo um apreciável esforço tecnológico na exploração de petróleo em novas fronteiras, tais como: perfuração de jazidas mais profundas, perfuração em águas profundas, perfuração de poços horizontais, o desenvolvimento da perfuração de poços delgados e a perfuração sub-balanceada.

É inerente ao ritmo destas atividades, principalmente em relação a última, o aumento dos riscos da perfuração dos poços no que se refere à ocorrência de influxos (entrada de fluidos da formação para dentro do poço), e neste caso, muito pouco do desenvolvimento tecnológico observado tem sido aplicado às técnicas de detecção destas anomalias.

Os sistemas de detecção de influxos, até então utilizados nas sondas, eram os medidores tradicionais e de pouca precisão. O aumento do volume de lama nos tanques eram detectados com sensores do tipo bóia. E para utilização do diferencial de vazão (diferença entre a vazão de retorno e a vazão de injeção) eram as vazões de injeção e de retorno medidas através de contadores de velocidade de bombeio e de medidores do tipo pá respectivamente.

No final da década passada, as companhias de exploração de petróleo passaram a aplicar recursos na pesquisa e no desenvolvimento de sistemas e dispositivos de detecção de influxos mais precisos, confiáveis e mais rápidos.

Nesta nova etapa, começaram a aparecer novos sistemas baseados em princípios físicos diferentes dos usuais, como por exemplo o emprego da análise acústica para constatar a presença de gás no fluido do espaço anular (estudo das variações da velocidade de propagação do som num meio líquido), bem como a utilização de sensores mais precisos em substituição aos tradicionais [12].

O problema da detecção de influxos em unidades flutuantes tem motivado esforços de pesquisadores no sentido de se obter, principalmente,

medidas da diferença entre vazão de retorno e vazão de injeção, e medidas de volume nos tanques de lama com o mínimo de efeito dos movimentos causados pelo estado do mar nas estruturas flutuantes de perfuração, em especial, a parcela do movimento de *heave*.

A detecção rápida de um influxo de fluido da formação para o poço é uma consideração importante para a segurança das equipes da sonda. A primeira boa indicação de um influxo é dada pelo diferencial de vazão do poço que está sendo perfurado. Medições precisas de vazões são, portanto, de importância crucial nas operações de perfuração. O movimento de *heave* de uma sonda flutuante, entretanto, produz indesejáveis variações instantâneas na vazão de retorno.

Neste trabalho é proposto um método para quantificar estas perturbações, com o objetivo de se obter uma indicação do diferencial de vazão entre a vazão de retorno, com os efeitos do movimento de *heave* removidos, e a vazão de injeção, para se detectar e confirmar a presença de um ganho ou perda de fluido dentro do poço com maior confiança. Esta abordagem é fundamentada numa análise em tempo real dos dados obtidos diretamente de uma sonda flutuante operando com uma unidade de *mud-logging* (unidade de monitoração de parâmetros de perfuração e de geologia) a bordo. Para compreensão da presente técnica de análise são comparados os valores de vazão de retorno simulados e os correspondentes valores de vazão de retorno medidos na sonda.

Os valores simulados são derivados de um método que utiliza os dados de movimento de *heave* monitorados no navio sonda. Qualquer indicação de desvio apresentado no diferencial de vazão entre os valores medidos e os valores estimados, que ultrapasse uma determinada faixa limite de segurança, será entendido como uma ocorrência de anormalidade no poço.

Com este propósito, registros do movimento de *heave*, de vazão de retorno e de vazão de injeção foram monitorados no navio sonda *Discoverer Seven Seas* (NS-14) em operação na Bacia de Campos, no Estado do Rio de Janeiro. A partir destas monitorações, os valores da vazão de retorno medida e os

da vazão de retorno simulada foram normalizados e comparados para verificar a eficácia do método proposto com o propósito de se otimizar o desenvolvimento do sistema de detecção de influxos.

O trabalho é complementado com ilustrações de situações hipotéticas durante a operação de perfuração de um poço. Estas situações compreendem: a perfuração com perda de circulação, a perfuração normal e a perfuração com uma ocorrência de um influxo.

No item 2 é apresentado o estado da arte dos métodos, técnicas e medidores dos sistemas para detecção de influxos utilizados até o momento.

Os métodos para detecção de influxos em unidades flutuantes e o método proposto, incluindo-se a fase de coleta de dados, são descritos no item 3.

Os resultados com suas análises são apresentados no item 4, e finalmente, as conclusões com as recomendações para trabalhos futuros são apresentados no item 5.

2- MÉTODOS DE DETECÇÃO DE INFLUXOS - O ESTADO DA ARTE

Durante a operação de perfuração de poços de petróleo, a pressão hidrostática exercida pelo fluido de perfuração no fundo do poço está normalmente em equilíbrio com a pressão da formação, com a finalidade de não criar condições de invasão do fluido do reservatório para o poço, como por exemplo, o gás. Quando tal equilíbrio é rompido, surgem algumas indicações na superfície, tais como: alteração na vazão de retorno, pressão no tubo bengala e elevação do nível de lama nos tanques. Estas indicações necessitam ser rapidamente analisadas a fim de se detectar a ocorrência ou não de um ganho ou de uma perda de fluido. Quanto menor for o intervalo de tempo entre o influxo e a detecção, menor será o volume do fluido invasor, conseqüentemente, menor será a máxima pressão no ponto de menor resistência ao gradiente de fratura ao longo do poço. Esta detecção rápida de um influxo permite otimizar as operações de controle do poço.

Como um influxo inesperado de gás ou de óleo pode ocorrer a qualquer momento, operações de perfuração permanecem ainda muito arriscadas. O perigo de não se detectar rapidamente um influxo cresce com: o aumento da profundidade média dos poços, a perfuração em lâmina d'água profunda, a perfuração de poços delgados, a perfuração de poços com alta temperatura e pressão e com a tendência de se perfurar com fluidos de perfuração menos denso.

Embora a maioria dos influxos sejam conduzidos sob controle, ocasionalmente, uma erupção descontrolada pode resultar em perdas de milhões de dólares, assim como, as mais sérias conseqüências de danos e perdas humanas.

De acordo com *Shields e Taylor* [12], um sistema de detecção de influxos deve apresentar as seguintes características básicas:

- apresentar respostas rápidas a qualquer anomalia no poço no que se refere a ganhos ou perdas de vazão e de volume;

- não emitir alarmes falsos que levariam o sistema ao descrédito pelo usuário;
- funcionar independentemente da situação de bombeio e do tipo de operação na sonda: perfurando, manobrando, conectando, perfilando, descendo ou recuperando o barrilete de testemunhagem;
- ser capaz de identificar o tipo do fluido invasor;
- não depender do tipo de fluido de perfuração utilizado.

2.1- Métodos Convencionais de Detecção de Influxos

2.1.1- Volume nos Tanques de Lama

Uma anomalia dentro do poço pode ser notada pela discordância entre os valores de volumes calculados a partir das capacidades volumétricas dos: tanques e das linhas de fluxos do fluido de perfuração, geometria do poço, etc., e os valores de volumes medidos nos tanques de lama [12].

A grande maioria das sondas ainda utilizam bóias como sensores de nível dos tanques, porém, hoje em dia já se nota com certa frequência o uso de sensores emissores-receptores de ultra-som, que podem detectar com facilidade, devido a sua boa sensibilidade, pequenas variações na altura do líquido nos tanques. O modelo ilustrado na Figura 2-1, é o equipamento utilizado pela *Anadrill-Schlumberger* no navio sonda *Discoverer Seven Seas* (NS-14) que está preparado para detectar um ganho ou perda de 4 bbl nos tanques de lama e emitir um alarme inicial para chamar a atenção dos operadores.

Este medidor consiste de um componente emissor-receptor ultra-sônico e de um módulo eletrônico. O sistema mede a altura do fluido nos tanques através dos pulsos ultra-sônicos, primeiro emitido pelo componente emissor e depois recebido os pulsos refletidos pela superfície do fluido. O módulo eletrônico executa as seguintes funções:

- Envia voltagem para o sensor
- Recebe o sinal sônico e a temperatura ambiente em torno do sensor
- Avalia estatisticamente o sinal para identificar o eco
- Corrige a velocidade de retorno do eco à variações na temperatura
- Calcula a distância medida baseado no tempo de trânsito

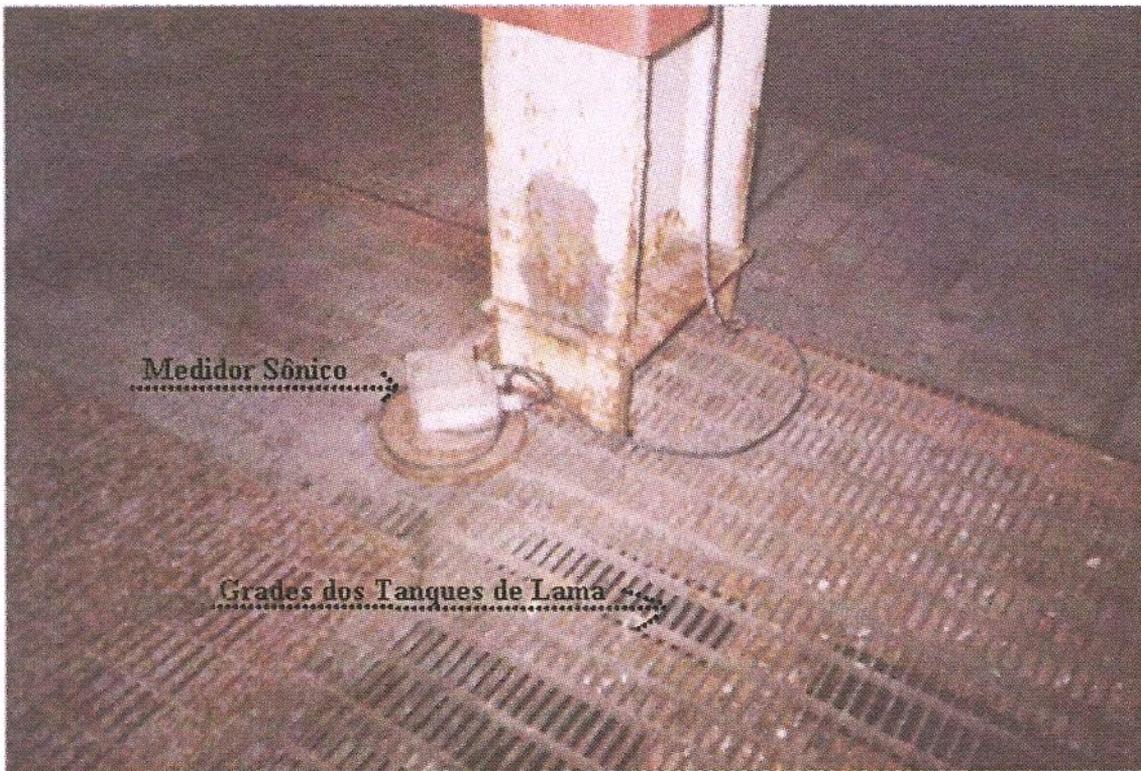


Figura. 2-1. Medidor Sônico do Nível de Fluido nos Tanques de Lama.

A cabine de *mud-logging* instalada no navio sonda utiliza vários sensores de ultra-som distribuídos pelos tanques de lama. Desta maneira o sistema oferece um valor mais próximo do real através do valor médio de suas leituras. Com isso, a confiabilidade do mesmo não fica prejudicada pelas oscilações no nível dos tanques de lama, devido aos movimentos da embarcação. Estes movimentos são provocados pela perturbação do meio ambiente, tais como:

ventos, ondas e correntes marítimas, que dificultam uma detecção rápida de uma anomalia operacional durante a perfuração de um poço.

2.1.2- Volume nos Tanques de Manobra

Devido às suas dimensões reduzidas, o tanque de manobra torna-se mais sensível e mais preciso às medições de nível. A variação na altura é maior quando comparada a de um tanque grande para uma mesma variação de volume. Isto provoca uma redução no erro relativo de medição. Também, devido à sua pequena área interna, serão menores os efeitos dos movimentos de *roll* e de *pitch* de uma sonda flutuante na sua superfície líquida [12].

2.1.3- Diferencial de Vazão

Método que serve para indicar alguma anomalia dentro do poço, desde que exista uma diferença entre as medições de vazão de injeção e de vazão de retorno. Um esquema deste método está ilustrado na Figura 2-2.

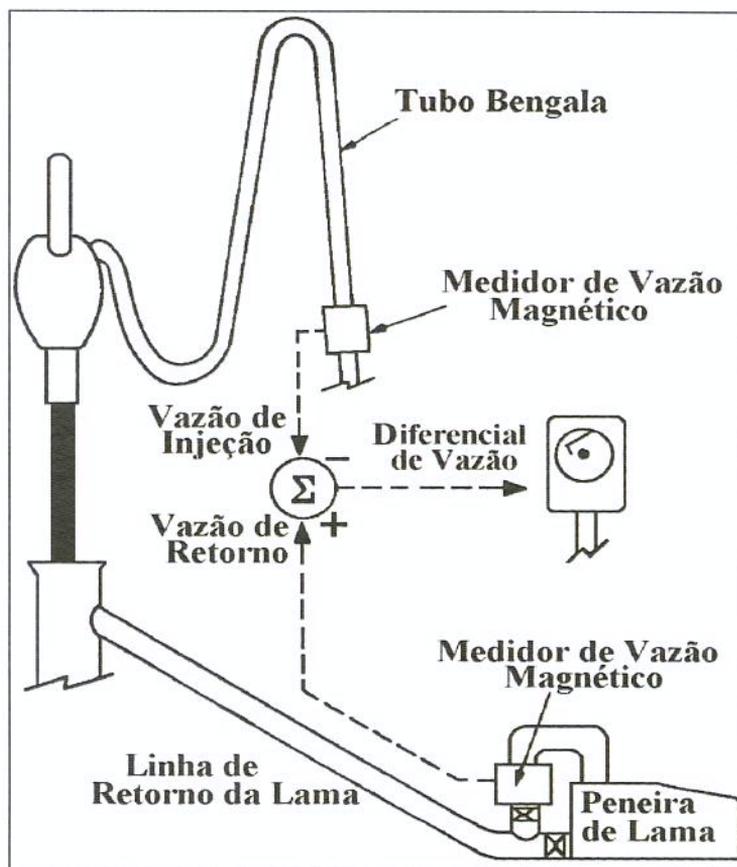


Figura. 2-2. Esquema do Diferencial de Vazão [20].

A vazão de injeção é estimada através do produto da velocidade da bomba em cursos por minuto (spm), pela sua capacidade volumétrica (em galões por curso) e pela sua eficiência volumétrica. Essa eficiência varia com o desgaste do engastamento e com a pressão de descarga da bomba, além da composição do fluido de perfuração e outros fatores. Portanto, é muito difícil determinar com precisão o valor da mesma. Na prática, adota-se um valor proporcional a vida útil da bomba de lama em questão. Devido à esta imprecisão, erros de até 10% podem ser produzidos nos valores da vazão de injeção [12].

A pior situação ocorre na medição da vazão de retorno, pois os medidores convencionais do tipo pá usados na linha de retorno, têm suas medidas influenciadas pela massa específica do fluido, viscosidade e altura do fluido dentro da linha.

Esses medidores empregam um arranjo de uma pá acoplada a uma mola que aciona um potenciômetro, conforme mostrado na Figura 2-3a. Este conjunto é montado sobre a parte superior da linha de retorno do fluido de perfuração, como evidenciado na Figura 2-3b. A pá é estendida para baixo até o fluxo, e é deslocada para cima quando sofre o impacto da massa do fluido. Esta deflexão é então calibrada para fornecer medidas de vazões de retorno. As maiores limitações desse tipo de medidor são:

- Fornecer os valores medidos de vazão em termos de percentagens da deflexão total da pá, ou seja, valores não absolutos de vazões.
- Apresentar os sinais captados da pá bastante dispersos devido ao transiente das ondas gerados na superfície da linha de retorno. Desta maneira, fica difícil qualquer calibração precisa do medidor.

Valores de até 15% de imprecisão foram obtidos por esses medidores [19]. Esta pobre precisão os descredenciam para serem utilizados na determinação do parâmetro diferencial de vazão. Como o instrumento requer contínua manutenção e calibração, na prática o que se obtém nas sondas, são valores de medidas de vazões com erros superiores a 20%.

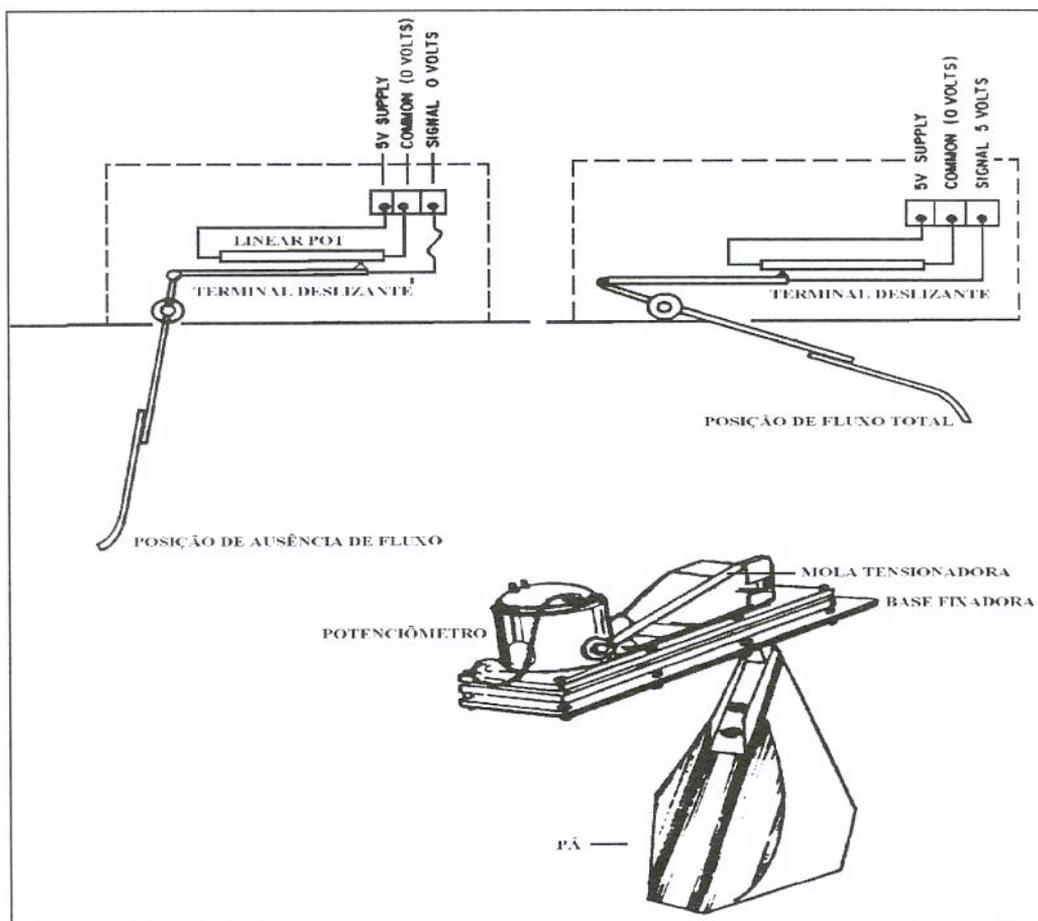


Figura. 2-3a. Esquema do Medidor de Vazão de Retorno Tipo Pá [1].

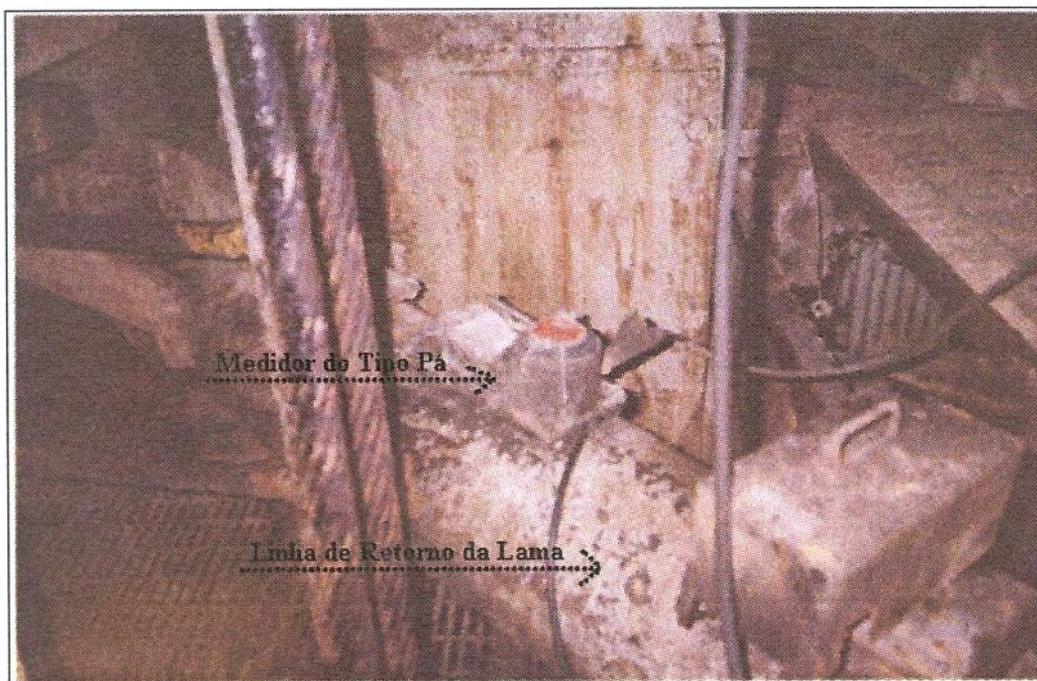


Figura. 2-3b. Localização do Medidor de Vazão Tipo Pá no NS-14.

Devido a estas limitações, estima-se que os valores das diferenças de vazão de injeção e retorno apresentam erros na faixa de 25% [12]. Para uma vazão de 1000 gpm (galões por minuto), por exemplo, isso representa um erro de 250 gpm. Estudos de *Orban et al.* [16], concluíram que é necessária uma precisão entre 25gpm e 50 gpm no diferencial de vazão para que seja possível se detectar um influxo no seu início. Isso significa que a precisão verificada nos medidores atuais deveria ser melhorada por volta de 10 vezes para que se tornassem confiáveis.

Além da limitação na precisão dos equipamentos, no caso da perfuração em unidades flutuantes, o próprio movimento da embarcação induz variações no diferencial de vazão que dificultam a detecção de uma situação de anormalidade dentro do poço, conforme já mencionado anteriormente.

2.2- Métodos Que Utilizam Novas Técnicas para Detecção de Influxos

2.2.1- Diferencial de Vazão com Medidores de Alta Precisão

Uma vez que os equipamentos convencionais utilizados para a avaliação do diferencial de vazão não são suficientemente precisos, a indústria procurou desenvolver medidores apropriados para as medições requeridas.

Os medidores de vazão de injeção e de retorno trabalham sob condições diferentes. Na injeção existe geralmente uma pressão alta, e toda a seção está preenchida com o fluido de perfuração. No retorno a pressão é atmosférica, e a seção pode estar parcialmente preenchida. Cada situação, portanto, requer um tipo específico de sensor [12].

2.2.1.1- Vazão de Injeção

Uma característica importante no medidor de vazão é que ele não interfira no escoamento, ou seja, não obstrua a seção, pois as características do fluido e do escoamento produzem uma condição de alta abrasividade que erode com muita rapidez qualquer componente intrusivo.

Outra característica desejável é que o medidor possa ser utilizado com qualquer tipo de fluido, independentemente de sua condutividade e teor de sólidos em suspensão.

Os medidores não intrusivos, normalmente empregados, utilizam-se de sensores do tipo ultra-sônicos ou eletromagnéticos. Os medidores ultra-sônicos mais comuns fazem uso do efeito *Doppler* para avaliar a velocidade com que o fluido está escoando. Essas medições são dependentes das características do fluido. Já os medidores eletromagnéticos baseiam-se na lei de indução eletromagnética de *Faraday*, que relaciona a força eletromotriz induzida em um condutor com a sua velocidade quando o mesmo se desloca através de um campo magnético. Assim, devido a este princípio físico, esses medidores só podem ser usados em fluidos condutivos. Portanto, não se aplicam a situações em que fluidos a base óleo estejam sendo utilizados na perfuração de poços [12].

Codazzi et al. [5], apresentaram um medidor de vazão que pode ser usado indiferentemente dos fluidos serem condutivos ou não. Este medidor universal, como é chamado, utiliza-se de princípios distintos para cada tipo de fluido: eletromagnético para fluidos condutivos e correlação cruzada eletrostática para fluidos não condutivos. Este último se aplica a fluxo turbulento, pois se baseia na velocidade de escoamento de perturbações no fluido (devido a turbulências ou a presença de gás no fluido). O princípio de operação a ser usado é definido automaticamente pelo próprio medidor, que avalia continuamente a impedância do fluido no duto. Esse medidor pode trabalhar sob pressões de até 15000 psi com precisão de 1% para vazões de até 1260 gpm em uma linha de 3 pol. (7,6cm).

Baseado em testes de campo, *Schafer et al.* [19] realizaram um estudo comparativo entre vários medidores (Contador de Cursos da Bomba, Contador de Rotação da Bomba, Medidor Eletromagnético e o Medidor Ultra-sônico). Resultados de desempenho dos mesmos, são apresentados na Tabela 2-1 com a inclusão do Medidor Universal de *Codazzi et al.* a este grupo.

Tab. 2-1. Comparação do Desempenho dos Medidores de Vazão de Injeção

	Contador de Cursos	Contador de Rotação	Medidor Eletromagnético	Medidor Ultra-sônico	Medidor Universal
Precisão	10%	5%	1%	1%	1%
Instalação	Fácil	Difícil	Aceitável	Fácil	Aceitável
Tipo de Fluido	Indiferente	Indiferente	Só a Base Água	Indiferente	Base Água e Óleo
Confiabilidade	Boa	Boa	Ótima	Regular	Boa
				Novas Tecnologias	
				Recomendados para medir Diferencial de Vazão	

De acordo com estes dados, poderia se concluir que o medidor eletromagnético é o que apresenta o melhor desempenho, mas o seu alto custo e sua limitação a fluidos condutivos, pode tornar seu uso rotineiro impraticável.

De fácil instalação e de ótima precisão, o medidor ultra-sônico de efeito *Doppler* também seria uma boa opção. Porém, por não apresentar uma confiabilidade satisfatória devido a imprecisões causadas por ruídos elétricos e mecânicos do ambiente da perfuração, sua utilização não é recomendada para uso em sondas.

Embora os contadores de cursos e de rotação das bombas de lama terem, ambos, boa confiabilidade em medir sua velocidade de bombeio, sua precisão é dependente da informação da eficiência volumétrica das bombas de lama. O contador de rotação apesar de ser mais acurado do que o de cursos, tem sua instalação limitada a determinado tipo de bomba.

O medidor universal parece ser, pelas suas características de testes, o que apresenta melhor desempenho.

2.2.1.2- Vazão de Retorno

Um dos meios de se medir a vazão de retorno, é através de medidores eletromagnéticos instalados numa linha de retorno modificada, de forma, a conter um tubo em forma de “U”. Desta maneira, o medidor pode ser instalado conforme apresentado por *Speers e Gehrig* [20]. Esta modificação é para se garantir o preenchimento da seção de escoamento, requisito básico para a utilização deste tipo de medidor de vazão. Conseqüência indesejável desta alteração é o acúmulo de cascalhos na parte baixa do tubo em “U”, ou seja, em cima do medidor instalado. Outro fator inconveniente deste sensor é a sua limitação de uso só para fluidos condutivos.

Uma outra opção para medição da vazão na linha de retorno foi proposta por *Orban et al.* [16], através de um medidor ultra-sônico que faz uso do efeito *Doppler*, aplicável a fluidos condutivos ou não. Quando acoplado a um medidor de vazão de injeção preciso (eletromagnético por exemplo), a precisão

testada deste instrumento fica em torno de 2%. Isso possibilita a detecção de um diferencial de vazão de 30 gpm, para uma vazão de injeção de 1200 gpm. Tal medidor, foi testado em campo para simulações de influxos, injeção contínua e verificação da vazão com bomba parada. Nos três casos, a detecção da anomalia ocorreu muito antes do que a realizada através do medidor de nível nos tanques.

Johnsen et al. [11] apresentaram um novo medidor de massa não intrusivo que se baseia em medições das forças geradas pelas variações da quantidade de movimento na linha de retorno. As medições destas forças são realizadas por meio de células de carga colocadas na linha de retorno modificada pelo acoplamento de uma extensão em forma de “J”, na qual, o fluido em escoamento cria um esforço em função da velocidade de escoamento. Durante testes no Mar do Norte, o novo medidor apresentou uma precisão de 1% para vazões de 1700 gpm utilizando-se fluidos de massa específica entre 8,5 ppg e 12,5 ppg. Em uma plataforma flutuante, o uso da técnica de filtragem dos dados foi adotada para se reduzir a sensibilidade do sensor às variações de vazão devido aos movimentos da embarcação.

Embora medidores suficientemente precisos para a avaliação do diferencial de vazão já existam, a utilização dos mesmos ficaria restrita a sondas de terra ou plataformas fixas, se não fosse desenvolvido um sistema que levasse em consideração as oscilações de vazão de retorno devido ao movimento de *heave* das sondas flutuantes. O sistema, apresentado por *McCann et al.* [15], monitora o movimento do *riser* e da junta telescópica e calcula o valor esperado de vazão de retorno. Com esse sistema, a sensibilidade para detecção do diferencial de vazão é de aproximadamente 50 gpm, conforme descrito no seu trabalho.

A Tabela 2-2, mostra comparativamente o desempenho de três medidores de vazão de retorno (o medidor de pá, o ultra-sônico e o de rolete flutuante) apresentado no trabalho de *Schafer et al.* [19]. Apesar de muito confiável qualitativamente, o medidor de pá, como citado anteriormente, não tem precisão suficiente para ser utilizado em medições de diferencial de vazão. O



medidor acústico mostra-se preciso e confiável, mas necessita de sensores adicionais para a determinação da temperatura do ar acima do nível do fluido, com a finalidade de corrigir as medições de vazão. O mesmo procedimento foi também adotado no trabalho de *Orban et al.*[16].

Tab. 2-2. Comparação do Desempenho dos Medidores de Vazão de Retorno

	Medidor de Pá	Medidor Ultra-sônico	Medidor de Rolete Flutuante
Precisão	10% - 15%	1% - 2%	1/2% - 2%
Instalação	Fácil	Fácil	Acceptável
Tipo de Fluido	Indiferente	Base Água e Óleo	Indiferente
Confiabilidade	Boa	Boa	Em Desenvolvimento
Novas Tecnologias			
Recomendados para medir Diferencial de Vazão			

O novo medidor de rolete flutuante (mostrado na Figura 2-4), apresenta os melhores resultados no que se refere à precisão, detectando alterações de vazão da ordem de 0,5 a 2%. Alguns problemas de ordem mecânica detectados no rolete, compromete a sua confiabilidade. Porém, a busca pela qualidade no seu desenvolvimento continua.

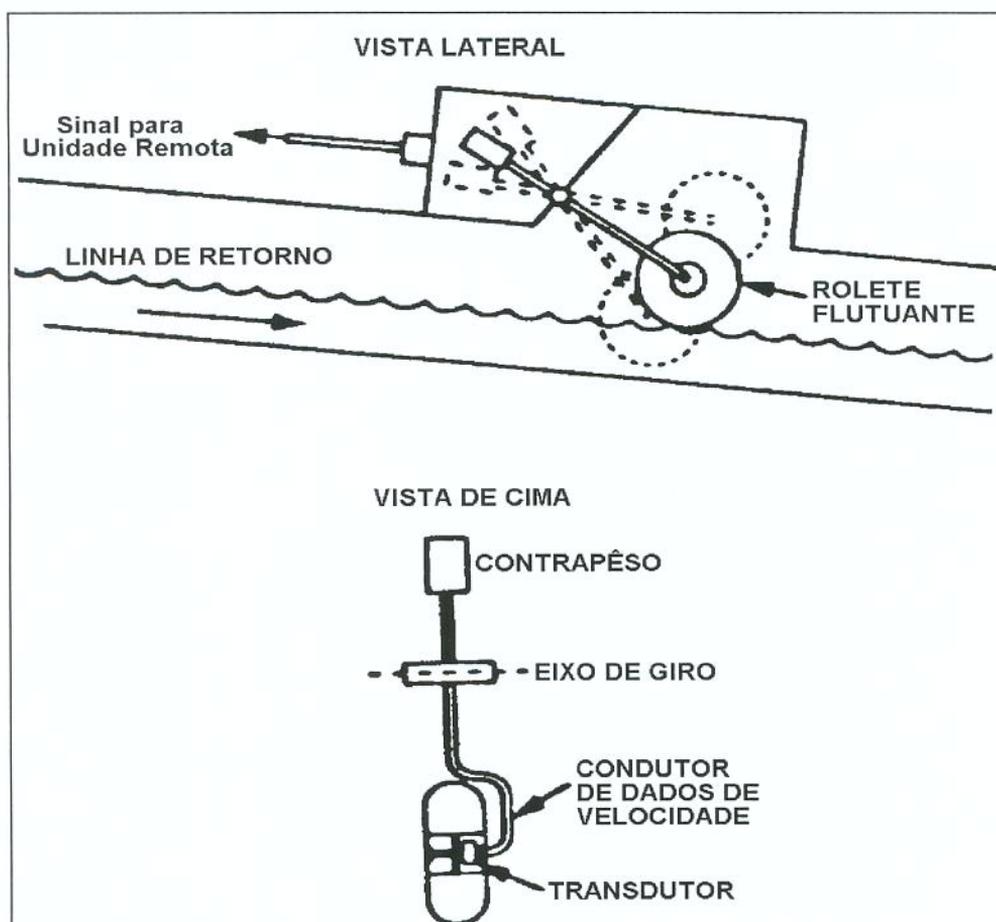


Figura.2-4. Medidor de Vazão de Retorno Tipo Rolete Flutuante [19].

2.2.2- Aplicação de Pulsos de Ultra-som para Detecção de Gás no Anular

Métodos novos para detecção de influxos utilizando-se princípios físicos e ferramentas de tecnologia avançada, foram apresentados por *Codazzi et al.* [6]. Alguns destes métodos serão ilustrados a seguir.

2.2.2.1- Método Acústico baseado nos Pulsos Gerados pelas Bombas de Perfuração

Esta metodologia está baseada na drástica redução da velocidade de propagação do som no fluido de perfuração em consequência da presença de gás dissociado. A fonte de emissão são os pulsos gerados pelo

movimento alternativo das bombas de lama. As ondas sonoras criadas neste processo propagam-se pela coluna de perfuração, atravessam o motor de fundo e o equipamento de MWD (equipamento que permite a medição de registros de inclinação e de direção do poço, sem parar a perfuração), caso estejam sendo utilizados, passam através dos jatos da broca e retornam à superfície pelo espaço anular.

São instalados dois detetores no sistema de circulação do fluido: o primeiro posicionado no tubo bengala e o segundo entre o BOP (conjunto de válvulas de acionamento hidráulico para a prevenção e controle de erupções) e a linha de retorno. Os dados coletados são analisados através do uso de um microcomputador.

Quando o gás começa a invadir o poço, observa-se um brusco aumento no tempo de trânsito do som. A presença da fase gasosa no espaço anular reduz abruptamente a velocidade de propagação do som, a qual nesta situação deve atravessar um meio mais compressível do que o fluido de perfuração. É então medido esta variação na velocidade de propagação.

A Figura 2-5 ilustra uma comparação entre esta metodologia e os métodos de aumento de volume nos tanques e do diferencial de vazão.

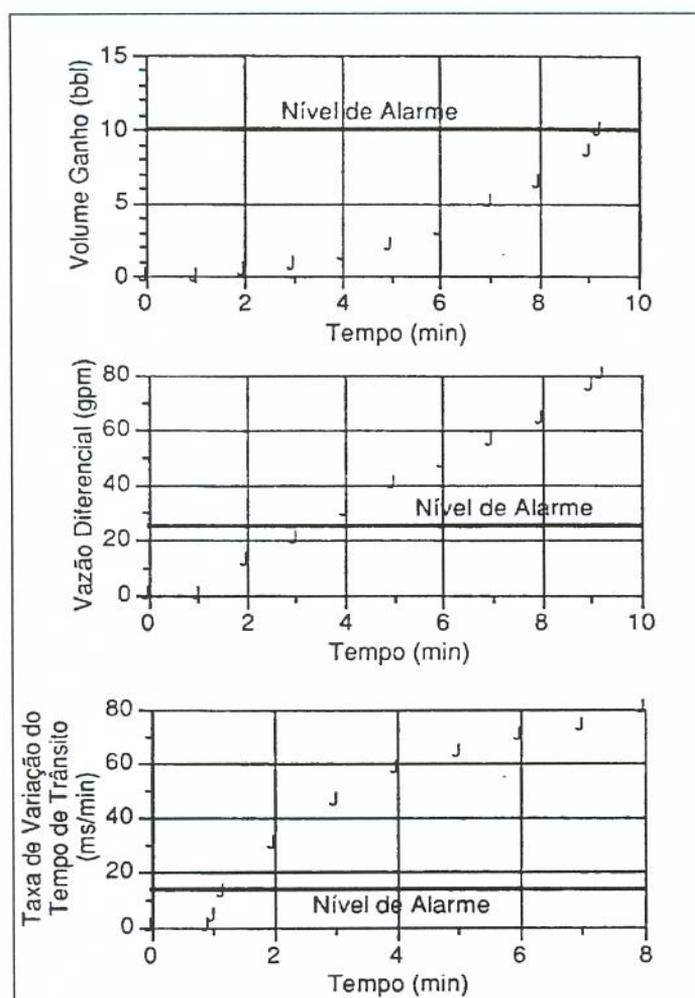


Figura. 2-5. Comparação entre os Métodos de Detecção de Influxos[12].

Observa-se na ilustração que este método acústico permite a detecção do influxo num intervalo de tempo duas vezes mais rápido do que por diferença entre as vazões e, quatro vezes mais rápido do que por aumento de volume nos tanques.

Em testes de campo realizados utilizando-se este tipo de sistema de detecção notou-se uma reduzida incidência de alarmes falsos. Comprovou-se também, que esta metodologia é capaz de detectar influxos de gás muito rapidamente. Com ganhos inferiores a 0,5 bbl verifica-se o disparo do alarme em alerta à equipe da sonda.

Limitação deste sistema de detecção na aplicação prática, restringe-se a situações em que o gás está dissociado, não sendo possível, neste caso, a identificação de influxos de água ou de óleo. Por outro lado, como

operacionalmente o sistema só funciona com o retorno do fluido à superfície, durante manobras com a coluna de perfuração este sistema fica inoperante [12].

2.2.2.2- Método Acústico por Atenuação e Ângulo de Fase

Segundo *Bryant et al.* [4], este método utiliza como canal de transmissão dos sinais enviados pelo MWD o próprio fluido de perfuração contido no interior da coluna de perfuração. Este sistema cria pulsações de ondas sonoras através do transmissor da ferramenta MWD. A informação é então transmitida por meio do uso de códigos binários de pulsos positivos de pressão gerados em multi-freqüência. A geração destes pulsos positivos provoca o aparecimento de pulsos negativos de pressão, com magnitude consideravelmente menor, que se propagam pelo anular do poço até a superfície. A ocorrência de um influxo de gás provoca modificações neste canal de transmissão, alterando o comportamento do fluido no anular.

Os pulsos de pressão enviados pelo MWD são constituídos de um sinal com uma freqüência máxima que corresponde ao dobro da freqüência mínima, algumas transmissões possuem ainda uma freqüência intermediária. O movimento destas ondas pode ser expresso por um movimento de onda de natureza periódica pela equação a seguir:

$$f(t) = U \text{ sen } (\Omega t) \quad (1)$$

onde:

$f(t) \Rightarrow$ amplitude da onda acústica [m]

$U \Rightarrow$ amplitude máxima do pulso [m]

$\Omega \Rightarrow$ freqüência angular do gerador de pulso [s^{-1}]

O sinal recebido pode ser expresso como:

$$g(t) = G U \text{ sen } (\Omega t - \varphi) \quad (2)$$

onde:

$G \Rightarrow$ ganho (atenuação ou amplificação)

$\varphi \Rightarrow$ ângulo de fase [graus]

$t \Rightarrow$ tempo [s]

Este método de detecção baseia-se na observação das variações no ganho, atenuação ou amplificação, e no ângulo de fase do sinal recebido no anular, próximo à superfície. Testes realizados em poços de treinamento para controle de influxos mostraram que estas variações devem ser monitoradas em pelo menos duas frequências de pulsação, para que a confiabilidade no método de detecção seja adequada.

Foi constatado nestes testes que esta metodologia é válida para detecção de gás dissociado (gás livre) em fluidos de perfuração à base d'água ou óleo. Entretanto, ainda não existe comprovação experimental da capacidade de detectar gás dissolvido (em solução) em fluido à base óleo. As simulações realizadas nos permitem concluir que o tempo decorrido desde o início da injeção de gás até a sua detecção, em média em torno de 4 minutos, é suficientemente pequeno a ponto de garantir o fechamento do poço sem que o volume de ganho chegue a cerca de 5 bbl [12].

2.2.2.3- Método Acústico por Ressonância

O interferômetro sônico, definido no trabalho de *Vestavik et al.* [22], é um dispositivo constituído de duas placas paralelas, conforme mostrado na Figura 2-6.

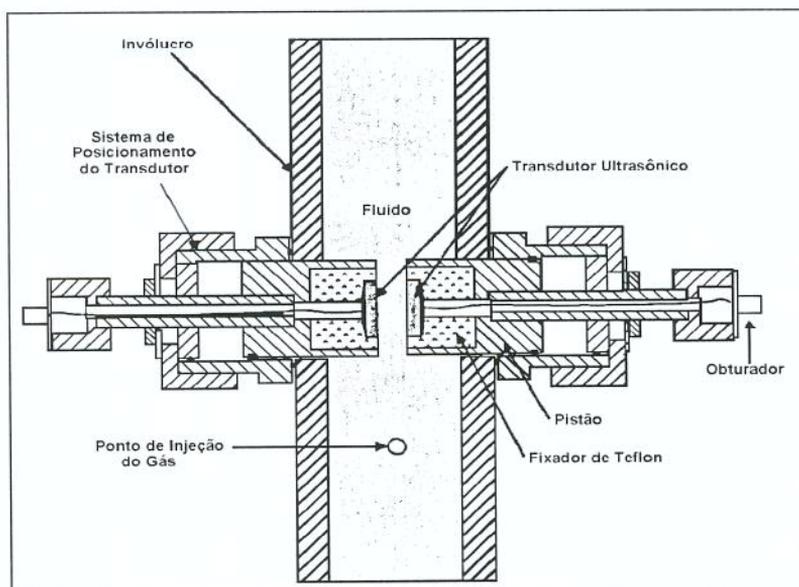


Figura. 2-6. Interferômetro Sônico [22].

Fundamenta-se o seu funcionamento na geração de ondas acústicas que se refletem entre as duas placas imersas no fluido. Para determinadas frequências, se a distância entre as placas for múltipla ou aproximadamente igual à metade do comprimento da onda sonora no meio fluido, ocorre ressonância. A velocidade de propagação do som e a constante de atenuação do fluido podem ser estimadas, através da medição da frequência central e da largura da banda do pico de ressonância por meio das equações (3) e (4). A Figura 2-7. esclarece o significado destes símbolos.

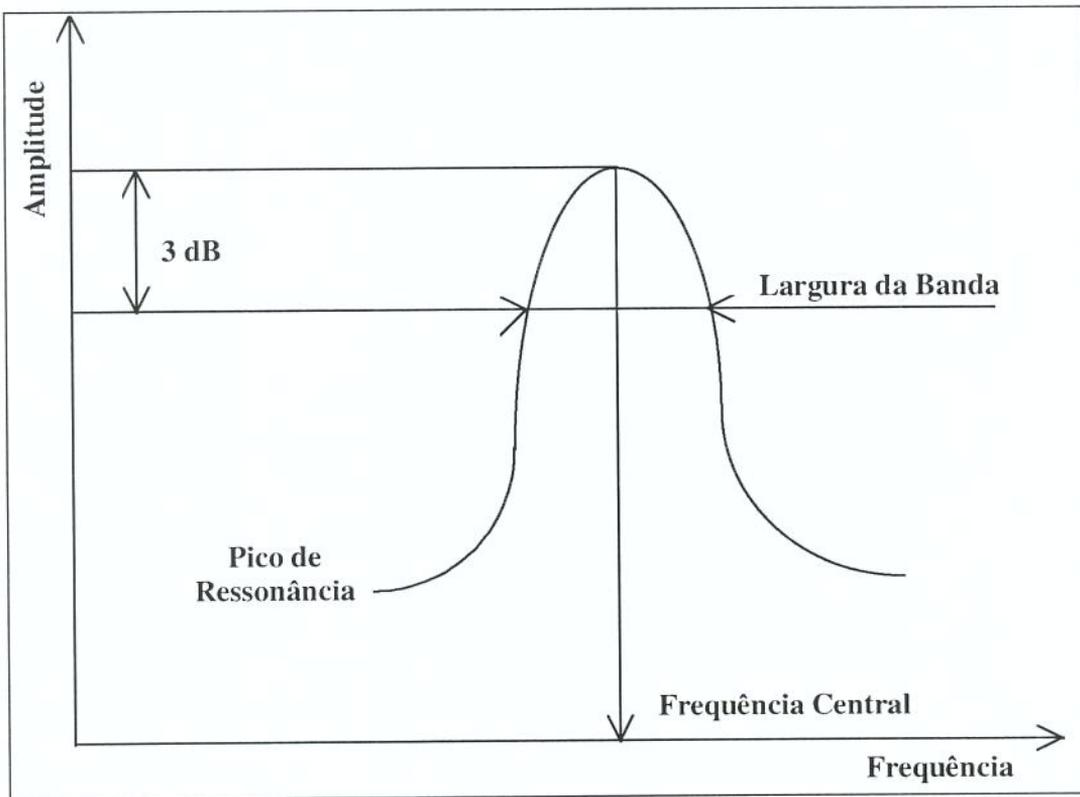


Figura 2-7. Definição de Frequência Central e Largura da Banda

$$c = 2 \cdot \Delta f \cdot L \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\pi \cdot \delta f}{c} \quad (4)$$

onde:

c \Rightarrow velocidade de propagação do som no fluido [m/s]

$\beta \Rightarrow$ atenuação do som no fluido [m^{-1}]

$L \Rightarrow$ distância entre as placas [m]

$\Delta f \Rightarrow$ diferença entre a frequência central de dois picos de ressonância que sejam vizinhos [s^{-1}]

$\delta f \Rightarrow$ largura da banda de um pico de ressonância [s^{-1}]

Experimentos realizados com este dispositivo mostraram que tanto a velocidade de propagação das ondas sonoras quanto a atenuação, são aumentados pela presença de pequenas bolhas de gás. O aumento da velocidade de propagação do som foi observado em função do deslocamento da frequência de ressonância para valores mais elevados. Este fenômeno foi provocado pela maior dificuldade apresentada pelo meio fluido para entrar em ressonância devido a presença das bolhas de gás. Por outro lado, o aumento na atenuação deve-se ao aumento da dissipação da energia acústica provocada pelas bolhas de gás, que aumentaram a compressibilidade do meio fluido.

O interferômetro mostra-se muito sensível à presença da fase gasosa, entretanto, constata-se uma redução na sensibilidade deste dispositivo à medida que se aumenta a massa específica da fase líquida. Para fluidos de perfuração com massa específica próxima à da água (fluidos leves), é possível detectar a presença do gás para concentrações de volumes de até 0,02%, todavia o nível de detecção aumenta para concentrações de volumes de gás de 1% no caso de fluidos com massa específica em torno de 11,5 ppg.

2.2.2.4- Método de Medição da Resistividade do Fluido de Perfuração

Bryant et al. [4] utilizaram a resistividade do fluido de perfuração no fundo do poço para detectar influxos. Quando o gás entra no poço, a resistividade do fluido aumenta dando uma indicação da presença do mesmo. Uma das características deste método é a possibilidade de se avaliar a concentração de gás observada no fundo do poço através da seguinte expressão:

$$V_{tg} = 100 \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (5)$$

onde:

V_{tg} \Rightarrow fração volumétrica do gás total [%]

R_1 \Rightarrow Resistividade do fluido de perfuração [Ω .m.]

ΔR_1 \Rightarrow variação da Resistividade do fluido de perfuração devido à presença do gás [Ω .m.]

Embora esta metodologia fique restrita a poços perfurados com fluidos à base água, ela apresenta boa sensibilidade e permite uma avaliação quantitativa da fração volumétrica de gás que entra no poço. Testes realizados em poços para treinamento no controle de influxos mostraram que ela possibilita pronta detecção dos influxos.

2.3- Sistemas Computacionais para Detecção de Influxos

O papel fundamental na melhoria da segurança e da eficiência nas operações de perfuração em uma sonda, cabe ao Sondador (operador da sonda que controla, executa, coordena e distribui todas as tarefas pertinentes ao andamento das operações de perfuração). É imprescindível que ele tenha à sua disposição todas as informações necessárias, para que possa identificar qualquer anormalidade no poço o mais rápido possível. No caso de detecção de um influxo isto se torna ainda mais importante, já que, quanto mais cedo o problema é identificado e providências sejam tomadas, menor será sua magnitude e suas conseqüências.

Portanto, para uma rápida e confiável detecção de um influxo é necessário um sistema que: disponha de bons sensores, faça a monitoração dos valores coletados, execute cálculos, defina tendências de variação, mostre ao usuário valores e resultados de uma forma muito clara e emita alarmes confiáveis aos operadores.

Conforme descrito por *McCann et al.* [14], um sistema automatizado com três monitores independentes foi desenvolvido para a detecção rápida de influxos. O sistema consiste na monitoração do volume ativo do sistema, do diferencial de vazão e da posição da broca. Estes dados são então mostrados ao sondador em forma de registros gráficos em tempo real. O sistema também realiza cálculos estatísticos para a determinação de tendências de variação, tanto do volume ativo como do diferencial de vazão, dependendo do tipo da operação. Esses valores e tendências são comparados com valores modelados para cada uma das operações normais, tais como: perfuração, manobra, conexão e circulação. Caso ocorra uma discrepância, o operador é alertado por um dispositivo de alarme.

Neste sistema, cada tanque possui vários sensores colocados de forma a minimizar o erro devido aos movimentos provocados em sondas flutuantes pelo estado do mar. Assim, o volume ativo total é alcançado pela soma

dos valores médios obtidos em cada tanque. Na Tabela 2-3, exemplos da sensibilidade destes sensores estão apresentados em função do tipo e da capacidade dos tanques de lama normalmente utilizados em sondas de perfuração.

Tab. 2-3. Sensibilidade dos Sensores de Medição de Volume

Tipo de Tanque	Capacidade (bbl)	Sensibilidade (bbl)
Grande	280	2,5
Pequeno	120	0,5
Tanque de Manobra	15	0,2

A vazão de injeção é obtida pelo método convencional através do curso das bombas (spm). A vazão de retorno por sua vez é dada pelo sensor de pá convencional já comentado anteriormente. Apesar do sensor de pá não ser preciso, o mesmo apresenta uma boa resolução qualitativa e, permite a detecção de mudanças de valor e de tendência.

A posição da broca e o comprimento da coluna de perfuração são calculados de um sistema de multisensores, que incluem codificadores instalados no bloco de coroamento da sonda. Através do uso dos valores da taxa de penetração da broca, o sistema obtém uma medida precisa de qualquer alteração realizada na coluna.

A combinação das leituras do sensor de posição da broca, colocado no bloco de coroamento, juntamente com os dados da coluna de perfuração permitem a avaliação do volume ativo nos tanques durante as operações de perfuração, manobras e conexões. Esses valores calculados são comparados com as leituras tratadas dos sensores de nível dos tanques. O tratamento estatístico, dado aos valores lidos para a definição de tendências, não só aumenta a sensibilidade do sistema, mas também minimiza a ocorrência de alarmes falsos.

As variações no volume ativo do sistema permitem uma melhor detecção de influxos de baixa vazão (formação com baixa permeabilidade), os

quais dificilmente serão detectados por meio do diferencial de vazão. Por sua vez, o diferencial de vazão permite uma detecção mais rápida nos casos de influxos de alta vazão (formação com alta permeabilidade) [12].

Weishaupt et al. [23], apresentaram um sistema MDS mais sofisticado do que o apresentado por *McCann* [15], para atender a requisitos governamentais para a perfuração de poços de alta pressão e alta temperatura no Mar do Norte.

Os avanços adicionais são:

- Monitoração das principais válvulas acionadas por controle remoto que controlam as linhas de fluxo da lama, junto com um sistema de alarme inteligente que avisa se há problema de alinhamento entre estas válvulas. Isto evita derrames de lama para o mar acidentalmente, aumentando-se assim a confiabilidade do sistema quanto à detecção de ganho ou perda de fluido ocorrendo no interior do poço.

- Visando-se melhorar a segurança da operação de circulação de um influxo para fora do poço, um conjunto de sensores e de monitores gráficos coloridos foram agregados ao sistema. Desse modo, parâmetros como posição (abertura) do *choke* e pressão nos tubos de perfuração, são também apresentados em formato de registros gráficos em tempo real.

Há ainda notícias de outros sistemas computacionais em desenvolvimento ou em testes de campo. Num futuro breve, acredita-se que estes *softwares* deverão estar comercialmente disponíveis às companhias de petróleo de todo o mundo.

3- SISTEMAS DE DETECÇÃO DE INFLUXOS EM SONDAS FLUTUANTES

Sondas de perfuração flutuantes estão submetidas aos movimentos causados pelo estado do mar, os quais afetam desfavoravelmente as operações de perfuração. Na Figura 3-1 estão evidenciados todos os movimentos possíveis de uma sonda flutuante. Todos, de uma forma ou de outra, causam algum tipo de dificuldades nas operações de perfuração. Porém, o *heave*, movimento linear na direção vertical da embarcação, é o que normalmente acarreta os maiores inconvenientes. Este movimento e seus efeitos são examinados neste item.

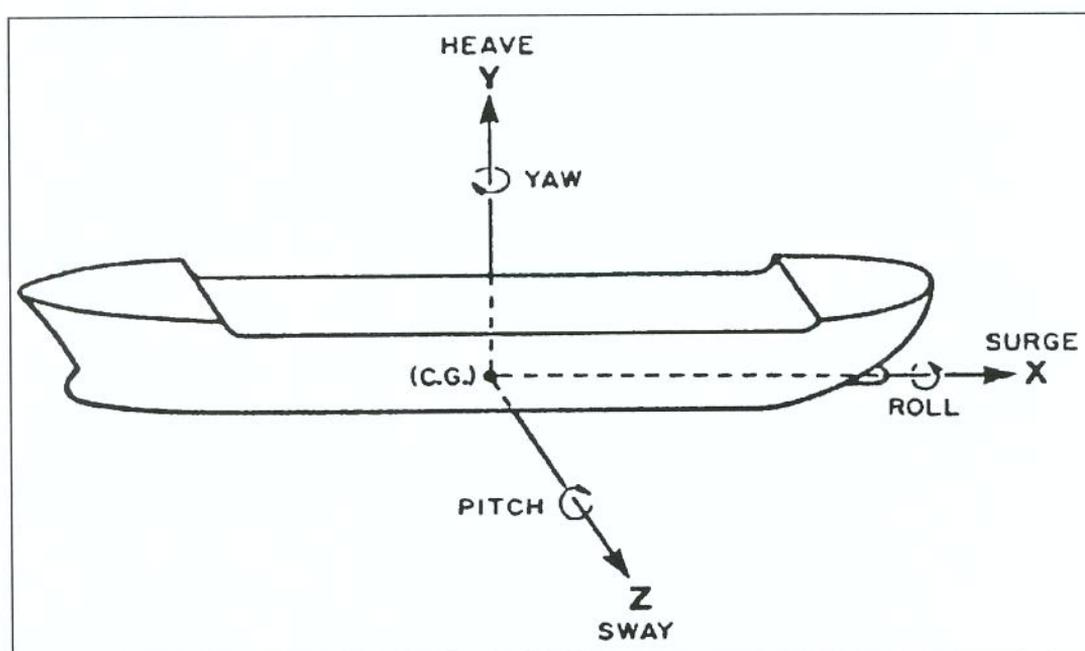


Figura. 3-1. Os Movimentos de uma Estrutura Flutuante no Mar.

O movimento de *heave* influencia nas operações *offshore* de plataformas flutuantes em cinco áreas importantes na perfuração [3], a saber:

- 1 Operações com a coluna de perfuração
- 2 Descida e recuperação de equipamentos submarinos
- 3 A vazão de retorno da lama
- 4 O projeto da sonda de perfuração flutuante
- 5 Movimentação de materiais com guindastes.

Neste trabalho foi verificado o efeito do movimento do *heave* no *riser* e, conseqüentemente, na vazão de retorno do fluido de perfuração.

3.1- O Problema da Vazão de Retorno em Sondas Flutuantes

Durante a maioria das operações de perfuração em sondas flutuantes são utilizados um BOP instalado no fundo do mar e um *riser* conectando este à sonda na superfície. Além desta função, o *riser* é usado como uma guia tubular entre o poço e a sonda para permitir o retorno do fluido de perfuração aos tanques de lama. O *riser*, que se encontra “fixo” ao poço através do BOP, é livre do movimento vertical da embarcação por meio de uma junta telescópica posicionada no seu topo, conforme ilustra a Figura 3-2. Juntas flexíveis são ainda conectadas aos seus extremos para possibilitar movimentos angulares em relação ao BOP e a junta telescópica.

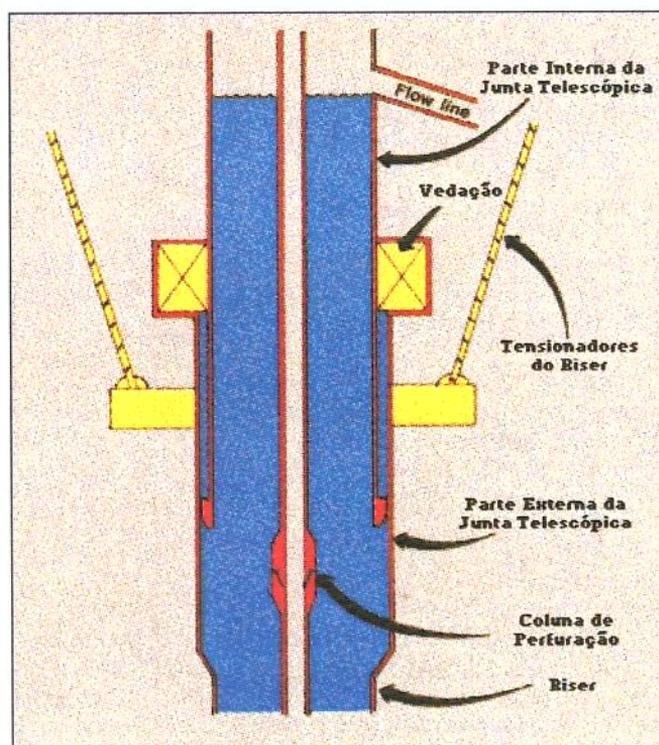


Figura. 3-2. Junta Telescópica Convencional [2].

Ainda na parte superior do *riser* existem os tensionadores do *riser* para suportar seu peso próprio e aplicar tensão suficiente para se evitar a flambagem do mesmo. Em poços de lâminas d'água profunda, módulos de flutuadores são adicionados ao *riser* para alívio do seu peso, e assim, reduzir os esforços de tensionamento aplicado nos tensionadores do *riser* na superfície.

A junta telescópica conectada no topo do *riser* permite a unidade de perfuração mover-se verticalmente em relação ao *riser*. Porém, isto leva a sérios problemas nas operações de perfuração de poços. O principal deles, diz respeito ao efeito do movimento da junta telescópica atuando como um grande pistão dentro do *riser*. Quando a junta telescópica desce verticalmente devido ao movimento de *heave*, um volume proporcional a este movimento é bombeado do seu interior para dentro da linha de retorno da lama. No movimento ascendente, de forma análoga, um volume similar de vazio é criado dentro do *riser* conforme mostrado na Figura 3-3. Esta taxa de bombeamento, induzida pelo movimento vertical da embarcação, é proporcional à velocidade do movimento de *heave* [9]. Este fenômeno dificulta bastante a detecção de uma perda de circulação do poço para a formação ou de um ganho de fluido da formação para dentro do poço.

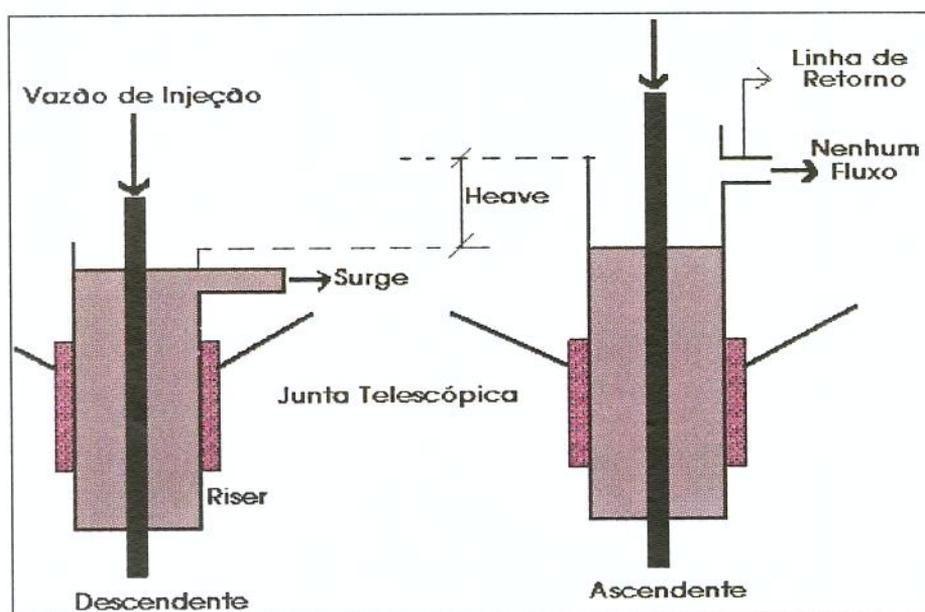


Figura. 3-3. Perturbação no Fluxo Induzida pelo *Heave*.

Esta dificuldade em se detectar um influxo, além de ser um problema de segurança operacional, acarreta também em dúvidas aos engenheiros de revestimento e cimentação na elaboração do programa de revestimento. Como consequência, as profundidades de assentamento dos revestimentos poderão estar mais profundas, causando um considerável aumento no custo do poço, ou estar mais rasas, expondo o poço a possíveis riscos de erupções.

O projeto de colunas de revestimento para perfuração de um poço é função da sua profundidade de assentamento e da máxima pressão prevista no interior do mesmo. Esta máxima pressão é afetada por vários fatores, dentre os quais, os principais são: a pressão de poros da formação (sobre a qual não temos nenhum controle) e o máximo volume de influxo previsto (que podemos tentar minimizar) [2].

Geralmente, as máximas pressões alcançadas durante uma operação de controle de poço estão relacionadas diretamente com o volume do fluido invasor no momento do fechamento do BOP e, durante a circulação do mesmo para fora do poço. Fundamentados nesta premissa, o conceito e o cálculo de “tolerância ao influxo (*kick tolerance*)” foram apresentados como uma ferramenta obrigatória na elaboração e avaliação das condições de segurança inerentes a um particular projeto de poço [17].

“Tolerância ao influxo” é definida como a máxima pressão de poros, (expressa em termos de peso específico equivalente ρ_{tk}) de modo que, caso um influxo aconteça a uma dada profundidade, com a lama existente e cujo volume ganho seja o máximo preestabelecido, o poço poderá ser fechado sem fraturar a formação mais fraca exposta [13]. Conclui-se desta definição que a “tolerância ao influxo” é o limite para o fechamento do poço sem que se fracture a formação mais frágil.

A equação

$$\rho_{tk} = \rho_l + \frac{H_f}{H}(\rho_f - \rho_l) - \frac{H_g}{H}(\rho_l - \rho_g) \quad (6)$$

onde:

ρ_{tk} = tolerância ao influxo (ppg)

ρ_l = peso do fluido de perfuração (ppg)

H_f = profundidade da sapata do revestimento (pé)

H = profundidade total do poço (pé)

ρ_f = peso equivalente de lama da pressão de fratura na sapata
(ppg)

H_g = comprimento da coluna de gás no poço (pé)

ρ_g = peso do gás invasor (ppg),

foi apresentada no trabalho de *Redmann* [17] para avaliação da “tolerância ao influxo”. Para o desenvolvimento desta equação, foi assumido que o gás ocupa o espaço anular como uma bolha contínua, e que a operação de fechamento do poço representa a pior situação.

Não se cogita aqui explicar o uso da ferramenta “tolerância ao influxo” através de sua aplicação prática no acompanhamento da perfuração de um poço. Mas, enfatizar que a “tolerância ao influxo” é inversamente proporcional ao volume do influxo, conforme Figura 3-4. Ou seja, quanto maior for o volume ganho nos tanques de lama menor será a “tolerância ao influxo”, e conseqüentemente, menor será o limite para o fechamento do poço sem que se frature a formação mais fraca exposta.

O volume do influxo (ou o máximo volume ganho pré estabelecido) é um fator que depende do treinamento e conscientização das equipes da sonda e dos equipamentos de detecção nela instalados.

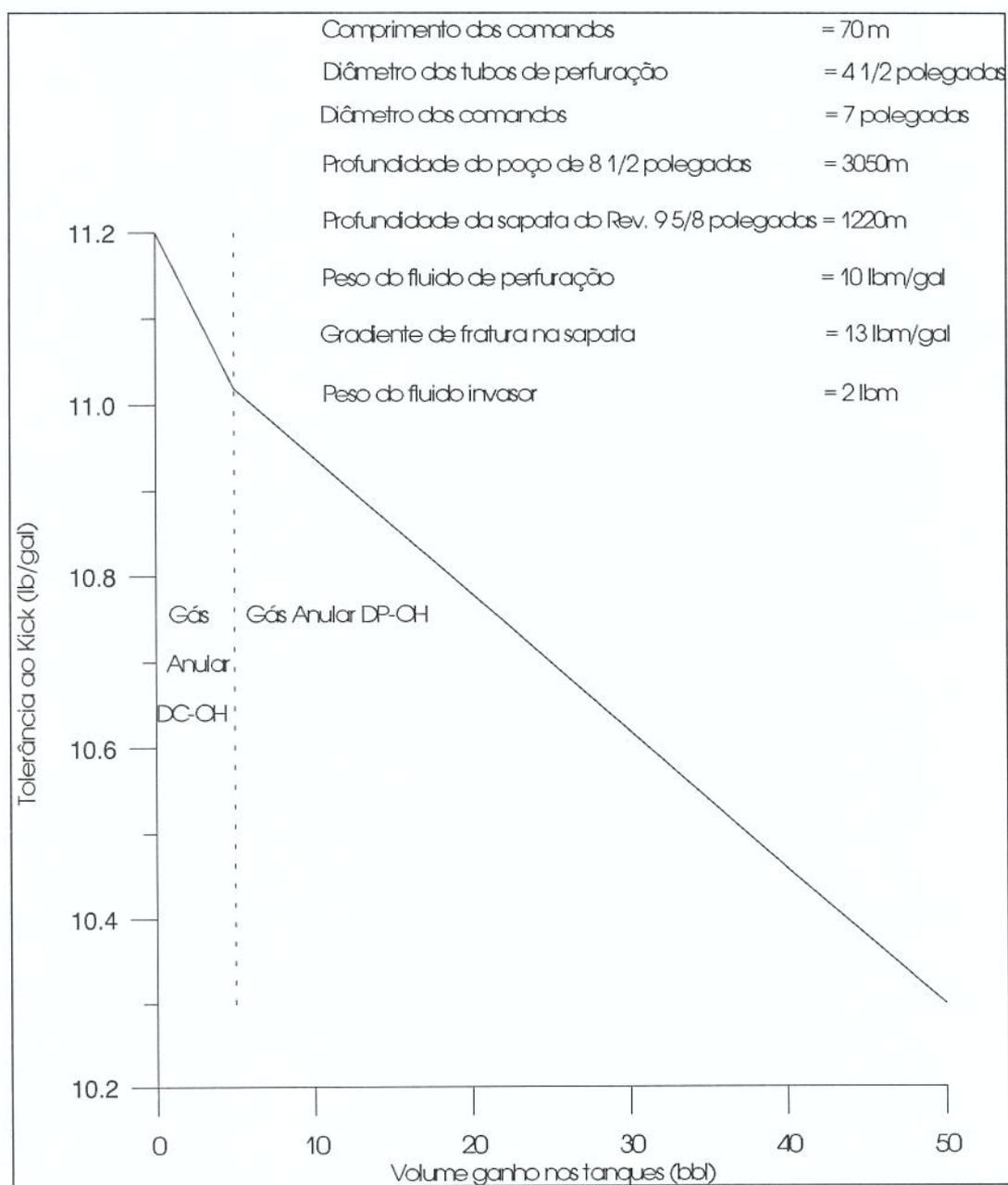


Figura. 3-4. “Tolerância ao Influxo” versus Volume Ganho

3.2 - Métodos para Detecção de Influxos Investigados

Vários métodos foram investigados e apresentados dentro da indústria do petróleo com o intuito de superar as desvantagens inerentes do sistema *riser*-junta telescópica na obtenção de medidas precisas de vazão de retorno em unidades flutuantes. Alguns destes métodos procuram vencer o efeito das variações de volume dentro do *riser* pela utilização de meios mecânicos, outros, através de meios computacionais e/ou eletrônicos para compensar ou remover estas variações.

3.2.1- Sistemas Físicos-Mecânicos

(a)-*Baker et al.* [2], apresentam uma técnica que anula as flutuações na vazão de retorno. A técnica, consiste no deslocamento de um volume de fluido de perfuração para dentro e para fora de uma câmara CVR (câmara que mantém no interior do *riser* um volume constante) durante o movimento ascendente e descendente do *heave* da embarcação. Esta câmara, ilustrada na Figura 3-5, é dimensionada, de maneira que o volume interno total da combinação junta telescópica e câmara, permaneça constante independentemente do movimento da junta telescópica e da sonda.

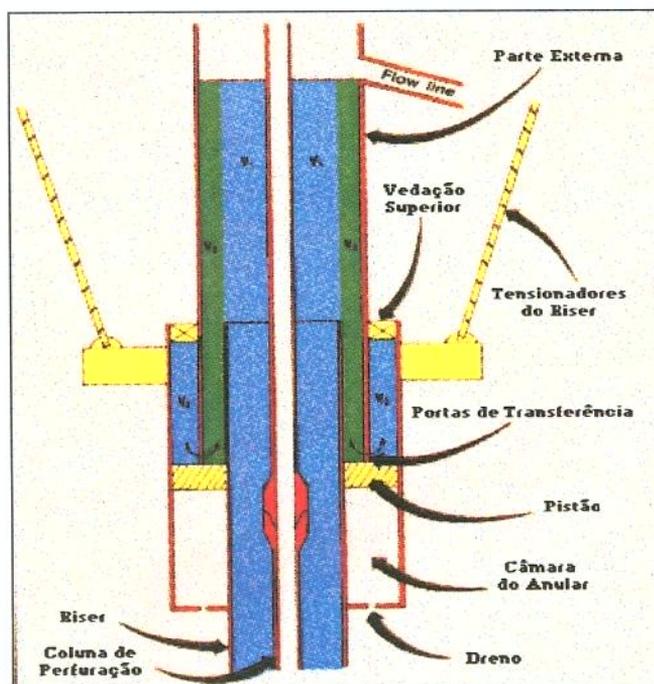


Figura. 3-5. Junta Telescópica com CVR [2].

(b)-*Baker et al.* [3], mencionam um método chamado FIFO (*flow in, flow out*), que se utiliza também de um meio mecânico para eliminar o efeito do movimento de *heave*. O princípio é instalar uma bomba num nível abaixo da junta telescópica, onde não existe os efeitos de *heave*, com capacidade de bombear o fluido de perfuração para fora do *riser* através de uma nova linha de retorno. Assim, as medições de vazão de retorno recaem no mesmo caso de medições de vazões em sondas fixas.

(c)-No trabalho de *Hatleskog* [9], foi apresentado um protótipo sofisticado chamado FCS (Sistema Compensador de Fluxo), que usa o mesmo princípio desenvolvido pelo FIFO. Ou seja, o conceito básico do sistema é assegurar um ponto no *riser* abaixo da junta telescópica, que serve como saída de uma nova linha de retorno do fluido de perfuração. Neste local, é então montado um medidor de vazão de retorno, e logo após, é instalado um arranjo tanque de coleta mais uma bomba centrífuga. Neste arranjo, o fluido é armazenado e bombeado para a linha de retorno convencional da sonda.

(d)-*Westerheim* [24] apresentou em seu trabalho, o protótipo de um detetor de influxo e de perda de circulação, consistindo de:

1- Uma unidade eletrônica que monitora os sinais de vazão de injeção, vazão de retorno, nível do tanque de *surge* (flutuações da vazão de retorno provocada pelo movimento de *heave*) e do próprio movimento de *heave*, para determinar a existência de uma anormalidade no poço, e mostrar ao sondador através de monitores de vídeo.

2- Um medidor de vazão de retorno eletromagnético bidirecional, posicionado conforme mostrado na Figura 3-6. Esta posição, permite que o medidor permaneça em contato com o fluido de perfuração continuamente. Outro benefício desta localização, é o de evitar a decantação de sólidos em cima do sensor. A razão do uso de um medidor bidirecional é que durante movimentos de *heave* muito intenso com uma vazão de perfuração baixa, a lama pode inverter a sua direção de fluxo e retornar para o poço. Portanto, este medidor não enviará sinais falsos para a unidade eletrônica.

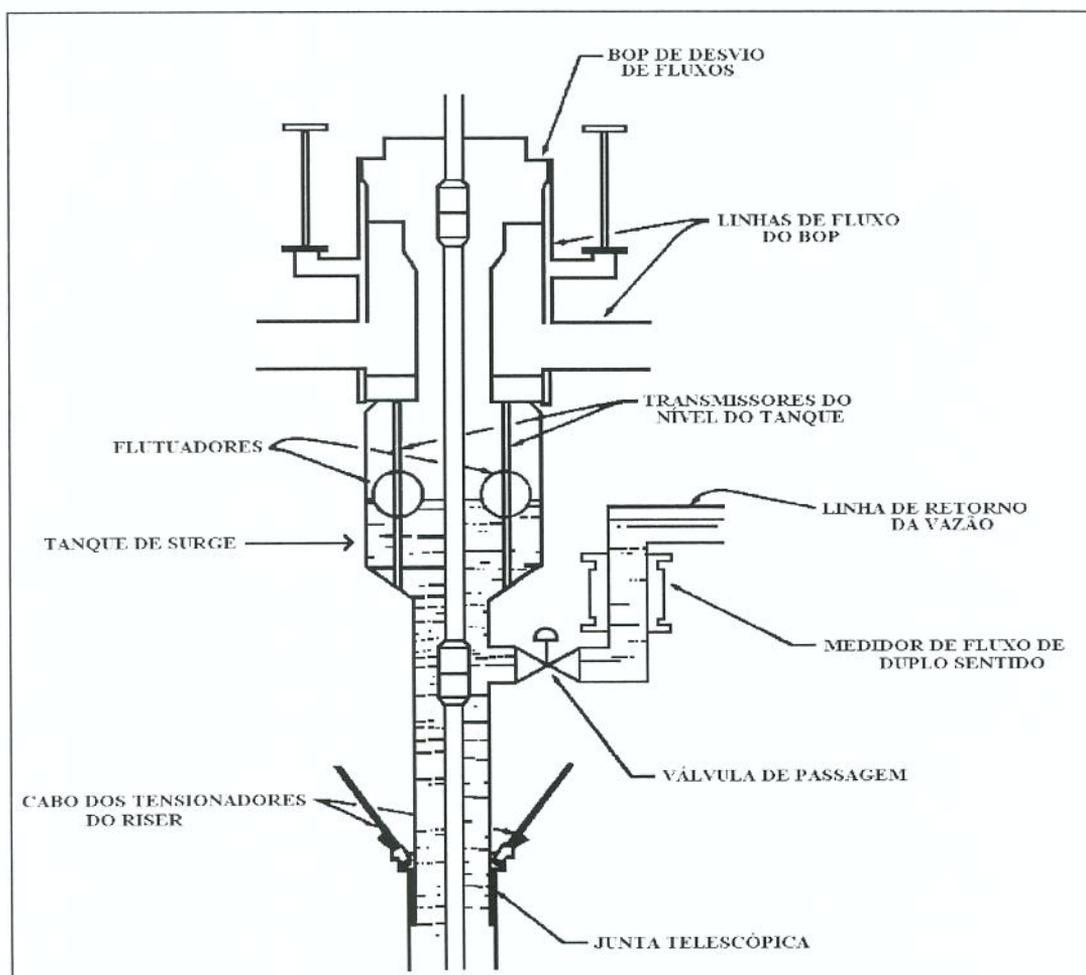


Figura. 3-6. Riser com o Topo Modificado [24].

3- O tanque de *surge*, ilustrado na Figura 3-6, evita que a lama transborde para o mar ou entre em algum equipamento conectado logo acima da linha de retorno, durante o movimento descendente do *heave*. Ele também impede que o nível do fluido de perfuração caia abaixo da altura do medidor de vazão durante o movimento ascendente do *heave*.

4- Um sensor do movimento de *heave* é posicionado em um dos cabos dos tensionadores do *riser*. Estes registros são utilizados pela unidade eletrônica para compensar as variações de volume dentro do *riser* devido ao movimento vertical da sonda flutuante.

3.2.2- Sistemas Computacionais e Eletrônicos

Como alternativa aos métodos que empregam meios mecânicos-físicos para solucionar o problema do *heave* nas medições de vazão de retorno em sondas flutuantes, há também os métodos que utilizam meios eletrônicos e/ou computacionais para isso.

(a)-O sistema descrito por *McCann* [15] utiliza *software* para detecção de influxos em sondas flutuantes.

(b)-Conforme *Speers* e *Gehrig* [20], normalmente os períodos do movimento de *heave* registrados em navios variam entre 6 e 16 segundos, ou seja, variam com frequências de 0,17 a 0,06 ciclos por segundo. Devido a estes valores de frequências muito baixas, é possível se construir circuitos ativados com filtros analógicos para se trabalhar dentro destes intervalos de frequências. O processamento digital com filtros de passagem de banda baixa que não permitem a passagem de componentes de frequências altas ou ruídos são bastante utilizados e fáceis de serem manuseados por *software* de computadores.

A inconveniência do uso sistemático destes filtros é que, ao se tentar atenuar muito os sinais de flutuações nas medidas de vazões, a sensibilidade de se detectar um influxo pode diminuir devido ao aumento no tempo de resposta do sistema [20].

Um grande número de soluções e propostas para enfrentar o problema do efeito do movimento de *heave* sobre a vazão de retorno tem sido apresentado na literatura e na indústria do petróleo. Porém, estas soluções tendem, geralmente, a ter custos elevados de instalação na sonda, a necessitar de equipamentos adicionais e a ser exclusivas para um determinado tipo de sonda, etc.

As empresas de perfuração têm enfrentado o problema por meio da elaboração de programas de poços que atendam esta dificuldade e por meio de procedimentos operacionais cuidadosamente planejados para evitar riscos. Entretanto, perfurar poços pioneiros, poços delgados, poços de alta pressão e

temperatura e o uso da perfuração sub-balanceada requerem muito mais controle do que estas medidas.

3.3 - Método Proposto

O resultado do produto da área do anular (área entre o diâmetro interno do *riser* e o diâmetro externo da coluna de perfuração) pela velocidade do movimento do *heave* produz os valores das flutuações experimentadas pela vazão de retorno em uma sonda flutuante [9]. O método proposto utiliza-se deste resultado para fazer as compensações nos valores medidos da vazão de retorno. Um esquema do método proposto nesta pesquisa está ilustrado na Figura 3-7.

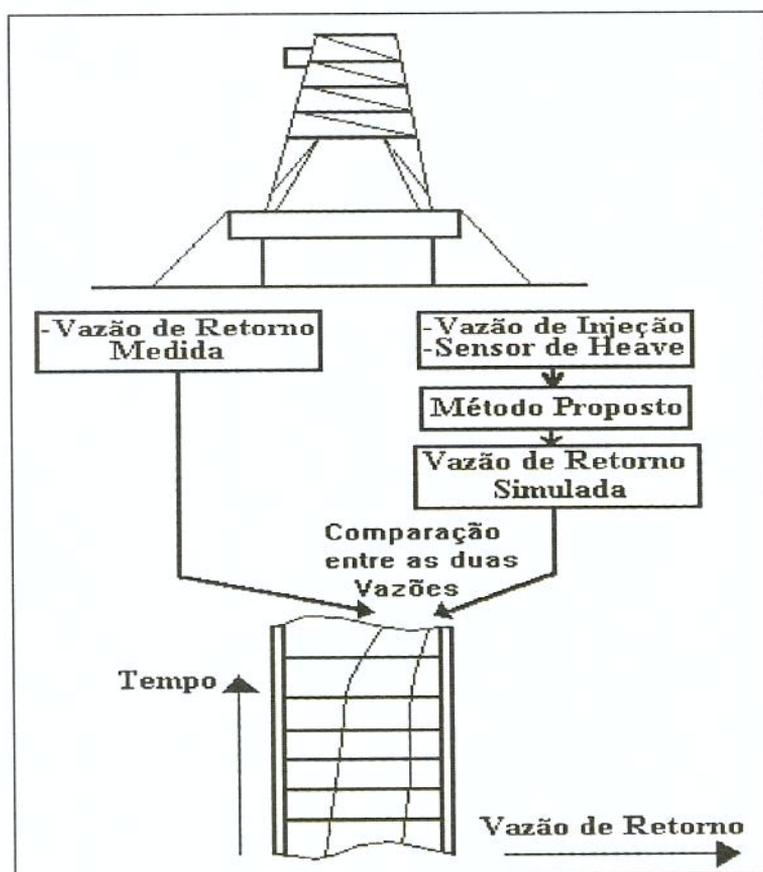


Figura. 3-7. Esquema do Método Proposto

3.3.1- Equacionamento do Método

Assumindo-se que:

$$Q_R(t) = Q_I(t) + Q_T(t) + Q_V(t) + \delta Q \quad (7)$$

onde:

$Q_R(t)$ = Vazão de retorno medida

$Q_I(t)$ = Vazão de injeção medida

$Q_T(t)$ = Variações de fluxos calculadas devido ao efeito do movimento de *heave* no interior do *riser*

$Q_V(t)$ = Somatório de pequenas variações de vazões causadas principalmente pelo: efeito da rotação da coluna, incorporação dos sólidos perfurados no volume do fluido de perfuração, mudanças na geometria e na inclinação do poço, entre outros fatores dinâmicos intrínsecos ao processo de perfuração.

δQ = Ganho ou perda de fluido

$$\text{Define-se, } Q_M(t) = Q_I(t) + Q_T(t) \quad (8)$$

como a vazão simulada. O valor do diferencial de vazão é obtido por:

$$\Delta Q = Q_R(t) - Q_M(t) = Q_V(t) + \delta Q \quad (9)$$

Esta diferença representa o diferencial de vazão estimado com os efeitos do movimento do *heave* removidos.

O sistema de alarme confiável descrito por *Speers e Gehrig* [20], por exemplo, pode ser agora aplicado a este resultado para se detectar alguma anomalia ocorrendo no poço.

3.3.2- Determinação de $Q_T(t)$

O conhecimento do movimento de *heave* de uma estrutura flutuante é necessário para estimar as flutuações na vazão de retorno. Com este propósito, o Estudo da Dinâmica de Estruturas Flutuantes foi utilizado para evidenciar a origem e a equação deste movimento.

O movimento de *heave* de um corpo flutuante em resposta à excitação gerada pelo estado do mar, deduzido no Apêndice A - Equação (A.11), é:

$$z(t) = z_a \cos(\omega t + \phi). \quad (\text{A.11})$$

O volume no interior de um anular *riser*-tubos de perfuração, cuja seção transversal tem área S , pode ser obtido através de:

$$V(t) = S z(t) \quad (10)$$

Devido ao movimento máximo de *heave* de navios sonda situar-se em torno de 12 pés. (3,7m) [8], interferências causadas pela inclinação do *riser* e/ou pelas perdas de fricção do fluido de perfuração neste percurso são desprezíveis no cálculo das flutuações destes volumes dentro do *riser*.

Substituindo-se o valor de (A.11) em (10), fica:

$$V(t) = S z_a \cos(\omega t + \phi). \quad (11)$$

A derivada primeira de (11) resulta na vazão $Q(t)$. Esta vazão é função da derivada do movimento de *heave*, como se mostra a seguir:

$$Q(t) = \frac{dV}{dt} = - S z_a \omega \sin(\omega t + \phi) \quad (12)$$

A equação (12) reflete o efeito de pistoneio na vazão de retorno da lama de perfuração devido ao deslocamento alternado contínuo da junta telescópica na sua direção longitudinal provocado pelo movimento de *heave* da sonda flutuante.

3.4 - Dados de Campo

Para a verificação do modelo proposto é necessário a obtenção de registros contínuos de vazão de injeção, vazão de retorno e do movimento de *heave* coletados num navio sonda em operação de perfuração.

3.4.1- Sistema de Medição de Vazões

Os dados de vazão de injeção, de vazão de retorno e os de cursos das bombas de lama foram coletados em um microcomputador conectado ao sistema da cabine de *mud-logging*. Com a utilização de um programa de comunicação *kermit*, os registros foram armazenados diretamente em disquetes. O Apêndice B mostra o conteúdo destes dados em um pequeno intervalo de tempo.

Devido ao sistema da unidade de *mud-logging* operar estes parâmetros monitorados em função da taxa de penetração da broca, os intervalos de tempo entre cada registro, além de não serem constantes, são bastante espaçados. Esta descontinuidade transformou-se, posteriormente, no mais sério inconveniente para evidenciar o resultado do trabalho proposto.

A medição da vazão de injeção foi realizada através do produto do contador de cursos das bombas (precisão de 10% conforme Tab. 2-1) pela sua capacidade volumétrica e pela sua eficiência volumétrica. Já a medição da vazão de retorno foi monitorada com o uso de um medidor do tipo pá (precisão de 15% conforme Tab. 2-2).

3.4.2- Sistema de Medição do *Heave*

Um sensor de *heave* registra o movimento vertical instantâneo do navio. Este dispositivo, mostrado na Figura 3-8, consiste de uma caixa metálica em forma cilíndrica com vedação contra a umidade. No seu interior fica alojado um acelerômetro. Este dispositivo é montado o mais próximo possível do centro de movimento do navio, para evitar interferências dos movimentos de *Pitch* e de *Roll*.

O sensor gera uma voltagem proporcional à velocidade de *heave* do navio. Esta voltagem é processada através de uma interface dirigida e aplicada a um computador.

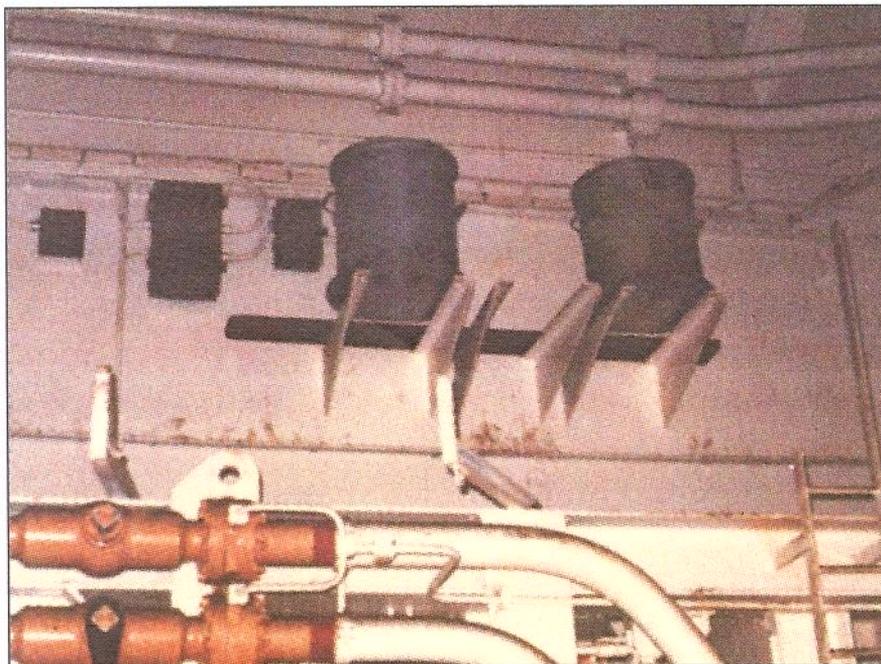


Figura. 3-8. Sensor de *Heave* de um Navio Sonda

Os dados instantâneos de movimento de *heave* (em pé) são então armazenados em um rolo de fita magnética para depois serem submetidos a uma decodificação. O Apêndice C ilustra uma pequena amostra do resultado desta decodificação.

3.4.3- Informações Adicionais

Os dados de vazões foram coletados durante quatro intervalos alternados de duração de uma hora cada. O registro do *heave* embora tenha sido gravado durante um intervalo de tempo de dezessete horas, só foi possível resgatar um registro de cinco minutos de duração dos dados coletados. Esta falha foi devida a problemas técnicos apresentados durante a fase da decodificação da fita magnética pela empresa proprietária do NS-14.

O *riser* utilizado pelo navio sonda tem 18 5/8 pol.(47,3cm) de diâmetro externo e 17 1/2 pol.(44,5cm) de diâmetro interno. Os tubos de perfuração têm o diâmetro externo de 5 pol.(12,7cm).

A capacidade de deslocamento do fluido no anular *riser*-tubos de perfuração é de 0,2649 bbl/pé, o que corresponde a uma área de anular nominal de 0,1382 m². O medidor de vazão do tipo pá está instalado entre o término da linha de fluxo (*flow line*) e as peneiras de lama. Isto significa que o fluido de perfuração tem um longo caminho para percorrer até o medidor.

O navio dispõe de três bombas de perfuração triplex, cada uma com capacidade volumétrica de 4,86 galões por curso. A eficiência volumétrica de cada uma foi estimada pela equipe da sonda em torno de 93%.

O poço estava sendo perfurado a uma profundidade de 3400 metros com uma broca de 12 1/4 pol.(31,2cm) de diâmetro. A sapata do último revestimento estava assentada a uma profundidade de 2562 metros.

4- RESULTADOS

A Figura 4-1 mostra os valores do movimento vertical do navio sonda NS-14 em operação na Baía de Campos, litoral do Rio de Janeiro, registrados pelo seu sensor de *heave* (a) e os da vazão de retorno medida pela unidade de *mud-logging* instalada no mesmo (b). Os sinais em (a) são utilizados para prever quando ocorrerão grandes variações de vazões nas medições de vazão de retorno em (b).

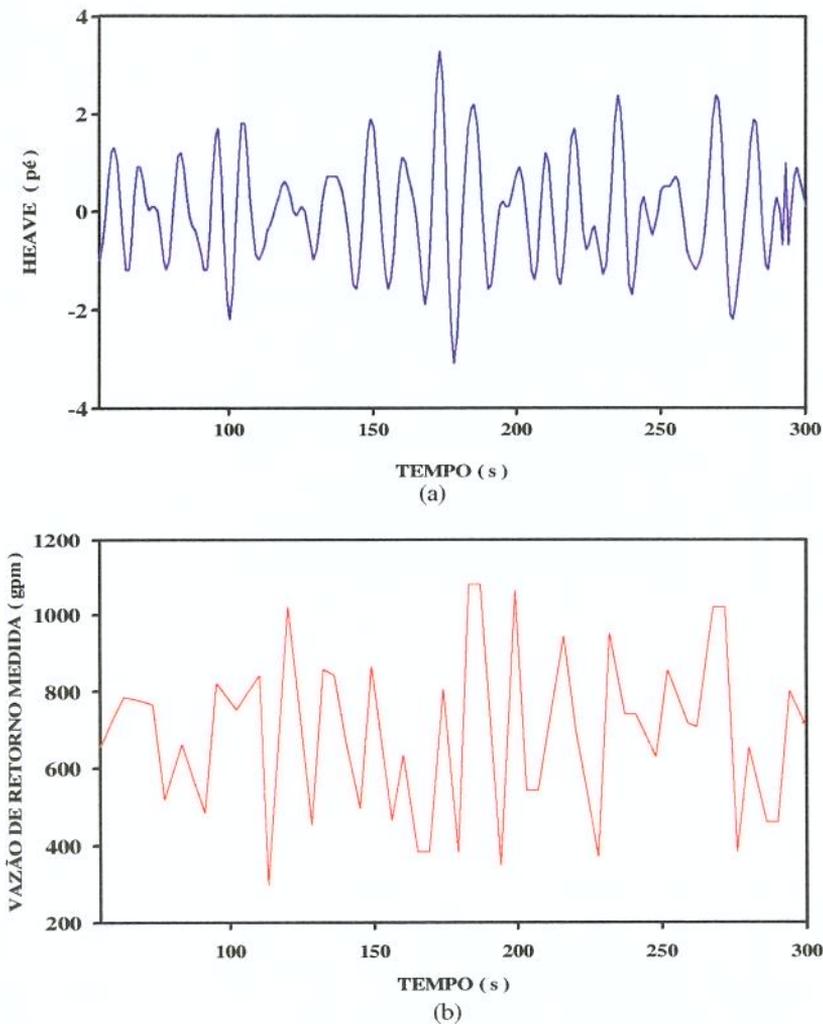


Figura 4-1. Registros de *Heave* e de Vazão de Retorno

Observa-se nesta ilustração que existe uma correspondência entre estes dois sinais, porém, com uma defasagem aproximada de 6 segundos entre os seus registros. O atraso nos registros da vazão de retorno medida é conseqüência da extensão do caminho da vazão na linha de retorno (*flow line*) até o local onde o medidor está instalado, também citado em *Jardine* [10].

Os valores de vazão de retorno mostrados na Figura 4-2, resultante do método proposto (Apêndice D), subtraídos dos valores de vazão de retorno do medidor tipo pá (Apêndice B), mostrados na Figura 4-3, resultam em valores do diferencial de vazão que ultrapassam facilmente as faixas de precisão de valores citadas em [15]. Nesta situação, torna-se impraticável o uso deste parâmetro para detecção de anomalias durante a perfuração de um poço.

Esta grande diferença de amplitudes, entre os valores simulados e os valores medidos, é explicada pelo fato de que os valores de vazão de retorno medidos no navio sonda NS-14 estarem limitados à faixa do medidor de vazão tipo pá instalado no mesmo. Esta faixa varia de um valor mínimo (0 gpm) a um valor máximo de (1200 gpm).

Devido a esta discrepância de amplitudes nos resultados, foi necessário normalizar os valores absolutos das duas vazões para se obter uma melhor comparação entre as mesmas.

Assim, os valores normalizados da vazão de retorno medida corrigidos em 6 segundos e os valores normalizados da vazão simulada, mostrados na Figura 4-4, evidenciam uma boa aproximação entre ambos.

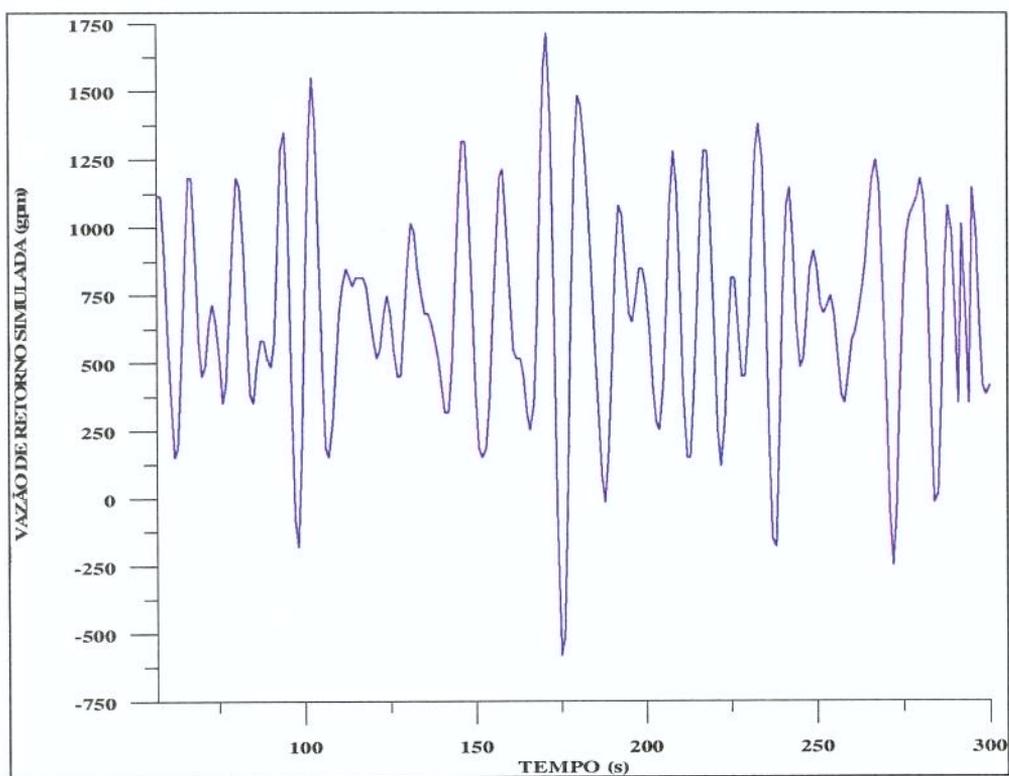


Figura.4-2. Valores de Vazão de Retorno Simulada

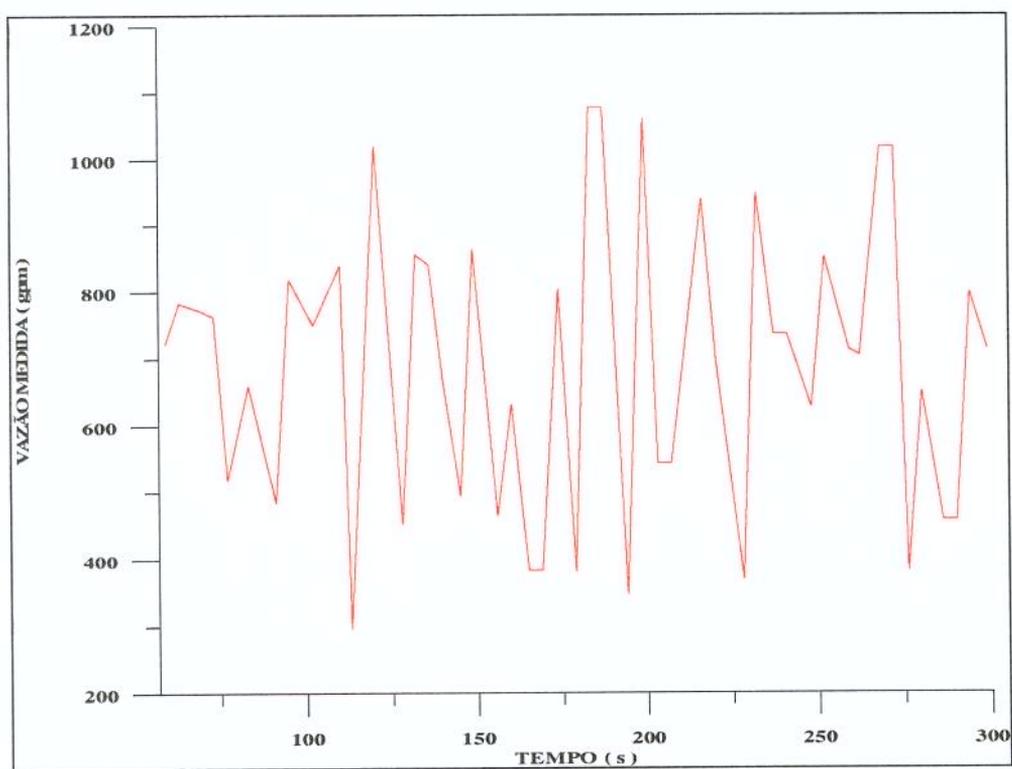


Figura 4-3. Valores de Vazão de Retorno do Medidor Tipo Pá

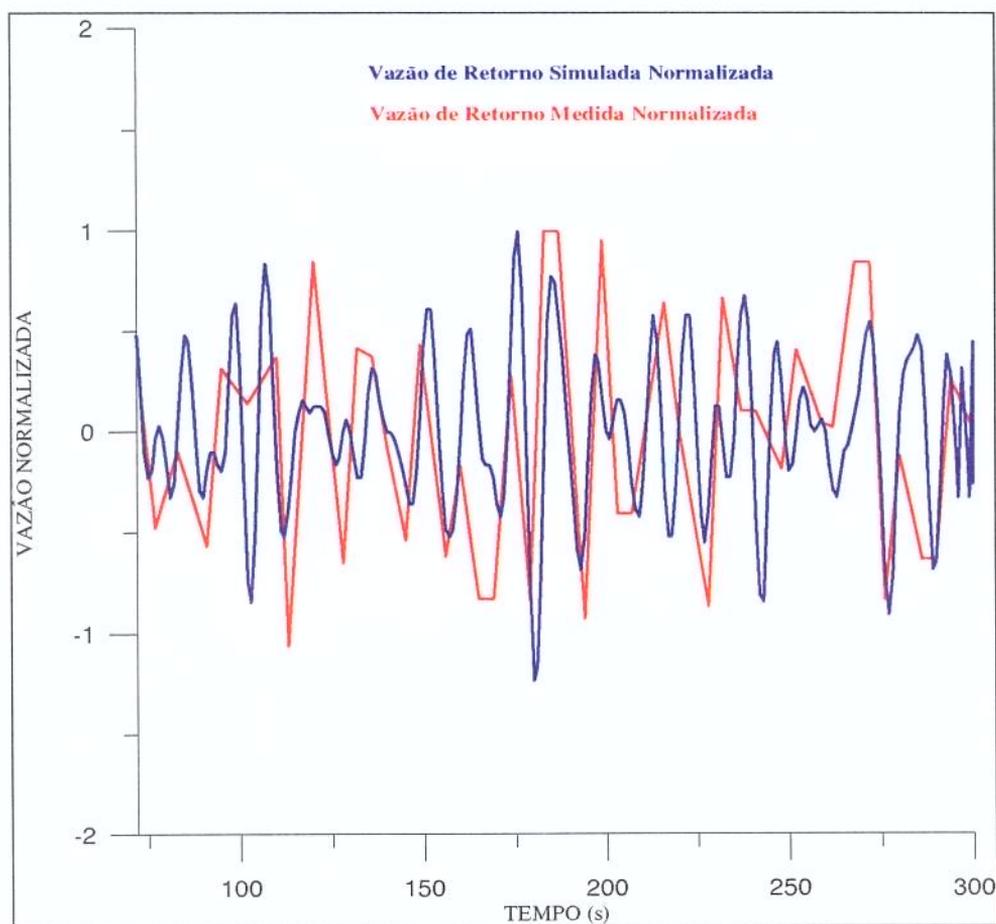


Figura 4-4. Comparação entre os Valores Normalizados da Vazão Simulada e os da Vazão Medida

Uma melhor correspondência entre os valores medidos e os valores simulados do método proposto não foi obtida devido, entre outros fatores, principalmente a:

a)- Defasagem entre a frequência dos registros da vazão de retorno monitorados na unidade de *mud-logging* a bordo do navio e a frequência dos registros do movimento de *heave* do mesmo. Este problema dificultou a obtenção de uma real correspondência entre estes dois sinais, ou seja, a determinação do diferencial de vazão tornou-se mais distante da situação real.

b)- Perturbação dos movimentos de *Roll* e de *Pitch* no fluxo dos fluidos no interior da linha de retorno (*flow line*). Esta perturbação depende da extensão e da inclinação desta linha. Ocorrendo estes efeitos, fica mais difícil a

tarefa de se medir a vazão de retorno com maior precisão. Ou seja, qualquer modelo ou sistema que utilizar a informação do movimento de *heave* para prever (simular) uma vazão de retorno terá seu resultado comprometido por estes dois movimentos.

c)- Medidor de vazão instalado na linha de retorno, perto das peneiras de lama, registra sempre valores de vazão de retorno mesmo quando a unidade flutuante está no topo do movimento ascendente do *heave*. Isto acarreta uma indicação falsa de que o fluxo de fluido na linha de retorno é contínuo. Este fenômeno, explicado pelo fluxo de fluido dentro da linha de retorno desde a saída do riser até as peneiras de lama devido ao efeito da ação da gravidade, mascara os valores da vazão de retorno dos medidores.

d)- Falta de manutenção no sensor do medidor de vazão do tipo pá, o que acarretou uma redução na sensibilidade do mesmo. Isto provocou também uma condição de não se obter uma calibração confiável. Segundo *Schafer* [19], as duas maiores limitações para este tipo de medidor são: a sua freqüente repetição de valores e a sua falta de precisão. Os valores registrados no navio sonda, pelo mesmo, nunca atingiram os seus valores extremos de zero gpm e de 1200 gpm.

e)- O pequeno intervalo de tempo dos registros do movimento do *heave* obtido junto ao navio sonda, por dificuldades na decodificação das gravações realizadas em fita magnética, impediu de elucidar os resultados em intervalos de tempo mais representativos.

Assumindo-se agora que os valores da vazão de retorno simulada $Q(t)$, ilustrados na Figura 4-2, representam os valores da vazão de retorno real (desprezando-se somente os valores de δQ), situações hipotéticas de perda de circulação, de perfuração normal e de ganho de fluido são simuladas para ilustrar a eficácia da técnica.

Na Figura 4-5 é mostrado um poço sofrendo um problema de perda de circulação. Neste caso, o fluido está fluindo do poço para dentro da formação. Vê-se que o sinal do diferencial de vazão diminui gradualmente indicando uma perda de lama. Isto ocorre, devido ao fato de que a pressão exercida pelo fluido de perfuração supera a do gradiente de fratura da formação que está sendo perfurada.

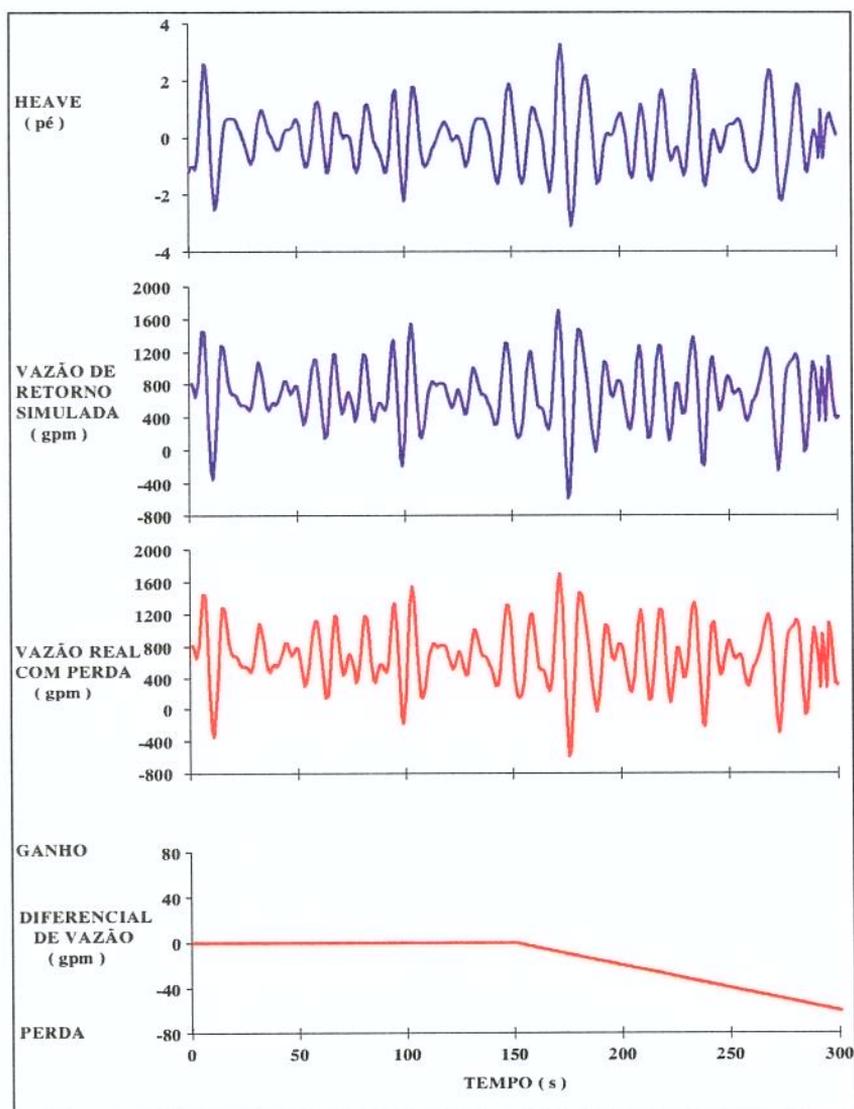


Figura 4-5. Detecção de uma Perda de Circulação no Poço

A Figura 4-6 ilustra uma situação de perfuração normal. Não há ganho ou perda de fluido no interior do poço. Nesta situação, a pressão exercida pelo fluido de perfuração é igual a exercida pela pressão de poros da formação que está sendo perfurada. Vale notar que embora a indicação da vazão de retorno se apresente oscilante devido ao movimento de *heave* do navio, a indicação do diferencial de vazão se apresenta estável.

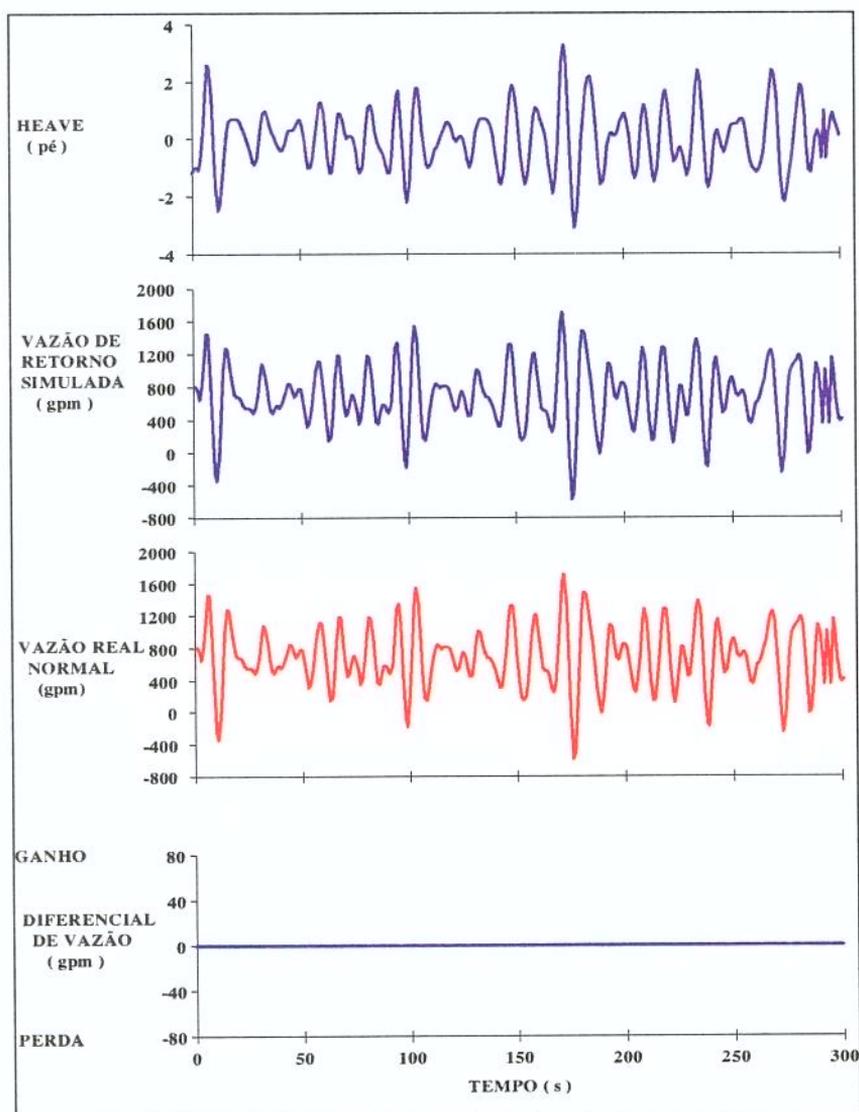


Figura 4-6. Poço em Situação de Perfuração Normal

Na Figura 4-7 o poço está sofrendo o efeito de um influxo. Gás e/ou óleo está entrando para o poço devido a pressão de poros da formação que está sendo perfurada ser maior do que a pressão do fluido de perfuração. O diferencial de vazão acusa um ganho de fluido na vazão de retorno do poço. O volume de fluido de perfuração que retorna do poço excede o volume do fluido que entra no mesmo, como consequência direta da entrada de fluidos da formação para o interior do poço.

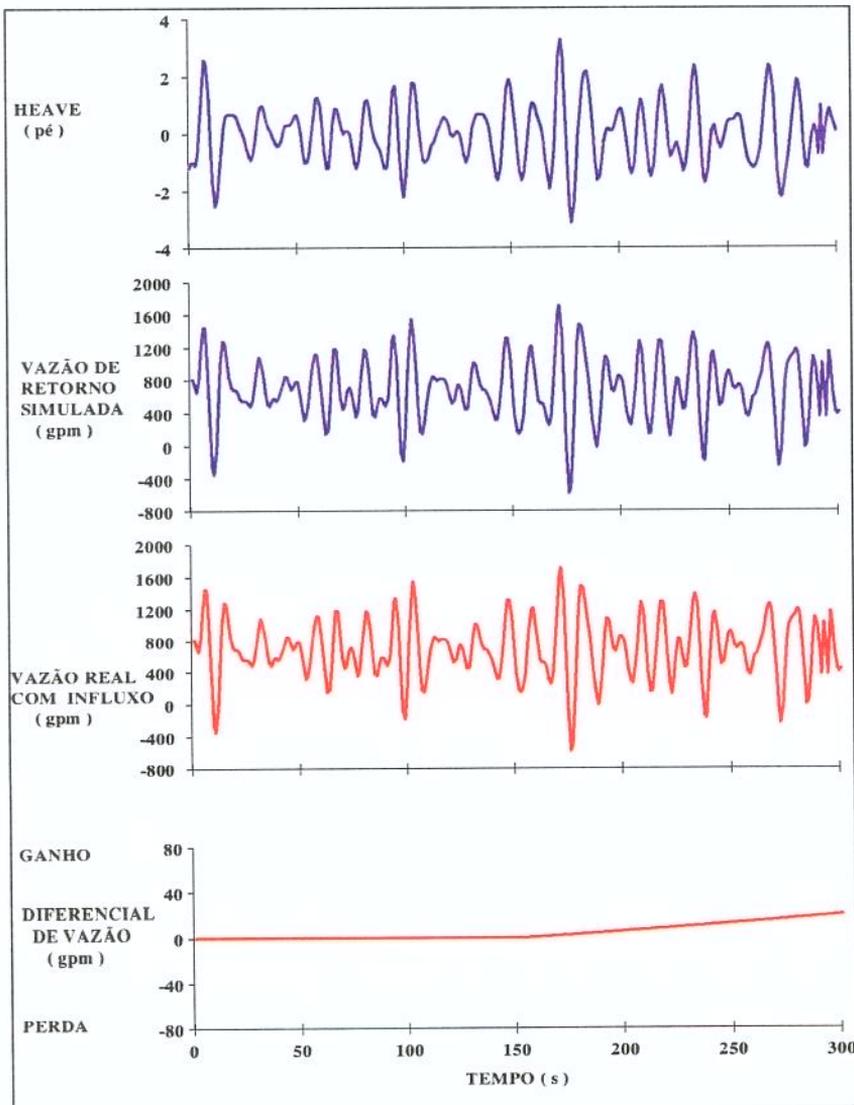


Figura 4-7. Detecção de um Influxo no Poço

5- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho é fundamentado no princípio de que, qualquer que seja o volume de fluido bombeado para o interior do poço, ele deve também ser retornado para fora do mesmo sob condições normais de perfuração. Se mais fluido é retornado do poço do que foi bombeado, temos uma situação anormal de ganho de fluidos da formação. Se menos fluido é retornado do poço do que foi bombeado, temos uma situação anormal de perda de fluidos para a formação.

1- Do presente estudo podemos concluir que:

- O método apresentado quantifica os valores de *surge* (variações na vazão de retorno criadas pela ação da junta telescópica no *riser* devido ao movimento de *heave* da embarcação). Estes valores são então utilizados para compensar os efeitos desta perturbação nas medições da vazão de retorno realizadas em sondas de perfuração flutuantes.

- A remoção destes valores de *surge* na vazão de retorno coloca as medições de vazão realizadas na mesma situação de sondas terrestres. E com o emprego de sistemas já conhecidos de detecção de influxos ou perdas de circulação, fica sendo possível a sua rápida identificação.

- A ótima precisão e a faixa dinâmica de valores de medição de um sensor são características determinantes para se detectar pequenas mudanças na vazão de retorno em um meio de grandes perturbações de fluxos, como por exemplo, o causado pelo efeito do movimento de *heave*.

- Em sondas flutuantes que disponham de sistemas de monitoração em tempo real, pode-se facilmente utilizar o método proposto para determinação dos valores de $Q(t)$ através de uma rápida implementação. O registro do movimento do *heave* da embarcação através de um sensor de *heave*, ou através de um instrumento instalado nos tensionadores do *riser* que monitore este movimento, é imprescindível para o método.

2- Para futuros trabalhos sugere-se:

- Um estudo para quantificar a influência dos movimentos de *roll* e de *pitch* de um navio sonda nas medições de vazão de retorno realizados com medidores instalados na linha de retorna da lama.

- Elaboração de um sistema de alarme que diferencie os sinais de ruídos (paradas de bombeio, início da circulação, variação da velocidade de bombeio durante a perfuração, conexões, etc.) dos sinais que verdadeiramente revelem problemas de poço em potencial (perda ou ganho de fluidos dentro do poço).

Dos métodos investigados até o momento, ainda não existe um consenso geral quanto ao melhor dentro da indústria do petróleo. Inconveniências tais como: atraso na detecção de influxos (quando do uso de filtros), custo alto aliado a problemas de instalação (quando do emprego dos meios físicos/mecânicos) são algumas das limitações que podem ser questionadas.

BIBLIOGRAFIA

[1] - Anadrill, *Material cedido pela Anadrill para fins acadêmicos*, Macaé, RJ, 1994.

[2] - Baker, R.J. et al., *Mud handling improved with a constant-volume riser*, Oil & Gas Journal, September 24, 1990.

[3] - Baker, R.J., *Improved Heave Compensation*, SPE/IADC 21961, "SPE/IADC 1991 Drilling Conference", Amsterdam, March 11-14.

[4] - Bryant, T.M., Grosso, D.S. e Wallace, S.N., *Gas Influx Detection Using MWD Technology*, IADC/SPE 19973, "IADC/SPE 1990 Drilling Conference", Houston, Texas, February 27-March 2.

[5] - Codazzi, D., Mioque, J.L., Moncharmont, J.A. e Montarom., *High-Pressure Universal Volume Flowmeter for Cementing, Stimulation, Drilling, and Production*, SPE 16650, "SPE 1987 Annual Technical Conference and Exhibition", Dallas, Texas, September 27-30.

[6] - Codazzi, D., Till, P.K., Starkey, A.A., Lenamond, C.P. e Monaghan, B.J., *Rapid and Reliable Gas Influx Detection*, IADC/SPE 23936, "IADC/SPE 1992 Drilling Conference", New Orleans, Louisiana, February 18-21.

[7] - Davis, John C., *Statistics and Data Analysis in Geology*, Second Edition, Singapore, JOHN WILEY & SONS, 1986, 269.

[8] - Hammett, D.S., *DP drilling extends technology*, "Deep Offshore Technology Conference", Palma de Mallorca, February 1982.

[9] - Hatleskog, J.T., *Mud Flow Compensation System for Floating Vessels*, SPE 26733, "Offshore European Conference", Aberdeen, September 7-10, 1993.

[10] - Jardine, S.I., McCann, D.P., White, D.B. e Blake, A.J., *An Improved Kick Detection System for Floating Rigs*, SPE 23133, "Offshore Europe Conference", Aberdeen, September 3-6, 1991.

[11] - Johnsen, H.K., Skalle, P., Podio, A.L., Sirevaag, G. e Vigen, A., *Development and Field Testing of a High-Accuracy Full-Bore Return Flow Meter*, IADC/SPE 17228, "IADC/SPE Drilling Conference", Dallas, Texas, February 28-March 2.

[12] - Martins Lage, A.C.V. e Nakagawa, E.Y., *Detecção de Kicks Durante a Perfuração*, Relatório Técnico Petrobrás, Março 1993.

[13] - Martins Lage, A.C.V. e Nakagawa, E.Y., *Development and Discussion of a New Approach for use Kick Tolerance Concept in HP/HT and Deep Water Wells*, Palestra Proferida na Petrobrás em 1994.

[14] - McCann, D.P., White, D.B., Marais, L. e Rodt, G.M., *Improved Rig Safety by Rapid and Automated Kick Detection*, SPE/IADC 21995, "SPE/IADC 1991 Drilling Conference", Amsterdam, March 11-14.

[15] - McCann, D.P., White, D.B. e Rodt, G.M., *Computerized flow monitors detect small kicks*, Oil & Gas Journal, February 24, 1992.

[16] - Orban, J.J., Zanner, K.J. e Orban, A.E., *New Flowmeters for Kick and Loss Detection During Drilling*, SPE 16665, "SPE 1987 Annual Technical Conference and Exhibition", Dallas, Texas, September 27-30.

[17] - Redmann Jr., K.P., *Understanding Kick Tolerance and Its Significance in Drilling Planning and Execution*, SPE 19991, "IADC/SPE 1990 Drilling Conference", Houston, Texas, February 27-March 2.

[18] - Patel, Minoos H., *DYNAMICS of Offshore Structures*, London, Butterworths, 1989, 402.

[19] - Schafer, D.M., Loeppke, G.E., Glowka, D.A., Scott, D.D. e Wright, E.K., *An Evaluation of Flowmeters for the Detection of Kicks and Lost Circulation During Drilling*, IADC/SPE 23935, "IADC/SPE 1992 Drilling Conference", New Orleans, Louisiana, February 18-21.

[20] - Speers, J.M. e Gehrig, G.F., *Delta Flow: An Accurate, Reliable System for Detecting Kicks and Loss of Circulation During Drilling*, SPE/IADC 13496, "SPE/IADC 1985 Drilling Conference", New Orleans, March 6-8.

[21] - Unsworth, M.I., Burgess, T.M. e Kerbart, Y.J., *How an Improved Depth Measurement and Smart Processing Can Help the Driller Improve Efficiency*", IADC/SPE 19965, "IADC/SPE 1990 Drilling Conference", Houston, Texas, February 27-March 2.

[22] - Vestavik, O.M., Aas, B. e Podio, A.L., *Downhole Gas Detection Method in Drilling Fluids*, IADC/SPE 19971, "IADC/SPE 1990 Drilling Conference", Houston, Texas, February 27-March 2.

[23] - Weishaupt, M.A., Omsberg, N.P., Jardine, S.I. e Patterson, D.A., *Rig Computer System Improves Safety for Deep HP/HT Wells by Kick Detection and Well Control Monitoring*, SPE 23053, "Offshore Europe Conference", Aberdeen, September 3-6, 1991.

[24] - Westerheim, M.H., *Heave Compensated Kick and Lost Circulation Detector*, OTC 3360, "11th Annual OTC", Houston, Texas, April 30-May 3, 1979.

[25] - Wylie JR, C.R., *Advanced Engineering Mathematics*, Third Edition, United States, McGRAW-HILL, 1966, 813.

APÊNDICES

APÊNDICE A

RESPOSTA DA DINÂMICA DE ESTRUTURAS FLUTUANTES SUBMETIDAS AO ESTADO DO MAR - DETERMINAÇÃO DO MOVIMENTO DE *HEAVE*.

O caso mais simples do estudo da dinâmica de estruturas flutuantes pode ser descrito por um sistema mola-massa amortecido com um grau de liberdade na direção da força externa atuante.

A Figura A-1 ilustra este sistema com uma massa m e uma constante de mola K . Ele é linearmente amortecido com um coeficiente de amortecimento C e, é submetido a uma força externa de amplitude F_a e de frequência w . A equação do movimento consiste de uma força de inércia, uma força de amortecimento e de uma força restauradora, todas resistindo a força externa.

$$m\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = F_a \cos(wt) \quad (A.1)$$

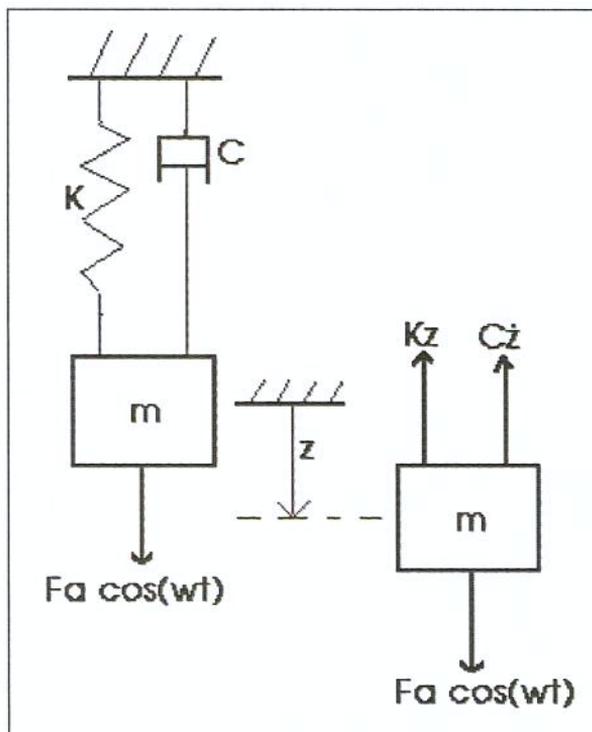


Figura. A-1. Sistema Mola-Massa Amortecido.

A transformação de um problema relacionado com a interação fluido circundante-estrutura de um corpo flutuante, em uma equação de segunda ordem que governe tal sistema dinâmico, é ilustrado na Figura A-2 por considerar o movimento de *heave* de um pequeno corpo flutuante [18].

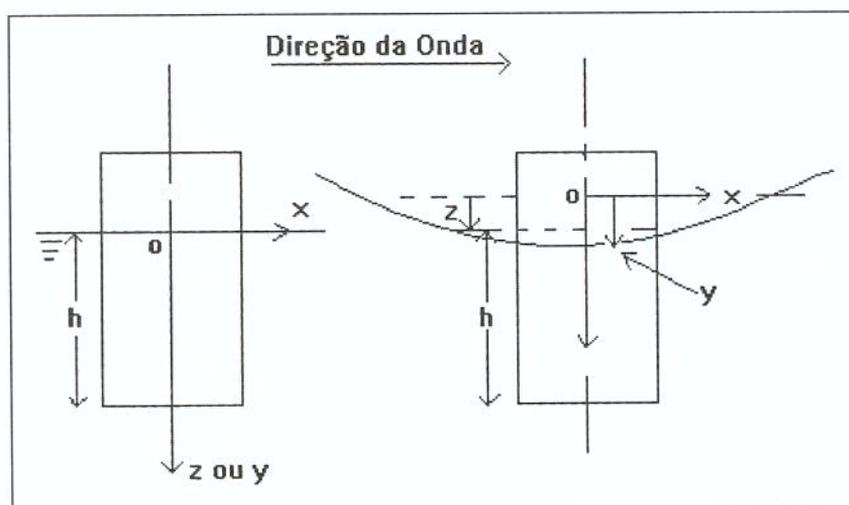


Figura. A-2. Movimento de *Heave* de um Corpo Flutuante.

A coordenada y exprime o movimento vertical da superfície da água, e a coordenada z denota o movimento vertical resultante do corpo (movimento de *heave*). Neste sistema, a força total agindo sobre o corpo será devido as parcelas de massa adicional do corpo no fluido, de forças induzidas pelo amortecimento e pela rigidez hidrostática (forças restauradoras). Estas forças são provocadas pela diferença de movimento entre o corpo flutuante e o fluido circundante. A força resultante destes efeitos induz uma aceleração ao corpo.

Assim, a equação deste movimento pode ser escrita como;

$$m\ddot{z} = A(\ddot{y} - \ddot{z}) + B(\dot{y} - \dot{z}) + C(y - z) \quad (\text{A.2})$$

onde m é a massa do corpo, e A , B e C são os respectivos coeficientes de massa adicional, de força induzida pelo amortecimento e de força induzida pela rigidez hidrostática sobre o corpo flutuante.

Arranjando-se a equação (A.2) de maneira que os termos desconhecidos do movimento do corpo flutuante apareçam no lado esquerdo, vem:

$$(m + A) \ddot{z} + B \dot{z} + C z = F(t). \quad (A.3)$$

onde $F(t) = A \ddot{y} + B \dot{y} + C y. \quad (A.4)$

Estas duas equações regem o comportamento do movimento vertical de um corpo flutuante causado pelo estado do mar. A equação (A.4) representa o movimento de elevação da onda que dá origem a uma força harmônica excitante $F(t)$. Por sua vez, a equação (A.3) representa uma força excitante de onda dando origem a um movimento de *heave*.

A elevação de uma onda na sua forma mais simples, pode ser representada por uma função trigonométrica do tipo:

$$y = a \cos(wt), \quad (A.5)$$

onde a é sua amplitude e w sua frequência. Logo $F(t)$ pode ser de forma similar igual a:

$$F(t) = F_a \cos(wt), \quad (A.6)$$

F_a = amplitude da força.

Portanto, a equação (A.3) torna-se

$$(m + A) \ddot{z} + B \dot{z} + C z = F_a \cos(wt). \quad (A.7)$$

A solução para esta equação diferencial linear não homogênea com coeficientes constantes de segunda ordem já conhecida, é:

$$z = z_1 + z_2 \quad (A.8)$$

onde, z_1 é a função complementar ou solução transiente e z_2 é a solução particular ou solução permanente. Assim,

$$(m + A) \ddot{z} + B \dot{z} + C z = 0, \quad (A.9)$$

tem solução da forma:

$$z_1 = z = K_1 e^{q_1 t} + K_2 e^{q_2 t} \quad (A.10)$$

Como os sinais de q_1 e q_2 são negativos [25], esta solução que representa a parte oscilatória livre do movimento, se aproxima de zero quando t

crece indefinidamente. As constantes arbitrárias K_1 e K_2 podem ser determinadas através das condições iniciais dadas $z(0) = z_0$ e $\frac{dz}{dt}|_{t=0} = 0$. O movimento amortecido destas oscilações desaparece logo que a força externa começa a atuar. Por isso, esta solução não será considerada na solução geral de z .

A solução particular da equação (A.7), representa a parte do movimento que ocorrerá continuamente, enquanto a condição de excitação estiver presente. E a expressão é dada por:

$$z_2 = z = z_a \cos(\omega t + \phi), \quad (\text{A.11})$$

onde

$$z_a = \frac{F_a}{\left\{ \left[C - (m + A)\omega^2 \right]^2 + (B\omega)^2 \right\}^{1/2}}, \quad (\text{A.12})$$

é a amplitude da oscilação, e

$$\phi = \arctan \left[\frac{B\omega}{C - (m + A)\omega^2} \right], \quad (\text{A.13})$$

é o ângulo de fase entre o movimento vertical e a força externa.

APÊNDICE B

AMOSTRA DOS DADOS DE VAZÃO DE INJEÇÃO E DE RETORNO COLETADOS NA UNIDADE DE MUD-LOGGING INSTALADA NO NAVIO SONDA *DISCOVERER SEVEN SEAS* (NS-14).

01-APR-94									
DATE	TIME	TOT FLOW	FLOW OUT	RIG POS	ACT VOL	SPM 1	SPM 2	SPM 3	
	SEC	GPM	GPM	METERS	BBL	SPM	SPM	SPM	
1-Apr-94	13:51:59	681.	795.	13.12	429.7	69.2	71.0	0	
.0	1-Apr-94	13:52:03	684.	424.	13.12	430.2	69.5	71.3	0
.0	1-Apr-94	13:52:08	685.	593.	12.51	429.0	69.5	71.4	0
.0	1-Apr-94	13:52:12	686.	763.	12.51	427.7	69.6	71.5	0
.0	1-Apr-94	13:52:16	686.	784.	12.51	428.8	69.6	71.6	0
.0	1-Apr-94	13:52:20	684.	737.	12.51	426.1	69.6	71.3	0
.0	1-Apr-94	13:52:26	686.	691.	12.44	423.8	69.7	71.5	0
.0	1-Apr-94	13:52:31	687.	644.	12.44	421.6	69.7	71.6	0
.0	1-Apr-94	13:52:35	687.	790.	12.44	426.9	69.7	71.6	0
.0	1-Apr-94	13:52:40	687.	722.	12.44	424.7	69.7	71.7	0
.0	1-Apr-94	13:52:44	686.	673.	13.21	426.4	69.6	71.6	0
.0	1-Apr-94	13:52:51	685.	730.	13.21	427.2	69.5	71.5	0
.0	1-Apr-94	13:52:57	685.	708.	13.21	427.3	69.5	71.5	0
.0	1-Apr-94	13:53:01	685.	581.	13.21	428.2	69.5	71.5	0
.0	1-Apr-94	13:53:05	681.	927.	13.90	430.3	69.2	70.9	0
.0	1-Apr-94	13:53:09	681.	872.	13.90	429.0	69.2	71.0	0
.0	1-Apr-94	13:53:14	681.	817.	13.90	427.7	69.2	71.0	0
.0	1-Apr-94	13:53:18	679.	835.	13.90	430.3	68.9	70.9	0
.0	1-Apr-94	13:53:25	684.	678.	12.40	428.8	69.3	71.4	0
.0	1-Apr-94	13:53:29	684.	867.	12.40	428.0	69.4	71.4	0
.0	1-Apr-94	13:53:33	685.	616.	12.40	430.0	69.5	71.4	0
.0	1-Apr-94	13:53:37	684.	670.	13.13	429.6	69.5	71.4	0
.0	1-Apr-94	13:53:42	684.	724.	13.13	429.1	69.4	71.3	0
.0	1-Apr-94	13:53:46	685.	604.	13.13	430.4	69.5	71.4	0
.0	1-Apr-94	13:53:53	685.	602.	13.13	427.1	69.6	71.5	0
.0	1-Apr-94	13:53:57	685.	628.	13.48	428.1	69.5	71.4	0
.0	1-Apr-94	13:54:00	685.	654.	13.48	429.0	69.5	71.4	0
.0	1-Apr-94	13:54:04	686.	723.	13.48	426.5	69.7	71.6	0
.0	1-Apr-94	13:54:08	686.	781.	13.48	428.5	69.7	71.6	0

APÊNDICE C

AMOSTRA DOS DADOS DO MOVIMENTO
VERTICAL (*HEAVE*) DO NAVIO SONDA NS-14 ADQUIRIDOS
ATRAVÉS DOS REGISTROS DECODIFICADOS DO SEU
SENSOR DE *HEAVE*.

ASK DATA REDUCTION - REV A00 VESSEL= DISCOVERER 7 SEAS PAGE 1										
TIME RUN = 228 11 48 20 TAPE ID=091 CPU 1 ANALOG PRINT										
TRIGGERS: LOW HIGH										
73	74	75	76	77	78	79	80			
CHANNEL 1 ROLL #2	CHANNEL 2 HEAVE	CHANNEL 3 HEAVE ALARM LIMIT	CHANNEL 4 WAVE HEIGHT	CHANNEL 5 CURRENT SENSOR F/A	CHANNEL 6 CURRENT SENSOR F/S	CHANNEL 7 WAVE DIRECTION	CHANNEL 8 WATER TEMPERATURE	DEGREES	FEET	FEET
091 13 52 00	-1.3	-1.2	-1.9	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 01	-1.2	-1.0	-1.0	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 02	.0	-1.0	-1.0	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 03	.2	-1.1	-1.9	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 04	.3	-.7	.3	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 05	.3	.3	-.9	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 06	.1	1.6	-1.0	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 07	-.1	2.6	-1.1	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 08	-.3	2.5	-1.1	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 09	-.4	1.4	.1	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 10	-.3	-.3	-1.2	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 11	-.2	-1.7	-1.1	9.5	.0	.0				S -
ASK DATA REDUCTION - REV A00 VESSEL= DISCOVERER 7 SEAS PAGE 2										
TIME RUN = 228 11 48 20 TAPE ID=091 CPU 1 ANALOG PRINT										
73	74	75	76	77	78	79	80			
091 13 52 12	-1.1	-2.5	-1.2	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 13	.0	-2.3	-1.2	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 14	.0	-1.5	-.2	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 15	.1	-.5	-1.2	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 16	.2	.2	-1.3	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 17	.3	.6	-1.3	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 18	.4	.7	-1.3	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 19	.4	.7	-.4	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 20	.3	.7	-1.1	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 21	.0	.7	-1.1	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 22	-.2	.6	-1.2	9.3	.0	.0				S -
091 13 52 23	-.3	.4	-1.1	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 24	-.2	.2	-.7	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 25	.0	.0	-1.1	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 26	.1	-.2	-1.2	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 27	.2	-.5	-1.3	9.3	.0	.0				S -
091 13 52 28	.2	-.8	-1.1	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 29	.2	-.9	-.9	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 30	.2	-.7	-1.1	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 31	.3	-.1	-1.2	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 32	.3	.5	-1.1	9.5	.0	.0				S -
ASK DATA REDUCTION - REV A00 VESSEL= DISCOVERER 7 SEAS PAGE 3										
TIME RUN = 228 11 48 20 TAPE ID=091 CPU 1 ANALOG PRINT										
73	74	75	76	77	78	79	80			
091 13 52 33	.3	.9	-1.0	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 34	.1	1.0	-.8	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 35	-.1	.8	-1.0	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 36	-.2	.5	-1.0	9.3	.0	.0				S -
091 13 52 37	-.3	.2	-1.0	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 38	-.3	.1	-1.0	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 39	-.3	-.1	-.6	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 40	-.2	-.3	-1.0	9.4	.0	.0				S -
091 13 52 41	-.1	-.4	-.9	9.5	.0	.0				S -
091 13 52 42	.0	-.4	-1.0	9.5	.0	.0				S -

APÊNDICE D

RESULTADO DOS VALORES DE VAZÃO DE RETORNO DO MÉTODO PROPOSTO (VAZÃO SIMULADA) DETERMINADOS A PARTIR DO MONITORAMENTO DO MOVIMENTO DE *HEAVE* DO NAVIO SONDA NS-14.

Dados obtidos no navio NS-14: diâmetro interno do *riser* = 17 1/2 pol., diâmetro externo da coluna de perfuração = 5 pol. Este anular tem uma capacidade volumétrica de 0,2649 bbl/pé, que é equivalente a uma área S de 0,138 m².

Para o cálculo das flutuações nas vazões de retorno Q(T), provocadas pelo movimento de *heave* (Z), foi utilizado um programa em FORTRAN para determinação das suas derivadas (Z').

$$Q(T) = S \times Z'$$

$$Q(T) = 0,138 \text{ m}^2 \times Z' \text{ (pé/s)} \times 60 \text{ (pé/min)} \times 1/3,281 \text{ (m/pé)}$$

$$= 2,52 \times Z' \text{ (pé/s)} \text{ (m}^3\text{/min)}$$

$$= 2,52 \times Z' \text{ (pé/s)} \times 264,2 \text{ (gal/min)}$$

$$Q(T) = 666,74 \times Z' \text{ (pé/s)} \text{ gpm.}$$

Tempo t (seg)	Heave Z (pé)	Derivada Z' (pé/seg)	Flutuações Q(T) = S x Z' (gpm)	Vazão de Injeção Q(I) (gpm)	Vazão Simulada Q(M) = Q(T) + Q(I) (gpm)
0	-1.2	0,2	133,348	685	818,348
1	-1	0,1	66,674	685	751,674
2	-1	-0,05	-33,337	685	651,663
3	-1.1	0,15	100,011	685	785,011
4	-0.7	0,7	466,718	685	1151,718
5	0.3	1,15	766,751	685	1451,751
6	1.6	1,15	766,751	685	1451,751
7	2.6	0,45	300,033	685	985,033
8	2.5	-0,6	-400,044	685	284,956
9	1.4	-1,4	-933,436	685	-248,436
10	-0.3	-1,55	-1033,447	685	-348,447
11	-1.7	-1,1	-733,414	685	-48,41399
12	-2.5	-0,3	-200,022	685	484,978
13	-2.3	0,5	333,37	685	1018,37
14	-1.5	0,9	600,066	685	1285,066
15	-0.5	0,85	566,729	685	1251,729
16	0.2	0,55	366,707	685	1051,707
17	0.6	0,25	166,685	685	851,685
18	0.7	0,05	33,337	685	718,337
19	0.7	0	0	685	685
20	0.7	0	0	685	685

21	0.7	-0,05	-33,337	685	651,663
22	0.6	-0,15	-100,011	685	584,989
23	0.4	-0,2	-133,348	685	551,652
24	0.2	-0,2	-133,348	685	551,652
25	0	-0,2	-133,348	685	551,652
26	-0.2	-0,25	-166,685	685	518,315
27	-0.5	-0,3	-200,022	685	484,978
28	-0.8	-0,2	-133,348	685	551,652
29	-0.9	0,05	33,337	685	718,337
30	-0.7	0,4	266,696	685	951,696
31	-0.1	0,6	400,044	685	1085,044
32	0.5	0,5	333,37	685	1018,37
33	0.9	0,25	166,685	685	851,685
34	1	-0,05	-33,337	685	651,663
35	0.8	-0,25	-166,685	685	518,315
36	0.5	-0,3	-200,022	685	484,978
37	0.2	-0,2	-133,348	685	551,652
38	0.1	-0,15	-100,011	685	584,989
39	-0.1	-0,2	-133,348	685	551,652
40	-0.3	-0,15	-100,011	685	584,989
41	-0.4	-0,05	-33,337	685	651,663
42	-0.4	0,1	66,674	685	751,674
43	-0.2	0,25	166,685	685	851,685

44	0.1	0,25	166,685	685	851,685
45	0.3	0,1	66,674	685	751,674
46	0.3	0	0	685	685
47	0.3	0,05	33,337	685	718,337
48	0.4	0,15	100,011	685	785,011
49	0.6	0,15	100,011	685	785,011
50	0.7	-0,05	-33,337	685	651,663
51	0.5	-0,35	-233,359	685	451,641
52	0	-0,55	-366,707	685	318,293
53	-0.6	-0,5	-333,37	685	351,63
54	-1	-0,2	-133,348	685	551,652
55	-1	0,15	100,011	685	785,011
56	-0.7	0,45	300,033	685	985,033
57	-0.1	0,65	433,381	685	1118,381
58	0.6	0,65	433,381	685	1118,381
59	1.2	0,35	233,359	685	918,359
60	1.3	-0,1	-66,674	685	618,326
61	1	-0,5	-333,37	685	351,63
62	0.3	-0,8	-533,392	685	151,608
63	-0.6	-0,75	-500,055	685	184,945
64	-1.2	-0,3	-200,022	685	484,978
65	-1.2	0,3	200,022	685	885,022
66	-0.6	0,75	500,055	685	1185,055

67	0.3	0,75	500,055	685	1185,055
68	0.9	0,3	200,022	685	885,022
69	0.9	-0,15	-100,011	685	584,989
70	0.6	-0,35	-233,359	685	451,641
71	0.2	-0,3	-200,022	685	484,978
72	0	-0,05	-33,337	685	651,663
73	0.1	0,05	33,337	685	718,337
74	0.1	-0,05	-33,337	685	651,663
75	0	-0,25	-166,685	685	518,315
76	-0.4	-0,5	-333,37	685	351,63
77	-1	-0,4	-266,696	685	418,304
78	-1.2	0	0	685	685
79	-1	0,45	300,033	685	985,033
80	-0.3	0,75	500,055	685	1185,055
81	0.5	0,7	466,718	685	1151,718
82	1.1	0,35	233,359	685	918,359
83	1.2	-0,1	-66,674	685	618,326
84	0.9	-0,45	-300,033	685	384,967
85	0.3	-0,5	-333,37	685	351,63
86	-0.1	-0,3	-200,022	685	484,978
87	-0.3	-0,15	-100,011	685	584,989
88	-0.4	-0,15	-100,011	685	584,989
89	-0.6	-0,25	-166,685	685	518,315

90	-0.9	-0,3	-200,022	685	484,978
91	-1.2	-0,15	-100,011	685	584,989
92	-1.2	0,35	233,359	685	918,359
93	-0.5	0,9	600,066	685	1285,066
94	0.6	1	666,74	685	1351,74
95	1.5	0,55	366,707	685	1051,707
96	1.7	-0,35	-233,359	685	451,641
97	0.8	-1,15	-766,751	685	-81,75099
98	-0.6	-1,3	-866,762	685	-181,762
99	-1.8	-0,8	-533,392	685	151,608
100	-2.2	0,1	66,674	685	751,674
101	-1.6	0,95	633,403	685	1318,403
102	-0.3	1,3	866,762	685	1551,762
103	1	1,05	700,077	685	1385,077
104	1.8	0,4	266,696	685	951,696
105	1.8	-0,3	-200,022	685	484,978
106	1.2	-0,75	-500,055	685	184,945
107	0.3	-0,8	-533,392	685	151,608
108	-0.4	-0,6	-400,044	685	284,956
109	-0.9	-0,3	-200,022	685	484,978
110	-1	0	0	685	685
111	-0.9	0,15	100,011	685	785,011
112	-0.7	0,25	166,685	685	851,685

113	-0.4	0,2	133,348	685	818,348
114	-0.3	0,15	100,011	685	785,011
115	-0.1	0,2	133,348	685	818,348
116	0.1	0,2	133,348	685	818,348
117	0.3	0,2	133,348	685	818,348
118	0.5	0,15	100,011	685	785,011
119	0.6	0	0	685	685
120	0.5	-0,15	-100,011	685	584,989
121	0.3	-0,25	-166,685	685	518,315
122	0	-0,2	-133,348	685	551,652
123	-0.1	0	0	685	685
124	0	0,1	66,674	685	751,674
125	0.1	0	0	685	685
126	0	-0,2	-133,348	685	551,652
127	-0.3	-0,35	-233,359	685	451,641
128	-0.7	-0,35	-233,359	685	451,641
129	-1	-0,05	-33,337	685	651,663
130	-0.8	0,3	200,022	685	885,022
131	-0.4	0,5	333,37	685	1018,37
132	0.2	0,45	300,033	685	985,033
133	0.5	0,25	166,685	685	851,685
134	0.7	0,1	66,674	685	751,674
135	0.7	0	0	685	685

136	0.7	0	0	685	685
137	0.7	-0,05	-33,337	685	651,663
138	0.6	-0,15	-100,011	685	584,989
139	0.4	-0,25	-166,685	685	518,315
140	0.1	-0,4	-266,696	685	418,304
141	-0.4	-0,55	-366,707	685	318,293
142	-1	-0,55	-366,707	685	318,293
143	-1.5	-0,3	-200,022	685	484,978
144	-1.6	0,15	100,011	685	785,011
145	-1.2	0,65	433,381	685	1118,381
146	-0.3	0,95	633,403	685	1318,403
147	0.7	0,95	633,403	685	1318,403
148	1.6	0,6	400,044	685	1085,044
149	1.9	0,05	33,337	685	718,337
150	1.7	-0,45	-300,033	685	384,967
151	1	-0,75	-500,055	685	184,945
152	0.2	-0,8	-533,392	685	151,608
153	-0.6	-0,75	-500,055	685	184,945
154	-1.3	-0,5	-333,37	685	351,63
155	-1.6	-0,05	-33,337	685	651,663
156	-1.4	0,4	266,696	685	951,696
157	-0.8	0,75	500,055	685	1185,055
158	0.1	0,8	533,392	685	1218,392

159	0.8	0,5	333,37	685	1018,37
160	1.1	0,1	66,674	685	751,674
161	1	-0,2	-133,348	685	551,652
162	0.7	-0,25	-166,685	685	518,315
163	0.5	-0,25	-166,685	685	518,315
164	0.2	-0,35	-233,359	685	451,641
165	-0.2	-0,55	-366,707	685	318,293
166	-0.9	-0,65	-433,381	685	251,619
167	-1.5	-0,5	-333,37	685	351,63
168	-1.9	0	0	685	685
169	-1.5	0,75	500,055	685	1185,055
170	-0.4	1,35	900,099	685	1585,099
171	1.2	1,55	1033,447	685	1718,447
172	2.7	1,05	700,077	685	1385,077
173	3.3	0,05	33,337	685	718,337
174	2.8	-1,1	-733,414	685	-48,41399
175	1.1	-1,9	-1266,806	685	-581,806
176	-1	-1,8	-1200,132	685	-515,132
177	-2.5	-1,05	-700,077	685	-15,07699
178	-3.1	0	0	685	685
179	-2.5	0,85	566,729	685	1251,729
180	-1.4	1,2	800,088	685	1485,088
181	-0.1	1,15	766,751	685	1451,751

182	0.9	0,9	600,066	685	1285,066
183	1.7	0,6	400,044	685	1085,044
184	2.1	0,25	166,685	685	851,685
185	2.2	-0,15	-100,011	685	584,989
186	1.8	-0,55	-366,707	685	318,293
187	1.1	-0,9	-600,066	685	84,93401
188	0	-1,05	-700,077	685	-15,07699
189	-1	-0,8	-533,392	685	151,608
190	-1.6	-0,25	-166,685	685	518,315
191	-1.5	0,3	200,022	685	885,022
192	-1	0,6	400,044	685	1085,044
193	-0.3	0,55	366,707	685	1051,707
194	0.1	0,25	166,685	685	851,685
195	0.2	0	0	685	685
196	0.1	-0,05	-33,337	685	651,663
197	0.1	0,1	66,674	685	751,674
198	0.3	0,25	166,685	685	851,685
199	0.6	0,25	166,685	685	851,685
200	0.8	0,15	100,011	685	785,011
201	0.9	-0,1	-66,674	685	618,326
202	0.6	-0,4	-266,696	685	418,304
203	0.1	-0,6	-400,044	685	284,956
204	-0.6	-0,65	-433,381	685	251,619

205	-1.2	-0,4	-266,696	685	418,304
206	-1.4	0,05	33,337	685	718,337
207	-1.1	0,6	400,044	685	1085,044
208	-0.2	0,9	600,066	685	1285,066
209	0.7	0,7	466,718	685	1151,718
210	1.2	0,15	100,011	685	785,011
211	1	-0,45	-300,033	685	384,967
212	0.3	-0,8	-533,392	685	151,608
213	-0.6	-0,8	-533,392	685	151,608
214	-1.3	-0,45	-300,033	685	384,967
215	-1.5	0,1	66,674	685	751,674
216	-1.1	0,6	400,044	685	1085,044
217	-0.3	0,9	600,066	685	1285,066
218	0.7	0,9	600,066	685	1285,066
219	1.5	0,5	333,37	685	1018,37
220	1.7	-0,1	-66,674	685	618,326
221	1.3	-0,65	-433,381	685	251,619
222	0.4	-0,85	-566,729	685	118,271
223	-0.4	-0,6	-400,044	685	284,956
224	-0.8	-0,15	-100,011	685	584,989
225	-0.7	0,2	133,348	685	818,348
226	-0.4	0,2	133,348	685	818,348
227	-0.3	-0,1	-66,674	685	618,326

228	-0.6	-0,35	-233,359	685	451,641
229	-1	-0,35	-233,359	685	451,641
230	-1.3	-0,05	-33,337	685	651,663
231	-1.1	0,5	333,37	685	1018,37
232	-0.3	0,9	600,066	685	1285,066
233	0.7	1,05	700,077	685	1385,077
234	1.8	0,85	566,729	685	1251,729
235	2.4	0,15	100,011	685	785,011
236	2.1	-0,65	-433,381	685	251,619
237	1.1	-1,25	-833,425	685	-148,425
238	-0.4	-1,3	-866,762	685	-181,762
239	-1.5	-0,65	-433,381	685	251,619
240	-1.7	0,1	66,674	685	751,674
241	-1.3	0,6	400,044	685	1085,044
242	-0.5	0,7	466,718	685	1151,718
243	0.1	0,4	266,696	685	951,696
244	0.3	-0,05	-33,337	685	651,663
245	0	-0,3	-200,022	685	484,978
246	-0.3	-0,25	-166,685	685	518,315
247	-0.5	0	0	685	685
248	-0.3	0,25	166,685	685	851,685
249	0	0,35	233,359	685	918,359
250	0.4	0,25	166,685	685	851,685

251	0.5	0,05	33,337	685	718,337
252	0.5	0	0	685	685
253	0.5	0,05	33,337	685	718,337
254	0.6	0,1	66,674	685	751,674
255	0.7	0	0	685	685
256	0.6	-0,25	-166,685	685	518,315
257	0.2	-0,45	-300,033	685	384,967
258	-0.3	-0,5	-333,37	685	351,63
259	-0.8	-0,35	-233,359	685	451,641
260	-1	-0,15	-100,011	685	584,989
261	-1.1	-0,1	-66,674	685	618,326
262	-1.2	0	0	685	685
263	-1.1	0,15	100,011	685	785,011
264	-0.9	0,3	200,022	685	885,022
265	-0.5	0,55	366,707	685	1051,707
266	0.2	0,75	500,055	685	1185,055
267	1	0,85	566,729	685	1251,729
268	1.9	0,7	466,718	685	1151,718
269	2.4	0,2	133,348	685	818,348
270	2.3	-0,45	-300,033	685	384,967
271	1.5	-1,1	-733,414	685	-48,41399
272	0.1	-1,4	-933,436	685	-248,436
273	-1.3	-1,1	-733,414	685	-48,41399

274	-2.1	-0,45	-300,033	685	384,967
275	-2.2	0,15	100,011	685	785,011
276	-1.8	0,45	300,033	685	985,033
277	-1.3	0,55	366,707	685	1051,707
278	-0.7	0,6	400,044	685	1085,044
279	-0.1	0,65	433,381	685	1118,381
280	0.6	0,75	500,055	685	1185,055
281	1.4	0,65	433,381	685	1118,381
282	1.9	0,2	133,348	685	818,348
283	1.8	-0,5	-333,37	685	351,63
284	0.9	-1,05	-700,077	685	-15,07699
285	-0.3	-1	-666,74	685	18,26001
286	-1.1	-0,45	-300,033	685	384,967
287	-1.2	0,25	166,685	685	851,685
288	-0.6	0,6	400,044	685	1085,044
289	0	0,45	300,033	685	985,033
290	0.3	0	0	685	685
291	0	-0,5	-333,37	685	351,63
292	-0.7	0,5	333,37	685	1018,37
293	1	0	0	685	685
294	-0.7	-0,5	-333,37	685	351,63
295	0	0,7	466,718	685	1151,718
296	0.7	0,45	300,033	685	985,033

297	0.9	-0,05	-33,337	685	651,663
298	0.6	-0,4	-266,696	685	418,304
299	0.1	-0,45	-300,033	685	384,967
300	-0.3	-0,4	-266,696	685	418,304