

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET-RJ**

**Algoritmo previsor de posição da extremidade
cortada de uma coluna após o fechamento de gaveta
cisalhante durante uma desconexão de emergência
em sonda de exploração de petróleo**

Leonardo Negreiros Weihrauch

Prof. Orientador: Alexandre Silva de Lima
Coorientador: Engenheiro Guilherme Negreiros Weihrauch

**Rio de Janeiro
Novembro de 2017**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET-RJ**

**Algoritmo previsor de posição da extremidade
cortada de uma coluna após o fechamento de gaveta
cisalhante durante uma desconexão de emergência
em sonda de exploração de petróleo**

Leonardo Negreiros Weihrauch

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Alexandre Silva de Lima
Coorientador: Engenheiro Guilherme Negreiros Weihrauch

**Rio de Janeiro
Novembro de 2017**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

W419 Weihrauch, Leonardo Negreiros
Algoritmo previsor de posição da extremidade cortada de uma
coluna após o fechamento de gaveta cisalhante durante uma
desconexão de emergência em sonda de exploração de petróleo /
Leonardo Negreiros Weihrauch.—2017.
xv, 115f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.

Bibliografia : f. 115

Orientador : Alexandre Silva de Lima

1. Engenharia mecânica. 2. Algoritmos. 3. Engenharia de
petróleo. 4. Poços de petróleo submarino – Perfuração. 5.
Sondagem. I. Lima, Alexandre Silva de (Orient.). II. Título.

CDD 621

Agradecimentos

Aos meus pais Valter e Mara, por todo apoio durante esse caminho tortuoso. Por me dar forças quando fui fraco, broncas quando perdi o foco, alegria de seguir em frente e, mais que tudo, os valores que me guiam.

Ao meu irmão, engenheiro Guilherme Weihrauch, pela valiosa orientação e pelo grande exemplo de pessoa. E à Gaby, sua esposa, pela amizade a mim e por cuidar muito bem do meu irmão.

À minha namorada e companheira, Tâmem Luiza, pelo carinho, apoio e suporte nessa reta final. E por me fazer acreditar que trabalhar pelo amanhã vale o esforço.

Ao meu orientador e professor Alexandre, pelas palavras de apoio, bom humor de sempre e orientação nessa etapa da minha formação.

Aos meus amigos Marcos e Júlia, por todo apoio e presença constante durante todos os bons e maus momentos do caminho.

Ao Belmiro, por todo suporte e boa vontade nas dificuldades que tive durante minha chegada ao CEFET, sem o qual talvez não estivesse hoje entregando este Projeto.

Ao CEFET-RJ, pela oportunidade de me formar engenheiro e poder contribuir com a sociedade da forma que sou capaz.

Resumo

Sequências de desconexão de emergência em sondas de exploração de petróleo são operações críticas e necessitam de decisões rápidas e precisas para garantir a segurança dos trabalhadores, mitigar prejuízos financeiros e evitar tragédias ambientais. Para essa tomada de decisão é fundamental o uso de algoritmos que calculem as variáveis presentes nas diversas situações específicas possíveis para uma emergência na sonda. Uma situação que pode ocorrer é a necessidade de se realizar uma desconexão com o fechamento de duas gavetas cisalhantes, sendo a primeira sem capacidade de vedação e a segunda com capacidade de vedação, onde a primeira irá realizar o corte dos elementos da coluna de perfuração presentes na frente do BOP (*Blowout Preventer* ou preventor de *Blowout*) e a segunda gaveta irá fechar instantes depois, devendo ter seu fechamento desimpedido (realizar o fechamento no vazio). Para garantir que esse segundo acionamento ocorra num momento onde não haja elemento na frente da segunda gaveta é necessário se considerar um conjunto de fatores que influenciam na posição dessa extremidade cortada da coluna no intervalo de tempo previsto para o segundo fechamento. Os fatores principais são o encurtamento da coluna pela retirada de carga cortada, a variação do afundamento da sonda pelo movimento marinho e a variação da posição da coluna devido à deriva da sonda. Um algoritmo foi construído com o equacionamento desses fatores, levando em conta que dados se tem disponível na operação de uma sonda ou o que é possível com a ajuda de outros trabalhos acadêmicos sobre os fatores mencionados. Esse algoritmo utiliza esses dados para gerar uma informação de posição da extremidade cortada em função do tempo, com a referência de zero na posição da segunda gaveta de corte. Um simulador com esse algoritmo foi construído para avaliar situações realistas idealizadas por um engenheiro da área e os resultados foram analisados, fornecendo conclusões quantitativas sobre a influência de vários parâmetros no posicionamento da extremidade cortada da coluna.

Palavras-chave: coluna de perfuração, sequência de desconexão de emergência, alongação de coluna, gavetas cisalhantes.

Abstract

Emergency disconnection sequences in oil drilling rigs are critical operations and require quick and accurate decisions to ensure worker safety, mitigate financial losses, and avoid environmental tragedies. For this decision making it is fundamental to use algorithms that calculate the variables present in the different possible situations for an emergency in the rig. A situation that may occur is the need to perform a disconnection with the closure of two shear rams, the first one without sealing capacity and the second with sealing capacity, where the first will perform the cutting of the elements of the drilling column present in front of the Blowout Preventer and the second ram will close briefly after, and must have its closure in void space. To ensure that this second drive occurs at a time when there is no element in front of the second ram, it is necessary to consider a set of factors that influence the position of said cut end of the post in the time interval provided for the second closure. The main factors are the shortening of the column by the withdrawal of cut cargo, the variation of the *Heave* of the rig by the marine movement and the variation of the position of the column due to the drift of the vessel. An algorithm was constructed with the equation of these factors, taking into account what data is available in the operation of a rig or what is possible nowadays with the help of other academic papers on the mentioned factors. This algorithm uses this data to generate a position information of the cut end as a function of time, with the zero reference at the position of the second cutter. A simulator with this algorithm was constructed to evaluate realistic situations idealized by an engineer of the area and the results were analyzed, providing quantitative conclusions on the influence of several parameters in the positioning of the cut end of the column.

Keywords: drilling column, emergency disconnection sequence, column elongation, shear rams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Acidente da Deepwater Horizon (2010)[1].....	2
Figura 2 - Sistema de segurança (Deepwater Horizon Study Group, University of California, Berkeley)[1].....	3
Figura 3 - Tipos de Sondas Marítimas – FONTE: ClickMacaé	6
Figura 4 - Navio-sonda moderno – FONTE: PetroNotícias.com.br.....	6
Figura 5 - Plataforma Semi-submersível – FONTE: PetroNotícias.com.br	7
Figura 6 - Torre de plataforma [4]	8
Figura 7 - Esquema da Sonda Mecânica [4].....	8
Figura 8 - Esquema Sonda Diesel-Elétrica [4]	9
Figura 9 - Exemplo de guincho [3]	9
Figura 10 - Exemplo de bloco de coroamento [4]	10
Figura 11 - Exemplo de Catarina [4]	10
Figura 12 - Mesa rotativa e Kelly [4].....	11
Figura 13 - Top Drive [4].....	12
Figura 14 - Motor de Fundo (Fonte: http://www.dthrotarydrilling.com).....	12
Figura 15 - Esquema de circulação de fluido [4].....	13
Figura 16 - Peneira Vibratória [3]	13
Figura 17 - Tratamento do fluido [3]	14
Figura 18 - Exemplo de BOP – FONTE: Martínez, 2010	14
Figura 19 - Preventor anular [4]	15
Figura 20 - Casing Shear Ram – FONTE: Workboat.com.....	15
Figura 21 - Blind Shear Ram - FONTE: Workboat.com.....	16
Figura 22 - Esquema de Cabeça de Poço [3].....	18
Figura 23 - Comandos lisos e espiralados.....	19
Figura 24 - Tubo Pesado [4].....	20
Figura 25 - Tubo de Perfuração [13]	21
Figura 26 - Offset de tubos de perfuração	22
Figura 27 - Substitutos	23
Figura 28 - Estabilizadores.....	24
Figura 29 - Escareadores [15]	24
Figura 30 - Alargador Hole Opener.....	25
Figura 31 - Alargador Under Reamer.....	25
Figura 32 - Amortecedor de coluna de perfuração [4]	25
Figura 33 - Chave Flutuante [4]	26
Figura 34 - Cunhas [4]	26
Figura 35 - Colar de Segurança [4].....	27
Figura 36 - Necessidade de EDS [13]	27
Figura 37 - Estados operacionais de uma sonda.....	28
Figura 38 - Evolução dos estados de operação em incidentes entre 1978 e 2012	29
Figura 39 - Evolução dos estados de operação em incidentes entre 2012 e 2017	30
Figura 40 - Configuração de BOP com três gavetas (BSR+CSR+BSR) [14]	31
Figura 41 - Curva típica de tensão x deformação [5]	34
Figura 42 - Extensão completa da coluna [7]	36
Figura 43 - Esforços sobre a coluna provocados pelas correntes marinhas [10]	38
Figura 44 - Distância entre Sonda e BOP	39

Figura 45 - Efeito do mar sobre embarcação [10]	41
Figura 46 - Amplitude de Heave da Sonda – FONTE: fisicalouca2012.blogspot.com.br	43
Figura 47 - Previsão de Heave por acelerômetros [11]	43
Figura 48 - Zonas de ganho e perda de Heave	45
Figura 49 – Definição das ZP e ZG	46
Figura 50 - Efeito de deriva	47
Figura 51 - Planilha de Ficha de Cenário.....	53
Figura 52 - Planilha Dados de Entrada.....	53
Figura 53 - Planilha Retração.....	54
Figura 54 - Planilha Heave Ajustado	55
Figura 55 - Planilha Heave Teórico	55
Figura 56 - Planilha Deriva.....	56
Figura 57 - Planilha Resultado	57
Figura 58 - Cenário 1A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	60
Figura 59 - Cenário 1A com intervalo de corte fixo e Heave teórico	61
Figura 60 - Cenário 1A com intervalo de corte variável e Heave ajustado	62
Figura 61 - Cenário 1A com intervalo de corte variável e Heave teórico.....	63
Figura 62 - Cenário 1B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	65
Figura 63 - Cenário 1B com intervalo de corte fixo e Heave teórico	66
Figura 64 - Cenário 1B com intervalo de corte variável e Heave ajustado	67
Figura 65 - Cenário 1B com intervalo de corte variável e Heave teórico	68
Figura 66 - Cenário 2A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	71
Figura 67 - Cenário 2A com intervalo de corte fixo e Heave teórico	72
Figura 68 - Cenário 2A com intervalo de corte variável e Heave ajustado	73
Figura 69 - Cenário 2A com intervalo de corte variável e Heave teórico.....	74
Figura 70 - Cenário 2B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	76
Figura 71 - Cenário 2B com intervalo de corte fixo e Heave teórico	77
Figura 72 - Cenário 2B com intervalo de corte variável e Heave ajustado	78
Figura 73 - Cenário 2B com intervalo de corte variável e Heave teórico	79
Figura 74 - Cenário 3A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	82
Figura 75 - Cenário 3A com intervalo de corte fixo e Heave teórico	83
Figura 76 - Cenário 3A com intervalo de corte variável e Heave ajustado	84
Figura 77 - Cenário 3A com intervalo de corte variável e Heave teórico.....	85
Figura 78 - Cenário 3B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	87
Figura 79 - Cenário 3B com intervalo de corte fixo e Heave teórico	88
Figura 80 - Cenário 3B com intervalo de corte variável e Heave ajustado	89
Figura 81 - Cenário 3B com intervalo de corte variável e Heave teórico	90
Figura 82 - Cenário 4A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	93
Figura 83 - Cenário 4A com intervalo de corte fixo e Heave teórico	94
Figura 84 - Cenário 4A com intervalo de corte variável e Heave ajustado	95
Figura 85 - Cenário 4A com intervalo de corte variável e Heave teórico.....	96
Figura 86 - Cenário 4B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	98
Figura 87 - Cenário 4B com intervalo de corte fixo e Heave teórico	99
Figura 88 - Cenário 4B com intervalo de corte variável e Heave ajustado	100
Figura 89 - Cenário 4B com intervalo de corte variável e Heave teórico.....	101
Figura 90 - Cenário 5A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	104
Figura 91 - Cenário 5A com intervalo de corte fixo e Heave teórico	105
Figura 92 - Cenário 5A com intervalo de corte variável e Heave ajustado	106

Figura 93 - Cenário 5A com intervalo de corte variável e Heave teórico.....	107
Figura 94 - Cenário 5B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	109
Figura 95 - Cenário 5B com intervalo de corte fixo e Heave teórico	110
Figura 96 - Cenário 5B com intervalo de corte variável e Heave ajustado	111
Figura 97 - Cenário 5B com intervalo de corte variável e Heave teórico.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Arranjos de gavetas cisalhantes no BOP [4].....	17
Tabela 2 - Grau de aços para tubos de perfuração.....	21
Tabela 3 - Categorias de comprimento nominal pela API – FONTE: API.....	22
Tabela 4 - Grau de desgaste no tubo de perfuração	22
Tabela 5 – Dimensões de válvulas em um BOP típico – FONTE: Worldwide Oilfield Machine	33
Tabela 6 - Especificações da coluna de perfuração – FONTE: SteelPipe, 2017	40
Tabela 7 - Entradas para a retração da coluna	49
Tabela 8 - Entradas para a perda de Heave	49
Tabela 9 - Entradas para a variação pela Deriva.....	50
Tabela 10 - Dados dos cenários de simulação	58
Tabela 11 - Dados do Cenário 1A	59
Tabela 12 - Resultado do cenário 1A com intervalo de corte fixo e Heave Ajustado.....	60
Tabela 13 - Cenário 1A com intervalo de corte fixo e Heave teórico	61
Tabela 14 - Cenário 1A com intervalo de corte variável e Heave ajustado	62
Tabela 15 - Cenário 1A com intervalo de corte variável e Heave teórico	63
Tabela 16 - Dados do Cenário 1B	64
Tabela 17 - Cenário 1B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	65
Tabela 18 - Cenário 1B com intervalo de corte fixo e Heave teórico.....	66
Tabela 19 - Cenário 1B com intervalo de corte variável e Heave ajustado.....	67
Tabela 20 - Cenário 1B com intervalo de corte variável e Heave teórico	68
Tabela 21 - Dados do Cenário 2A	70
Tabela 22 - Cenário 2A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	71
Tabela 23 - Cenário 2A com intervalo de corte fixo e Heave teórico	72
Tabela 24 - Cenário 2A com intervalo de corte variável e Heave ajustado	73
Tabela 25 - Cenário 2A com intervalo de corte variável e Heave teórico	74
Tabela 26 - Dados do Cenário 2B	75
Tabela 27 - Cenário 2B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	76
Tabela 28 - Cenário 2B com intervalo de corte fixo e Heave teórico.....	77
Tabela 29 - Cenário 2B com intervalo de corte variável e Heave ajustado.....	78
Tabela 30 - Cenário 2B com intervalo de corte variável e Heave teórico	79
Tabela 31 - Dados do Cenário 3A	81
Tabela 32 - Cenário 3A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	82
Tabela 33 - Cenário 3A com intervalo de corte fixo e Heave teórico	83
Tabela 34 - Cenário 3A com intervalo de corte variável e Heave ajustado	84
Tabela 35 - Cenário 3A com intervalo de corte variável e Heave teórico	85
Tabela 36 - Dados do Cenário 3B	86
Tabela 37 - Cenário 3B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	87
Tabela 38 - Cenário 3B com intervalo de corte fixo e Heave teórico.....	88
Tabela 39 - Cenário 3B com intervalo de corte variável e Heave ajustado.....	89
Tabela 40 - Cenário 3B com intervalo de corte variável e Heave teórico	90
Tabela 41 - Dados do Cenário 4A	92
Tabela 42 - Cenário 4A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	93
Tabela 43 - Cenário 4A com intervalo de corte fixo e Heave teórico	94
Tabela 44 - Cenário 4A com intervalo de corte variável e Heave ajustado	95
Tabela 45 - Cenário 4A com intervalo de corte variável e Heave teórico	96

Tabela 46 - Dados do Cenário 4B	97
Tabela 47 - Cenário 4B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	98
Tabela 48 - Cenário 4B com intervalo de corte fixo e Heave teórico.....	99
Tabela 49 - Cenário 4B com intervalo de corte variável e Heave ajustado.....	100
Tabela 50 - Cenário 4B com intervalo de corte variável e Heave teórico	101
Tabela 51 - Dados do Cenário 5A	103
Tabela 52 - Cenário 5A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	104
Tabela 53 - Cenário 5A com intervalo de corte fixo e Heave teórico	105
Tabela 54 - Cenário 5A com intervalo de corte variável e Heave ajustado	106
Tabela 55 - Cenário 5A com intervalo de corte variável e Heave teórico	107
Tabela 56 - Dados do Cenário 5B	108
Tabela 57 - Cenário 5B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado	109
Tabela 58 - Cenário 5B com intervalo de corte fixo e Heave teórico.....	110
Tabela 59 - Cenário 5B com intervalo de corte variável e Heave ajustado.....	111
Tabela 60 - Cenário 5B com intervalo de corte variável e Heave teórico	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	– American Petroleum Institute
BHA	– Bottom Hole Assembly
BOP	– Blowout Preventer
BSR	– <i>Blind Shear Ram</i>
CSR	– <i>Casing Shear Ram</i>
DIP	– Ângulo de Mergulho
EDS	– Emergency Disconnection Sequence (Sequência de Desconexão de Emergência)
ESCP	– Equipamentos de Segurança da Cabeça de Poço
EU	– External Upset
OD	– Diâmetro Externo
PSB	– Peso Sobre Broca
IEU	– Internal External Upset
IU	– Internal Upset
ZG	– Zona de Ganho de <i>Heave</i>
ZOA	– Zona Ótima de Acionamento
ZP	– Zona de Perda de <i>Heave</i>
A	– Amplitude de <i>Heave</i> [m]
A₀	– Área de seção [m ²]
A_C	– Área de seção da coluna [m ²]
D	– Deriva da Sonda [m]
D₀	– Deriva Inicial da Sonda [m]
E	– Módulo de Elasticidade [GPa]
E_C	– Empuxo sobre a parte não cortada da coluna [kN]
F_C	– Força peso da parte não cortada da coluna [kN]
g	– Aceleração da gravidade [m/s ²]
H₀	– Comprimento da Lâmina D'água [m]
I_c	– Intervalo de corte [s]
k_H	– Fator de ajuste de <i>Heave</i> [s]
L	– Comprimento da coluna [m]
L₀	– Comprimento inicial [m]
P	– Carga [kN]
P_C	– Carga cortada [kN]
P_T	– Carga total [kN]
P_R	– Carga restante [kN]
T	– Período de <i>Heave</i> [s]
t	– Tempo [s]
t₀	– Tempo de ajuste para ângulo inicial [s]
t₁	– Tempo de ajuste para intervalo de corte [s]
V_C	– Volume da coluna [m ³]
v_D	– Velocidade de Deriva da Sonda [m/s]
Z	– Distância entre Sonda e BOP [m]

- $\mathbf{z}(t)$ – Posição vertical em função do tempo [m]
 ΔL – Variação de comprimento [m]
 Δz_H – Variação de posição devido o *Heave* [m]
 Δz – Variação da distância entre Sonda e BOP [m]
 Δx – Variação da distância de deriva [m]
 Δz_D – Variação da posição devido à deriva [m]
 ϵ – Deformação Específica [%]
 σ – Tensão [Pa]
 δ – Variação de comprimento [m]
 ρ_C – Densidade da coluna [kN/m³]
 ρ_l – Densidade do fluido da coluna [kN/m³]
 φ_0 – Ângulo de Fase ou Inicial [rad]

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação - O desastre de Macondo	2
1.2	Algoritmos de tomada de decisão	4
2	Conceitos da perfuração de poços marítimos	5
2.1	Sondas de perfuração marítima	5
2.1.1	Navio-sonda	6
2.1.2	Plataforma Semi-submersível	7
2.2	Sistemas e equipamentos principais de uma sonda	7
2.2.1	Sustentação de Cargas	7
2.2.2	Geração e Transmissão	8
2.2.3	Movimentação de Cargas	9
2.2.4	Rotação	11
2.2.5	Circulação	12
2.2.6	Segurança do Poço	14
2.2.7	Monitoração	18
2.2.8	Subsuperfície - Coluna de Perfuração	18
2.3	Seqüência de Desconexão de Emergência (EDS)	27
3	Caso estudado – Previsão de posição da extremidade da coluna após corte por gaveta cisalhante	31
3.1	Fatores de influência na posição final da extremidade cortada da coluna	32
3.1.1	Retração da coluna	34
3.1.2	Oscilação da sonda (<i>Heave</i>)	41
3.1.3	Deriva da Sonda	47
4	Entradas e saídas do algoritmo	48
4.1	Retração da coluna (ΔzR)	49
4.2	Perda de <i>Heave</i> (ΔzH)	49
4.3	Variação pela Deriva (ΔzD)	50
5	Algoritmo	51
5.1	A plataforma do simulador	52
5.1.1	Ficha de Cenário	52
5.1.2	Dados de Entrada	53
5.1.3	Retração	54
5.1.4	<i>Heave</i> Ajustado	54
5.1.5	<i>Heave</i> Teórico	55
5.1.6	Deriva	56

5.1.7 Resultado.....	56
5.2 Cenários	57
6 Simulações e resultados.....	59
6.1 Cenário 1 – Influência da altura da lâmina d’água	59
6.1.1 1A – Lâmina d’água profunda	59
6.1.2 1B – Lâmina d’água rasa	64
6.1.3 Conclusões sobre Cenário 1	69
6.2 Cenário 2 – Influência da carga cortada.....	70
6.2.1 2A – Pouca carga (manobra de coluna)	70
6.2.2 2B – Muita carga (BHA e grande profundidade de poço)	75
6.2.3 Conclusões sobre Cenário 2	80
6.3 Cenário 3 – Influência da densidade do fluido	81
6.3.1 3A – Fluido muito denso	81
6.3.2 3B – Fluido pouco denso	86
6.3.3 Conclusões sobre Cenário 3	91
6.4 Cenário 4 – Influência da intensidade de <i>Heave</i>	92
6.4.1 4A – Amplitude alta de <i>Heave</i>	92
6.4.2 4B – Amplitude baixa de <i>Heave</i>	97
6.4.3 Conclusões sobre Cenário 4	102
6.5 Cenário 5 – Avaliação da influência da velocidade de deriva	103
6.5.1 5A – Velocidade de deriva alta	103
6.5.2 5B – Velocidade de deriva baixa.....	108
6.5.3 Conclusões sobre Cenário 5	113
7 Conclusão.....	114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

Capítulo 1

1 Introdução

A exploração submarina de petróleo e gás natural se apresenta como uma atividade desafiante na engenharia, pois envolve riscos passíveis de prejuízos físicos e materiais ao trabalhador, empresa e principalmente para o meio ambiente. Esses riscos tendem a aumentar com a exploração de regiões de difícil acesso, as quais até poucas décadas eram proibitivas ou financeiramente inviáveis para as técnicas existentes.

A busca por técnicas de segurança é fundamental na atividade de exploração do petróleo, porém gera um custo considerável, por vezes tornando a exploração deficitária. Dessa forma o desenvolvimento técnico é essencial, não somente para tornar os processos mais seguros como também mais eficientes. O conhecimento preciso das variáveis do método escolhido permite a otimização da técnica, reduzindo coeficientes de segurança desnecessários e garantindo bons resultados financeiros.

Um processo importante nos procedimentos de segurança na exploração de petróleo é a sequência de desconexão de emergência (EDS) de uma sonda de perfuração de águas profundas. O processo de decisão para que ocorra a EDS considera diferentes parâmetros em cada situação, sendo ela inúmera e com especificidades, dessa forma um componente carrega uma incerteza e, como consequência, um fator de segurança. O estudo desses fatores e o trabalho de prever com exatidão o comportamento reduzem custos sem prejudicar a segurança, tornando a exploração de petróleo rentável e desestimulando comportamentos de risco motivados por pressão financeira.

O estudo propõe trabalhar o aprimoramento da previsão da posição da extremidade da coluna durante uma EDS, iniciando após a realização de um primeiro corte da gaveta *Casing Shear Ram* (CSR), o qual não realiza vedação, sendo a preparação para o segundo fechamento da gaveta *Blind Shear Ram* (BSR), promovendo a vedação sem elemento obstrutor. Dessa forma, será criado um algoritmo através das principais variáveis que influenciam esse posicionamento. O trabalho consiste em um caso específico dentre as possibilidades de modo de EDS, na qual se aplicam considerações bastante conservadoras.

Para o desenvolvimento do algoritmo serão trabalhados alguns pontos específicos, como conceitos do ramo petrolífero, a teoria envolvida nas variáveis do processo, a elaboração de equações na definição do posicionamento e a arquitetura geral dentro do programa matemático escolhido para a construção do mesmo.

1.1 Motivação - O desastre de Macondo

Em 20 de abril de 2010, na Bacia do México, ocorreu o famoso acidente com a sonda de águas profundas Deepwater Horizon (Figura 1). O vazamento de um poço com alta pressão despejou óleo e gás no convés da sonda, o qual em contato com uma centelha provocou a explosão da mesma. O acidente resultou na morte de 11 pessoas e feriu outras 17, permanecendo por vários dias e acarretando no naufrágio da sonda. O vazamento de óleo levou meses para ser contido e provocou o despejo de 4,9 milhões de barris de petróleo no mar, causando um grande impacto ambiental e 20 bilhões de dólares em prejuízo às empresas envolvidas.[1]



Figura 1 - Acidente da Deepwater Horizon (2010)[1]

A *Deepwater Horizon*, era uma sonda de perfuração de propriedade da *Transocean*, operava para a petrolífera *British Petroleum* (BP) e no momento do acidente estava na parte final da construção de um poço no local do acidente de Macondo. A plataforma apresentava a manutenção de vários sistemas desatualizada e a equipe da BP trabalhava com 60 dias de atraso na entrega prevista do poço. Este cenário contribuiu com um conjunto de decisões que mais tarde se mostraram desastrosas, porém na incerteza de serem as causas principais do acidente, mas sim consequências de um comportamento sistêmico que levou à catástrofe.

No relatório oficial do Grupo de Estudos da *Deepwater Horizon* foram apontados os motivos e decisões imediatas que provocaram o acidente, assim como as raízes das causas, em grande parte relacionadas à forma de operar das empresas e do governo, sendo os responsáveis pelo ocorrido. Muitos desses fatores estão relacionados ao comportamento das pessoas envolvidas e às práticas vigentes de gerenciamento de tomada de decisões. No entanto as causas imediatas estão naturalmente ligadas à engenharia, com análise de dados, eficácia de testes e interpretação de resultados de modo equivocado pelos responsáveis.

No ramo da engenharia os componentes não são completamente seguros, projetos, processos e equipamentos são projetados para trabalhar com uma margem de segurança e um risco de falha. Dessa forma, a garantia de segurança dos projetos se fundamenta na Teoria do Queijo Suíço, proposta por James Reason (Figura 2), no qual cada barreira de segurança possui “furos”, porém o alinhamento de várias barreiras tende a minimizar ou até anular o risco de um imprevisto. Sendo assim, os imprevistos em engenharia geralmente ocorrerem por uma sequência de falhas nesses sistemas de segurança, e não por uma causa isolada.

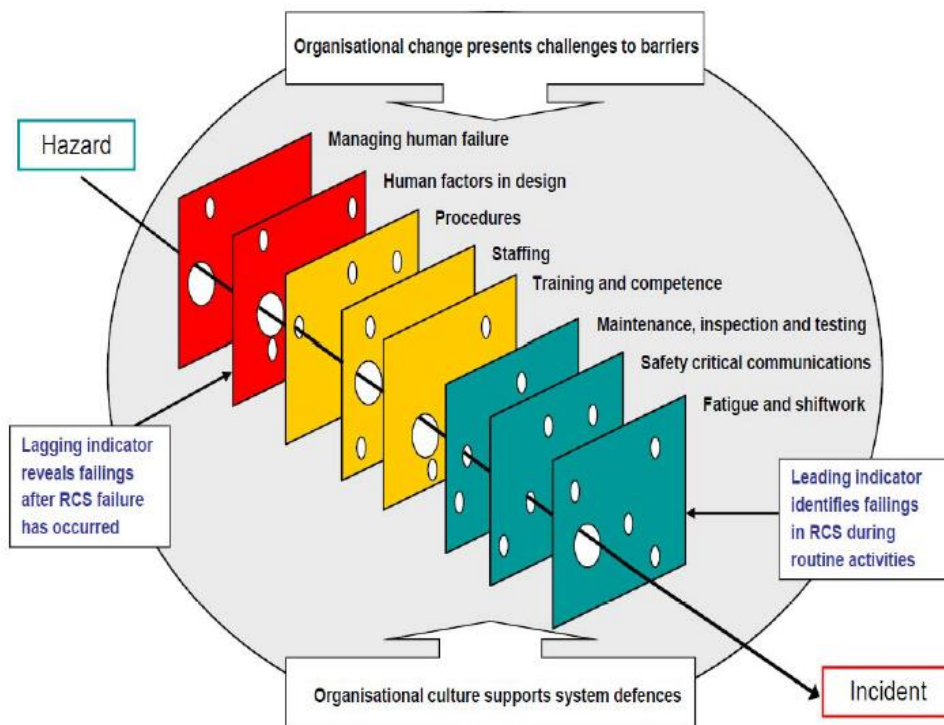


Figura 2 - Sistema de segurança (Deepwater Horizon Study Group, University of California, Berkeley)[1]

A Teoria do Queijo se aplica à situação da *Deepwater Horizon*, pois todas as etapas passam pela regulação governamental, fiscalização, pelas boas práticas de gestão técnica e decisória da operadora e das empresas contratadas, do treinamento do pessoal e da boa

comunicação entre todos os agentes durante o processo. O excesso de “buracos” em cada uma dessas camadas culminou no cenário do acidente.

O relatório do acidente também apresenta pontos específicos onde pequenas alterações poderiam diminuir os riscos nas camadas de segurança, principalmente nas áreas de gestão e de comunicação. Contudo, ressalta-se a necessidade de preparo nos fatores que envolvem a engenharia, principalmente no que diz respeito à exposição ao erro humano.

1.2 Algoritmos de tomada de decisão

Um tema bastante vigente hoje em dia é a automação da tomada de decisões por algoritmos “inteligentes”. Veículos já circulam nas ruas de forma experimental com complexos algoritmos de tomada de decisão para que possam transportar pessoas sem a necessidade de um motorista. Talvez ainda não sejam completamente sem risco de acidentes, mas já demonstram taxas de risco bastante menores que as dos humanos. Sistemas mais simples e já em funcionamento podem ser observados no dia a dia da sociedade. Um exemplo comum é o gerenciamento inteligente de elevadores em prédios comerciais, onde cada passageiro digita o andar pra onde deseja ir e um algoritmo indica qual elevador ele deve utilizar. Em diversas áreas, com maior ou menor complexidade, esses sistemas vêm avançando, sempre mostrando bastante ganho de eficiência e segurança.

É inevitável que se incorporem algoritmos também na tomada de decisão dentro da exploração de petróleo e casos como o acidente de 2010 demonstram que o fator decisório humano é um risco considerável nos processos dessa indústria.

Um fato interessante sobre o acidente de Macondo foi a incapacidade de se acionar, manualmente, o Sistema de Desconexão de Emergência (EDS) em tempo hábil de se evitar o prolongamento do incêndio e a salvação da sonda. Uma vez que a embarcação ficou presa à cabeça de poço durante todo o processo, o óleo e o gás estavam fluindo continuamente para o convés, mantendo o fogo incontrolável e levando a plataforma a pique. A impossibilidade de se realizar a desconexão também provocou a incapacidade de se fechar o escape de óleo pela cabeça de poço, ocasionando o maior derrame de óleo da história da exploração de petróleo. A correta realização de desconexão de emergência poderia ter evitado a explosão e as mortes dos trabalhadores, assim como muitos bilhões de prejuízo material e certamente minimizaria o volume de óleo que vazou para o mar, contendo o enorme desastre ambiental, talvez a pior consequência de todo o acidente.

Capítulo 2

2 Conceitos da perfuração de poços marítimos

Para o correto entendimento do caso que se propõe estudar é necessária a compreensão da operação e dos componentes da perfuração de petróleo em alto mar. Este capítulo irá apresentar conceitos, equipamentos e processos importantes dessa operação.

2.1 Sondas de perfuração marítima

A função de uma sonda é carregar o equipamento de perfuração e todos os sistemas acessórios necessários para a preparação de um poço de produção de petróleo e gás. Elas operam em variadas profundidades de lâmina de água, desde as águas mais rasas até profundidades próximas a 3000 metros de lâmina. As sondas devem ser capazes de se manter conectadas à cabeça de poço ou de se desconectar quando necessário.

As sondas podem ser de quatro tipos principais: Fixa, Auto-elevável, Semi-submersível e Navio-sonda (Figura 3). A utilização de cada tipo está relacionada à profundidade da lâmina de água. As plataformas Fixas e Auto-elevável são para locais onde a estrutura da plataforma pode se alojar no fundo do mar, ou seja, para locais de pouca profundidade.

Como o objetivo desse estudo está ligado à poços de grande profundidade marítima (mais pra frente será visto o motivo), serão focados os estudos da Plataforma Semi-submersível e do Navio-sonda. Ambas não estão presas por estruturas fixas ao fundo do mar e, quando em grande profundidade, são operadas por sistemas de posicionamento dinâmico, para garantir a estabilidade de sua posição com relação ao poço.

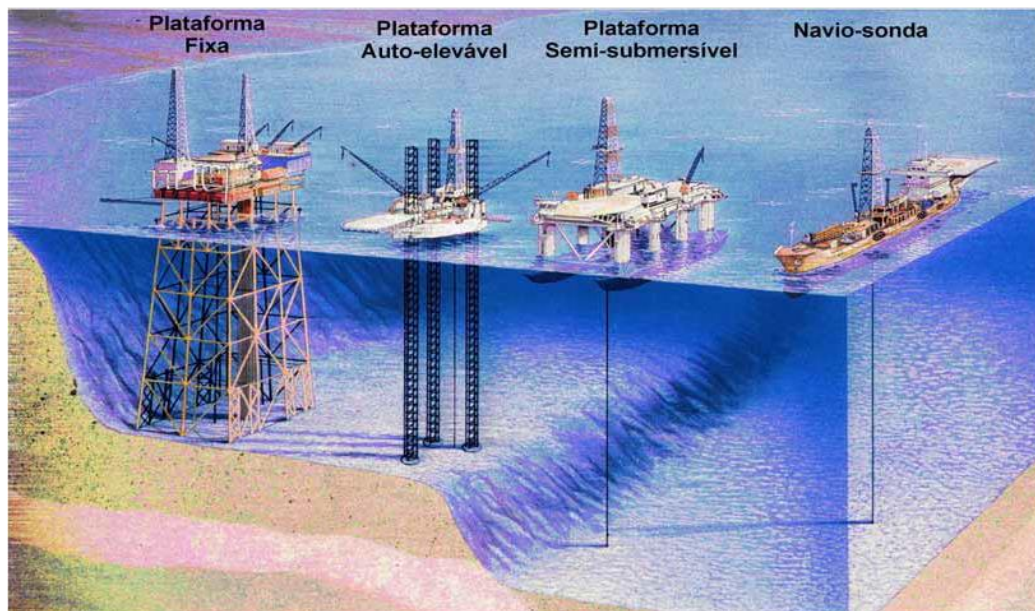


Figura 3 - Tipos de Sondas Marítimas – FONTE: ClickMacaé

2.1.1 Navio-sonda

São embarcações projetadas, ou adaptadas, para explorar poços submarinos e são equipadas com aparelhagem de perfuração. Operam de forma autônoma, sem a necessidade de embarcações de apoio. Utilizam compensadores de movimento para ajustar a coluna de perfuração.

Os primeiros Navios-sonda eram apenas sondas terrestres montadas no convés de um navio comum. Os mais modernos já são projetados inteiramente com essa finalidade (Figura 4).



Figura 4 - Navio-sonda moderno – FONTE: PetroNoticias.com.br

2.1.2 Plataforma Semi-submersível

São estruturas de um ou mais conveses, apoiadas em flutuadores submersos (Figura 5). Usam um sofisticado sistema de sensores acústicos e propulsores para garantir o posicionamento da plataforma, uma vez que não há nada ligando a mesma ao fundo do mar além da própria coluna de perfuração.



Figura 5 - Plataforma Semi-submersível – FONTE: PetroNotícias.com.br

As Semi-submersíveis são mais estáveis que os Navios-sonda e, portanto, capazes de enfrentar condições mais adversas de mar e tempo.

2.2 Sistemas e equipamentos principais de uma sonda

Uma sonda tradicional, do tipo rotativa, tem seus equipamentos agrupados em oito sistemas principais de operação. São eles: Sustentação de Cargas; Geração e Transmissão de energia; Movimentação de Carga; Rotação; Circulação; Segurança de Poço; Monitoração e; Subsuperfície (coluna de perfuração).

2.2.1 Sustentação de Cargas

O Sistema de Sustentação de Cargas é o responsável por receber a carga da coluna de perfuração e revestimento, transferindo os esforços para a estrutura de sustentação da plataforma. É composto principalmente do mastro ou torre, da subestrutura e da base da plataforma (Figura 6).



Figura 6 - Torre de plataforma [4]

2.2.2 Geração e Transmissão

O Sistema de Geração e Transmissão de Energia tem a função de fornecer a eletricidade necessária para a operação da sonda e diversos outros sistemas. É composto por motores diesel ou, caso a sonda possua produção de gás natural, turbinas a gás. A depender da forma escolhida para realizar a transmissão de energia dentro da plataforma, elas podem ser classificadas como sondas mecânicas ou diesel-elétricas.

As sondas mecânicas são aquelas onde, após a geração de eletricidade pelos motores, a energia é convertida pra forma mecânica através de conversores de torque e embreagens, assim distribuídos para toda plataforma por uma transmissão principal (*Compound*)(Figura 7). Essa forma de transmissão é mais eficiente do ponto de vista energético, porém necessita de uma estrutura mais robusta de transmissão.

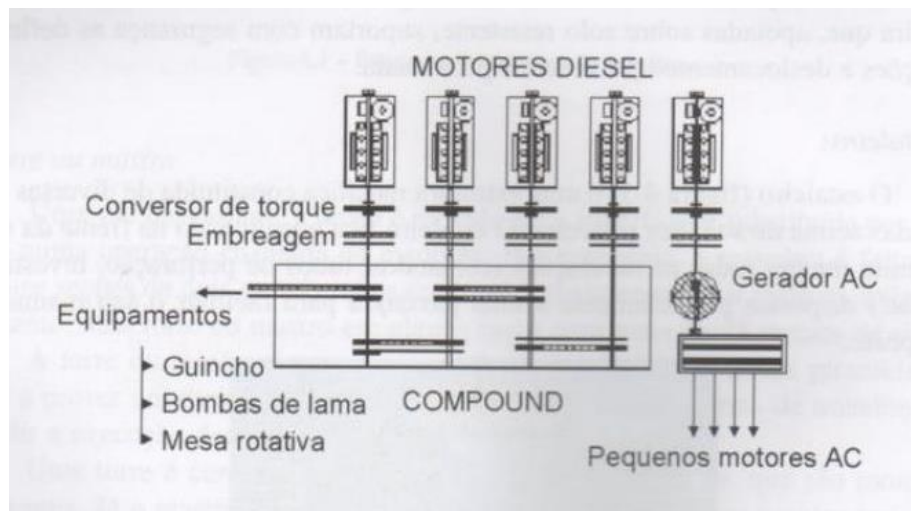


Figura 7 - Esquema da Sonda Mecânica [4]

A sonda Diesel-Elétrica funciona com a geração direta de eletricidade no motor na forma de corrente alternada. Estes alimentam um barramento trifásico de 600 volts e então a eletricidade é distribuída para os demais sistemas na forma de corrente direta (Figura 8).

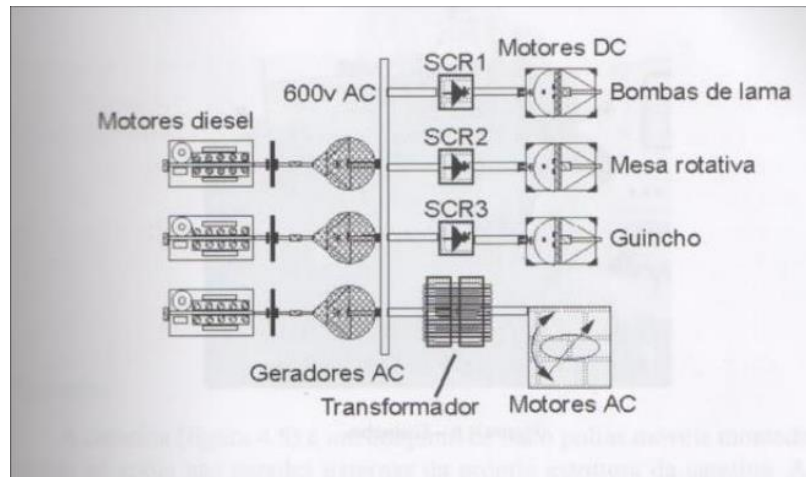


Figura 8 - Esquema Sonda Diesel-Elétrica [4]

2.2.3 Movimentação de Cargas

O Sistema de Movimentação de Cargas tem a função de movimentar as colunas de perfuração, revestimentos e outros equipamentos como: guincho, bloco de coroamento, Catarina, cabo de perfuração, gancho e elevador.

O guincho recebe a energia mecânica capaz de realizar a movimentação de cargas através da transmissão principal ou diretamente de um motor elétrico acoplado e ele. É constituído por tambor principal, tambor auxiliar (ou de limpeza), freios, molinetes e embreagens (Figura 9).

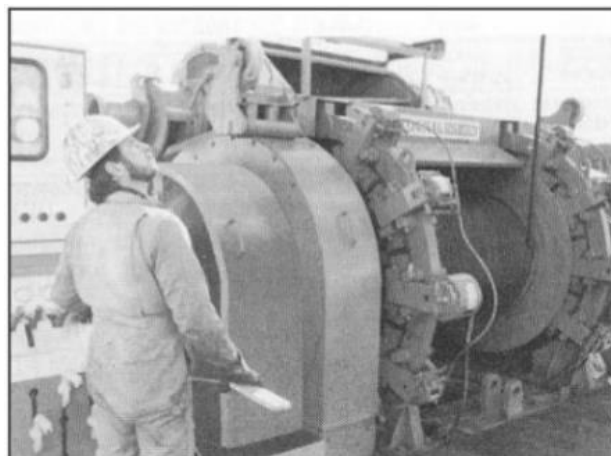


Figura 9 - Exemplo de guincho [3]

O bloco de coroamento sustenta as cargas transmitidas pelo cabo de perfuração. É um conjunto estacionário de 4 a 7 polias montadas em linha num eixo suportado por dois mancais de deslizamento. É localizado na parte superior do mastro (Figura 10).



Figura 10 - Exemplo de bloco de coroamento [4]

A Catarina é o equipamento responsável por fazer a multiplicação de esforço por um conjunto de 3 a 6 polias móveis. Também possui um sistema amortecedor para impedir que os golpes causados na movimentação de cargas se propague no equipamento (Figura 11).



Figura 11 - Exemplo de Catarina [4]

O cabo de perfuração é o cabo de aço que vem do carretel, passa pela Catarina e se prende numa âncora, onde há um sensor para medir a tensão no cabo. Na outra extremidade é fixado no tambor, completando o aparelho de força.

O elevador é o equipamento responsável por fazer a movimentação de elementos tubulares, como tubos de perfuração e comandos.

2.2.4 Rotação

O Sistema de Rotação é aquele responsável por gerar o movimento de giro da broca necessário para a perfuração. O sistema pode funcionar de três formas diferentes: em sondas convencionais se utiliza um “*Kelly*” montado numa mesa rotativa; pode-se também utilizar o “*Top Drive*”; uma terceira possibilidade é a utilização de um motor de fundo, colocado logo acima da broca.

O *Kelly* é uma seção de tubo com parede externa de forma quadrada (sonda de terra) ou hexagonal (sonda marítima) que se encaixa em uma mesa rotativa com rotação proveniente do sistema de geração e transmissão da sonda. O *Kelly* faz parte da Coluna de Perfuração, assim transmitindo diretamente o giro obtido à mesma (Figura 12). Nesse sistema se utiliza um equipamento chamado *Swivel*, junto à Catarina, que separa os elementos rotativos daqueles estacionários.



Figura 12 - Mesa rotativa e Kelly [4]

O *Top Drive* é o sistema onde um motor é acoplado no topo da coluna, junto à Catarina e ao *Swivel* (Figura 13). O *Top Drive* elimina a necessidade da mesa rotativa e do *Kelly*. O *Top Drive* apresenta vantagens sobre o *Kelly*, como a possibilidade de perfurar o poço de três em três tubos e permite que a retirada ou descida da coluna seja feita com rotação ou circulação de fluido, o que é importante em poços de alta inclinação ou horizontais.



Figura 13 - Top Drive [4]

No sistema com motor de fundo não há necessidade de *Kelly* ou *Top Drive*. Um motor hidráulico tipo turbina ou de deslocamento positivo é colocado acima da broca (ver figura 14). Dessa forma a coluna não gira, diminuindo seu desgaste. É largamente utilizado em perfurações direcionais



Figura 14 - Motor de Fundo (Fonte: <http://www.dthrotarydrilling.com>)

2.2.5 Circulação

O Sistema de Circulação é responsável por permitir a circulação e o tratamento do fluido de perfuração. Numa circulação em estado normal o fluido é bombeado através da coluna até a broca e retornando pelo espaço anular até a superfície, carregando o detritos da perfuração. Na sonda esse fluido é tratado e reinserido no na coluna. (Figura 15)

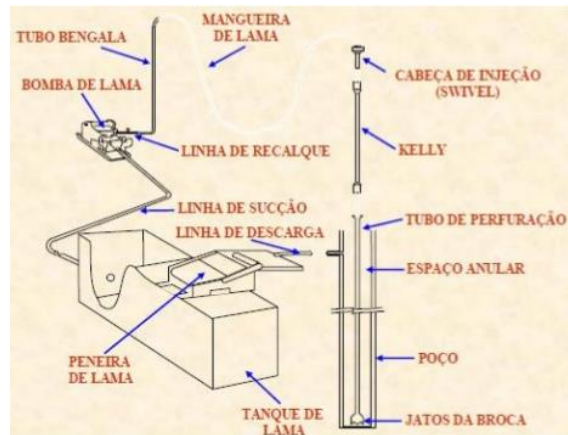


Figura 15 - Esquema de circulação de fluido [4]

A circulação é dividida em três fases, a Injeção, o Retorno e o Tratamento. Na injeção o fluido é succionado dos tanques e injetado na coluna até chegar aos jatos de brocas. Então começa a fase de retorno, quando o fluido, através da pressão própria, retorna pelo espaço anular entre a coluna e a parede do poço, até chegar à peneira vibratória (Figura 16).



Figura 16 - Peneira Vibratória [3]

A última fase é a de tratamento, que consiste na eliminação de gás e sólidos provenientes do solo perfurado e na adição de produtos químicos que melhorem as propriedades do fluido. Durante o tratamento são utilizados alguns equipamentos para essa limpeza e recondicionamento do fluido, como Desgaseificador, Desareador, *Mud Cleaner*, Dessiltador e Centrífuga (Figura 17).

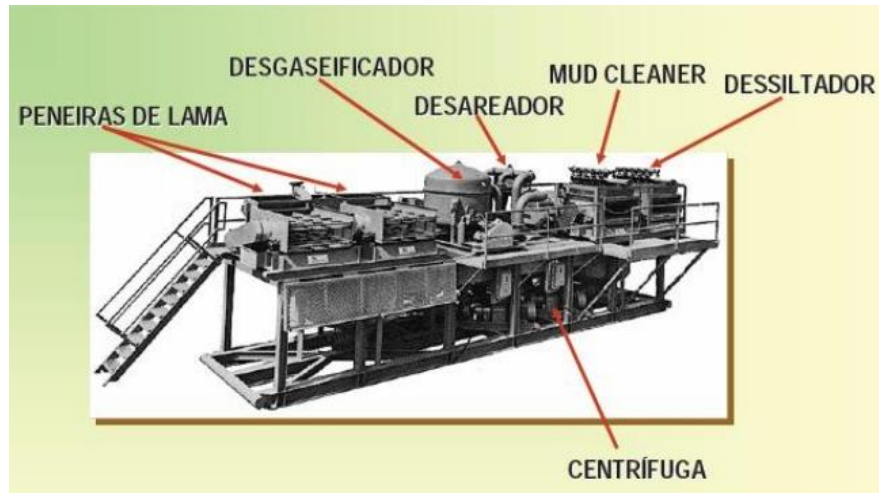


Figura 17 - Tratamento do fluido [3]

2.2.6 Segurança do Poço

O Sistema de Segurança do Poço tem por objetivo evitar que fluidos da formação entrem de forma descontrolada no ambiente do poço. É constituído de equipamentos que permitem o controle de fluxos e o fechamento do poço.

Esse sistema é constituído de Equipamentos de Segurança de Cabeça do Poço (ESCP) e de equipamentos complementares a estes. O mais importante é o BOP (*Blowout Preventer*), que é um conjunto de válvulas especializadas que permite interromper o fluxo do poço ou até cortar os elementos da coluna para vedar o mesmo (Figura 18).



Figura 18 - Exemplo de BOP – FONTE: Martínez, 2010

O BOP possui dois tipos de válvulas, as anulares e as de gaveta. As válvulas anulares são aquelas que fecham sobre qualquer diâmetro de tubo, sem cortá-lo, e não permanece fechado após a retirada da pressão hidráulica (Figura 19).



Figura 19 - Preventor anular [4]

As válvulas de gaveta são mais robustas e têm a função de cisalhar os elementos da coluna em frente à válvula. São as gavetas que exercem a importante função de separar a sonda do poço durante uma desconexão de emergência. Existem dois tipos de gavetas cisalhantes, a “Casing Shear Ram” (CSR) e a “Blind Shear Ram” (BSR).

A CSR é uma gaveta de corte robusto, capaz de cisalhar quase todo tipo de elemento que fica em frente à válvula, porém ela não é capaz de realizar a vedação do poço (Figura 20). Portanto só é utilizada em casos extremos ou em conjunto com uma válvula vedante.



Figura 20 - Casing Shear Ram – FONTE: Workboat.com

A BSR é uma válvula de corte de geometria mais elaborada, o que dá a ela a capacidade de vedação (Figura 21). Porém essa capacidade diminui a força de corte, limitando a BSR em algumas situações.

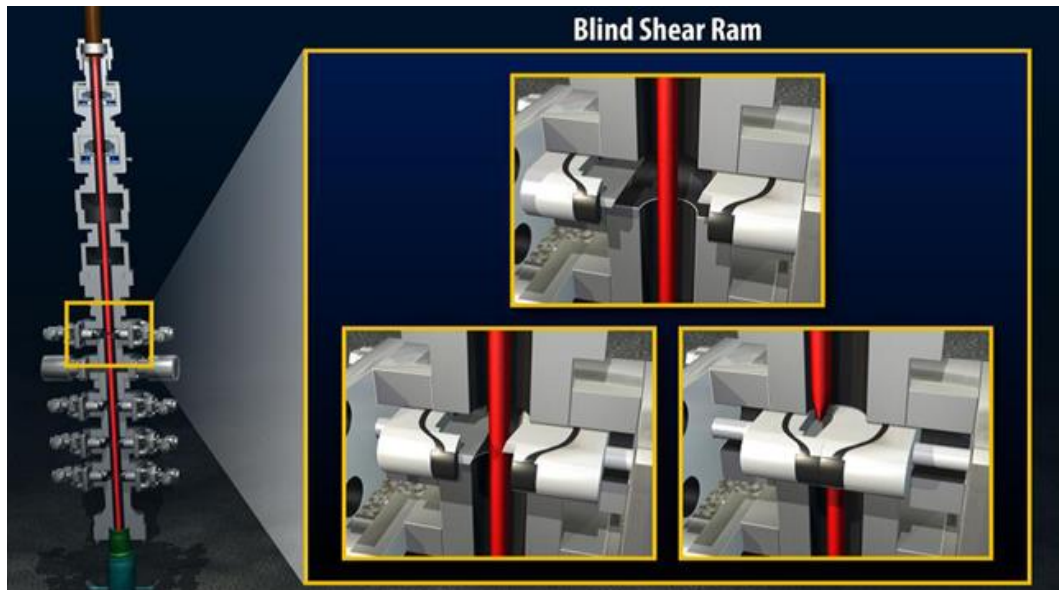


Figura 21 - Blind Shear Ram - FONTE: Workboat.com

O BOP não é igual em todas as sondas. A montagem de um BOP pode variar bastante pela quantidade e disposição de válvulas que o compõe. Essa variedade se dá pelas diversas situações diferentes de emergência que podem surgir durante uma perfuração. As situações possíveis geralmente são antecipadas durante a fase de projeto de poço, definindo qual a melhor disposição para o BOP que será utilizado junto àquela sonda.

Uma definição importante é a quantidade de gavetas BSRs e CSRs presentes no BOP. Elas são definidas pelos modos de desconexão de emergência (EDS) que se deseja ter disponível para aquele projeto. Pode haver EDS sem corte, com corte vedante ou com corte não vedante e fechamento da válvula vedante. Em geral existe uma variedade padrão de arranjos, conforme a Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Arranjos de gavetas cisalhantes no BOP [4]

Arranjo		Modos de EDS possíveis
1 gaveta cisalhante	BSR	S/corte BSR
2 gavetas cisalhantes	BSR+BSR	S/Corte UBSR LBSR UBSR+LBSR LBSR+UBSR
	BSR+CSR	S/Corte BSR CSR CSR+BSR
3 gavetas cisalhantes	BSR+CSR+BSR	S/Corte UBSR LBSR CSR UBSR+LBSR LBSR+UBSR CSR+UBSR CSR+LBSR

Em cada arranjo de gavetas, além da variedade de combinações mostrada acima, também há a sequência temporal de acionamento das mesmas que serve como outra variável pra maximizar a eficácia de uma EDS.

A Cabeça de Poço é constituída de diversos equipamentos que permitem a ancoragem e vedação das colunas de revestimento na superfície, como cabeça de revestimento, carretel de perfuração, adaptadores, carretel espaçador e seus acessórios.

A cabeça de revestimento é colocada no topo do revestimento e tem a finalidade de sustentar os revestimentos intermediários e de produção, através de suspensores. Também deve vedar o anular do revestimento com a cabeça, permitindo o acesso a este.

O suspensor do revestimento permite a ancoragem do revestimento e a vedação do anular, que é feita de forma automática, com o peso do revestimento que extruda um elemento de borracha (Figura 22).

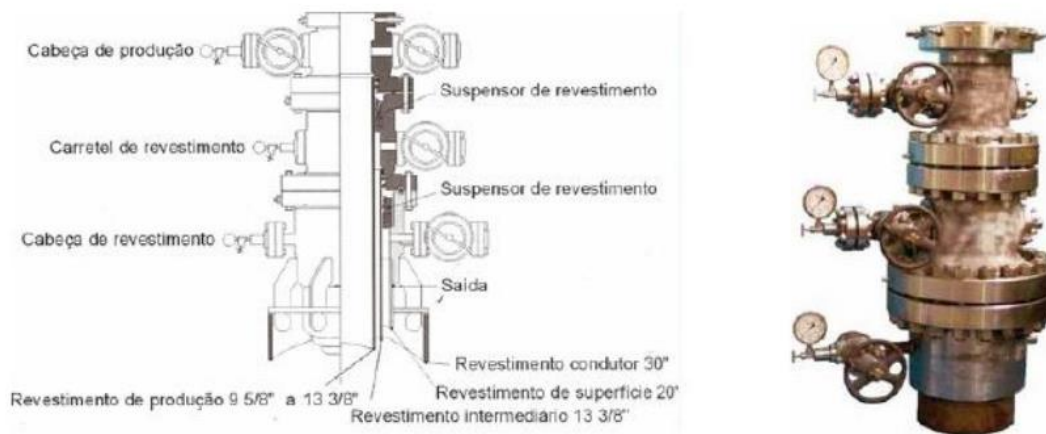


Figura 22 - Esquema de Cabeça de Poço [3]

2.2.7 Monitoração

O Sistema de Monitoração é o conjunto de equipamentos necessários para o controle da perfuração, como manômetros, tacômetros, indicadores de peso sobre a broca, indicadores de torque, etc. Os equipamentos podem ser divididos entre indicadores, que mostram o valor atual de um determinado parâmetro, e registradores, que guardam o histórico de valores em gráficos.

Os principais indicadores são o indicador de peso no gancho e sobre a broca, o manômetro de pressão de bombeio e o torquímetro do torque na coluna.

2.2.8 Subsuperfície - Coluna de Perfuração

Para a perfuração da rocha é necessário um gradiente alto de energia na broca para cortar as diversas formações rochosas. Essa energia chega à broca na forma de rotação e de peso aplicado sobre a mesma. A coluna tem a função de realizar esse trabalho, suportando as altas cargas e carregando o fluido de perfuração pelo seu interior. Seus principais componentes são: comandos, tubos pesados e tubos de perfuração.

2.2.8.1 Comandos

Os comandos são elementos tubulares de aço forjado e de alto peso linear devido a sua espessura de parede. Têm as funções de transmitir peso à broca e dar rigidez à coluna, melhorando o controle da perfuração.

As conexões dos comandos são usinadas no próprio tubo e são protegidas por uma camada fosfatada na superfície, ao contrário dos tubos de perfuração, a conexão é a parte mais

frágil dos comandos [15]. As propriedades mecânicas e geométricas dos comandos afetam no desempenho da broca, podem causar problemas no poço como *doglegs* (poços com desvios indesejados), *key seats* (coluna descentralizada provocando uma “barriga” no poço), vibrações na coluna de perfuração e diminuição no tempo de vida de um drill pipe [14].

Comandos (Figura 23) são fabricados em vários tamanhos e formas. O comando convencional tem área transversal circular e lisa, porém comandos espiralados e quadrados também podem ser usados na indústria. Comandos com área transversal quadrada são usados quando se é preciso de mais rigidez, enquanto que os comandos em espiral são recomendados na perfuração em áreas que sofrem com altos diferenciais de pressão. As espirais na superfície externa desses comandos reduzem o contato entre a parede do poço e os comandos, que, por vez, diminui a força por diferencial de pressão [14].



FONTE: ANSON (2015).

Figura 23 - Comandos lisos e espiralados

Um comando deve ser classificado de acordo com: diâmetro externo, diâmetro interno, e tipo de conexão. O diâmetro externo é escolhido em função do diâmetro do poço e sempre levando em conta a possibilidade de uma pescaria. O diâmetro interno está diretamente ligado com o peso do comando, portanto também é possível a identificação pelo peso linear em lb/pé [15].

Vários fatores afetam na seleção da forma do comando. Os fatores mais importantes são: tamanho da broca, OD (diâmetro externo) que se pode colocar no poço, ângulo de mergulho (DIP) e heterogeneidade da formação, programa hidráulico (tipo de fluido de perfuração,

propriedades, razão de fluxo), PSB (peso sobre broca) requerido e possibilidade de operações de pescaria.

2.2.8.2 Tubos Pesados

Tubos Pesados são tubos que têm geralmente o mesmo diâmetro externo dos tubos de perfuração normais, porém com maior espessura de parede (Figura 24). Além de poderem ser utilizados para dar peso sobre a broca, os tubos pesados entre os comandos e os tubos de perfuração permitem uma mudança gradual da rigidez da coluna, o que é importante pois uma mudança brusca de rigidez na coluna se torna um ponto de concentração de tensões e portanto um ponto que pode sofrer fraturas com mais facilidade [16].



FONTE: THOMAS et al (2001).

Figura 24 - Tubo Pesado [4]

São bastante utilizados em poços direcionais, como elemento auxiliar no fornecimento de peso sobre a broca, em substituição a alguns comandos. Sua utilização tem algumas vantagens: Diminui a ruptura de tubos nas zonas de transição entre comandos e tubos de perfuração; Aumenta a eficiência e a capacidade de sondas de pequeno porte, pela sua maior facilidade de manuseio do que os comandos; Nos poços direcionais diminui o torque e o arraste em vista de sua menor área de contato com as paredes do poço e; Reduz tempo de manobra.

2.2.8.3 Tubos de Perfuração

Os tubos de perfuração constituem a maior parte da coluna de perfuração. São tubos de aço sem costura, tratados internamente com resinas para diminuir o desgaste e a corrosão. Possuem extremidades cônicas (*tool joints*), que são soldadas ao seu corpo (Figura 25). Essas *tool joints* são as responsáveis por fazer a conexão entre um tubo de perfuração e outro. Em algumas aplicações, como perfuração com grandes alcances, pode ser melhor usar alumínio, ou possivelmente titânio para produzir os tubos de perfuração.



Figura 25 - Tubo de Perfuração [13]

Alguns fatores são muito importantes para a decisão do material para a fabricação desses tubos, como por exemplo, configuração do poço, temperaturas do fundo do poço, o ambiente de trabalho (presença de H₂S e CO₂), e também arraste e torque.

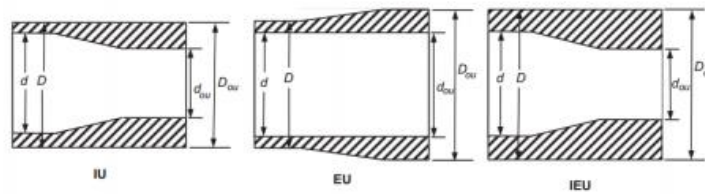
Na especificação de um tubo de perfuração são considerados: o diâmetro nominal, o peso nominal, tipo de reforço para soldagem de uniões, tipo do aço, comprimento nominal e tipo de rosca. A máxima tensão de escoamento suportada é chamada grau do aço. Na Tabela 2 abaixo seguem exemplos de aços utilizados em tubos de perfuração e suas tensões de escoamento.

Tabela 2 - Grau de aços para tubos de perfuração

Grau do Aço	Tensão de escoamento (psi)
D	55000
E	75000
X-95	95000
G-105	105000
S-135	135000
V-150	150000

Os tubos têm um reforço na sua extremidade, esse reforço é chamado de upset. O upset aumenta a área de aço dos tubos, permitindo que quando haja a soldagem das conexões, não ocorra a redução na espessura da parede além da espessura do corpo do tubo, mantendo sua resistência, já que a soldagem acarreta na redução da área de aço no pino ou rosca.

Como é observado na Figura 26, o upset tem três variações possíveis, o *internal-upset* (IU) no qual o reforço é dado no interior do tubo, *external-upset* (EU) onde o reforço é dado no exterior do tubo, e o *internal-external-upset* (IEU) no qual o reforço é implantado tanto no exterior como no interior do tubo.



FONTE: MITCHELL, MISKA (2011).

Figura 26 - Offset de tubos de perfuração

O comprimento nominal é dividido em três categorias (ranges) de acordo com o *American Petroleum Institute* (API), como mostrado na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Categorias de comprimento nominal pela API – FONTE: API

Range	Comprimento do tubo (pés)	Comprimento do tubo aproximado (m)
Range 1	16-25	4,9-7,6
Range 2	27-30	7,6-10,4
Range 3	>34	>10,4

Periodicamente os tubos precisam ser inspecionados para avaliar seu grau de desgaste. De acordo com a norma API RP 5C1, esse desgaste é verificado pela diminuição de sua espessura e seu grau é mostrado na figura abaixo, junto com a identificação que o avaliador deve fazer quando da inspeção (Tabela 4).

Tabela 4 - Grau de desgaste no tubo de perfuração

Classe	Redução da Espessura	Código Faixa/Cor
Novo	0 %	1 Faixa Branca
Premium	de 0% a 20 %	2 Faixas Brancas
Classe 2	de 20 a 30%	1 Faixa Amarela
Classe 3	de 30 a 40%	1 Faixa Laranja
Rejeitado	Maior que 40%	1 Faixa Vermelha

2.2.8.4 Acessórios da coluna de perfuração

2.2.8.4.1 Substitutos

São pequenos tubos que encaixam na coluna e desempenham funções específicas de acordo com suas características (Figura 27), como:



Figura 27 - Substitutos

- Sub de Içamento – É utilizado para movimentação de comandos. Possui seção superior com diâmetro igual a dos tubos de perfuração para permitir o encaixe do elevador.
- Sub de Broca – É o elemento de encaixe da broca através de pinos.
- Sub de Cruzamento – Tem a função de conectar tubos com diferentes diâmetros e roscas.

2.2.8.4.2 Estabilizadores

O estabilizador é um acessório quase indispensável em uma coluna de perfuração, principalmente quando a perfuração é direcional. Essa ferramenta é responsável por centralizar a coluna de perfuração, afastando os comandos das paredes do poço, provendo estabilidade para o BHA e reduzindo a vibração na coluna, como também diminui o risco de prisão da mesma por diferencial de pressão [16].

Podem ser rotativos e não rotativos; Os rotativos podem ser com camisa substituível, lâminas integrais e lâminas soldadas. A Figura 28 representa o estabilizador.



FONTE: DRILLING (2012)

Figura 28 - Estabilizadores

2.2.8.4.3 Escareadores

Os escareadores têm a mesma função dos estabilizadores, porém são mais resistentes por possuir roletes pra manter o calibre do poço mais facilmente (Figura 29). Por isso são indicados para formações muito abrasivas. A vantagem dos escareadores é diminuir o torque resistivo sobre a coluna, porém trazem a desvantagem do risco de necessitar pescaria, uma vez que possuem partes móveis que podem se soltar durante a operação e ficar dentro do poço.



Figura 29 - Escareadores [15]

2.2.8.4.4 Alargadores

Têm a função de aumentar o diâmetro de um trecho do poço já perfurado. Podem ser de dois tipos: *Hole Opener*, que serve para alargar o poço desde a cabeça (Figura 30), ou um *Under Reamer*, que é capaz de alargar apenas um trecho do poço abaixo da cabeça (Figura 31).



FONTE: TIANHE (2016).

Figura 30 - Alargador Hole Opener



FONTE: ADRIATECH (2016).

Figura 31 - Alargador Under Reamer

2.2.8.4.5 Amortecedores de vibração

São elementos que absorvem a vibração vertical provinda da ação da broca. Devem ser utilizados quando a rocha a ser perfurada é muito dura ou há muita variação na dureza da rocha. Os amortecedores podem utilizar molas helicoidal ou um princípio hidráulico (Figura 32).



Figura 32 - Amortecedor de coluna de perfuração [4]

2.2.8.4.6 Ferramentas de Manuseio da Coluna

Para manusear a coluna e realizar conexões e desconexões de elementos são utilizadas ferramentas especiais. Os principais são: Chaves Flutuantes, Cunha e Colar de Segurança.

As Chaves Flutuantes têm a função de fornecer o torque necessário para aperto e desaperto das uniões cônicas da coluna (Figura 33). Elas ficam suspensas na plataforma por cabos, polias e contrapesos, disponíveis para manuseio do operador.



Figura 33 - Chave Flutuante [4]

As Cunhas são utilizadas para manter a coluna totalmente suspensa na mesa rotativa. São utilizadas durante as conexões de tubos e comandos. Possuem mordentes para prender a parede dos tubos (Figura 34).



Figura 34 - Cunhas [4]

O Colar de Segurança serve para evitar a queda da coluna quando a mesma está suspensa pela cunha. Ele é colocado próximo ao topo da coluna de comandos (Figura 35).



Figura 35 - Colar de Segurança [4]

2.3 Sequência de Desconexão de Emergência (EDS)

Algumas situações durante a operação de uma sonda podem levar à uma situação de risco para a sonda, às pessoas ou ao ambiente. A ocorrência de um blowout descontrolado, a falha de equipamentos, tempo severo demais, ou qualquer condição que impeça a sonda não ancorada (posicionamento dinâmico) de manter sua posição levam à necessidade de uma desconexão de emergência entre a sonda e o poço, o que significa desconectar ou cortar a coluna de perfuração na cabeça de poço (Figura 36).

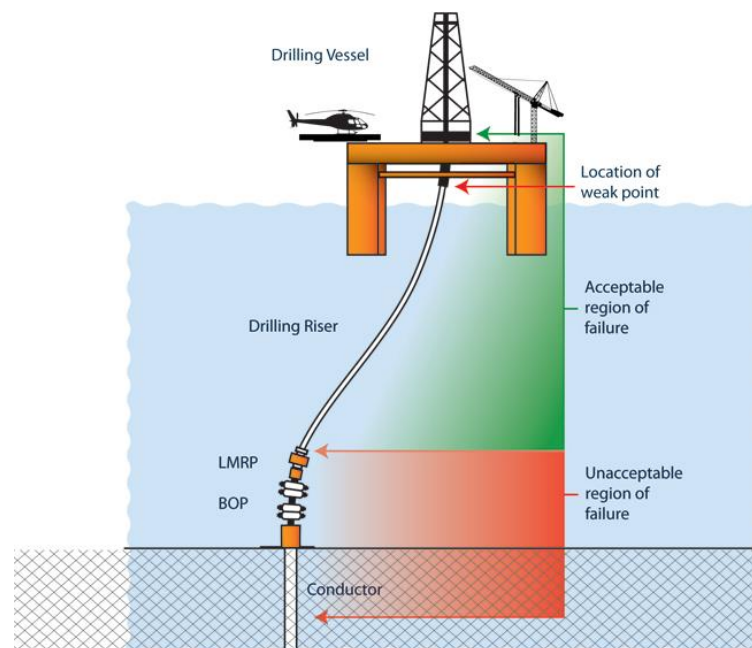


Figura 36 - Necessidade de EDS [13]

A sequência de ações de uma EDS não pode ser decidida no momento que o problema surge. Todas as operações devem ser pensadas e a EDS adequada deve estar sempre planejada antes de qualquer ação, de modo que no momento da emergência o responsável apenas precise observar o momento correto de apertar um botão e garantir que a sequência seja acionada.

Esse momento é definido pela deriva da sonda com relação à posição ideal que esta deve manter com relação à cabeça de poço. Para isso são definidos quatro estados de operação da sonda, como mostrado na Figura 37:

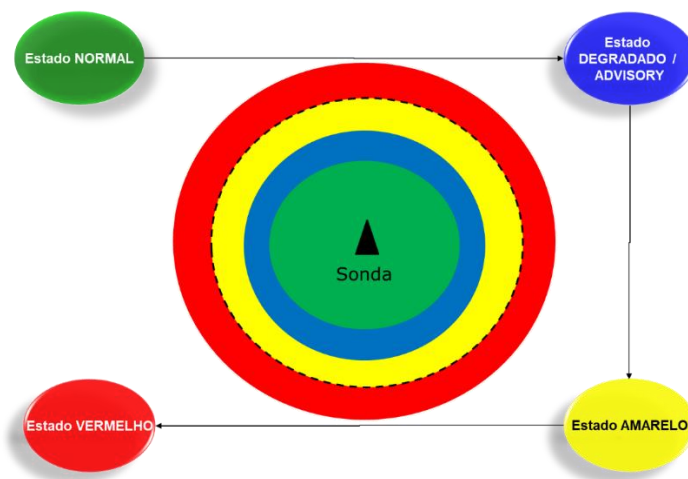


Figura 37 - Estados operacionais de uma sonda

A sonda em estado NORMAL opera sem nenhuma ameaça à sua capacidade de manter a posição, com todos os sistemas e suas redundâncias operando normalmente.

Quando a sonda perde a redundância mínima em algum de seus sistemas, mas ainda é capaz de manter a sua posição, a sonda entra em estado DEGRADADO. Apesar de ainda haver capacidade de manter posição, esse estado sinaliza o início das preocupações sobre uma possível EDS. É o momento de se decidir sobre a continuidade ou não das operações que estão ocorrendo com a sonda.

A falta de redundância pode provir de quatro aspectos:

- Numérica: relacionada à quantidade de equipamentos similares em funcionamento.
- Taxa de demanda: relacionada à capacidade limite de operação dos equipamentos utilizados.
- Configuração: Relacionada à falha de alguma equipamento com função específica, mesmo que haja outros similares em outras funções.

- Modo de falha: Quando a falha de um sistema pode indicar a falha em outro ou se são independentes.

As operações críticas da sonda não devem ter início durante um estado degradado.

A sonda entra em estado AMARELO quando efetivamente a sonda ultrapassa os limites normais de posicionamento, sinalizando a perda de capacidade de manter posição. A partir deste momento todas as operações no poço devem ser interrompidas e uma EDS deve estar pronta pra ser acionada. Porém ações para mitigar ou resolver o problema ainda são possíveis.

Quando a sonda atinge sua posição limite de operação e sua capacidade de manter posição é dada como perdida, se atinge o estado VERMELHO. Nesse estado todas as ações com a tentativa de recuperação da posição devem cessar e se proceder com a EDS imediatamente. É o momento limite para se realizar uma EDS com segurança, pois além disso, a deriva se torna muito elevada com relação à cabeça de poço, danificando a coluna, o equipamentos da cabeça de poço e podendo impossibilitar a EDS.

A EDS, então, segue esse balizamento posicional e de capacidade de manutenção de posição para que os profissionais da sonda tomem as decisões necessárias para que a sequência ocorra. Os limites AMARELO e VERMELHO são definidos a partir da capacidade de se realizar ações adequadas dentro dos planos de EDS escolhidos e da limitação do pessoal envolvido em tomar ações ágeis e confiáveis.

Dados sobre incidentes com sondas operando no Brasil entre 1978 e 2012 apontam o seguinte (Figura 38):

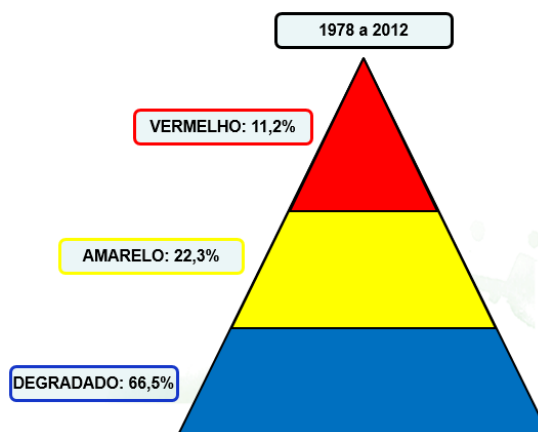


Figura 38 - Evolução dos estados de operação em incidentes entre 1978 e 2012

Isso significa que de 100 casos em que houve alguma falha na operação da sonda que provocasse um estado degradado, em 11 delas houve a necessidade de uma EDS. Mais

importante, nos 22 casos em que a sonda perdeu a capacidade de sustentar sua posição, houve capacidade de reversão da situação e recuperar o posicionamento em metade delas, sem a necessidade de uma EDS.

Dados mais recentes mostram um avanço na quantidade de incidentes, assim como na taxa de recuperação após o alarme amarelo. Porém ainda há muitos casos onde a EDS se faz necessária, de acordo com a Figura 39.

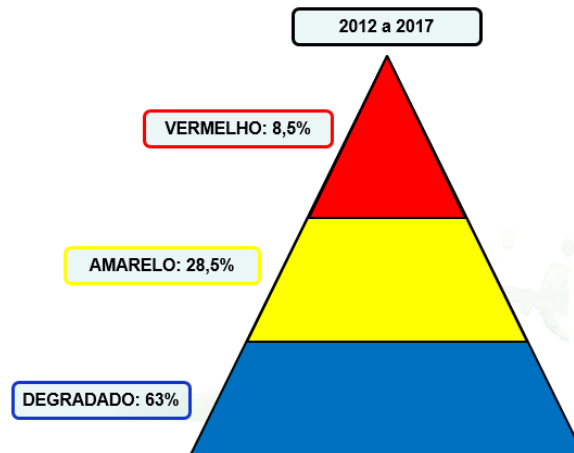


Figura 39 - Evolução dos estados de operação em incidentes entre 2012 e 2017

Com todos os prejuízos causados por uma EDS, seja por material perdido ou por tempo de retrabalho necessário para reconectar a sonda e reconfigurar a coluna após a EDS, qualquer melhoria que impeça a necessidade de uma desconexão representa um ganho extraordinário, seja financeiro ou de segurança.

O caminho mais simples das melhorias está em identificar as principais causas de perda posição da sonda, entender os fatores que levam à situação de crise e desenvolver medidas para criar salvaguardas, redundâncias ou ações rápidas de reparo sobre esses fatores. Esse é um trabalho que já vem sendo feito pela indústria do petróleo com bons resultados. Uma abordagem diferente se mostra na análise dos parâmetros que definem a fronteira entre os estados operacionais.

Os estados operacionais são definidos a partir da análise do ângulo limite entre a sonda e a cabeça de poço. Essa angulação causa uma curvatura inadmissível na parte inferior da coluna, que danifica seus componentes e impossibilita a EDS segura. A definição dessa angulação define o raio máximo de desvio que a sonda pode ter antes que a EDS esteja feita. Porém a definição da deriva máxima onde se deve começar a EDS vem do entendimento de quanto tempo após a entrada no alarme vermelho o responsável toma a decisão e fisicamente

aciona a sequência de desconexão, assim como outras variáveis específicas de cada EDS escolhida para a situação atual da sonda.

A criação de algoritmos que leiam as variáveis específicas com mais precisão e tomem decisões imediatas pode aumentar substancialmente a distância máxima de deriva da sonda, uma vez que seria possível garantir com mais certeza que a EDS estaria completa antes do ponto limite.

3 Caso estudado – Previsão de posição da extremidade da coluna após corte por gaveta cisalhante

Dentre a variedade de possibilidades de configuração para a EDS de uma sonda existe uma onde a desconexão deve ocorrer com o acionamento de duas gavetas em sequência, sendo que a primeira irá realizar o corte dos elementos passantes e a segunda deve, por necessidade, fechar sem nenhum elemento à sua frente, para garantir a vedação do poço.

Esse caso ocorre quando há elementos de revestimento ou outros equipamentos não cisalháveis por uma BSR em frente ao BOP e o compensador da sonda não está em funcionamento. Além disso a coluna deve estar com sua carga sobre a sonda, e não sobre o fundo do poço. Para solucionar essa situação aciona-se a CSR, por ser mais robusta, cortando a coluna em frente ao BOP (Figura 40). Após esse corte a parte inferior da coluna irá se desprender e cair sobre o fundo do poço, com isso retirando a carga sobre a parte superior da coluna, que ainda está acima da gaveta cisalhante. Sem essa carga a parte superior da coluna irá retrair e, juntamente com outros fatores, possivelmente ultrapassar a posição da gaveta BSR superior, permitindo que esta feche sem obstáculo (no vazio) e faça a vedação do poço.

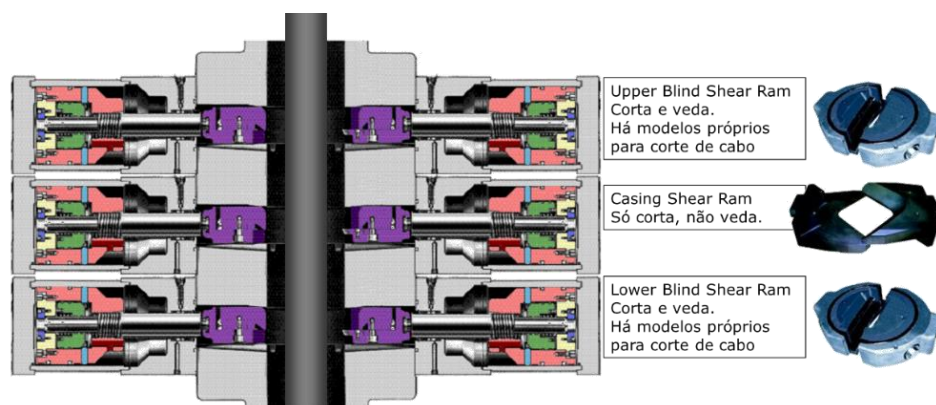


Figura 40 - Configuração de BOP com três gavetas (BSR+CSR+BSR) [14]

A pergunta central a ser respondida pelo algoritmo proposto é se a segunda gaveta poderá fechar no vazio durante a EDS e qual é o melhor momento pra se realizar cada um dos dois cortes, dessa forma maximizando o tempo anterior à tomada de decisão da desconexão, permitindo que as equipes continuem tentando recuperar a posição da sonda.

Efetivamente o que se quer é minimizar a área de alarme vermelho, deixando para se realizar o corte no último momento possível, com um grau de certeza alto sobre o procedimento e, assim, evitar uma possível EDS desnecessária.

Para chegar a essas respostas serão investigados os fatores mecânicos que influenciam a posição final da extremidade cortada nos momentos posteriores ao corte pela CSR. Com a lista de fatores (entradas do algoritmo) serão propostas relações matemáticas entre estes para se chegar a um algoritmo.

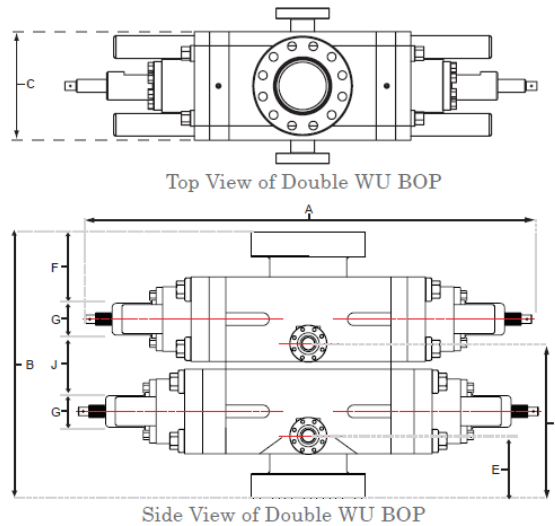
Esse algoritmo pode ter diversas formas de resultados (saídas) conforme se parametrizam as entradas. Essas possibilidades serão exploradas para demonstrar que o algoritmo não é rígido e pode se adaptar a demandas específicas. Não se trata de um algoritmo definitivo, uma vez que pode sofrer diversos aprofundamentos em cada um dos aspectos equacionados, mas de uma nova abordagem na forma de se tomar decisões críticas na situação de uma EDS.

3.1 Fatores de influência na posição final da extremidade cortada da coluna

O que se quer após a realização do primeiro corte é que aconteça uma “subida” da extremidade cortada da coluna de tal magnitude que ultrapasse a posição da segunda gaveta cisalhante, a BSR, que irá vedar o poço e deve fechar no vazio.

Essa magnitude depende da configuração do BOP utilizado, mas pode ser simplificado como a distância física entre as duas gavetas. De acordo com um manual de fabricante (WOM – *Worldwide Oilfield Machine*) essa distância pode, tipicamente, oscilar entre 17” e 35”, como exemplificado na Tabela 5:

Tabela 5 – Dimensões de válvulas em um BOP típico – FONTE: Worldwide Oilfield Machine



Size	Pressure Rating (psi)	Vertical Bore	A-1	A-2	A-3	A-4	B-1 (Flanged)	B-2 (Clamp)	C	E-1	E-2	F-1	F-2	G	H-1 (Flanged)	H-2 (Clamp)	J (Between)	Approx. Weight (lbs)
7-1/16"	3,000	7-1/16"	74	109.5	-	-	41	-	20.25	8.75	-	7.84	-	5.5	25.69	-	11.44	5,000
7-1/16"	5,000	7-1/16"	74	109.5	-	-	44.19	41.88	20.25	10.4	9.25	9.63	8.47	5.5	27.09	25.94	11.19	5,200
7-1/16"	10,000	7-1/16"	74	109.5	-	-	48.63	45.25	20.63	11.06	9.38	12.03	10.34	5.5	29.13	27.44	12.56	6,400
7-1/16"	15,000	7-1/16"	74	109.5	-	-	49.88	-	20.63	11.69	-	12.66	-	5.5	29.75	-	12.56	6,750
11"	3,000	11	96.25	146.88	-	-	49.25	-	25.13	9.81	-	10.53	-	6.75	30	-	13.44	9,900
11"	5,000	11	96.25	146.88	110.13	150.19	54.5	49.5	25.13	12.44	9.94	13.17	10.66	6.75	32.63	30.13	13.44	10,200
11"	10,000	11	96.25	146.88	110.13	150.19	55.88	52.38	25.75	13.13	11.38	13.84	12.09	6.75	33.31	31.56	13.44	11,300
11"	15,000	11	124	175.31	124.5	167.13	69.75	58.81	32	16.69	11.22	17.78	12.31	9.25	41.63	36.16	15.69	18,400
13-5/8"	3,000	13-5/8	112.13	171.5	122.69	166.06	53.38	-	29.25	10.31	-	11.53	-	7.5	32.38	-	14.56	14,300
13-5/8"	5,000	13-5/8	112.13	171.5	122.69	166.06	55.88	54	29.25	11.56	10.63	12.78	11.84	7.5	33.63	32.69	14.56	14,800
13-5/8"	10,000	13-5/8	114.13	172.75	124.69	167.31	66.63	57.75	30.25	15.13	10.69	17.09	12.66	7.5	40.06	35.63	17.44	18,400
13-5/8"	15,000	13-5/8	139	214.38	152.25	205.5	81.75	70.13	39.5	21.38	15.5	22.84	17	8	49.44	43.56	20.06	43,250
*18-3/4"	10,000	18-3/4	156.38	242.13	166.5	226.63	87.13	74	42.5	20.5	13.88	22	15.34	12	51.5	44.88	19.13	57,000
*18-3/4"	15,000	18-3/4	160.00	246.00	170.0	230.00	99.50	88.5	45.5	24.25	18.50	26.93	21.12	11.5	58.38	52.88	23.00	62,000
20-3/4"	3,000	20-3/4	143.69	226.81	163.94	223.88	66.13	58.88	39.52	14.31	10.69	16.28	12.66	8	39.88	36.25	17.56	25,550
21-1/4"	2,000	21-1/4	143.69	226.81	163.94	223.88	62.75	58.88	39.52	12.63	10.69	14.59	12.66	8	38.19	36.25	17.56	25,150
26-3/4"	3,000	26-3/4	169.63	275.38	-	-	78.88	-	46.25	17.44	-	19.91	-	8	48	-	22.56	44,200

Essa distância varia de acordo com o fabricante e modelo das válvulas do BOP utilizado, mas para efeito do algoritmo será utilizado o dado de entrada fornecido em cada simulação.

Os fatores que influenciam a posição da extremidade cortada estão relacionados a três grandes premissas do comportamento da coluna:

- Retração devido à elasticidade da coluna após retirada de carga;
- Oscilação da sonda devido ao movimento marítimo e;
- Deriva da sonda com conseqüente aumento de distância.

Esses três fatores englobam uma série de pequenos outros que serão discutidos e equacionados, mas resumem o entendimento do problema a ser resolvido.

3.1.1 Retração da coluna

A coluna possui uma extensão bastante grande, desde a sonda, na superfície do mar, passando pela cabeça de poço, no solo marítimo e alcançando o fundo do poço. Esses poços podem perfurar em águas com profundidade de até uns 3000 metros e ainda perfurar mais outros 5000 metros abaixo disso. Então a carga que a coluna exerce sobre si mesma é bastante considerável e o efeito de alongação da mesma deve ser considerado durante o cálculo de seu comprimento.

Da mesma forma, no momento em que uma porção considerável da coluna é cortada, esse alívio de carga provoca um retorno elástico do material que causa esse efeito de encurtamento desejado no cenário estudado.

Ao se avaliar o comportamento de valor de carga contra a alongação obtida para elementos de aço chegamos a uma típica curva tensão x deformação como mostrada a Figura 41:

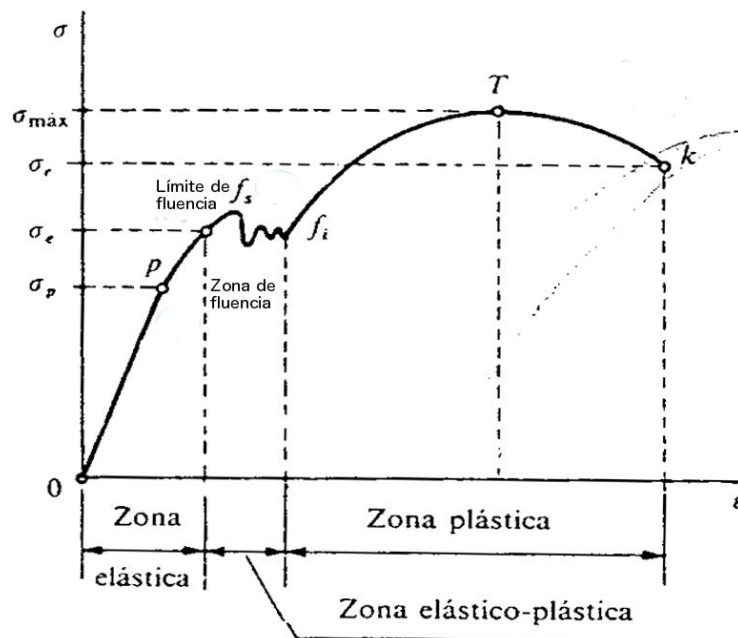


Figura 41 - Curva típica de tensão x deformação [5]

É desejável que se trabalhe dentro do regime elástico do material, para se evitar deformações permanentes. O projeto de cargas de uma coluna obedece esse princípio e se mantém dentro da zona elástica. Essa zona da curva apresenta um comportamento linear e pode ser equacionado. Esse comportamento elástico da coluna é regido pela Lei de Hooke:

$$\sigma = E\epsilon \quad (1)$$

De acordo com Hibbeler: “Os diagramas tensão-deformação para muitos materiais utilizados em engenharia apresentam uma relação linear entre tensão e deformação específica na região elástica”. Essa razão de proporcionalidade é conhecida como módulo de elasticidade ou módulo de Young e é uma característica de cada material.

A tensão é definida como:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

Onde: P é a carga aplicada sobre o material e A_0 é a área da seção.

A deformação é definida como:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (3)$$

Onde: δ é a variação no comprimento e L_0 é o comprimento inicial do elemento.

Como o objetivo é obter uma expressão que demonstre o encurtamento da coluna, vamos substituir as definições de tensão e deformação para, em seguida isolar a variação do comprimento:

$$\frac{P}{A} = \frac{E\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Então,

$$\Delta L = \frac{PL}{EA} \quad (5)$$

Concluimos que, para obter o encurtamento devemos avaliar três fatores: a carga que será retirada, o comprimento restante da coluna e a resistência linear da coluna.

3.1.1.1 Carga cortada

Toda sonda possui um sensor conhecido como Indicador de Peso no Gancho. Esse valor indica quanta carga está sustentada pelo gancho e, portanto, distribuída pela extensão não apoiada da coluna. É um valor disponível pela operação da sonda e pode ser fornecido ao algoritmo.

Esse valor indica a carga da coluna inteira, tanto da parte entre a sonda e o fundo do mar, quanto a parte do poço (Figura 42). Então, para prever a carga que será retirada devemos saber o quanto de carga está sob a cabeça de poço.

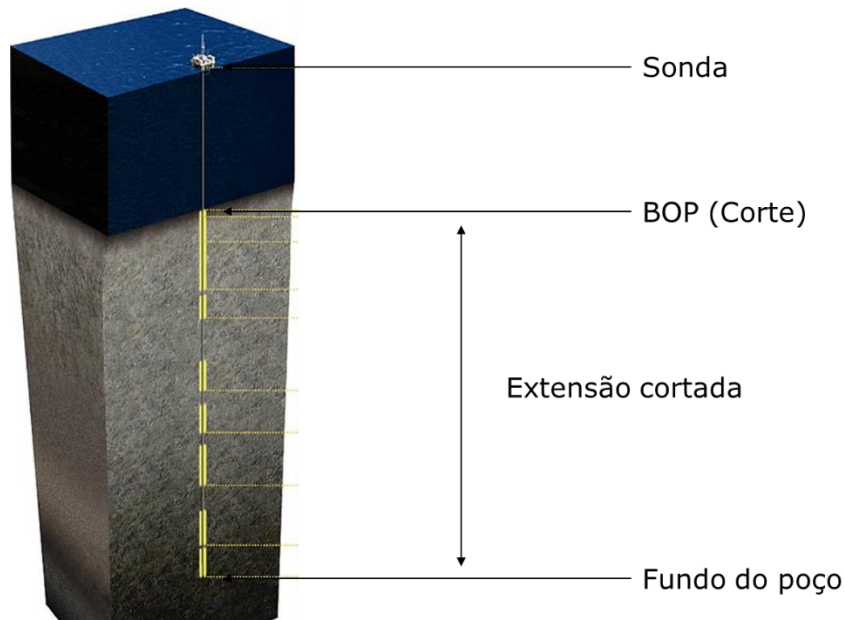


Figura 42 - Extensão completa da coluna [7]

Como a densidade linear, ou peso linear, da coluna é um valor fornecido pelo fabricante, podemos utilizar essa informação para definir a carga que será cortada pela subtração da carga total pela carga da coluna não cortada:

$$P_C = P_T - P_R \quad (6)$$

Onde: P_C é a carga da parte cisalhada da coluna; P_T é a carga total da coluna e; P_R é a carga da parte restante da coluna.

A carga total P_T será fornecida como uma entrada do algoritmo pelo indicador de peso no gancho. Para se obter o valor de P_R exige-se um pouco de atenção.

A carga da parte superior da coluna provém do peso próprio dessa parte da coluna, subtraído do empuxo gerado pelo fluido onde esta está mergulhada. Essa equação é dada por:

$$P_R = F_C - E_C \quad (7)$$

Onde: F_C é a força peso dessa parte da coluna e; E_C é o empuxo dessa parte da coluna.

Como:

$$F_C = \rho_c V_c g \quad (8)$$

Mas como:

$$V_C = A_C L \quad (9)$$

Temos:

$$F_C = \rho_C A_C L g \quad (10)$$

E para o empuxo:

$$E_C = \rho_l A_C L g \quad (11)$$

Onde: E_C é o empuxo sobre a coluna e; ρ_l é a densidade do fluido.

Retornando para a carga da parte restante:

$$P_R = \rho_C A_C L g - \rho_l A_C L g \quad (12)$$

Reagrupando:

$$P_R = (\rho_C - \rho_l) A_C L g \quad (13)$$

Então a equação da carga cortada fica:

$$P_C = P_T - (\rho_C - \rho_l) A_C L g \quad (14)$$

3.1.1.2 Comprimento da coluna entre a Sonda e o BOP

A última variável pendente de consideração nessa equação da carga é o comprimento da coluna no momento do corte. Esse cálculo necessita algumas considerações:

- A posição central da sonda não está verticalmente sobre o poço, e sim deslocada para uma melhor geometria da coluna;
- A coluna não possui uma geometria reta entre a sonda e a cabeça de poço;
- No momento do corte a sonda está bastante deslocada com relação à cabeça de poço;
- A coluna sofre esforços provindos das correntes marinhas que causam uma curvatura da mesma.

Esse posicionamento ideal da sonda é ajustado para tornar as curvas que a coluna faz mais suaves, conforme mostra a Figura 43:

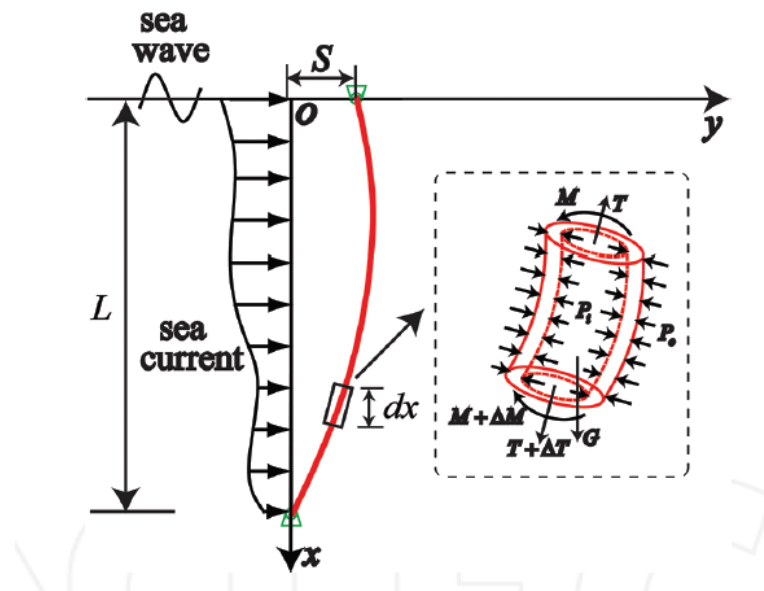


Figura 43 - Esforços sobre a coluna provocados pelas correntes marinhas [10]

Por essa figura, apesar de fora de escala, percebemos que a coluna faz um percurso não reto. Na verdade vários trabalhos acadêmicos e publicações demonstram que o formato da coluna é de uma catenária. Essa figura mesmo foi retirada de uma publicação com o título de “*Mechanical Behavior Analysis and Testing of Marine Raiser in Deepwater Drilling*”, dos autores Yanbin Wang, Deli Gao e Jun Fang. Nesse trabalho os autores demonstram todos os esforços envolvidos na formação dessa curva e como calcular suas dimensões.

Apesar de ser possível calcular as dimensões da catenária da coluna, as variáveis necessárias para isso são específicas de cada caso e não estão disponíveis para o algoritmo. Portanto essa abordagem não é possível para o cálculo do comprimento da coluna com o que há disponível.

Se uma empresa considerar economicamente viável, é possível equipar a sonda com os sensores necessários para se obter os dados necessários para o cálculo dessa catenária. Talvez não somente para ter a informação da distância, mas poder prever melhor os esforços que a coluna está sofrendo durante sua rotação com a curva da catenária.

Uma abordagem mais simples e efetiva seria utilizar algum tipo de sensor na sonda que usasse pulsos elétricos ou algum outro princípio semelhante para determinar a distância efetiva de coluna entre o BOP e o gancho na sonda. Porém essa solução não é utilizada, provavelmente pela ineficiência econômica de tal instalação.

Portanto uma aproximação conservadora parece ser o caminho mais razoável pra se determinar o comprimento da coluna. Essa aproximação é, justamente, tratar a coluna como

uma linha reta entre os dois pontos de apoio. Dessa forma a coluna forma a hipotenusa de um triângulo onde os catetos são a profundidade do mar e a distância da sonda até o ponto da superfície ortogonal à cabeça do poço (Figura 44).

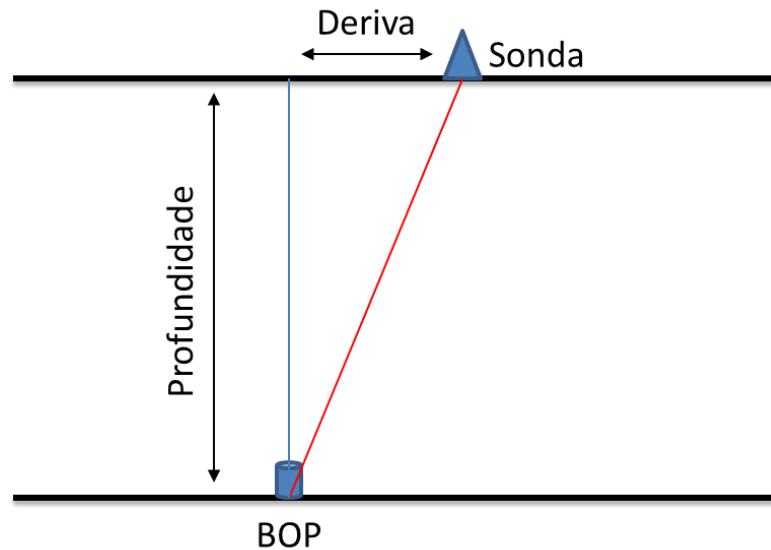


Figura 44 - Distância entre Sonda e BOP

Essa aproximação é bastante conservadora, o que, apesar de ser uma imprecisão, é algo que traz um fator de segurança desejável ao algoritmo, pois o erro é sempre uma medição mais curta da coluna, o que favorece a segurança. Também há de se destacar que uma imprecisão de dezenas de metros na mensuração do comprimento da coluna acarreta um desvio de centímetros ou milímetros no encurtamento da mesma, devido ao elevado módulo de elasticidade do aço.

Utilizando então essa abordagem para o cálculo e sabendo que a profundidade do mar e a deriva da sonda são grandezas conhecidas a todos momentos pela operação da sonda, podemos definir a equação para o comprimento L como:

$$L = \sqrt{H_0^2 + D^2} \quad (15)$$

Onde: H_0 é a altura da lâmina de água sobre o BOP e; D é a distância de deriva entre a sonda e o ponto da superfície ortogonal ao BOP.

Essa distância de deriva é medida a partir de uma posição inicial de deriva D_0 e a velocidade de deriva v_D pela seguinte fórmula:

$$D = D_0 + v_D t \quad (16)$$

3.1.1.3 Resistência Linear da Coluna

Por último, para completar o cálculo do encurtamento ΔL , precisamos obter a resistência linear da coluna. Esses dados são obtidos a partir de tabelas do fabricante, como a Tabela 6 mostrada abaixo:

Tabela 6 - Especificações da coluna de perfuração – FONTE: SteelPipe, 2017

Detail Specification for API 5D Drill Pipe									
Size	Weight Designation	Calculated Plain-End Weight		Outside Diameter		Grade	Wall Thickness		Upset Ends. For Weld-on Tools Joint
		Lb/ft	kg/m	in	mm		in	mm	
2 3/8	6.65	6.26	9.32	2.375	60.3	E,X,G,S	0.280	7.11	EU
2 7/8	10.40	9.72	14.48	2.875	73.0	E,X,G,S	0.362	9.19	IU or EU
3 1/2	9.50	8.81	13.12	3.500	88.9	E	0.254	6.45	IU or EU
3 1/2	13.30	12.31	18.34	3.500	88.9	E,X,G,S	0.368	9.35	IU or EU
3 1/2	15.50	14.63	21.79	3.500	88.9	E	0.449	11.40	IU or EU
3 1/2	15.50	14.63	21.79	3.500	88.9	X,G,S	0.449	11.40	EU or IEU
4	14.00	12.93	19.26	4.000	101.6	E,X,G,S	0.330	8.38	IU or EU
4 1/2	13.75	12.24	18.23	4.500	114.3	E	0.271	6.88	IU or EU
4 1/2	16.60	14.98	22.31	4.500	114.3	E,X,G,S	0.337	8.56	EU or IEU
4 1/2	20.00	18.69	27.84	4.500	114.3	E,X,G,S	0.430	10.92	EU or IEU
5	16.25	14.87	22.15	5.000	127.0	X,G,S	0.296	7.52	IU
5	19.50	17.93	26.71	5.000	127.0	E	0.362	9.19	IEU
5	19.50	17.93	26.71	5.000	127.0	X,G,S	0.362	9.19	EU or IEU
5	25.60	24.03	35.79	5.000	127.0	E	0.500	12.70	IEU
5	25.60	24.03	35.79	5.000	127.0	X,G,S	0.500	12.70	EU or IEU
5 1/2	21.90	19.81	29.51	5.500	139.7	E,X,G,S	0.361	9.17	IEU
5 1/2	24.70	22.54	33.57	5.500	139.7	E,X,G,S	0.415	10.54	IEU
6 5/8	25.20	22.19	33.05	6.625	168.3	E,X,G,S	0.330	8.38	IEU
6 5/8	27.70	24.21	36.06	6.625	168.3	E,X,G,S	0.362	9.19	IEU

Com mais essa entrada a equação que define o efeito do encurtamento da coluna por retirada de carga fica completa e pronta para implementação de acordo com a equação:

$$\Delta z_R = \frac{(P_T - (\rho_C - \rho_l)A_C g (H_0^2 + (D_0 + v_D t)^2)^{\frac{1}{2}})(H_0^2 + (D_0 + v_D t)^2)^{\frac{1}{2}}}{EA_C} \quad (17)$$

Onde: Δz_R é a variação no comprimento devido à retração da coluna.

3.1.2 Oscilação da sonda (*Heave*)

O segundo efeito a ser analisado é devido à movimentação da sonda com a instabilidade marítima. O mar provoca na sonda uma variedade de movimentos que podem ser traduzidos por três pares de efeitos de deslocamento e giro no três eixos de referência (seis graus de liberdade). São eles: arfagem e avanço no eixo X (longitudinal da embarcação), jogo e deriva no eixo Y (transversal da embarcação) e, afundamento e guinada no eixo Z (vertical da embarcação). Esses efeitos podem ser visualizados na Figura 45.

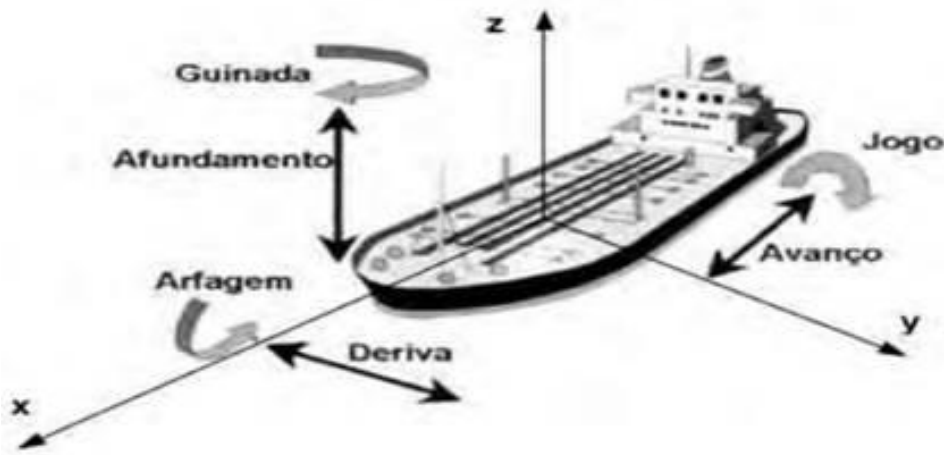


Figura 45 - Efeito do mar sobre embarcação [10]

Para a posição da coluna o efeito relevante é o de afundamento, ou Efeito de *Heave*, como é conhecido na indústria. A variação relevante é com relação ao eixo Z. Como a coluna está apoiada no centro da sonda pode-se considerar esse apoio coincidente com a origem dos eixos. Dessa forma o jogo e a arfagem não irão influenciar na coordenada Z do gancho da coluna. Os deslocamentos de deriva e avanço não influenciam a coordenada Z, assim como a rotação de guinada.

O sistema de monitoração da sonda possui indicadores de posição de *Heave* em tempo real, indicando qual a coordenada Z da sonda naquele momento. Porém prever a posição futura de *Heave* da sonda com exatidão é um problema mais complexo. Muitos trabalhos foram publicados sobre o equacionamento do comportamento de embarcações sob o efeito das ondas.

Um trabalho de Lars Bergdahl, da *Chalmers University*, na Suécia, do ano de 2009, intitulado “*Wave-induced Loads and Ship Motions*” (movimentação de embarcação e da carga induzida pelas ondas – tradução livre), se estende por 180 páginas de análise e equacionamento sobre esta movimentação. A leitura do trabalho demonstra que uma possível previsão de posição é uma tarefa demasiadamente complexa.

Um outro trabalho, de Kuchler, Eberharter, Langer, Schneider e Sawodny, da Universidade de Stuttgart, na Alemanha, publicado em 2011, intitulado “*Heave Motion Estimation of a Vessel Using Acceleration Measurements*” (Estimativa do movimento de afundamento de uma embarcação utilizando medida de aceleração – tradução livre), traz uma abordagem que se mostra bastante proveitosa ao algoritmo deste trabalho.

Os engenheiros alemães afirmam que é possível utilizar os dados dos acelerômetros para prever a movimentação vertical da embarcação. Essa metodologia evita a necessidade da utilização de parâmetros específicos de cada embarcação, facilitando e padronizando um sistema aplicável a qualquer navio ou sonda.

É uma solução importante na utilização de sistemas compensadores como “*Active Heave Compensators*” presentes em muitas sondas ou grandes embarcações de passageiros, onde há grande importância na estabilidade da operação ou no conforto das pessoas. Esses compensadores, quando presentes, eliminam a necessidade da consideração do parâmetro de afundamento na avaliação proposta pelo algoritmo.

Esse sistema pode ser implementado em paralelo e servir como dados de entrada para a previsão da posição da coluna cortada. Porém, na ausência de um compensador e desse tipo de sistema, é necessária uma abordagem que estime uma posição segura para que a segunda gaveta consiga fechar no vazio.

Uma abordagem conservadora, mas utilizada em casos desse tipo pela indústria, é considerar o “*worst case scenario*”. Seria o caso onde sempre se considera a possibilidade de haver o primeiro corte quando a sonda está no ponto mais alto de sua variação vertical, na crista, e que o segundo fechamento de gaveta pode acontecer no momento onde a sonda se encontra no ponto mais baixo, no vale (Figura 46). Essa consideração do pior cenário garante que se a EDS ocorre com sucesso dessa forma, irá ocorrer com sucesso em qualquer outra variação de Heave.

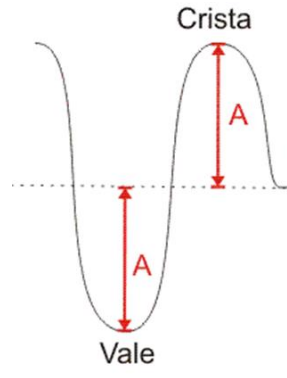


Figura 46 - Amplitude de Heave da Sonda – FONTE: fisicalouca2012.blogspot.com.br

Nesse caso se soma a amplitude do *Heave* indicado pelo sistema de monitoração. Esse nível de margem de segurança parece ser muito alto e incorre na necessidade do acionamento da EDS ocorra muito cedo, para que o efeito de deriva possa compensar essa diferença tão alta.

Utilizando o estudo realizado pelos alemães de Stuttgart uma outra abordagem pode ser aproveitada a partir das conclusões demonstradas por eles. No trabalho ficou claro que o resultado da movimentação da embarcação obedece uma função senoidal onde o tempo é a única variável, conforme equação (18).

$$z(t) = \sum_{j=1}^{N_m} A_j \text{sen}(\omega_j + \varphi_j) + v(t) \quad (18)$$

Essa equação, aplicada a dados reais, mostra uma resposta posição x tempo como na Figura 47:

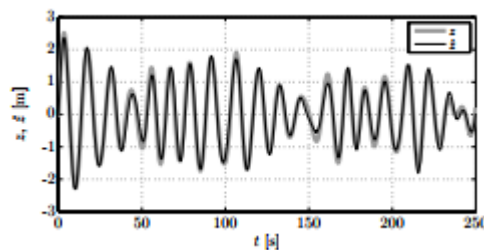


Figura 47 - Previsão de Heave por acelerômetros [11]

Apesar de ser impossível simplificar o comportamento dessa senoide múltipla, pois cada onda apresenta uma variação na amplitude de oscilação, foi notado por eles que o período de onda permanece virtualmente constante num horizonte de tempo próximo, principalmente para as ondas de amplitude mais elevada, permitindo prever o momento aproximado onde a sonda irá alcançar as cristas e os vales.

A ideia é receber a informação de período, amplitude máxima e ângulo de fase para traçar uma curva senoidal simples que servirá como balizadora para a tomada de decisão. Essa curva não vai prever a posição exata da sonda, mas irá indicar as zonas ideais para o acionamento das gavetas de corte.

Essa senoide segue um modelo simples do tipo:

$$z(t) = \frac{A}{2} \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi_0\right) \quad (19)$$

Onde: $z(t)$ é a posição de afundamento em função do tempo; A é a amplitude; T é o período da onda e; φ_0 é o ângulo inicial.

A importância dessa senoidal é replicar as tendências de subida ou descida da sonda. Como o período é constante e a amplitude não sofre alterações bruscas, podemos utilizar essa previsão aproximada para fornecer ao algoritmo as zonas ótimas de acionamento (ZOA).

Nesse momento é importante mencionar que o intervalo entre os acionamentos das gavetas geralmente é um tempo fixo e pré-determinado. Este deve ser definido em função do período da onda e também será um dado de entrada do algoritmo.

Porém também é possível explorar a possibilidade de não se fixar o intervalo entre os fechamentos e buscar o melhor momento para o segundo fechamento após a ocorrência do primeiro. Nesse caso é preciso considerar o cenário mais conservador sobre a posição de *Heave*. Esse cenário será explorado no algoritmo.

Serão definidas duas zonas dentro da senoide, uma Zona de Perda (ZP) e uma Zona de Ganho (ZG). Essas zonas definem o valor que será entregue ao algoritmo como o valor de contribuição do *Heave* sobre a posição da extremidade após o corte (Figura 48).

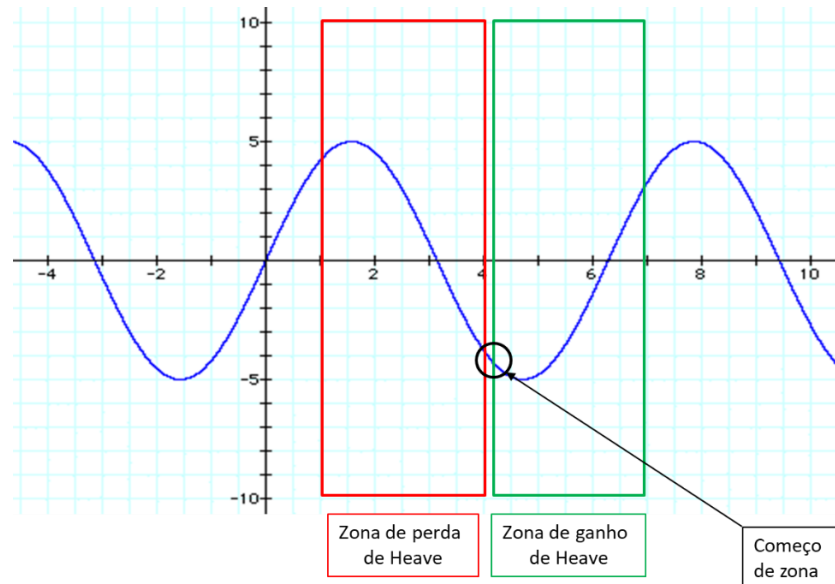


Figura 48 - Zonas de ganho e perda de Heave

Na zona vermelha (ZP) da figura será considerado o pior caso possível, onde o primeiro corte acontece no momento em que a sonda está em movimento de descida, fazendo com que a extremidade da coluna desça também. Se for decidido por realizar o corte nessa situação será considerado no algoritmo o valor de perda máxima encontrado pela simulação teórica da senoide em qualquer instante para o intervalo de corte dado como entrada:

$$\Delta z_H = \max \Delta z_H \text{ teórico} \quad (20)$$

Esse valor reflete o máximo que a sonda pode perder em afundamento durante o intervalo de corte. Não seria razoável utilizar o valor máximo de amplitude se o intervalo de corte não for um tempo suficiente para que a sonda percorra essa mesma amplitude.

O ideal é programar o corte dentro da zona verde (ZG), onde a sonda está em tendência de subida e haverá ganho de deslocamento da extremidade cortada. Neste caso, pra manter um bom nível de fator de segurança pela incerteza do comportamento real do afundamento, será considerado um valor também conservador de zero ganho dentro do algoritmo.

$$\Delta z_H = 0 \quad (21)$$

O início da ZG será definido como metade do tempo de corte antes do momento de mínimo da oscilação (vale) e o final como metade do tempo de corte antes do ponto de máxima (crista). Toda região que não for considerada ZG será considerada ZP.

Para determinar numericamente, na forma de tempo, essas zonas, vamos utilizar o período de *Heave* e o ângulo de fase para definir o instante onde a onda passa pelo ângulo zero pela equação:

$$t_0 = -\frac{\varphi_0 T}{2\pi} \quad (22)$$

Onde: t_0 é o tempo passado desde a última vez que a oscilação passou pelo ângulo zero da senoide.

Somando a esse instante o valor de um quarto do período menos a metade intervalos de corte temos o início do primeiro intervalo de ZP. Esse intervalo se estende por metade do período de oscilação, quando começa um intervalo de ZG. Daí por diante as zonas se intercalam em intervalos de metade do período. Esse comportamento pode ser observado na Figura 49:

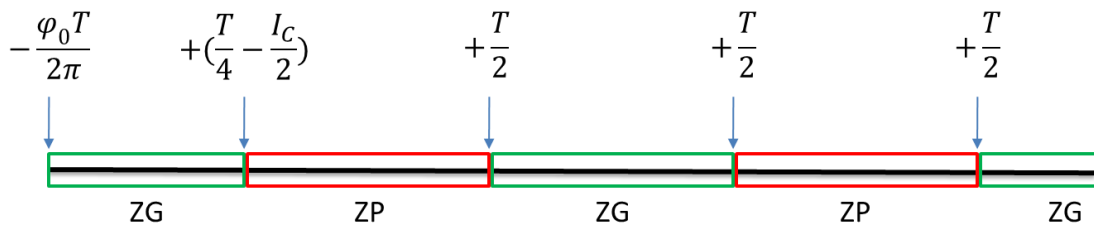


Figura 49 – Definição das ZP e ZG

O cálculo necessário para se chegar até essas zonas utiliza a lógica de programação de seguinte forma:

Calcula-se o tempo necessário para a próxima passagem da senoide pelo ângulo $2k\pi$ onde será definido o tempo t_0 segundo a seguinte equação:

$$t_0 = \frac{2\pi - \varphi_0}{2\pi} T \quad (23)$$

Após isso utiliza-se esse valor para encontrar o primeiro ponto de início de uma zona de perda somando um quarto do período e retirando metade do intervalo de corte pra se achar o tempo t_1 da seguinte forma:

$$t_1 = t_0 + \left(\frac{T}{4} - \frac{I_c}{2}\right) \quad (24)$$

Então subtrai-se esse valor obtido do valor de tempo utilizado em cada instante da simulação pra se chegar a um valor que será conhecido como k_H :

$$k_H = t - t_1 \quad (25)$$

A este valor k_H aplicamos dois testes de quociente e resto da divisão por dois para identificar se o valor de tempo está dentro da ZP ou dentro da ZG. Esse equacionamento não tem significado físico, se trata apenas de uma manobra lógica para que o algoritmo consiga identificar em qual zona se encontra a sonda num determinado momento futuro.

Com isso tem-se uma definição sobre a abordagem da variação da altura da extremidade cortada da coluna sob efeito da oscilação do mar para utilizar no algoritmo. A contribuição do *Heave* pode assumir valores de acordo com essas duas equações:

Se o corte for feito na ZG:

$$\Delta z_H = 0 \quad (26)$$

Se o corte for feito na ZP:

$$\Delta z_H = \max \Delta z_H \text{ teórico} \quad (27)$$

3.1.3 Deriva da Sonda

Durante o cenário que leva à necessidade de uma EDS a sonda está se deslocando para longe da posição ideal, se afastando com uma velocidade conhecida. Essa velocidade é conhecida por velocidade de deriva. Esse movimento de afastamento aumenta a distância entre a sonda e o BOP, trazendo consigo a coluna.

Entre o momento em que a coluna é cortada e o momento em que a segunda gaveta irá se fechar a sonda realiza um movimento de deriva Δx que irá provocar um movimento de afastamento da extremidade da coluna com relação à gaveta de corte (Figura 50).

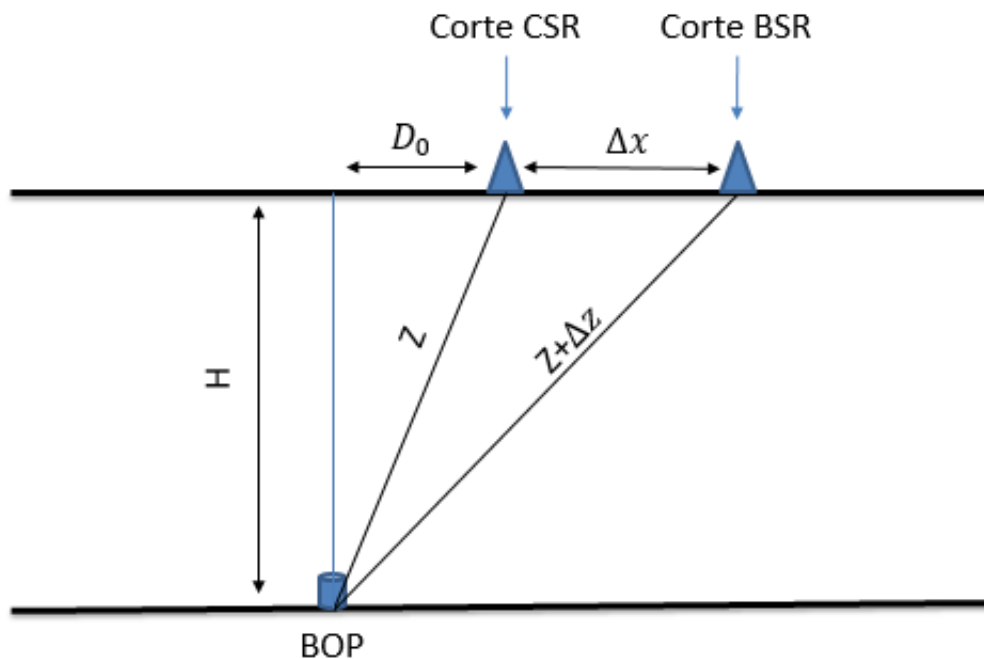


Figura 50 - Efeito de deriva

As informações de profundidade H , posição inicial de deriva D_0 , velocidade de deriva v_D e o intervalo de tempo entre os cortes I_c são conhecidos pelo algoritmo e são suficientes para o cálculo de Δz . Esse cálculo se faz a partir dos triângulos retângulos da figura acima da seguinte forma:

$$Z = \sqrt{H^2 + D_0^2} \quad (28)$$

Também:

$$Z + \Delta z = \sqrt{H^2 + (D_0 + \Delta x)^2} \quad (29)$$

Então:

$$\Delta z_D = \sqrt{H^2 + (D_0 + \Delta x)^2} - \sqrt{H^2 + D_0^2} \quad (30)$$

Sendo que:

$$\Delta x = v_D I_c \quad (31)$$

Dessa forma obtém-se o terceiro e último valor de contribuição para o encurtamento da coluna segunda a seguinte equação:

$$\Delta z_D = \sqrt{H^2 + (D_0 + v_D I_c)^2} - \sqrt{H^2 + D_0^2} \quad (32)$$

4 Entradas e saídas do algoritmo

O algoritmo necessita de um conjunto de dados de entrada para seu processamento eficaz, seguindo unidades de medidas coerentes e em formato compatível com o utilizado nas equações que compõe a lógica de programação.

Abaixo seguem as tabelas com uma descrição breve do dado de entrada, o símbolo correspondente nas equações, a unidade de medida a ser utilizada e a fonte dos dados necessários em cada um dos três fatores calculados:

4.1 Retração da coluna (Δz_R)

Tabela 7 - Entradas para a retração da coluna

Símbolo	Descrição	Unidade	Fonte
ρ_c	Densidade do aço da coluna	kg/m^3	Tabela fabricante
ρ_l	Densidade do fluido envoltório	kg/m^3	Operação sonda
P_T	Carga total da coluna	kN	Sistema de monitoração
A_c	Área da seção – diâmetro externo e espessura de parede	mm	Tabela fabricante
H_0	Profundidade do BOP	m	Operação da sonda
D_0	Deriva inicial	m	Operação da sonda
v_D	Velocidade de deriva	m/s	Operação da sonda
E	Módulo de Young do aço da coluna	GPa	Tabela do fabricante

4.2 Perda de Heave (Δz_H)

Tabela 8 - Entradas para a perda de Heave

Símbolo	Descrição	Unidade	Fonte
A_H	Amplitude do Heave	m	Operação da sonda
T_H	Período oscilatório do Heave	s	Operação da sonda
φ_0	Ângulo de fase (inicial) do Heave	rad	Operação da sonda
I_C	Intervalo de corte	s	Operação da sonda

4.3 Variação pela Deriva (Δz_D)

Tabela 9 - Entradas para a variação pela Deriva

Símbolo	Descrição	Unidade	Fonte
D_0	Deriva inicial	m	Operação da sonda
v_D	Velocidade de deriva	m/s	Operação da sonda
H_0	Profundidade do BOP	m	Operação da sonda
I_C	Intervalo de corte	s	Operação da sonda

Além dessas entradas listadas também é necessário informar a distância entre as gavetas de corte, que é a distância que deve ser vencida pelo deslocamento da extremidade da coluna para que ocorra um fechamento no vazio da segunda gaveta. Essa entrada será feita pela operação da sonda com unidade em metros.

É um total de doze parâmetros de entrada que são necessários para se calcular a posição futura de extremidade da coluna após o corte da CSR. Esses dados serão processados pelas equações já apresentadas em softwares adequados e entregar uma saída que seja útil na tomada de decisão de uma EDS nas condições propostas pelo caso estudado.

A pergunta central a ser respondida por esse algoritmo é: “Qual o melhor momento para se acionar a gaveta de corte CSR para que a segunda gaveta BSR consiga fechar no vazio?” (na versão padrão do simulador). Para responder a essa pergunta o algoritmo propõe simular o acionamento da primeira gaveta em momentos sucessivos, com intervalos de 1 segundo entre as tentativas, num horizonte de 60 segundos, a partir do momento que o operador considerar adequado. Esse momento pode ser, digamos, a entrada da sonda em estado vermelho de operação. Esse momento será identificado nos dados de entrada a partir das informações de deriva inicial, por exemplo, não necessitando que se entre nos parâmetros individuais de cada sonda para definir esse instante.

O algoritmo irá fornecer um conjunto de 60 valores diferentes de Δz obtidos para aquele cenário específico. Esse valores serão comparados com a distância nominal entre as duas gavetas de corte, para definir se naquele momento a gaveta fecharia ou não no vazio. Por fim haverá uma resposta do conjunto de momentos que são adequados para o acionamento da gaveta, sendo essa a resposta fundamental à pergunta proposta.

Cada cenário simulado irá fornecer três objetos informativos: uma tabela de valores para Δz , um gráfico com a posição relativa entre a extremidade cortada e a segunda gaveta ao longo do tempo, e uma régua de recomendação de corte mostrando os melhores instantes para se acionar a EDS.

5 Algoritmo

O algoritmo possui duas versões que farão dois tipos de simulação diferentes de acordo com o tratamento dado ao intervalo de corte.

Na primeira versão (versão padrão) o intervalo de corte será utilizado como uma grandeza fixa, refletindo o formato atual de EDS utilizado na indústria. Com isso o simulador irá avaliar o cenário proposto e calcular qual o melhor instante para se acionar a primeira gaveta de corte para que a segunda consiga efetuar o fechamento no vazio.

Nessa versão as equações que serão utilizadas são aquelas desenvolvidas nos itens anteriores. Aqui segue uma lista centralizada delas:

Para a retração da coluna:

$$\Delta z_R = \frac{(P_T - (\rho_C - \rho_l)A_C g (H_0^2 + (D_0 + v_D t)^2)^{\frac{1}{2}})(H_0^2 + (D_0 + v_D t)^2)^{\frac{1}{2}}}{EA_C} \quad (17)$$

Para a perda de *Heave*:

$$t_0 = \frac{2\pi - \varphi_0}{2\pi} T \quad (23)$$

$$t_1 = t_0 + \left(\frac{T}{4} - \frac{I_C}{2}\right) \quad (24)$$

$$k_H = t - t_1 \quad (25)$$

$$\Delta z_H = \max \Delta z_H \text{ teórico ou } \Delta z_H = 0 \quad (27) \text{ e } (26)$$

$$z(t) = \frac{A}{2} \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi_0\right) \quad (19)$$

Para a variação de deriva:

$$\Delta z_D = \sqrt{H^2 + (D_0 + v_D I_c)^2} - \sqrt{H^2 + D_0^2} \quad (32)$$

A segunda versão do simulador trata o intervalo de corte como uma grandeza variável, fixando o momento do primeiro corte como o instante inicial da simulação. Nessa versão a questão que se busca responder é: “Qual o momento ideal para se realizar o fechamento da segunda gaveta após esse primeiro corte já ter ocorrido?”.

A mudança de versão afeta muito pouco as equações utilizadas. No cálculo de perda de *Heave* e da variação por deriva não há alteração alguma nas equações, apenas uma mudança na forma de obter o parâmetro de intervalo de corte, que deixa de ser fixo e passa a ser a variável do algoritmo.

Para o cálculo do encurtamento devemos desconsiderar a velocidade de deriva, uma vez que o corte irá ocorrer no instante inicial e o encurtamento será com relação à coluna naquele momento. Então a equação para a retração fica:

$$\Delta z_R = \frac{(P_T - (\rho_C - \rho_l) A_C g (H_0^2 + (D_0)^2)^{\frac{1}{2}}) (H_0^2 + (D_0)^2)^{\frac{1}{2}}}{E A_C} \quad (33)$$

Todos os cenários serão testados em ambas as versões.

5.1 A plataforma do simulador

O algoritmo simulador foi construído como protótipo na plataforma Excel, uma vez que todas as equações envolvidas são de simples execução e leves no processamento.

O simulador foi construído em sete planilhas de um mesmo arquivo, uma para entrada de dados, uma para resultados e cinco para processamento dos dados de forma compartimentada entre as subdivisões da lógica do algoritmo. As planilhas possuem os nomes de: “Ficha de Cenário”, “Dados de Entrada”, “Retração”, “*Heave* Ajustado”, “*Heave* Teórico”, “Deriva” e “Resultados”.

5.1.1 Ficha de Cenário

A primeira planilha do simulador tem a função de capturar os dados referentes à simulação desejada pelo usuário, assim como identificar a característica a ser avaliada naquela simulação (Figura 51).

Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1300	kg/m ³
Carga total da coluna:	500	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	1000	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,1	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	2	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s
Distância entre gavetas	0,9	m

Previsor de posição da extremidade da coluna de perfuração cortada durante desconexão de emergência (Versão com Intervalo de Corte fixo)

Instruções de uso:
 Insira os dados de entrada do cenário a ser avaliado nos retângulos à esquerda de acordo com as unidades indicadas.
 O resultado irá surgir na aba de mesmo nome (RESULTADO)

Ficha de Cenário | Dados de Entrada | Retração | Heave Ajustado | Heave Teórico | Deriva | Resultado

Figura 51 - Planilha de Ficha de Cenário

Essa deve ser a única tela onde o usuário irá interagir com alguma edição, apenas necessitando inserir os dados correspondentes ao cenário desejado.

5.1.2 Dados de Entrada

Trata-se de uma planilha puramente acessória, onde são consolidados os dados inseridos na tela de Ficha de Cenário e alguns cálculos preliminares são realizados (Figura 52).

Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1300	kg/m ³
Carga total da coluna:	500	kN
Área de seção:	0,0018669	m ²
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	1000	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,1	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	2	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s
Distância entre gavetas	0,9	m

Ficha de Cenário | **Dados de Entrada** | Retração | Heave Ajustado | Heave Teórico | Deriva

Figura 52 - Planilha Dados de Entrada

5.1.3 Retração

Na planilha de Retração é calculada a equação correspondente ao longo da variável de tempo, que vai de 0 a 60 segundos. Os dados de entrada são importados da planilha de dados. Os resultados são expostos na última coluna da tabela e exportados à planilha Resultados. Alguns valores intermediários estão calculados na tabela para análise e possível avaliação de algum erro (Figura 53).

Encurtamento						
	D	D ²	L	Pr	Pc	Zr
0	70,00	4900,00	1501,63	181328	618672	2,40
1	70,80	5012,64	1501,67	181332	618668	2,40
2	71,60	5126,56	1501,71	181337	618663	2,40
3	72,40	5241,76	1501,75	181342	618658	2,40
4	73,20	5358,24	1501,79	181346	618654	2,40
5	74,00	5476,00	1501,82	181351	618649	2,40
6	74,80	5595,04	1501,86	181356	618644	2,40
7	75,60	5715,36	1501,90	181361	618639	2,40
8	76,40	5836,96	1501,94	181366	618634	2,40
9	77,20	5959,84	1501,99	181371	618629	2,40
10	78,00	6084,00	1502,03	181376	618624	2,40
11	78,80	6209,44	1502,07	181381	618619	2,40
12	79,60	6336,16	1502,11	181386	618614	2,40
13	80,40	6464,16	1502,15	181391	618609	2,40
14	81,20	6593,44	1502,20	181396	618604	2,40
15	82,00	6724,00	1502,24	181401	618599	2,40
16	82,80	6855,84	1502,28	181407	618593	2,40
17	83,60	6988,96	1502,33	181412	618588	2,40
18	84,40	7123,36	1502,37	181417	618583	2,40
19	85,20	7259,04	1502,42	181423	618577	2,40

$$\Delta z_R = \frac{(P_T - (\rho_c - \rho_i)A_c g (H_0^2 + (D_0 + v_D t)^2)^{\frac{1}{2}})(H_0^2 + (D_0 + v_D t)^2)^{\frac{1}{2}}}{EA_c}$$

Ficha de Cenário	Dados de Entrada	Retração	Heave Ajustado	Heave Teórico	Deriva	Resultado	⊕
------------------	------------------	-----------------	----------------	---------------	--------	-----------	---

Figura 53 - Planilha Retração

5.1.4 Heave Ajustado

Essa planilha realiza os cálculos necessário para determinar a ZG (zona de ganho) e a ZP (zona de perda), e determinar se cada instante da simulação se encontra em uma ou outra. Essa planilha importa o dado de Heave Teórico Máximo de outra planilha para determinar a mgnitude do ajuste que será feito àquelas linhas que se encontrarem na ZP. Na última coluna se encontra o valor ajustado que será exportado à planilha Resultados (Figura 54).

Heave								
t	T	lc						Zh
0	24,00	8,00	26,00	-2,00	0	0	-2,77	-2,77
1	24,00	8,00	26,00	-1,00	0	0	-2,77	-2,77
2	24,00	8,00	26,00	0,00	0	0	-2,77	-2,77
3	24,00	8,00	26,00	1,00	0	0	-2,77	-2,77
4	24,00	8,00	26,00	2,00	0	0	-2,77	-2,77
5	24,00	8,00	26,00	3,00	0	0	-2,77	-2,77
6	24,00	8,00	26,00	4,00	0	0	-2,77	-2,77
7	24,00	8,00	26,00	5,00	0	0	-2,77	-2,77
8	24,00	8,00	26,00	6,00	0	0	-2,77	-2,77
9	24,00	8,00	26,00	7,00	0	0	-2,77	-2,77
10	24,00	8,00	26,00	8,00	0	0	-2,77	-2,77
11	24,00	8,00	26,00	9,00	0	0	-2,77	-2,77
12	24,00	8,00	26,00	10,00	0	0	-2,77	-2,77
13	24,00	8,00	26,00	11,00	0	0	-2,77	-2,77
14	24,00	8,00	26,00	12,00	1	1	-2,77	0,00
15	24,00	8,00	26,00	13,00	1	1	-2,77	0,00
16	24,00	8,00	26,00	14,00	1	1	-2,77	0,00
17	24,00	8,00	26,00	15,00	1	1	-2,77	0,00
18	24,00	8,00	26,00	16,00	1	1	-2,77	0,00
19	24,00	8,00	26,00	17,00	1	1	-2,77	0,00

Pi: 3,141593

$$t_0 = -\frac{\varphi_0 T}{2\pi}$$

$$t_1 = -\frac{\varphi_0 T}{2\pi} + \left(\frac{T}{4} - \frac{l_c}{2}\right)$$

$$\Delta z_H = -\frac{2l_c}{T} A$$

Figura 54 - Planilha Heave Ajustado

5.1.5 Heave Teórico

A planilha de *Heave* Teórico difere da *Heave* Ajustado por calcular a perda de *Heave* diretamente da senoide teórica de posição da sonda. Essa planilha tem duas funções: calcular o *Heave* Teórico Máximo que será utilizado para o *Heave* Ajustado e servir de base de comparação com o resultado que utiliza o *Heave* Ajustado.

A tela segue o mesmo modelo das anteriores, com as colunas apresentando cálculos intermediários, as linhas representando a variável do tempo e a última coluna mostrando a variação que será exportada para a planilha Resultado (Figura 55).

Heave										
t	sen φ				Z0			Z1	Zh	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,09	2,09	0,87	1,39	1,39
1	0,00	0,26	0,26	0,26	0,41	2,36	2,36	0,71	1,13	0,72
2	0,00	0,52	0,52	0,50	0,80	2,62	2,62	0,50	0,80	0,00
3	0,00	0,79	0,79	0,71	1,13	2,88	2,88	0,26	0,41	-0,72
4	0,00	1,05	1,05	0,87	1,39	3,14	3,14	0,00	0,00	-1,39
5	0,00	1,31	1,31	0,97	1,55	3,40	3,40	-0,26	-0,41	-1,96
6	0,00	1,57	1,57	1,00	1,60	3,67	3,67	-0,50	-0,80	-2,40
7	0,00	1,83	1,83	0,97	1,55	3,93	3,93	-0,71	-1,13	-2,68
8	0,00	2,09	2,09	0,87	1,39	4,19	4,19	-0,87	-1,39	-2,77
9	0,00	2,36	2,36	0,71	1,13	4,45	4,45	-0,97	-1,55	-2,68
10	0,00	2,62	2,62	0,50	0,80	4,71	4,71	-1,00	-1,60	-2,40
11	0,00	2,88	2,88	0,26	0,41	4,97	4,97	-0,97	-1,55	-1,96
12	0,00	3,14	3,14	0,00	0,00	5,24	5,24	-0,87	-1,39	-1,39
13	0,00	3,40	3,40	-0,26	-0,41	5,50	5,50	-0,71	-1,13	-0,72
14	0,00	3,67	3,67	-0,50	-0,80	5,76	5,76	-0,50	-0,80	0,00
15	0,00	3,93	3,93	-0,71	-1,13	6,02	6,02	-0,26	-0,41	0,72
16	0,00	4,19	4,19	-0,87	-1,39	6,28	6,28	0,00	0,00	1,39
17	0,00	4,45	4,45	-0,97	-1,55	6,54	6,54	0,26	0,41	1,96
18	0,00	4,71	4,71	-1,00	-1,60	6,81	6,81	0,50	0,80	2,40
19	0,00	4,97	4,97	-0,97	-1,55	7,07	7,07	0,71	1,13	2,68

Pi: 3,141593

$$z(t) = \frac{A}{2} \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi_0\right)$$

Zh max: -2,77

Figura 55 - Planilha Heave Teórico

5.1.6 Deriva

A planilha Deriva realiza os cálculos da variação causada pela deriva da sonda ao longo da variável tempo (linhas da tabela) e exporta o resultado (última coluna) para a planilha Resultado (Figura 56).

Deriva			
t	L0	L1	Zd
0	1501,63	1501,94	0,31
1	1501,63	1501,94	0,31
2	1501,63	1501,94	0,31
3	1501,63	1501,94	0,31
4	1501,63	1501,94	0,31
5	1501,63	1501,94	0,31
6	1501,63	1501,94	0,31
7	1501,63	1501,94	0,31
8	1501,63	1501,94	0,31
9	1501,63	1501,94	0,31
10	1501,63	1501,94	0,31
11	1501,63	1501,94	0,31
12	1501,63	1501,94	0,31
13	1501,63	1501,94	0,31
14	1501,63	1501,94	0,31
15	1501,63	1501,94	0,31
16	1501,63	1501,94	0,31
17	1501,63	1501,94	0,31
18	1501,63	1501,94	0,31
19	1501,63	1501,94	0,31
20	1501,63	1501,94	0,31

$$\Delta z_D = \sqrt{H^2 + (D_0 + v_D I_c)^2} - \sqrt{H^2 + D_0^2}$$

Ficha de Cenário	Dados de Entrada	Retração	Heave Ajustado	Heave Teórico	Deriva	Resultado
------------------	------------------	----------	----------------	---------------	---------------	-----------

Figura 56 - Planilha Deriva

5.1.7 Resultado

Essa é a outra tela de interesse do usuário, onde ele irá encontrar o resultado da simulação realizada pelo cenário proposto na Ficha de Cenário.

O resultado é composto de uma tabela e dois gráficos. Na tabela há a importação dos resultados parciais das outras planilhas e o cálculo do resultado agregado em duas formas, considerando o *Heave Ajustado* e considerando o *Heave Teórico*. Os gráficos refletem esses mesmos resultados (Figura 57).

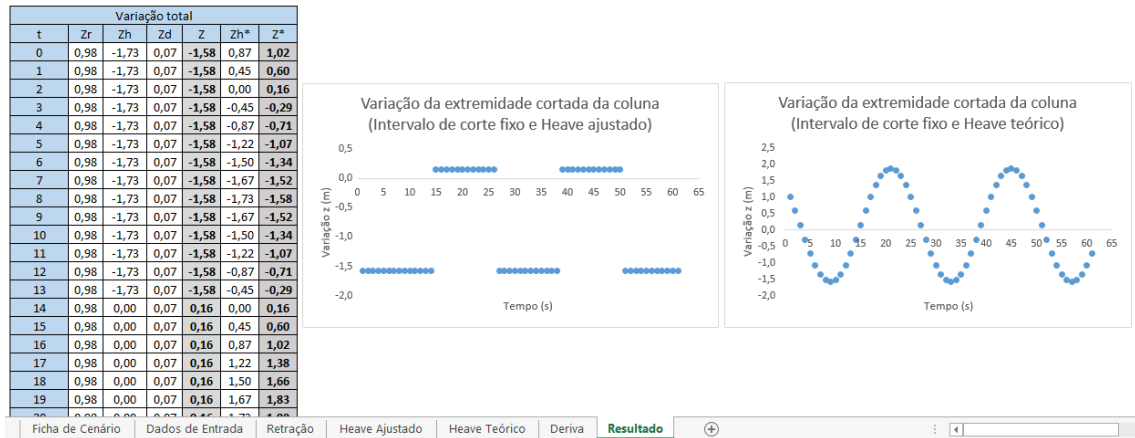


Figura 57 - Planilha Resultado

Os gráficos de *Heave* teórico refletem com bastante proximidade o comportamento da extremidade da coluna e serão usados para uma análise mais qualitativa. Já os gráficos de *Heave* ajustado possuem o fator de segurança adequado para uso real e servem para uma análise sobre a decisão a ser tomada pelo operador da sonda (ou pelo sistema, numa possível automação).

5.2 Cenários

Alguns cenários foram propostos para simulação no algoritmo para testar situações características da operação e tirar conclusões importantes sobre a EDS. Esses cenários envolvem a variação dos parâmetros de entrada em limites opostos encontrados na operação de sondas.

Os cenários são:

1. Lâmina d'água rasa x profunda.
2. Manobra de coluna durante fase de reservatório (pouca carga devido à ausência de BHA) x Operação com BHA (muita carga).
3. Fluido pesado x fluido leve.
4. Mar calmo x mar agitado (*Heave* baixo x *Heave* alto).
5. Velocidade de deriva alta x velocidade de deriva baixa.

Os demais parâmetros irão permanecer inalterados para se obter uma simulação que reflita apenas a influência do parâmetro destacado. Todos os cenários serão simulados nas duas versões do algoritmo (intervalo de corte fixo e intervalo de corte variável).

Os dados utilizados em cada cenário estão na Tabela 10:

Tabela 10 - Dados dos cenários de simulação

	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
Densidade do aço:	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900	7900
Densidade do fluido:	1300	1300	1300	1300	2000	1000	1300	1300	1300	1300
Carga total da coluna:	800	800	220	1400	800	800	400	400	500	500
Diâmetro externo:	114,3	114,3	114,3	114,3	114,3	114,3	114,3	114,3	114,3	114,3
Espessura de parede:	10,92	10,92	10,92	10,92	10,92	10,92	10,92	10,92	10,92	10,92
Lâmina d'água:	3000	400	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1000	1000
Deriva inicial:	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
Velocidade de deriva:	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,2	0,1
Módulo de elasticidade do aço:	207	207	207	207	207	207	207	207	207	207
Amplitude de Heave:	2	2	2	2	2	2	4	0,4	2	2
Período de Heave:	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Ângulo de fase:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Intervalo de corte:	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Distância entre gavetas	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Nessa tabela são indicados duas versões para cada cenário de acordo com a lista abaixo:

- 1A – Lâmina d'água profunda
- 1B – Lâmina d'água rasa
- 2A – Carga total baixa
- 2B – Carga total alta
- 3A – Fluido da coluna muito denso
- 3B – Fluido da coluna pouco denso
- 4A – Oscilação de *Heave* alta
- 4B – Oscilação de *Heave* baixa
- 5A – Velocidade alta de deriva
- 5B – Velocidade baixa de deriva

Para a simulação na versão de intervalo de corte variável será desconsiderado este mesmo dado em cada cenário da tabela.

6 Simulações e resultados

6.1 Cenário 1 – Influência da altura da lâmina d'água

6.1.1 1A – Lâmina d'água profunda

Tabela 11 - Dados do Cenário 1A

Cenário de Simulação		Nº: 01A
Característica: Lâmina d'água profunda		
Objetivo: Verificar a influência da profundidade da lâmina d'água na posição da extremidade da coluna após o corte.		
Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1300	kg/m ³
Carga total da coluna:	800	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	3000	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,5	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	2	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s
Distância entre gavetas	0,9	m

6.1.1.1 Intervalo de corte fixo

6.1.1.1.1 Heave Ajustado

Tabela 12 - Resultado do cenário 1A com intervalo de corte fixo e Heave Ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	0,89	10 s	0,89	20 s	2,62	30 s	0,89	40 s	2,62	50 s	0,89
1 s	0,89	11 s	0,89	21 s	2,62	31 s	0,89	41 s	2,62	51 s	0,89
2 s	0,89	12 s	0,89	22 s	2,62	32 s	0,89	42 s	2,62	52 s	0,89
3 s	0,89	13 s	0,89	23 s	2,62	33 s	0,89	43 s	2,62	53 s	0,89
4 s	0,89	14 s	2,62	24 s	2,62	34 s	0,89	44 s	2,62	54 s	0,89
5 s	0,89	15 s	2,62	25 s	2,62	35 s	0,89	45 s	2,62	55 s	0,89
6 s	0,89	16 s	2,62	26 s	0,89	36 s	0,89	46 s	2,62	56 s	0,89
7 s	0,89	17 s	2,62	27 s	0,89	37 s	0,89	47 s	2,62	57 s	0,89
8 s	0,89	18 s	2,62	28 s	0,89	38 s	2,62	48 s	2,62	58 s	0,89
9 s	0,89	19 s	2,62	29 s	0,89	39 s	2,62	49 s	2,62	59 s	0,89

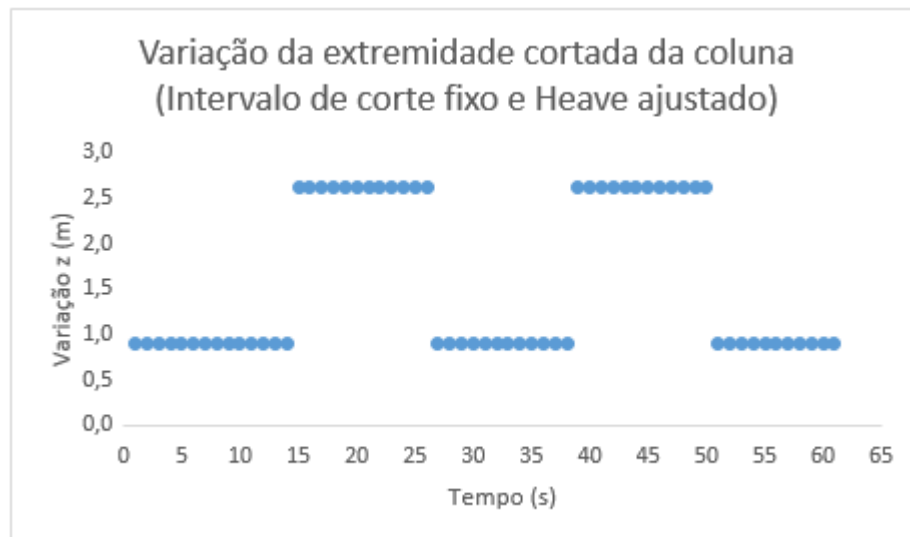


Figura 58 - Cenário 1A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

6.1.1.1.2 Heave Teórico

Tabela 13 - Cenário 1A com intervalo de corte fixo e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	3,49	10 s	1,12	20 s	4,35	30 s	1,12	40 s	3,49	50 s	2,62
1 s	3,07	11 s	1,40	21 s	4,29	31 s	0,95	41 s	3,85	51 s	2,17
2 s	2,62	12 s	1,75	22 s	4,12	32 s	0,89	42 s	4,12	52 s	1,76
3 s	2,17	13 s	2,17	23 s	3,85	33 s	0,95	43 s	4,29	53 s	1,40
4 s	1,75	14 s	2,62	24 s	3,49	34 s	1,12	44 s	4,35	54 s	1,12
5 s	1,40	15 s	3,07	25 s	3,07	35 s	1,40	45 s	4,29	55 s	0,95
6 s	1,12	16 s	3,49	26 s	2,62	36 s	1,76	46 s	4,12	56 s	0,89
7 s	0,95	17 s	3,85	27 s	2,17	37 s	2,17	47 s	3,85	57 s	0,95
8 s	0,89	18 s	4,12	28 s	1,76	38 s	2,62	48 s	3,49	58 s	1,12
9 s	0,95	19 s	4,29	29 s	1,40	39 s	3,07	49 s	3,07	59 s	1,40

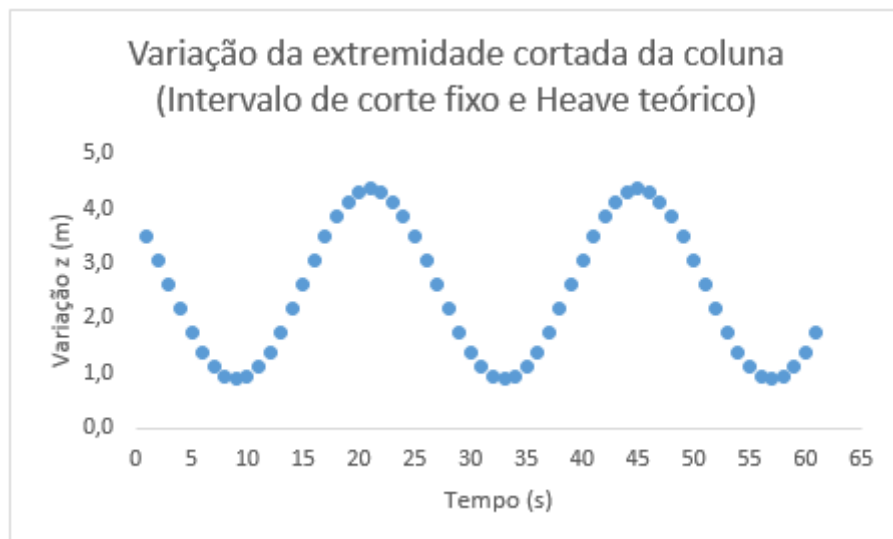


Figura 59 - Cenário 1A com intervalo de corte fixo e Heave teórico

6.1.1.2 Intervalo de corte variável

6.1.1.2.1 Heave Ajustado

Tabela 14 - Cenário 1A com intervalo de corte variável e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,50	10 s	1,65	20 s	2,81	30 s	1,99	40 s	2,16	50 s	3,35
1 s	1,51	11 s	1,67	21 s	2,83	31 s	2,00	41 s	2,18	51 s	3,37
2 s	1,53	12 s	1,68	22 s	2,85	32 s	2,02	42 s	3,20	52 s	3,39
3 s	1,54	13 s	1,70	23 s	2,87	33 s	2,04	43 s	3,22	53 s	3,41
4 s	1,56	14 s	1,72	24 s	2,88	34 s	2,06	44 s	3,24	54 s	2,43
5 s	1,57	15 s	1,73	25 s	2,90	35 s	2,07	45 s	3,26	55 s	2,45
6 s	1,59	16 s	1,75	26 s	2,92	36 s	2,09	46 s	3,28	56 s	2,47
7 s	1,61	17 s	1,77	27 s	2,93	37 s	2,11	47 s	3,29	57 s	2,49
8 s	1,62	18 s	2,78	28 s	2,95	38 s	2,13	48 s	3,31	58 s	2,51
9 s	1,64	19 s	2,80	29 s	2,97	39 s	2,15	49 s	3,33	59 s	2,53

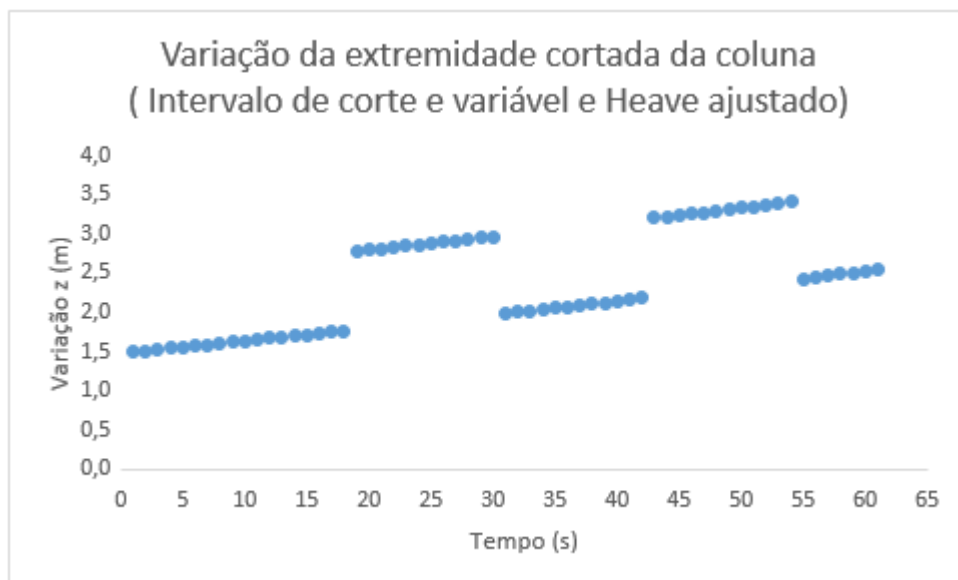


Figura 60 - Cenário 1A com intervalo de corte variável e Heave ajustado

6.1.12.2 Heave Teórico

Tabela 15 - Cenário 1A com intervalo de corte variável e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	2,50	10 s	3,15	20 s	1,95	30 s	3,99	40 s	2,30	50 s	3,85
1 s	2,77	11 s	2,93	21 s	2,12	31 s	3,97	41 s	2,22	51 s	4,08
2 s	3,03	12 s	2,68	22 s	2,35	32 s	3,89	42 s	2,20	52 s	4,26
3 s	3,25	13 s	2,44	23 s	2,61	33 s	3,75	43 s	2,25	53 s	4,38
4 s	3,43	14 s	2,22	24 s	2,88	34 s	3,56	44 s	2,37	54 s	4,43
5 s	3,54	15 s	2,03	25 s	3,16	35 s	3,33	45 s	2,55	55 s	4,41
6 s	3,59	16 s	1,88	26 s	3,42	36 s	3,09	46 s	2,78	56 s	4,33
7 s	3,57	17 s	1,80	27 s	3,64	37 s	2,85	47 s	3,04	57 s	4,20
8 s	3,49	18 s	1,78	28 s	3,82	38 s	2,63	48 s	3,31	58 s	4,01
9 s	3,34	19 s	1,83	29 s	3,93	39 s	2,44	49 s	3,59	59 s	3,79

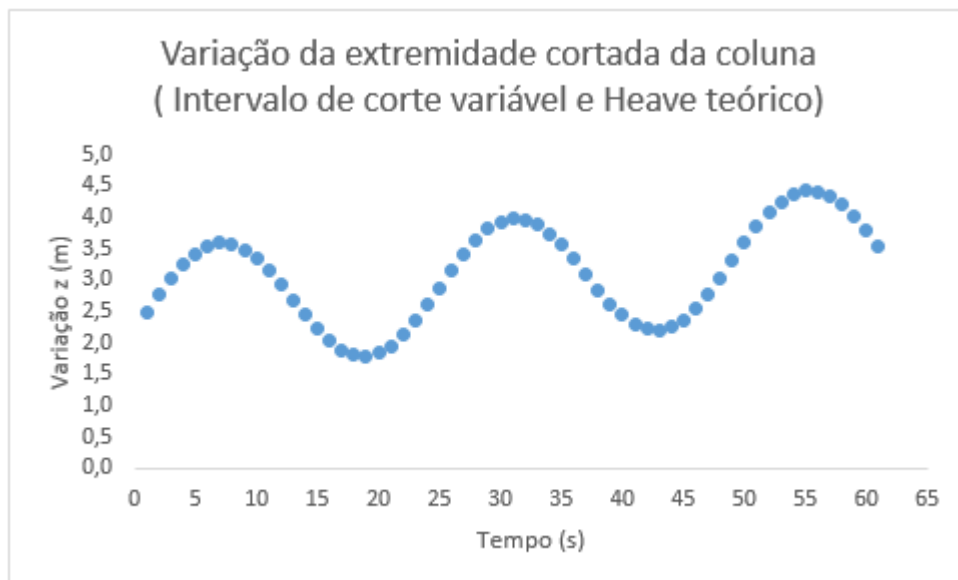


Figura 61 - Cenário 1A com intervalo de corte variável e Heave teórico

6.1.2 1B – Lâmina d'água rasa

Tabela 16 - Dados do Cenário 1B

Cenário de Simulação		Nº: 01B
Característica: Lâmina d'água rasa		
Objetivo: Verificar a influência da profundidade da lâmina d'água na posição da extremidade da coluna após o corte.		
Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1300	kg/m ³
Carga total da coluna:	800	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	400	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,5	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	2	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s
Distância entre gavetas	0,9	m

6.1.2.1 Intervalo de corte fixo

6.1.2.1.1 Heave Ajustado

Tabela 17 - Cenário 1B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	-0,94	10 s	-0,94	20 s	0,80	30 s	-0,93	40 s	0,80	50 s	-0,93
1 s	-0,94	11 s	-0,94	21 s	0,80	31 s	-0,93	41 s	0,80	51 s	-0,93
2 s	-0,94	12 s	-0,94	22 s	0,80	32 s	-0,93	42 s	0,80	52 s	-0,93
3 s	-0,94	13 s	-0,94	23 s	0,80	33 s	-0,93	43 s	0,80	53 s	-0,93
4 s	-0,94	14 s	0,80	24 s	0,80	34 s	-0,93	44 s	0,80	54 s	-0,93
5 s	-0,94	15 s	0,80	25 s	0,80	35 s	-0,93	45 s	0,80	55 s	-0,93
6 s	-0,94	16 s	0,80	26 s	-0,93	36 s	-0,93	46 s	0,80	56 s	-0,93
7 s	-0,94	17 s	0,80	27 s	-0,93	37 s	-0,93	47 s	0,80	57 s	-0,93
8 s	-0,94	18 s	0,80	28 s	-0,93	38 s	0,80	48 s	0,80	58 s	-0,93
9 s	-0,94	19 s	0,80	29 s	-0,93	39 s	0,80	49 s	0,80	59 s	-0,93

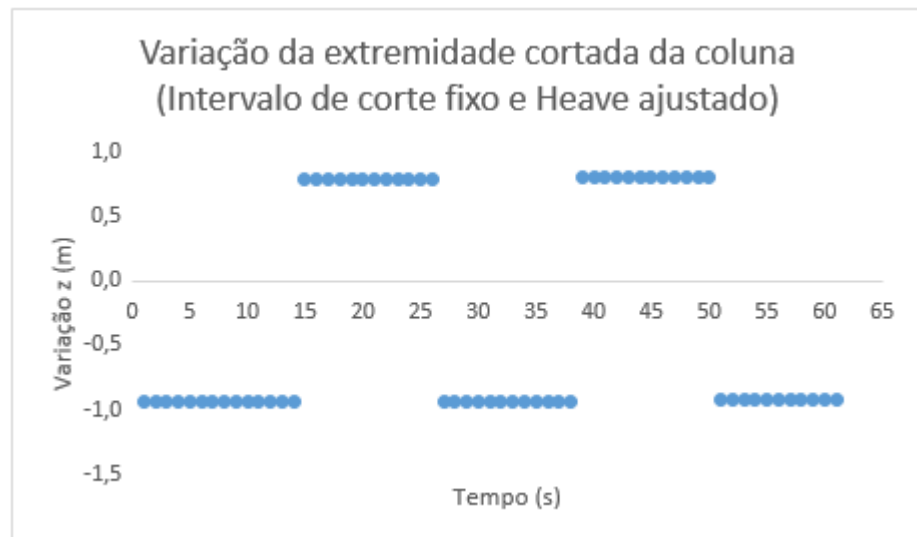


Figura 62 - Cenário 1B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

6.1.2.1.2 Heave Teórico

Tabela 18 - Cenário 1B com intervalo de corte fixo e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,66	10 s	-0,71	20 s	2,53	30 s	-0,70	40 s	1,67	50 s	0,80
1 s	1,24	11 s	-0,43	21 s	2,47	31 s	-0,87	41 s	2,03	51 s	0,36
2 s	0,79	12 s	-0,07	22 s	2,30	32 s	-0,93	42 s	2,30	52 s	-0,06
3 s	0,35	13 s	0,35	23 s	2,02	33 s	-0,87	43 s	2,48	53 s	-0,42
4 s	-0,07	14 s	0,80	24 s	1,66	34 s	-0,70	44 s	2,53	54 s	-0,69
5 s	-0,43	15 s	1,24	25 s	1,25	35 s	-0,42	45 s	2,48	55 s	-0,87
6 s	-0,71	16 s	1,66	26 s	0,80	36 s	-0,07	46 s	2,30	56 s	-0,93
7 s	-0,88	17 s	2,02	27 s	0,35	37 s	0,35	47 s	2,03	57 s	-0,87
8 s	-0,94	18 s	2,30	28 s	-0,07	38 s	0,80	48 s	1,67	58 s	-0,69
9 s	-0,88	19 s	2,47	29 s	-0,43	39 s	1,25	49 s	1,25	59 s	-0,42

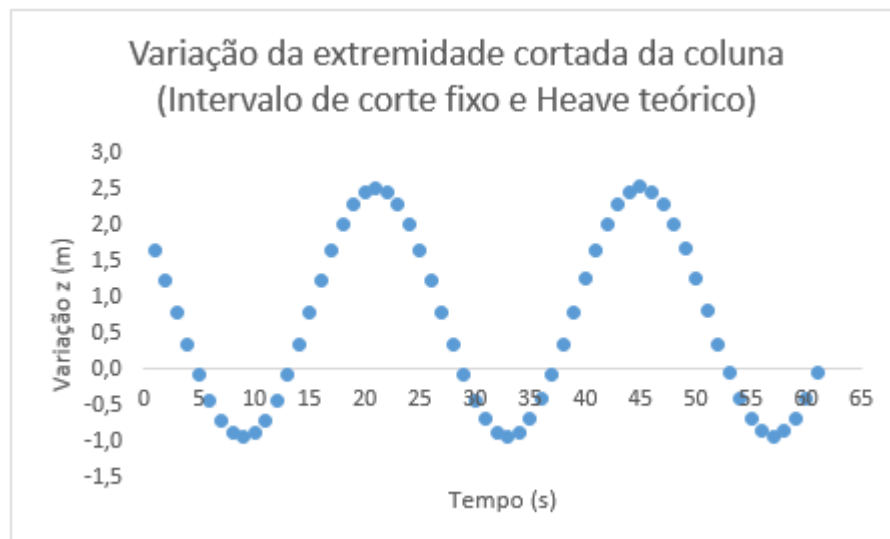


Figura 63 - Cenário 1B com intervalo de corte fixo e Heave teórico

6.1.2.2 Intervalo de corte variável

6.1.2.2.1 Heave Ajustado

Tabela 19 - Cenário 1B com intervalo de corte variável e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	-1,10	10 s	0,02	20 s	2,21	30 s	2,45	40 s	3,75	50 s	6,10
1 s	-0,99	11 s	0,14	21 s	2,33	31 s	2,58	41 s	3,88	51 s	6,24
2 s	-0,88	12 s	0,25	22 s	2,45	32 s	2,70	42 s	5,01	52 s	6,38
3 s	-0,77	13 s	0,37	23 s	2,57	33 s	2,83	43 s	5,15	53 s	6,52
4 s	-0,66	14 s	0,49	24 s	2,70	34 s	2,96	44 s	5,28	54 s	5,66
5 s	-0,55	15 s	0,61	25 s	2,82	35 s	3,09	45 s	5,42	55 s	5,80
6 s	-0,43	16 s	0,73	26 s	2,94	36 s	3,22	46 s	5,55	56 s	5,94
7 s	-0,32	17 s	0,85	27 s	3,07	37 s	3,35	47 s	5,69	57 s	6,08
8 s	-0,21	18 s	1,97	28 s	3,20	38 s	3,48	48 s	5,82	58 s	6,22
9 s	-0,09	19 s	2,09	29 s	3,32	39 s	3,61	49 s	5,96	59 s	6,37

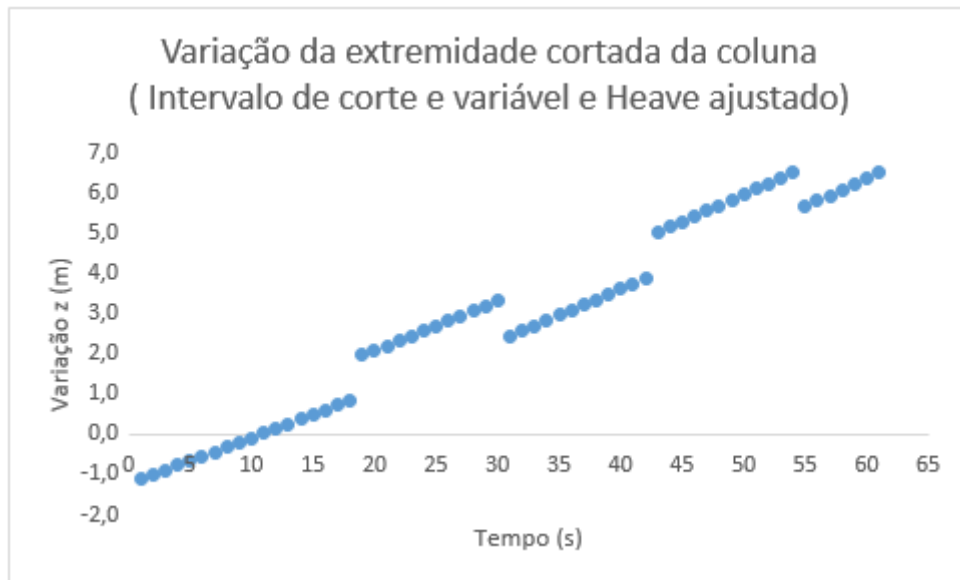


Figura 64 - Cenário 1B com intervalo de corte variável e Heave ajustado

6.1.2.2 Heave Teórico

Tabela 20 - Cenário 1B com intervalo de corte variável e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	-0,10	10 s	1,52	20 s	1,34	30 s	4,45	40 s	3,88	50 s	6,60
1 s	0,27	11 s	1,40	21 s	1,62	31 s	4,54	41 s	3,91	51 s	6,94
2 s	0,62	12 s	1,25	22 s	1,95	32 s	4,57	42 s	4,01	52 s	7,24
3 s	0,94	13 s	1,11	23 s	2,31	33 s	4,54	43 s	4,18	53 s	7,48
4 s	1,21	14 s	0,99	24 s	2,70	34 s	4,46	44 s	4,41	54 s	7,66
5 s	1,42	15 s	0,90	25 s	3,08	35 s	4,35	45 s	4,71	55 s	7,76
6 s	1,57	16 s	0,86	26 s	3,44	36 s	4,22	46 s	5,05	56 s	7,80
7 s	1,64	17 s	0,88	27 s	3,78	37 s	4,09	47 s	5,43	57 s	7,79
8 s	1,66	18 s	0,97	28 s	4,06	38 s	3,98	48 s	5,82	58 s	7,72
9 s	1,61	19 s	1,12	29 s	4,29	39 s	3,91	49 s	6,22	59 s	7,62

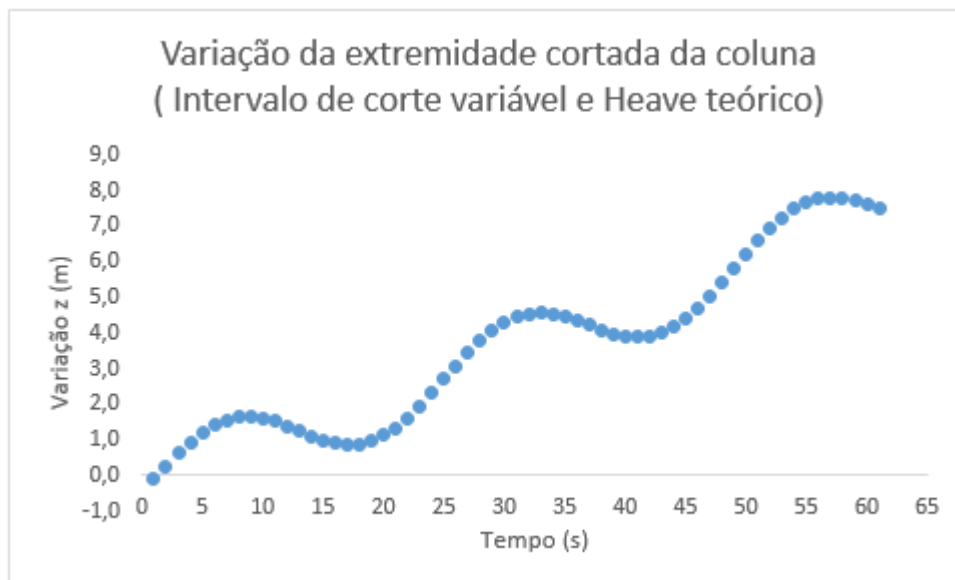


Figura 65 - Cenário 1B com intervalo de corte variável e Heave teórico

6.1.3 Conclusões sobre Cenário 1

No cenário de águas profundas é possível observar a grande influência do comprimento de coluna que irá se retrair com intensidade, causando grande impacto no efeito total da variação, enquanto nas águas rasas os valores obtidos estão muito mais próximos de zero, necessitando muito cuidado na escolha correta do momento de desconexão.

6.1.3.1 Análise 1A x 1B com intervalo de corte fixo

O intervalo de corte selecionado no cenário é compatível com a média de tempo que uma EDS na indústria costuma usar. Dessa forma é possível observar que em águas profundas este intervalo não traz problemas, porém em águas rasas ele se mostra arriscado, sendo necessário repensar esse parâmetro da sequência.

6.1.3.2 Análise 1A x 1B com intervalo de corte variável

A variação do intervalo de corte se mostrou bastante valiosa para o cenário de águas rasas, pois permite que o efeito da deriva, que é bastante sensível à profundidade, compense a pequena retração da coluna.

6.1.3.3 Conclusão do cenário

O algoritmo demonstrou que a posição da extremidade da coluna é bastante sensível à altura da lâmina d'água, se mostrando bastante valioso na seleção do melhor momento do corte no cenário de águas rasas.

6.2 Cenário 2 – Influência da carga cortada

6.2.1 2A – Pouca carga (manobra de coluna)

Tabela 21 - Dados do Cenário 2A

Cenário de Simulação		Nº: 02A
Característica: Carga total da coluna baixa		
Objetivo: Verificar a influência da carga cortada na posição da extremidade da coluna após o corte.		
Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1300	kg/m ³
Carga total da coluna:	220	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	1500	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,5	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	2	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s

6.2.1.1 Intervalo de corte fixo

6.2.1.1.1 Heave Ajustado

Tabela 22 - Cenário 2A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	-1,55	10 s	-1,55	20 s	0,18	30 s	-1,55	40 s	0,18	50 s	-1,55
1 s	-1,55	11 s	-1,55	21 s	0,18	31 s	-1,55	41 s	0,18	51 s	-1,55
2 s	-1,55	12 s	-1,55	22 s	0,18	32 s	-1,55	42 s	0,18	52 s	-1,55
3 s	-1,55	13 s	-1,55	23 s	0,18	33 s	-1,55	43 s	0,18	53 s	-1,55
4 s	-1,55	14 s	0,18	24 s	0,18	34 s	-1,55	44 s	0,18	54 s	-1,55
5 s	-1,55	15 s	0,18	25 s	0,18	35 s	-1,55	45 s	0,18	55 s	-1,55
6 s	-1,55	16 s	0,18	26 s	-1,55	36 s	-1,55	46 s	0,18	56 s	-1,55
7 s	-1,55	17 s	0,18	27 s	-1,55	37 s	-1,55	47 s	0,18	57 s	-1,55
8 s	-1,55	18 s	0,18	28 s	-1,55	38 s	0,18	48 s	0,18	58 s	-1,55
9 s	-1,55	19 s	0,18	29 s	-1,55	39 s	0,18	49 s	0,18	59 s	-1,55

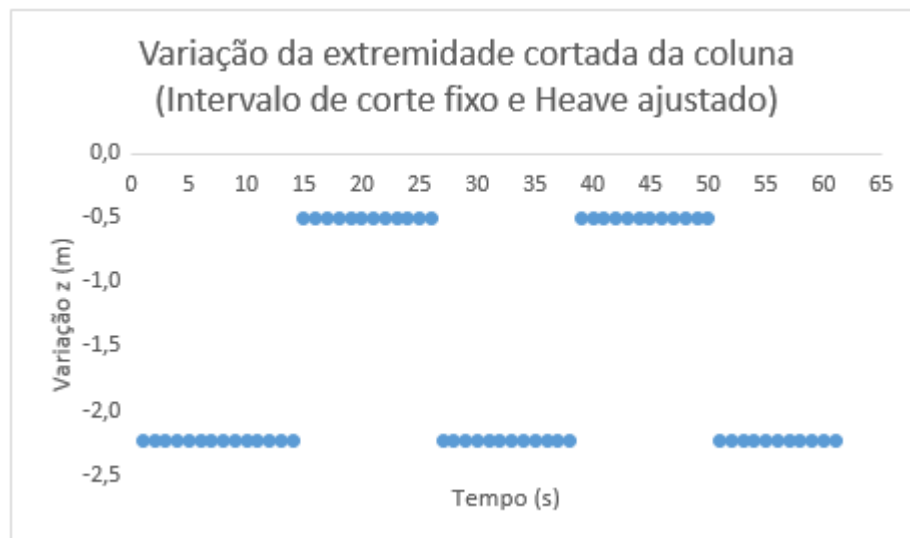


Figura 66 - Cenário 2A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

6.2.1.1.2 Heave Teórico

Tabela 23 - Cenário 2A com intervalo de corte fixo e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,04	10 s	-1,32	20 s	1,91	30 s	-1,32	40 s	1,04	50 s	0,18
1 s	0,63	11 s	-1,05	21 s	1,85	31 s	-1,49	41 s	1,40	51 s	-0,27
2 s	0,18	12 s	-0,69	22 s	1,68	32 s	-1,55	42 s	1,68	52 s	-0,69
3 s	-0,27	13 s	-0,27	23 s	1,40	33 s	-1,49	43 s	1,85	53 s	-1,05
4 s	-0,69	14 s	0,18	24 s	1,04	34 s	-1,32	44 s	1,91	54 s	-1,32
5 s	-1,05	15 s	0,63	25 s	0,63	35 s	-1,05	45 s	1,85	55 s	-1,49
6 s	-1,32	16 s	1,04	26 s	0,18	36 s	-0,69	46 s	1,68	56 s	-1,55
7 s	-1,50	17 s	1,40	27 s	-0,27	37 s	-0,27	47 s	1,40	57 s	-1,49
8 s	-1,55	18 s	1,68	28 s	-0,69	38 s	0,18	48 s	1,05	58 s	-1,32
9 s	-1,50	19 s	1,85	29 s	-1,05	39 s	0,63	49 s	0,63	59 s	-1,04

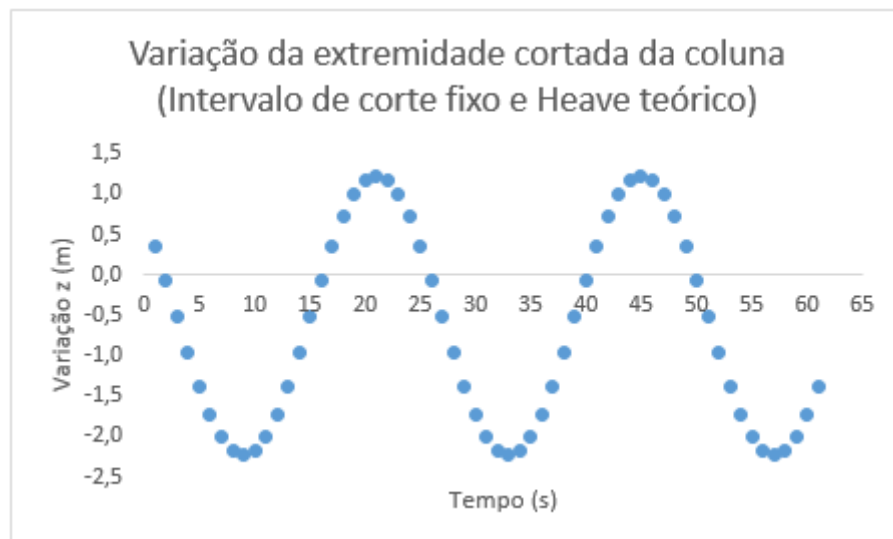


Figura 67 - Cenário 2A com intervalo de corte fixo e Heave teórico

6.2.1.2 Intervalo de corte variável

6.2.1.2.1 Heave Ajustado

Tabela 24 - Cenário 2A com intervalo de corte variável e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	-1,75	10 s	-1,44	20 s	-0,12	30 s	-0,78	40 s	-0,42	50 s	0,95
1 s	-1,72	11 s	-1,41	21 s	-0,08	31 s	-0,74	41 s	-0,38	51 s	0,99
2 s	-1,69	12 s	-1,38	22 s	-0,05	32 s	-0,71	42 s	0,65	52 s	1,03
3 s	-1,66	13 s	-1,35	23 s	-0,02	33 s	-0,67	43 s	0,69	53 s	1,07
4 s	-1,63	14 s	-1,31	24 s	0,02	34 s	-0,64	44 s	0,73	54 s	0,11
5 s	-1,60	15 s	-1,28	25 s	0,05	35 s	-0,60	45 s	0,77	55 s	0,15
6 s	-1,57	16 s	-1,25	26 s	0,08	36 s	-0,56	46 s	0,80	56 s	0,19
7 s	-1,54	17 s	-1,22	27 s	0,12	37 s	-0,53	47 s	0,84	57 s	0,23
8 s	-1,51	18 s	-0,18	28 s	0,15	38 s	-0,49	48 s	0,88	58 s	0,27
9 s	-1,47	19 s	-0,15	29 s	0,19	39 s	-0,46	49 s	0,92	59 s	0,30

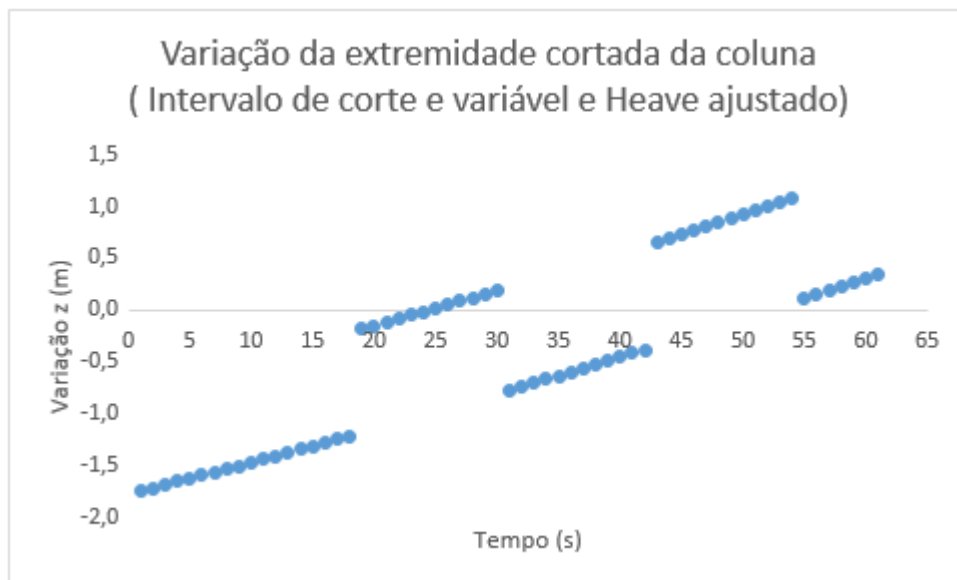


Figura 68 - Cenário 2A com intervalo de corte variável e Heave ajustado

6.2.1.2.2 Heave Teórico

Tabela 25 - Cenário 2A com intervalo de corte variável e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	-0,75	10 s	0,06	20 s	-0,98	30 s	1,22	40 s	-0,29	50 s	1,45
1 s	-0,46	11 s	-0,15	21 s	-0,79	31 s	1,22	41 s	-0,35	51 s	1,70
2 s	-0,19	12 s	-0,38	22 s	-0,55	32 s	1,16	42 s	-0,35	52 s	1,90
3 s	0,05	13 s	-0,61	23 s	-0,28	33 s	1,04	43 s	-0,28	53 s	2,04
4 s	0,24	14 s	-0,81	24 s	0,02	34 s	0,86	44 s	-0,14	54 s	2,11
5 s	0,37	15 s	-0,99	25 s	0,31	35 s	0,66	45 s	0,06	55 s	2,11
6 s	0,43	16 s	-1,12	26 s	0,58	36 s	0,44	46 s	0,30	56 s	2,05
7 s	0,43	17 s	-1,18	27 s	0,83	37 s	0,21	47 s	0,58	57 s	1,93
8 s	0,36	18 s	-1,18	28 s	1,02	38 s	0,01	48 s	0,88	58 s	1,77
9 s	0,23	19 s	-1,12	29 s	1,15	39 s	-0,16	49 s	1,17	59 s	1,56

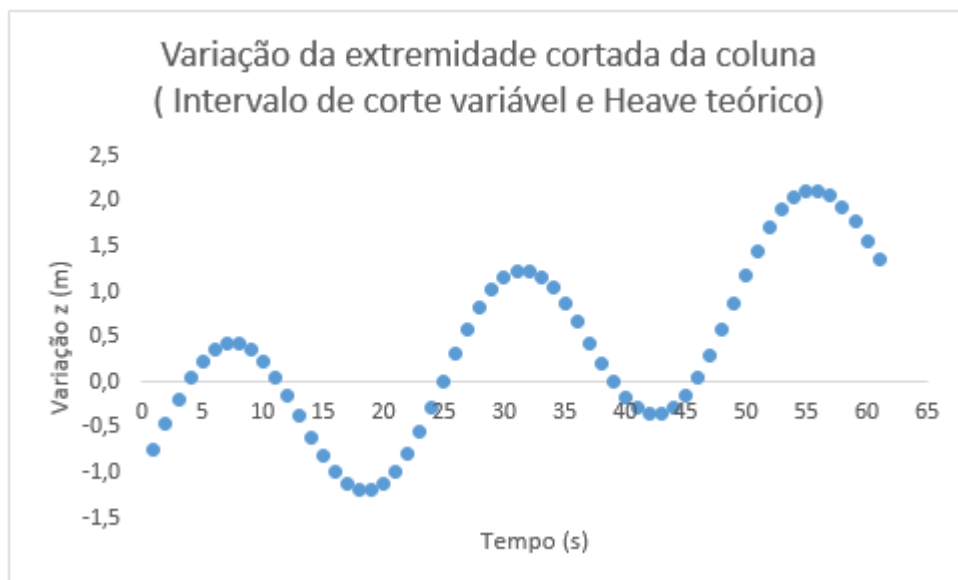


Figura 69 - Cenário 2A com intervalo de corte variável e Heave teórico

6.2.2 2B – Muita carga (BHA e grande profundidade de poço)

Tabela 26 - Dados do Cenário 2B

Cenário de Simulação		Nº: 02B
Característica: Carga total da coluna alta		
Objetivo: Verificar a influência da carga cortada na posição da extremidade da coluna após o corte.		
Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1300	kg/m ³
Carga total da coluna:	1400	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	1500	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,5	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	2	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s

6.2.2.1 Intervalo de corte fixo

6.2.2.1.1 Heave Ajustado

Tabela 27 - Cenário 2B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	2,35	10 s	2,35	20 s	4,08	30 s	2,35	40 s	4,09	50 s	2,36
1 s	2,35	11 s	2,35	21 s	4,08	31 s	2,35	41 s	4,09	51 s	2,36
2 s	2,35	12 s	2,35	22 s	4,08	32 s	2,35	42 s	4,09	52 s	2,36
3 s	2,35	13 s	2,35	23 s	4,09	33 s	2,35	43 s	4,09	53 s	2,36
4 s	2,35	14 s	4,08	24 s	4,09	34 s	2,35	44 s	4,09	54 s	2,36
5 s	2,35	15 s	4,08	25 s	4,09	35 s	2,35	45 s	4,09	55 s	2,36
6 s	2,35	16 s	4,08	26 s	2,35	36 s	2,35	46 s	4,09	56 s	2,36
7 s	2,35	17 s	4,08	27 s	2,35	37 s	2,35	47 s	4,09	57 s	2,36
8 s	2,35	18 s	4,08	28 s	2,35	38 s	4,09	48 s	4,09	58 s	2,36
9 s	2,35	19 s	4,08	29 s	2,35	39 s	4,09	49 s	4,09	59 s	2,36

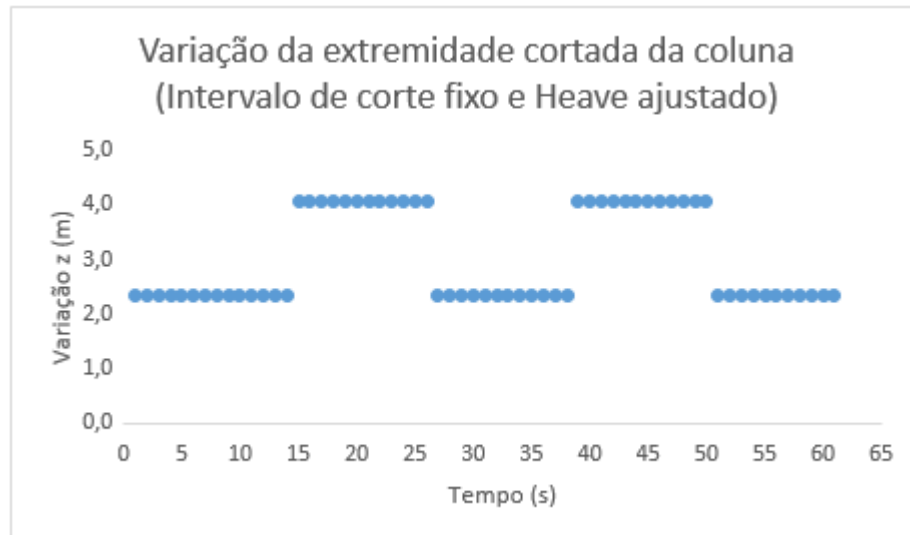


Figura 70 - Cenário 2B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

6.2.2.1.2 Heave Teórico

Tabela 28 - Cenário 2B com intervalo de corte fixo e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	4,95	10 s	2,58	20 s	5,82	30 s	2,59	40 s	4,95	50 s	4,09
1 s	4,53	11 s	2,86	21 s	5,76	31 s	2,41	41 s	5,31	51 s	3,64
2 s	4,08	12 s	3,22	22 s	5,58	32 s	2,35	42 s	5,59	52 s	3,22
3 s	3,64	13 s	3,64	23 s	5,31	33 s	2,41	43 s	5,76	53 s	2,86
4 s	3,22	14 s	4,08	24 s	4,95	34 s	2,59	44 s	5,82	54 s	2,59
5 s	2,86	15 s	4,53	25 s	4,53	35 s	2,86	45 s	5,76	55 s	2,42
6 s	2,58	16 s	4,95	26 s	4,09	36 s	3,22	46 s	5,59	56 s	2,36
7 s	2,41	17 s	5,31	27 s	3,64	37 s	3,64	47 s	5,31	57 s	2,42
8 s	2,35	18 s	5,58	28 s	3,22	38 s	4,09	48 s	4,95	58 s	2,59
9 s	2,41	19 s	5,76	29 s	2,86	39 s	4,53	49 s	4,54	59 s	2,86

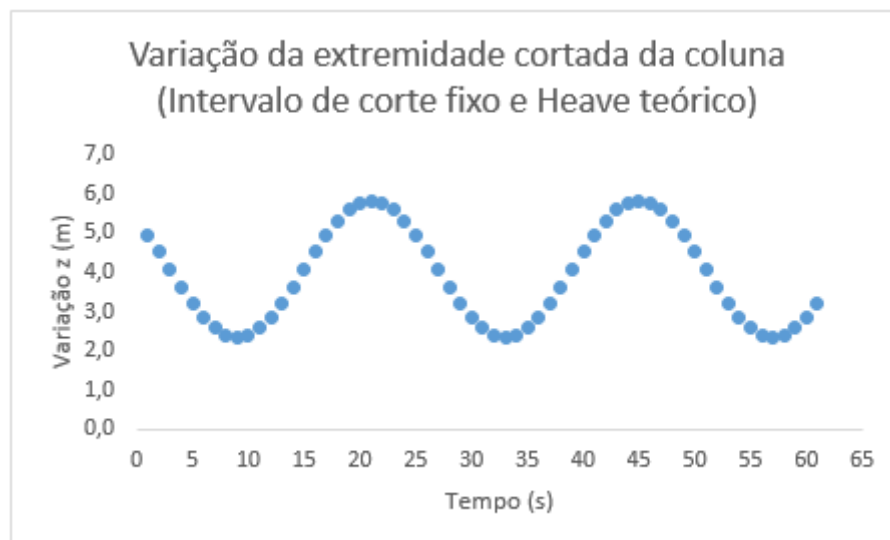


Figura 71 - Cenário 2B com intervalo de corte fixo e Heave teórico

6.2.2.2 Intervalo de corte variável

6.2.2.2.1 Heave Ajustado

Tabela 29 - Cenário 2B com intervalo de corte variável e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	2,84	10 s	3,15	20 s	4,47	30 s	3,81	40 s	4,17	50 s	5,54
1 s	2,87	11 s	3,18	21 s	4,50	31 s	3,85	41 s	4,21	51 s	5,58
2 s	2,90	12 s	3,21	22 s	4,54	32 s	3,88	42 s	5,24	52 s	5,62
3 s	2,93	13 s	3,24	23 s	4,57	33 s	3,92	43 s	5,28	53 s	5,66
4 s	2,96	14 s	3,27	24 s	4,60	34 s	3,95	44 s	5,32	54 s	4,70
5 s	2,99	15 s	3,31	25 s	4,64	35 s	3,99	45 s	5,35	55 s	4,74
6 s	3,02	16 s	3,34	26 s	4,67	36 s	4,02	46 s	5,39	56 s	4,77
7 s	3,05	17 s	3,37	27 s	4,71	37 s	4,06	47 s	5,43	57 s	4,81
8 s	3,08	18 s	4,40	28 s	4,74	38 s	4,10	48 s	5,47	58 s	4,85
9 s	3,11	19 s	4,44	29 s	4,78	39 s	4,13	49 s	5,50	59 s	4,89

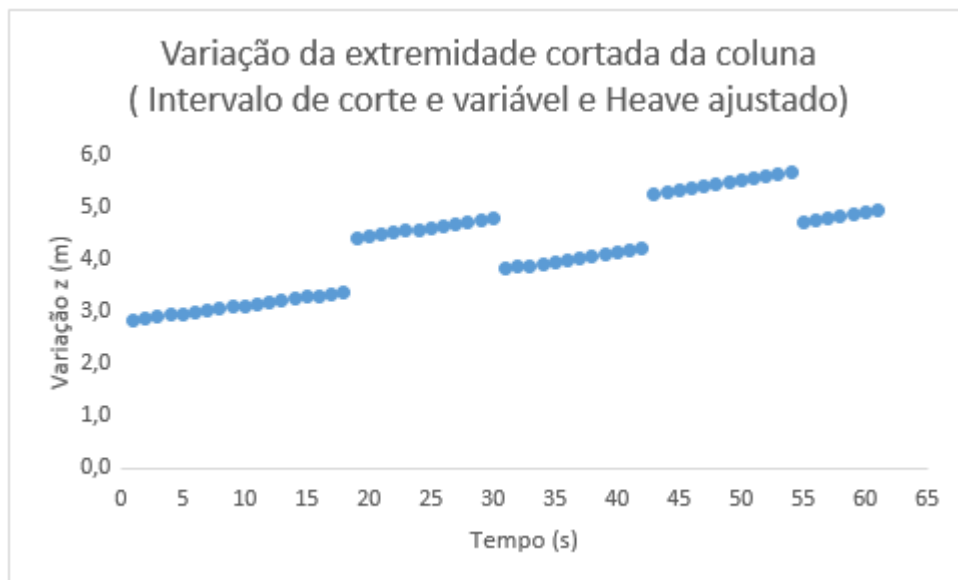


Figura 72 - Cenário 2B com intervalo de corte variável e Heave ajustado

6.2.2.2 Heave Teórico

Tabela 30 - Cenário 2B com intervalo de corte variável e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	3,84	10 s	4,65	20 s	3,60	30 s	5,81	40 s	4,30	50 s	6,04
1 s	4,13	11 s	4,44	21 s	3,80	31 s	5,81	41 s	4,24	51 s	6,29
2 s	4,40	12 s	4,21	22 s	4,04	32 s	5,75	42 s	4,24	52 s	6,49
3 s	4,64	13 s	3,98	23 s	4,31	33 s	5,62	43 s	4,31	53 s	6,62
4 s	4,83	14 s	3,77	24 s	4,60	34 s	5,45	44 s	4,45	54 s	6,70
5 s	4,96	15 s	3,60	25 s	4,90	35 s	5,25	45 s	4,65	55 s	6,70
6 s	5,02	16 s	3,47	26 s	5,17	36 s	5,02	46 s	4,89	56 s	6,64
7 s	5,02	17 s	3,41	27 s	5,41	37 s	4,80	47 s	5,17	57 s	6,52
8 s	4,95	18 s	3,40	28 s	5,61	38 s	4,60	48 s	5,47	58 s	6,35
9 s	4,82	19 s	3,47	29 s	5,74	39 s	4,42	49 s	5,76	59 s	6,15

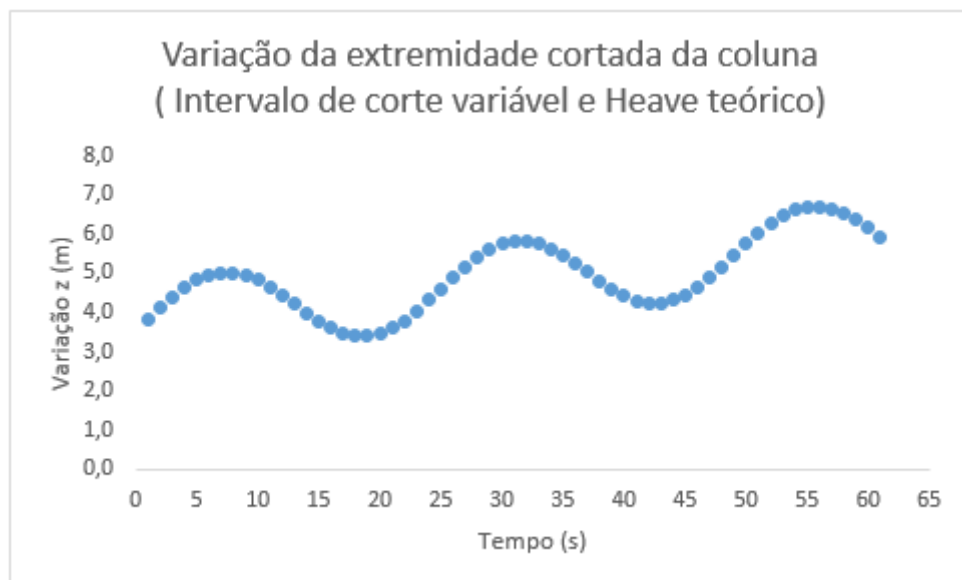


Figura 73 - Cenário 2B com intervalo de corte variável e Heave teórico

6.2.3 Conclusões sobre Cenário 2

O cenário de pouca carga, dentro dos outros parâmetros medianos propostos, apresenta a impossibilidade de uma EDS segura em quase toda extensão de tempo avaliada, se mostrando um cenário muito crítico.

De forma oposta, o cenário de carga alta apresenta uma segurança bastante grande da execução da EDS em quase qualquer instante e quase sempre com bastante folga.

6.2.3.1 Análise 2A x 2B com intervalo de corte fixo

O intervalo de corte fixo se mostrou problemático para a situação de pouca carga, impossibilitando a EDS com esses parâmetros. Também se mostrou um parâmetro quase irrelevante quando a carga é muito alta.

6.2.3.2 Análise 2A x 2B com intervalo de corte variável

O intervalo variável é muito valioso para resolver o problema da EDS com pouca carga, necessitando de um grande intervalo para que a deriva se desenvolva até que se possa fechar a segunda gaveta.

6.2.3.3 Conclusão do cenário

As cargas utilizadas no cenário são grandezas bastante realistas, encontradas em cenários de operação bastante comuns para uma sonda. Essa informação se faz importante destacar pelo enorme domínio que a carga mostra sobre os outros fatores na influência sobre a posição da extremidade da coluna.

O algoritmo é valioso para definir qual a profundidade onde uma EDS é segura com intervalos curtos ou onde a EDS vai precisar de mais tempo para ocorrer, levando o operador da sonda a planejar melhor o acionamento da mesma.

6.3 Cenário 3 – Influência da densidade do fluido

6.3.1 3A – Fluido muito denso

Tabela 31 - Dados do Cenário 3A

Cenário de Simulação		Nº: 03A
Característica: Fluido da coluna muito denso		
Objetivo: Verificar a influência da densidade do fluido na posição da extremidade da coluna após o corte.		
Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	2000	kg/m ³
Carga total da coluna:	800	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	1500	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,5	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	2	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s

6.3.1.1 Intervalo de corte fixo

6.3.1.1.1 Heave Ajustado

Tabela 32 - Cenário 3A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	0,09	10 s	0,09	20 s	1,83	30 s	0,09	40 s	1,83	50 s	0,09
1 s	0,09	11 s	0,09	21 s	1,83	31 s	0,09	41 s	1,83	51 s	0,09
2 s	0,09	12 s	0,09	22 s	1,83	32 s	0,09	42 s	1,83	52 s	0,09
3 s	0,09	13 s	0,09	23 s	1,83	33 s	0,09	43 s	1,83	53 s	0,10
4 s	0,09	14 s	1,83	24 s	1,83	34 s	0,09	44 s	1,83	54 s	0,10
5 s	0,09	15 s	1,83	25 s	1,83	35 s	0,09	45 s	1,83	55 s	0,10
6 s	0,09	16 s	1,83	26 s	0,09	36 s	0,09	46 s	1,83	56 s	0,10
7 s	0,09	17 s	1,83	27 s	0,09	37 s	0,09	47 s	1,83	57 s	0,10
8 s	0,09	18 s	1,83	28 s	0,09	38 s	1,83	48 s	1,83	58 s	0,10
9 s	0,09	19 s	1,83	29 s	0,09	39 s	1,83	49 s	1,83	59 s	0,10

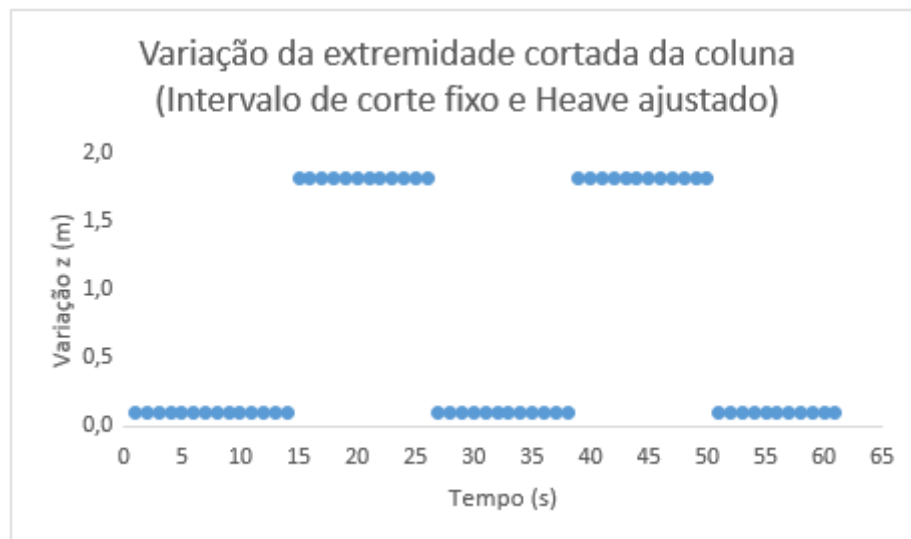


Figura 74 - Cenário 3A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

6.3.1.1.2 Heave Teórico

Tabela 33 - Cenário 3A com intervalo de corte fixo e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	2,69	10 s	0,33	20 s	3,56	30 s	0,33	40 s	2,69	50 s	1,83
1 s	2,27	11 s	0,60	21 s	3,50	31 s	0,15	41 s	3,05	51 s	1,38
2 s	1,82	12 s	0,96	22 s	3,33	32 s	0,09	42 s	3,33	52 s	0,96
3 s	1,38	13 s	1,38	23 s	3,05	33 s	0,15	43 s	3,50	53 s	0,60
4 s	0,96	14 s	1,83	24 s	2,69	34 s	0,33	44 s	3,56	54 s	0,33
5 s	0,60	15 s	2,27	25 s	2,27	35 s	0,60	45 s	3,50	55 s	0,15
6 s	0,33	16 s	2,69	26 s	1,83	36 s	0,96	46 s	3,33	56 s	0,10
7 s	0,15	17 s	3,05	27 s	1,38	37 s	1,38	47 s	3,05	57 s	0,15
8 s	0,09	18 s	3,33	28 s	0,96	38 s	1,83	48 s	2,69	58 s	0,33
9 s	0,15	19 s	3,50	29 s	0,60	39 s	2,27	49 s	2,28	59 s	0,60

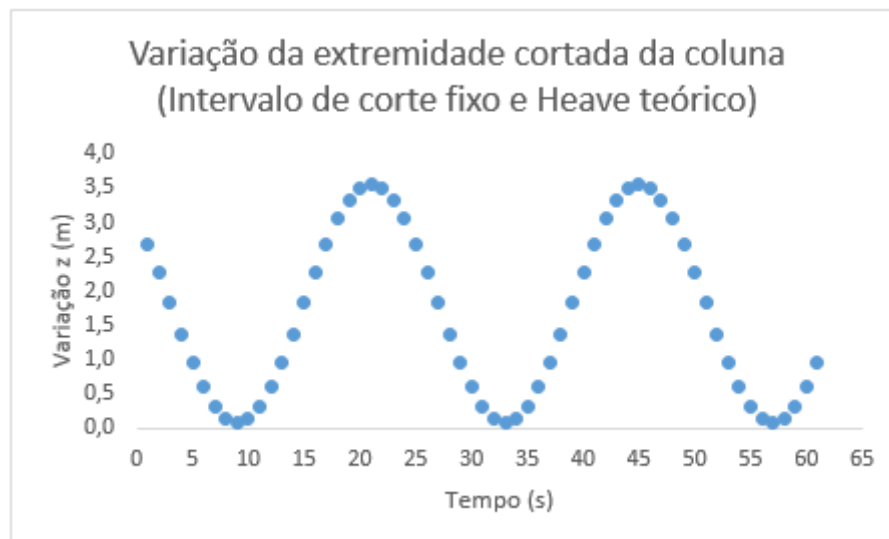


Figura 75 - Cenário 3A com intervalo de corte fixo e Heave teórico

6.3.1.2 Intervalo de corte variável

6.3.1.2.1 Heave Ajustado

Tabela 34 - Cenário 3A com intervalo de corte variável e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	0,58	10 s	0,89	20 s	2,21	30 s	1,55	40 s	1,91	50 s	3,28
1 s	0,61	11 s	0,92	21 s	2,25	31 s	1,59	41 s	1,95	51 s	3,32
2 s	0,64	12 s	0,95	22 s	2,28	32 s	1,62	42 s	2,98	52 s	3,36
3 s	0,67	13 s	0,98	23 s	2,31	33 s	1,66	43 s	3,02	53 s	3,40
4 s	0,70	14 s	1,02	24 s	2,35	34 s	1,69	44 s	3,06	54 s	2,44
5 s	0,73	15 s	1,05	25 s	2,38	35 s	1,73	45 s	3,10	55 s	2,48
6 s	0,76	16 s	1,08	26 s	2,41	36 s	1,77	46 s	3,13	56 s	2,52
7 s	0,79	17 s	1,11	27 s	2,45	37 s	1,80	47 s	3,17	57 s	2,56
8 s	0,82	18 s	2,15	28 s	2,48	38 s	1,84	48 s	3,21	58 s	2,60
9 s	0,86	19 s	2,18	29 s	2,52	39 s	1,87	49 s	3,25	59 s	2,63

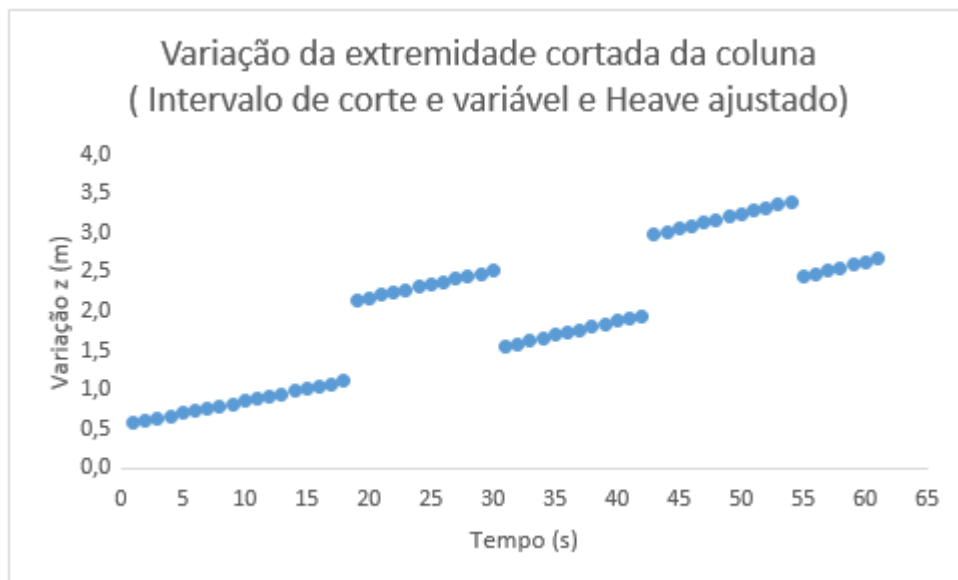


Figura 76 - Cenário 3A com intervalo de corte variável e Heave ajustado

6.3.1.2.2 Heave Teórico

Tabela 35 - Cenário 3A com intervalo de corte variável e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,58	10 s	2,39	20 s	1,35	30 s	3,55	40 s	2,04	50 s	3,78
1 s	1,87	11 s	2,18	21 s	1,54	31 s	3,55	41 s	1,98	51 s	4,03
2 s	2,14	12 s	1,95	22 s	1,78	32 s	3,49	42 s	1,98	52 s	4,23
3 s	2,38	13 s	1,72	23 s	2,05	33 s	3,37	43 s	2,05	53 s	4,37
4 s	2,57	14 s	1,52	24 s	2,35	34 s	3,19	44 s	2,19	54 s	4,44
5 s	2,70	15 s	1,34	25 s	2,64	35 s	2,99	45 s	2,39	55 s	4,44
6 s	2,76	16 s	1,21	26 s	2,91	36 s	2,77	46 s	2,63	56 s	4,38
7 s	2,76	17 s	1,15	27 s	3,16	37 s	2,54	47 s	2,91	57 s	4,26
8 s	2,69	18 s	1,15	28 s	3,35	38 s	2,34	48 s	3,21	58 s	4,10
9 s	2,56	19 s	1,21	29 s	3,48	39 s	2,17	49 s	3,50	59 s	3,89

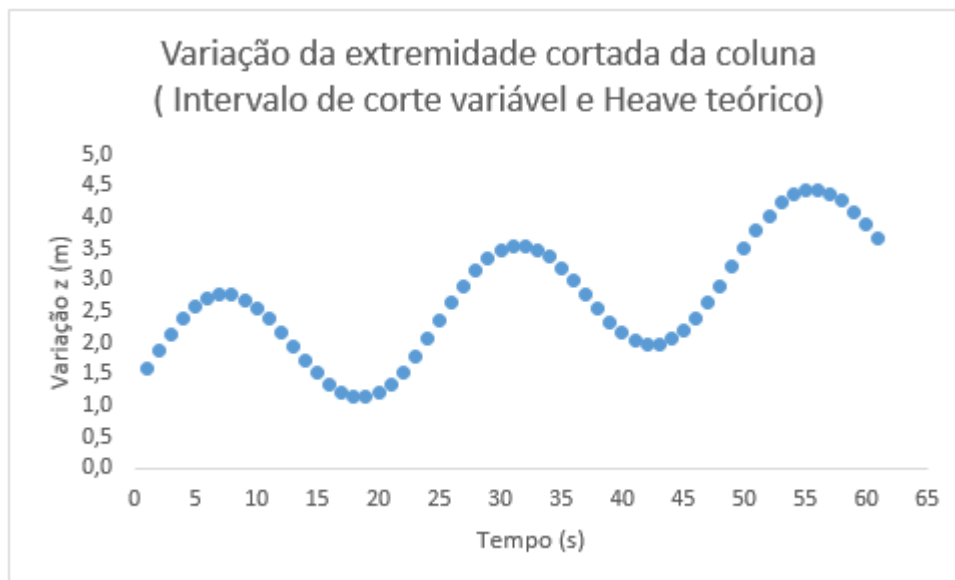


Figura 77 - Cenário 3A com intervalo de corte variável e Heave teórico

6.3.2 3B – Fluido pouco denso

Tabela 36 - Dados do Cenário 3B

Cenário de Simulação		Nº: 03B
Característica: Fluido da coluna pouco denso		
Objetivo: Verificar a influência da densidade do fluido na posição da extremidade da coluna após o corte.		
Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1000	kg/m ³
Carga total da coluna:	800	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	1500	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,5	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	2	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s

6.3.2.1 Intervalo de corte fixo

6.3.2.1.1 Heave Ajustado

Tabela 37 - Cenário 3B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	-0,01	10 s	-0,01	20 s	1,72	30 s	-0,01	40 s	1,72	50 s	-0,01
1 s	-0,01	11 s	-0,01	21 s	1,72	31 s	-0,01	41 s	1,72	51 s	-0,01
2 s	-0,01	12 s	-0,01	22 s	1,72	32 s	-0,01	42 s	1,72	52 s	-0,01
3 s	-0,01	13 s	-0,01	23 s	1,72	33 s	-0,01	43 s	1,72	53 s	-0,01
4 s	-0,01	14 s	1,72	24 s	1,72	34 s	-0,01	44 s	1,72	54 s	-0,01
5 s	-0,01	15 s	1,72	25 s	1,72	35 s	-0,01	45 s	1,72	55 s	-0,01
6 s	-0,01	16 s	1,72	26 s	-0,01	36 s	-0,01	46 s	1,72	56 s	-0,01
7 s	-0,01	17 s	1,72	27 s	-0,01	37 s	-0,01	47 s	1,72	57 s	-0,01
8 s	-0,01	18 s	1,72	28 s	-0,01	38 s	1,72	48 s	1,72	58 s	-0,01
9 s	-0,01	19 s	1,72	29 s	-0,01	39 s	1,72	49 s	1,72	59 s	-0,01

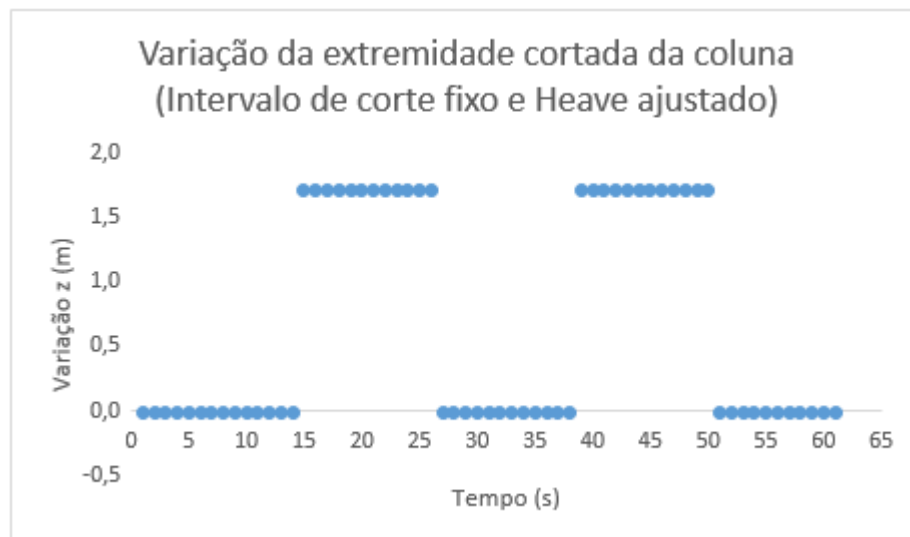


Figura 78 - Cenário 3B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

6.3.2.1.2 Heave Teórico

Tabela 38 - Cenário 3B com intervalo de corte fixo e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	2,58	10 s	0,22	20 s	3,45	30 s	0,22	40 s	2,59	50 s	1,72
1 s	2,17	11 s	0,49	21 s	3,39	31 s	0,05	41 s	2,94	51 s	1,27
2 s	1,72	12 s	0,85	22 s	3,22	32 s	-0,01	42 s	3,22	52 s	0,85
3 s	1,27	13 s	1,27	23 s	2,94	33 s	0,05	43 s	3,39	53 s	0,50
4 s	0,85	14 s	1,72	24 s	2,58	34 s	0,22	44 s	3,45	54 s	0,22
5 s	0,49	15 s	2,17	25 s	2,17	35 s	0,49	45 s	3,39	55 s	0,05
6 s	0,22	16 s	2,58	26 s	1,72	36 s	0,85	46 s	3,22	56 s	-0,01
7 s	0,05	17 s	2,94	27 s	1,27	37 s	1,27	47 s	2,94	57 s	0,05
8 s	-0,01	18 s	3,22	28 s	0,85	38 s	1,72	48 s	2,59	58 s	0,22
9 s	0,05	19 s	3,39	29 s	0,49	39 s	2,17	49 s	2,17	59 s	0,50

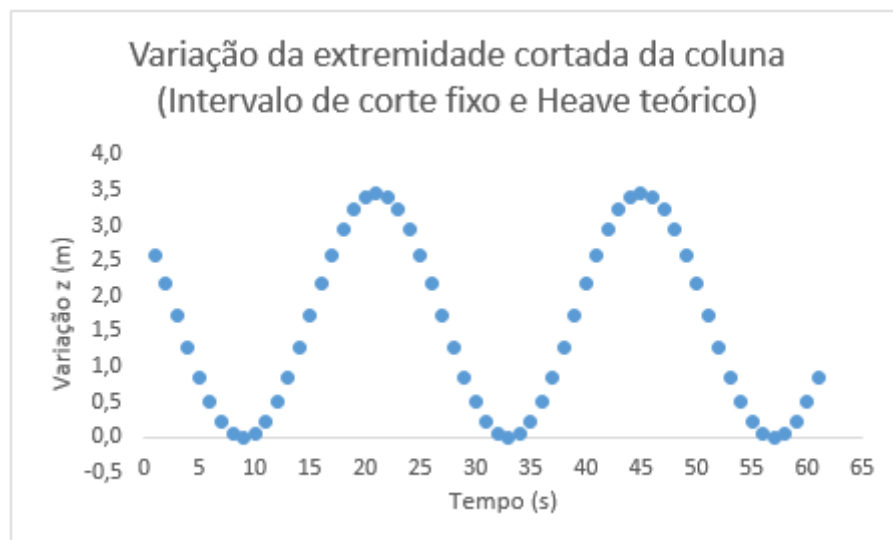


Figura 79 - Cenário 3B com intervalo de corte fixo e Heave teórico

6.3.2.2 Intervalo de corte variável

6.3.2.2.1 Heave Ajustado

Tabela 39 - Cenário 3B com intervalo de corte variável e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	0,47	10 s	0,78	20 s	2,11	30 s	1,45	40 s	1,80	50 s	3,18
1 s	0,50	11 s	0,81	21 s	2,14	31 s	1,48	41 s	1,84	51 s	3,22
2 s	0,53	12 s	0,84	22 s	2,17	32 s	1,52	42 s	2,88	52 s	3,25
3 s	0,56	13 s	0,88	23 s	2,21	33 s	1,55	43 s	2,91	53 s	3,29
4 s	0,59	14 s	0,91	24 s	2,24	34 s	1,59	44 s	2,95	54 s	2,33
5 s	0,62	15 s	0,94	25 s	2,27	35 s	1,62	45 s	2,99	55 s	2,37
6 s	0,66	16 s	0,97	26 s	2,31	36 s	1,66	46 s	3,03	56 s	2,41
7 s	0,69	17 s	1,01	27 s	2,34	37 s	1,69	47 s	3,06	57 s	2,45
8 s	0,72	18 s	2,04	28 s	2,38	38 s	1,73	48 s	3,10	58 s	2,49
9 s	0,75	19 s	2,07	29 s	2,41	39 s	1,77	49 s	3,14	59 s	2,53

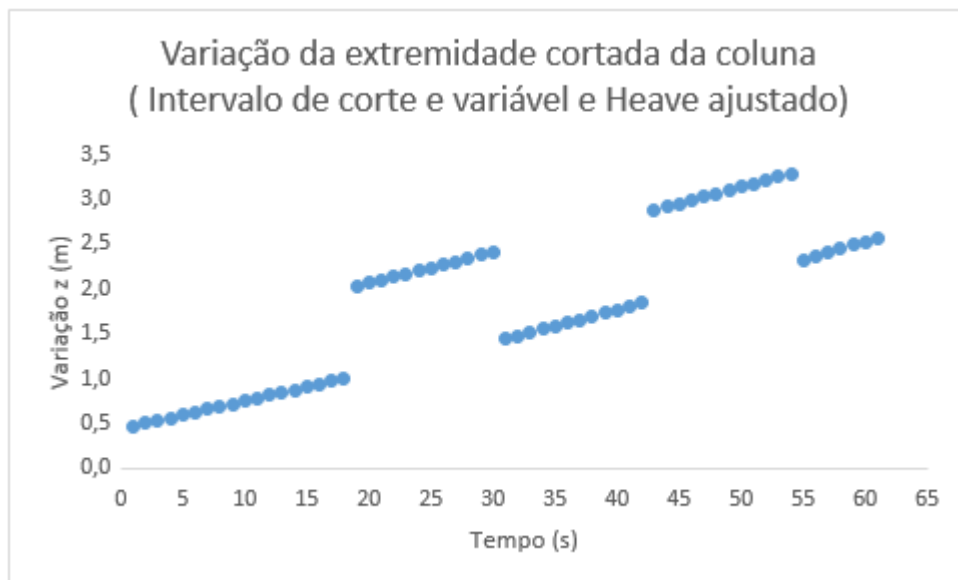


Figura 80 - Cenário 3B com intervalo de corte variável e Heave ajustado

6.3.2.2.1 Heave Teórico

Tabela 40 - Cenário 3B com intervalo de corte variável e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,47	10 s	2,28	20 s	1,24	30 s	3,45	40 s	1,94	50 s	3,68
1 s	1,76	11 s	2,07	21 s	1,43	31 s	3,45	41 s	1,87	51 s	3,92
2 s	2,03	12 s	1,84	22 s	1,67	32 s	3,38	42 s	1,88	52 s	4,12
3 s	2,27	13 s	1,62	23 s	1,95	33 s	3,26	43 s	1,95	53 s	4,26
4 s	2,46	14 s	1,41	24 s	2,24	34 s	3,09	44 s	2,08	54 s	4,33
5 s	2,59	15 s	1,23	25 s	2,53	35 s	2,88	45 s	2,28	55 s	4,34
6 s	2,66	16 s	1,11	26 s	2,81	36 s	2,66	46 s	2,53	56 s	4,28
7 s	2,65	17 s	1,04	27 s	3,05	37 s	2,44	47 s	2,80	57 s	4,16
8 s	2,58	18 s	1,04	28 s	3,24	38 s	2,23	48 s	3,10	58 s	3,99
9 s	2,46	19 s	1,11	29 s	3,38	39 s	2,06	49 s	3,40	59 s	3,79

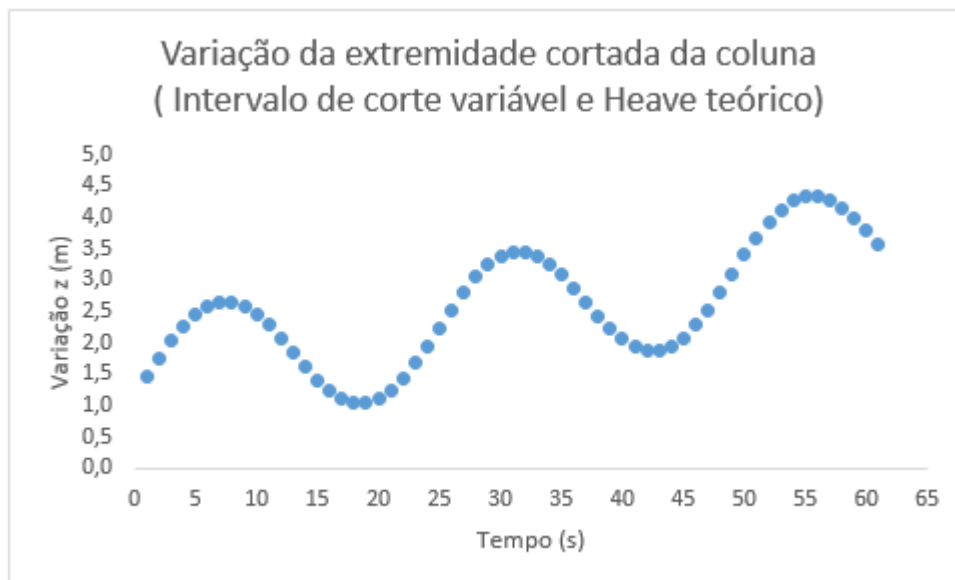


Figura 81 - Cenário 3B com intervalo de corte variável e Heave teórico

6.3.3 Conclusões sobre Cenário 3

Os resultados obtidos para ambos cenários são bastante semelhantes, com pouca variação entre eles.

6.3.3.1 Análise 3A x 3B com intervalo de corte fixo

Apresentam comportamento semelhante em ambos os cenários com intervalo de corte fixo.

6.3.3.2 Análise 3A x 3B com intervalo de corte variável

Da mesma forma que no intervalo fixo, também apresentam comportamentos semelhantes. O intervalo variável se faz relevante em situações limítrofes, onde um intervalo maior pode dar a margem de segurança necessária para a EDS, independente da densidade do fluido.

6.3.3.3 Conclusão do cenário

A variação na densidade do líquido tem reflexo na carga da coluna, tanto na parte cortada como na parte restante. Como há uma diferença ainda bastante grande entre a densidade do aço da coluna e as possíveis densidades de fluidos, a influência desse parâmetro se mostrou pouco relevante ao resultado final, exceto em situações bastante específicas, onde essa variação pode significar a diferença entre o fechamento no vazio ou não. Porém não se recomenda que se utilize margens tão curtas de segurança para a decisão sobre a EDS.

6.4 Cenário 4 – Influência da intensidade de *Heave*

6.4.1 4A – Amplitude alta de *Heave*

Tabela 41 - Dados do Cenário 4A

Cenário de Simulação		Nº: 04A
Característica: Amplitude de Heave muito alta (mar agitado)		
Objetivo: Verificar a influência da amplitude de Heave na posição da extremidade da coluna após o corte.		
Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1300	kg/m ³
Carga total da coluna:	400	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	1500	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,5	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	4	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s

6.4.1.1 Intervalo de corte fixo

6.4.1.1.1 Heave Ajustado

Tabela 42 - Cenário 4A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	-1,71	10 s	-1,71	20 s	1,75	30 s	-1,71	40 s	1,75	50 s	-1,71
1 s	-1,71	11 s	-1,71	21 s	1,75	31 s	-1,71	41 s	1,75	51 s	-1,71
2 s	-1,71	12 s	-1,71	22 s	1,75	32 s	-1,71	42 s	1,75	52 s	-1,71
3 s	-1,71	13 s	-1,71	23 s	1,75	33 s	-1,71	43 s	1,75	53 s	-1,71
4 s	-1,71	14 s	1,75	24 s	1,75	34 s	-1,71	44 s	1,75	54 s	-1,71
5 s	-1,71	15 s	1,75	25 s	1,75	35 s	-1,71	45 s	1,75	55 s	-1,71
6 s	-1,71	16 s	1,75	26 s	-1,71	36 s	-1,71	46 s	1,75	56 s	-1,71
7 s	-1,71	17 s	1,75	27 s	-1,71	37 s	-1,71	47 s	1,75	57 s	-1,71
8 s	-1,71	18 s	1,75	28 s	-1,71	38 s	1,75	48 s	1,75	58 s	-1,71
9 s	-1,71	19 s	1,75	29 s	-1,71	39 s	1,75	49 s	1,75	59 s	-1,71

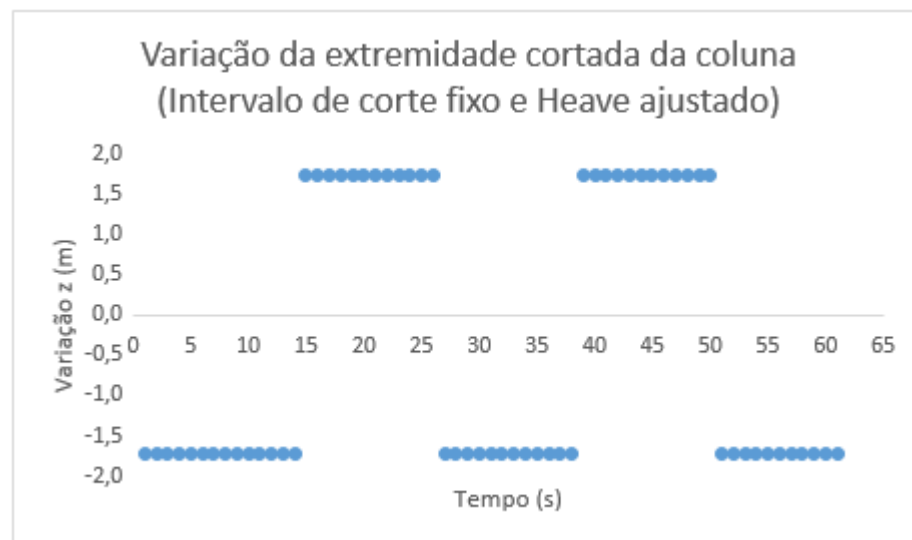


Figura 82 - Cenário 4A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

6.4.1.1.2 Heave Teórico

Tabela 43 - Cenário 4A com intervalo de corte fixo e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	3,48	10 s	-1,25	20 s	5,21	30 s	-1,25	40 s	3,48	50 s	1,75
1 s	2,65	11 s	-0,70	21 s	5,10	31 s	-1,59	41 s	4,20	51 s	0,86
2 s	1,75	12 s	0,02	22 s	4,75	32 s	-1,71	42 s	4,75	52 s	0,02
3 s	0,85	13 s	0,85	23 s	4,20	33 s	-1,59	43 s	5,10	53 s	-0,70
4 s	0,02	14 s	1,75	24 s	3,48	34 s	-1,25	44 s	5,22	54 s	-1,25
5 s	-0,70	15 s	2,65	25 s	2,65	35 s	-0,70	45 s	5,10	55 s	-1,59
6 s	-1,25	16 s	3,48	26 s	1,75	36 s	0,02	46 s	4,75	56 s	-1,71
7 s	-1,60	17 s	4,20	27 s	0,85	37 s	0,85	47 s	4,20	57 s	-1,59
8 s	-1,71	18 s	4,75	28 s	0,02	38 s	1,75	48 s	3,48	58 s	-1,25
9 s	-1,60	19 s	5,10	29 s	-0,70	39 s	2,65	49 s	2,65	59 s	-0,70

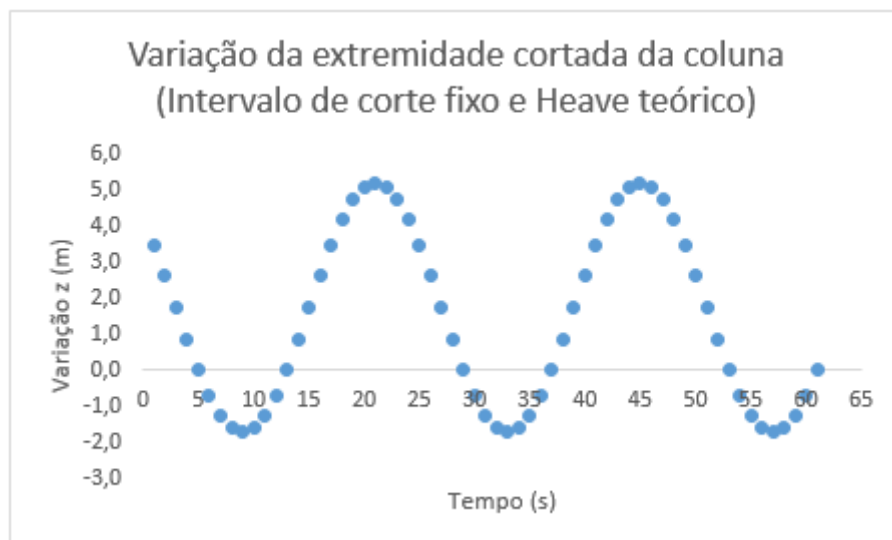


Figura 83 - Cenário 4A com intervalo de corte fixo e Heave teórico

6.4.1.2 Intervalo de corte variável

6.4.1.2.1 Heave Ajustado

Tabela 44 - Cenário 4A com intervalo de corte variável e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	-0,53	10 s	-0,22	20 s	2,11	30 s	0,45	40 s	0,80	50 s	3,18
1 s	-0,50	11 s	-0,19	21 s	2,14	31 s	0,48	41 s	0,84	51 s	3,22
2 s	-0,47	12 s	-0,16	22 s	2,17	32 s	0,52	42 s	2,88	52 s	3,25
3 s	-0,44	13 s	-0,12	23 s	2,21	33 s	0,55	43 s	2,91	53 s	3,29
4 s	-0,41	14 s	-0,09	24 s	2,24	34 s	0,59	44 s	2,95	54 s	1,33
5 s	-0,38	15 s	-0,06	25 s	2,27	35 s	0,62	45 s	2,99	55 s	1,37
6 s	-0,34	16 s	-0,03	26 s	2,31	36 s	0,66	46 s	3,03	56 s	1,41
7 s	-0,31	17 s	0,01	27 s	2,34	37 s	0,69	47 s	3,06	57 s	1,45
8 s	-0,28	18 s	2,04	28 s	2,38	38 s	0,73	48 s	3,10	58 s	1,49
9 s	-0,25	19 s	2,07	29 s	2,41	39 s	0,77	49 s	3,14	59 s	1,53

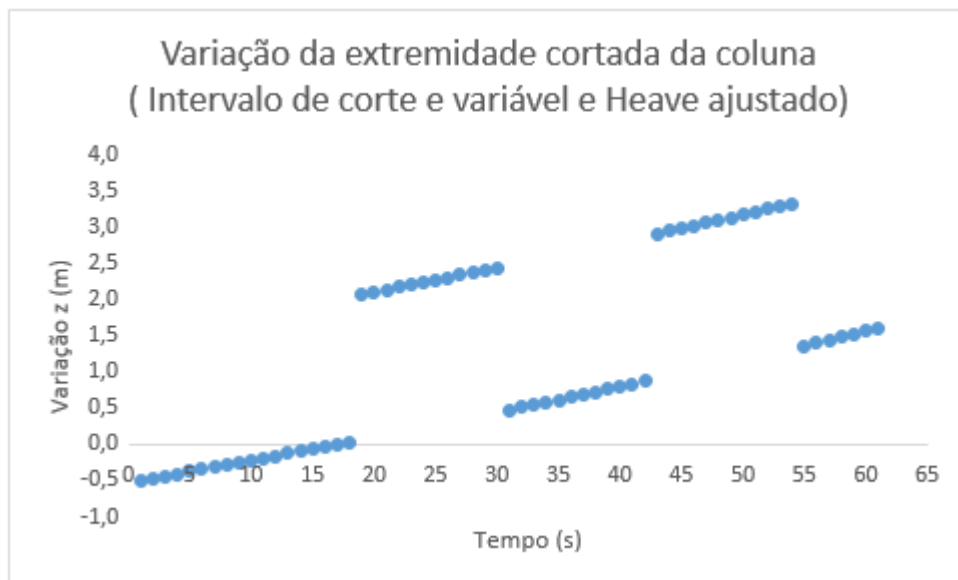


Figura 84 - Cenário 4A com intervalo de corte variável e Heave ajustado

6.4.1.2.2 Heave Teórico

Tabela 45 - Cenário 4A com intervalo de corte variável e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,47	10 s	2,78	20 s	0,37	30 s	4,45	40 s	1,07	50 s	4,18
1 s	2,02	11 s	2,33	21 s	0,72	31 s	4,41	41 s	0,91	51 s	4,63
2 s	2,53	12 s	1,84	22 s	1,17	32 s	4,25	42 s	0,88	52 s	4,99
3 s	2,98	13 s	1,36	23 s	1,69	33 s	3,97	43 s	0,98	53 s	5,22
4 s	3,33	14 s	0,91	24 s	2,24	34 s	3,59	44 s	1,22	54 s	5,33
5 s	3,56	15 s	0,53	25 s	2,79	35 s	3,14	45 s	1,57	55 s	5,30
6 s	3,66	16 s	0,24	26 s	3,31	36 s	2,66	46 s	2,03	56 s	5,14
7 s	3,62	17 s	0,07	27 s	3,76	37 s	2,18	47 s	2,55	57 s	4,86
8 s	3,45	18 s	0,04	28 s	4,11	38 s	1,73	48 s	3,10	58 s	4,49
9 s	3,16	19 s	0,14	29 s	4,34	39 s	1,35	49 s	3,66	59 s	4,05

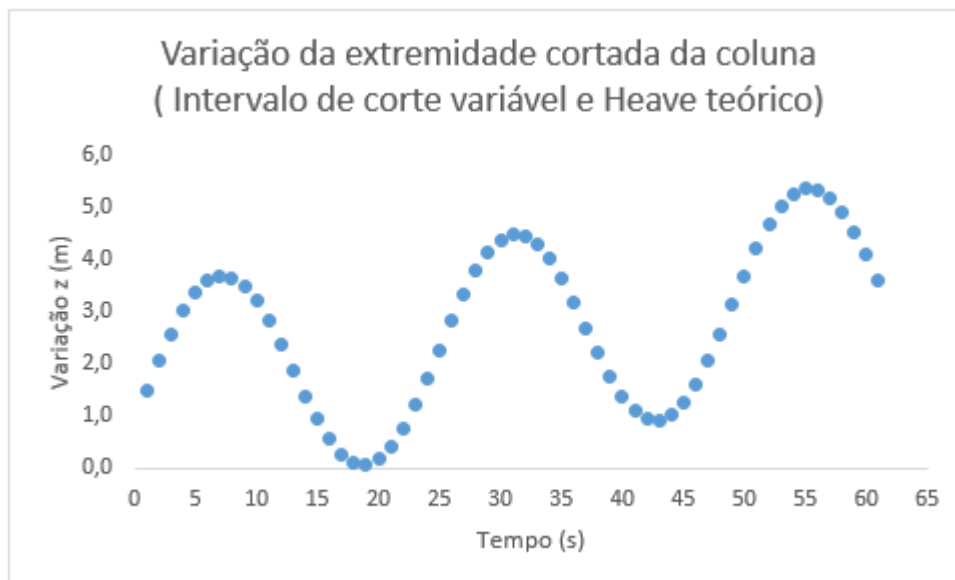


Figura 85 - Cenário 4A com intervalo de corte variável e Heave teórico

6.4.2 4B – Amplitude baixa de *Heave*

Tabela 46 - Dados do Cenário 4B

Cenário de Simulação		Nº: 04B
Característica: Amplitude de Heave muito baixa (mar calmo)		
Objetivo: Verificar a influência da amplitude de Heave na posição da extremidade da coluna após o corte.		
Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1300	kg/m ³
Carga total da coluna:	400	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	1500	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,5	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	0,4	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s

6.4.2.1 Intervalo de corte fixo

6.4.2.1.1 Heave Ajustado

Tabela 47 - Cenário 4B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,40	10 s	1,40	20 s	1,75	30 s	1,40	40 s	1,75	50 s	1,41
1 s	1,40	11 s	1,40	21 s	1,75	31 s	1,40	41 s	1,75	51 s	1,41
2 s	1,40	12 s	1,40	22 s	1,75	32 s	1,40	42 s	1,75	52 s	1,41
3 s	1,40	13 s	1,40	23 s	1,75	33 s	1,40	43 s	1,75	53 s	1,41
4 s	1,40	14 s	1,75	24 s	1,75	34 s	1,40	44 s	1,75	54 s	1,41
5 s	1,40	15 s	1,75	25 s	1,75	35 s	1,40	45 s	1,75	55 s	1,41
6 s	1,40	16 s	1,75	26 s	1,40	36 s	1,40	46 s	1,75	56 s	1,41
7 s	1,40	17 s	1,75	27 s	1,40	37 s	1,40	47 s	1,75	57 s	1,41
8 s	1,40	18 s	1,75	28 s	1,40	38 s	1,75	48 s	1,75	58 s	1,41
9 s	1,40	19 s	1,75	29 s	1,40	39 s	1,75	49 s	1,75	59 s	1,41

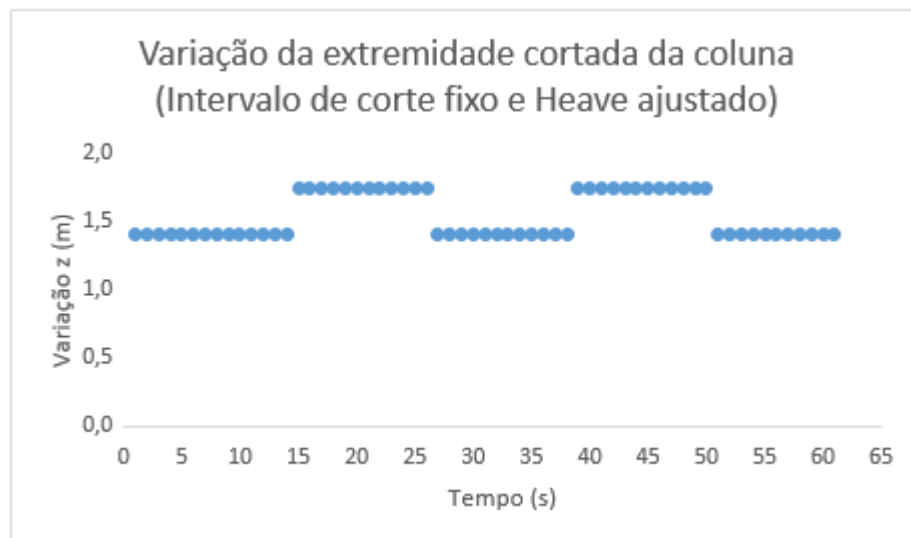


Figura 86 - Cenário 4B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

6.4.2.1.2 Heave Teórico

Tabela 48 - Cenário 4B com intervalo de corte fixo e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,92	10 s	1,45	20 s	2,10	30 s	1,45	40 s	1,92	50 s	1,75
1 s	1,84	11 s	1,51	21 s	2,09	31 s	1,42	41 s	2,00	51 s	1,66
2 s	1,75	12 s	1,58	22 s	2,05	32 s	1,40	42 s	2,05	52 s	1,58
3 s	1,66	13 s	1,66	23 s	2,00	33 s	1,42	43 s	2,09	53 s	1,51
4 s	1,58	14 s	1,75	24 s	1,92	34 s	1,45	44 s	2,10	54 s	1,45
5 s	1,51	15 s	1,84	25 s	1,84	35 s	1,51	45 s	2,09	55 s	1,42
6 s	1,45	16 s	1,92	26 s	1,75	36 s	1,58	46 s	2,05	56 s	1,41
7 s	1,42	17 s	2,00	27 s	1,66	37 s	1,66	47 s	2,00	57 s	1,42
8 s	1,40	18 s	2,05	28 s	1,58	38 s	1,75	48 s	1,93	58 s	1,45
9 s	1,42	19 s	2,09	29 s	1,51	39 s	1,84	49 s	1,84	59 s	1,51

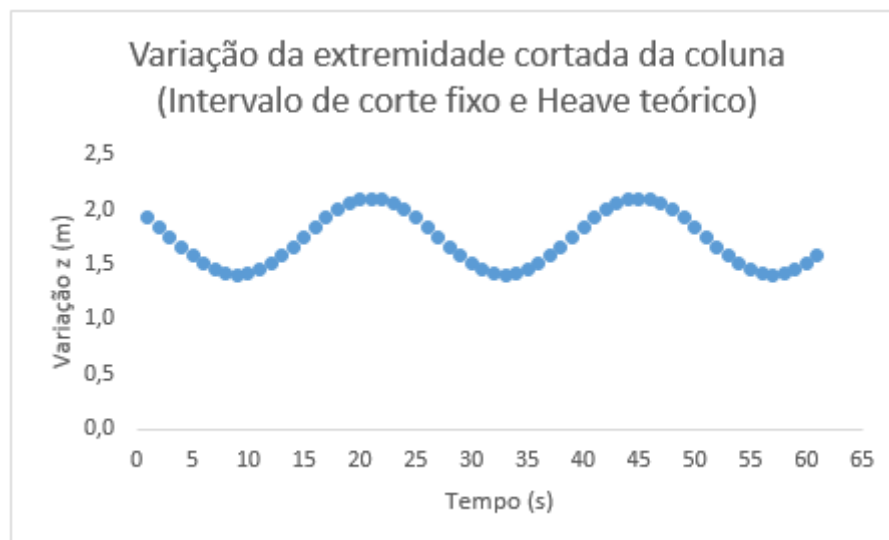


Figura 87 - Cenário 4B com intervalo de corte fixo e Heave teórico

6.4.2.2 Intervalo de corte variável

6.4.2.2.1 Heave Ajustado

Tabela 49 - Cenário 4B com intervalo de corte variável e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,27	10 s	1,58	20 s	2,11	30 s	2,25	40 s	2,60	50 s	3,18
1 s	1,30	11 s	1,61	21 s	2,14	31 s	2,28	41 s	2,64	51 s	3,22
2 s	1,33	12 s	1,64	22 s	2,17	32 s	2,32	42 s	2,88	52 s	3,25
3 s	1,36	13 s	1,68	23 s	2,21	33 s	2,35	43 s	2,91	53 s	3,29
4 s	1,39	14 s	1,71	24 s	2,24	34 s	2,39	44 s	2,95	54 s	3,13
5 s	1,42	15 s	1,74	25 s	2,27	35 s	2,42	45 s	2,99	55 s	3,17
6 s	1,46	16 s	1,77	26 s	2,31	36 s	2,46	46 s	3,03	56 s	3,21
7 s	1,49	17 s	1,81	27 s	2,34	37 s	2,49	47 s	3,06	57 s	3,25
8 s	1,52	18 s	2,04	28 s	2,38	38 s	2,53	48 s	3,10	58 s	3,29
9 s	1,55	19 s	2,07	29 s	2,41	39 s	2,57	49 s	3,14	59 s	3,33

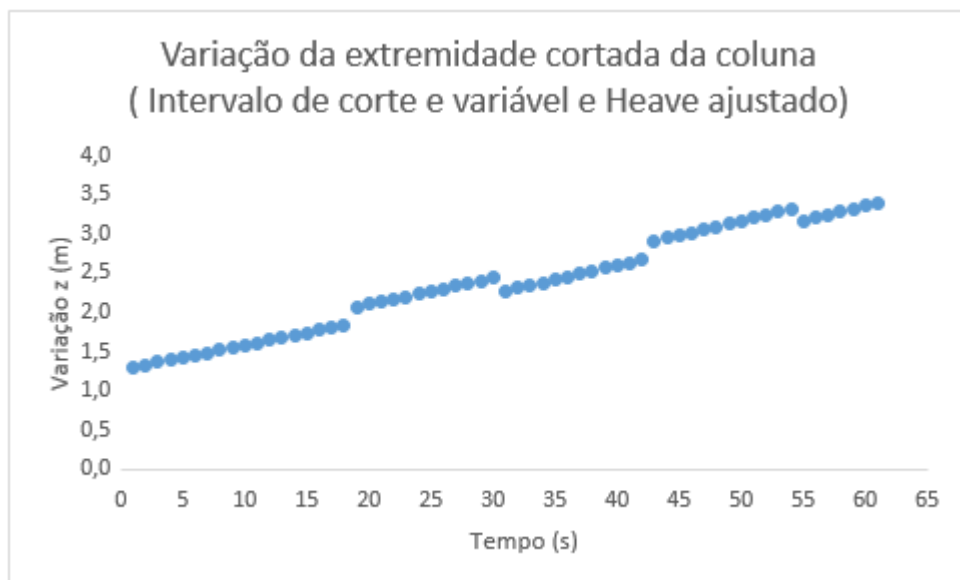


Figura 88 - Cenário 4B com intervalo de corte variável e Heave ajustado

6.4.2.2 Heave Teórico

Tabela 50 - Cenário 4B com intervalo de corte variável e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,47	10 s	1,88	20 s	1,93	30 s	2,65	40 s	2,63	50 s	3,28
1 s	1,55	11 s	1,86	21 s	2,00	31 s	2,67	41 s	2,65	51 s	3,36
2 s	1,63	12 s	1,84	22 s	2,07	32 s	2,69	42 s	2,68	52 s	3,43
3 s	1,71	13 s	1,82	23 s	2,15	33 s	2,69	43 s	2,72	53 s	3,49
4 s	1,77	14 s	1,81	24 s	2,24	34 s	2,69	44 s	2,78	54 s	3,53
5 s	1,82	15 s	1,80	25 s	2,33	35 s	2,67	45 s	2,85	55 s	3,56
6 s	1,86	16 s	1,80	26 s	2,41	36 s	2,66	46 s	2,93	56 s	3,58
7 s	1,88	17 s	1,81	27 s	2,48	37 s	2,64	47 s	3,01	57 s	3,59
8 s	1,89	18 s	1,84	28 s	2,55	38 s	2,63	48 s	3,10	58 s	3,59
9 s	1,89	19 s	1,88	29 s	2,60	39 s	2,63	49 s	3,19	59 s	3,58

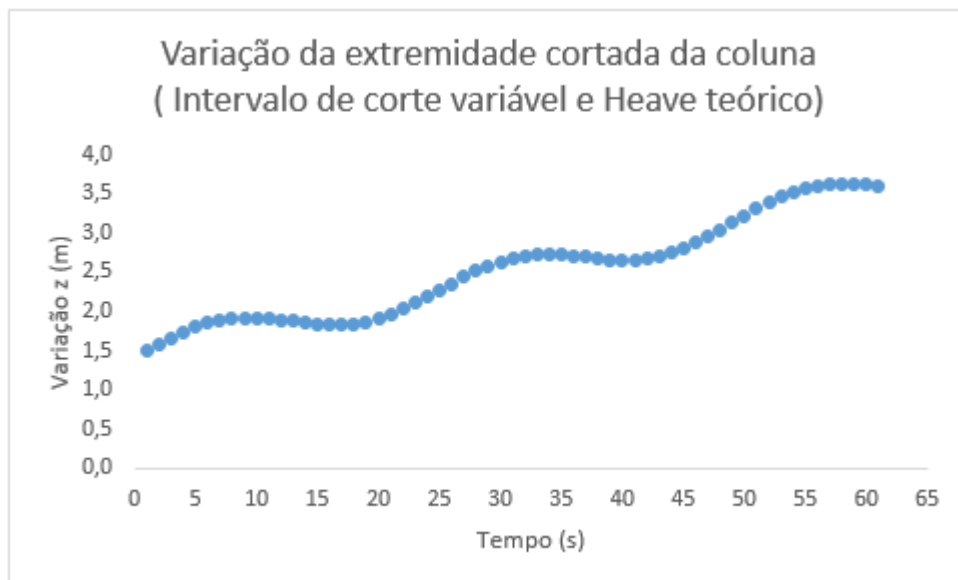


Figura 89 - Cenário 4B com intervalo de corte variável e Heave teórico

6.4.3 Conclusões sobre Cenário 4

O cenário com amplitude de *Heave* alta mostra uma oscilação grande na posição da extremidade da coluna, enquanto a amplitude de *Heave* pequena provoca um comportamento quase linear do gráfico, com pouca oscilação entre os valores resultantes.

6.4.3.1 Análise 4A x 4B com intervalo de corte fixo

Para o *Heave* alto há intervalos bem destacados onde a EDS é favorável e onde não é, enquanto que no *Heave* baixo o cenário praticamente se mostra todo favorável ou todo desfavorável.

6.4.3.2 Análise 4A x 4B com intervalo de corte variável

O intervalo variável é importante no caso do mar agitado, onde é possível permitir um tempo mais longo de deriva para evitar que o efeito da grande oscilação possa gerar alguma insegurança na condição de fechamento no vazio.

6.4.3.3 Conclusão do cenário

O mar agitado provoca uma variação grande na posição da extremidade da coluna, numa grandeza bastante próxima à dos outros efeitos dominantes, como carga e profundidade da lâmina d'água. Por isso o *Heave* possui um efeito oscilatório bastante relevante para a tomada de decisão. O algoritmo é capaz de indicar quais os melhores intervalos para a execução da EDS em casos como estes.

6.5 Cenário 5 – Avaliação da influência da velocidade de deriva

6.5.1 5A – Velocidade de deriva alta

Tabela 51 - Dados do Cenário 5A

Cenário de Simulação		Nº: 05A
Característica: Velocidade de deriva alta		
Objetivo: Verificar a influência da velocidade de deriva na posição da extremidade da coluna após o corte.		
Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1300	kg/m ³
Carga total da coluna:	500	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	1000	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	1,2	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	2	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s

6.5.1.1 Intervalo de corte fixo

6.5.1.1.1 Heave Ajustado

Tabela 52 - Cenário 5A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	0,38	10 s	0,38	20 s	2,11	30 s	0,38	40 s	2,11	50 s	0,38
1 s	0,38	11 s	0,38	21 s	2,11	31 s	0,38	41 s	2,11	51 s	0,38
2 s	0,38	12 s	0,38	22 s	2,11	32 s	0,38	42 s	2,12	52 s	0,38
3 s	0,38	13 s	0,38	23 s	2,11	33 s	0,38	43 s	2,12	53 s	0,38
4 s	0,38	14 s	2,11	24 s	2,11	34 s	0,38	44 s	2,12	54 s	0,38
5 s	0,38	15 s	2,11	25 s	2,11	35 s	0,38	45 s	2,12	55 s	0,38
6 s	0,38	16 s	2,11	26 s	0,38	36 s	0,38	46 s	2,12	56 s	0,38
7 s	0,38	17 s	2,11	27 s	0,38	37 s	0,38	47 s	2,12	57 s	0,38
8 s	0,38	18 s	2,11	28 s	0,38	38 s	2,11	48 s	2,12	58 s	0,39
9 s	0,38	19 s	2,11	29 s	0,38	39 s	2,11	49 s	2,12	59 s	0,39

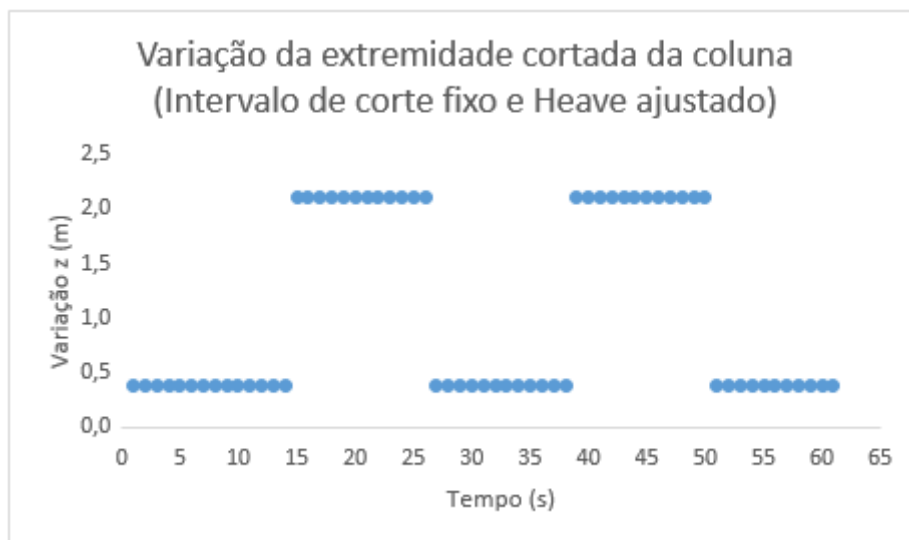


Figura 90 - Cenário 5A com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

6.5.1.1.2 Heave Teórico

Tabela 53 - Cenário 5A com intervalo de corte fixo e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	2,98	10 s	0,61	20 s	3,84	30 s	0,61	40 s	2,98	50 s	2,12
1 s	2,56	11 s	0,89	21 s	3,79	31 s	0,44	41 s	3,34	51 s	1,67
2 s	2,11	12 s	1,25	22 s	3,61	32 s	0,38	42 s	3,62	52 s	1,25
3 s	1,66	13 s	1,66	23 s	3,34	33 s	0,44	43 s	3,79	53 s	0,89
4 s	1,24	14 s	2,11	24 s	2,98	34 s	0,61	44 s	3,85	54 s	0,62
5 s	0,89	15 s	2,56	25 s	2,56	35 s	0,89	45 s	3,79	55 s	0,44
6 s	0,61	16 s	2,98	26 s	2,11	36 s	1,25	46 s	3,62	56 s	0,38
7 s	0,44	17 s	3,34	27 s	1,66	37 s	1,67	47 s	3,34	57 s	0,44
8 s	0,38	18 s	3,61	28 s	1,25	38 s	2,11	48 s	2,98	58 s	0,62
9 s	0,44	19 s	3,79	29 s	0,89	39 s	2,56	49 s	2,56	59 s	0,89

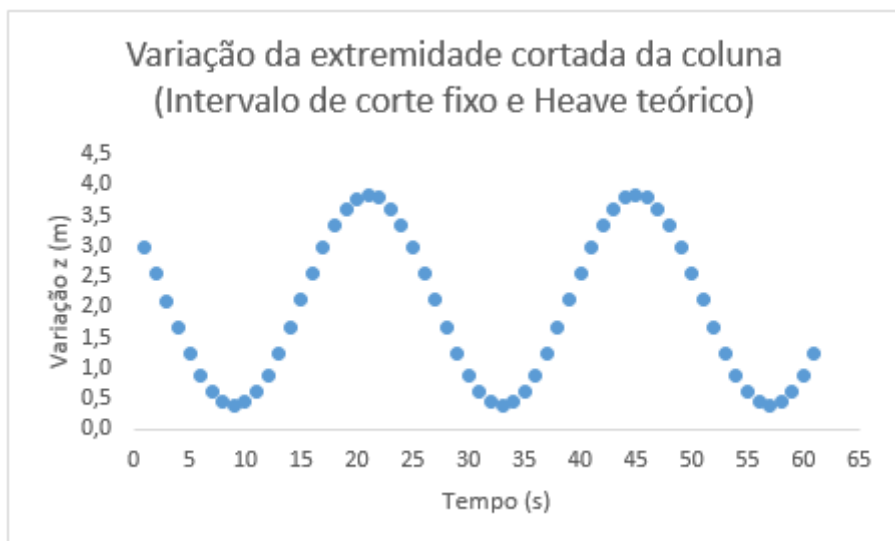


Figura 91 - Cenário 5A com intervalo de corte fixo e Heave teórico

6.5.1.2 Intervalo de corte variável

6.5.1.2.1 Heave Ajustado

Tabela 54 - Cenário 5A com intervalo de corte variável e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	0,51	10 s	1,27	20 s	3,13	30 s	3,09	40 s	4,14	50 s	6,29
1 s	0,58	11 s	1,35	21 s	3,22	31 s	3,19	41 s	4,25	51 s	6,41
2 s	0,65	12 s	1,44	22 s	3,32	32 s	3,29	42 s	5,36	52 s	6,53
3 s	0,73	13 s	1,52	23 s	3,41	33 s	3,40	43 s	5,48	53 s	6,65
4 s	0,80	14 s	1,60	24 s	3,50	34 s	3,50	44 s	5,59	54 s	5,77
5 s	0,88	15 s	1,69	25 s	3,60	35 s	3,60	45 s	5,70	55 s	5,90
6 s	0,95	16 s	1,78	26 s	3,70	36 s	3,71	46 s	5,82	56 s	6,02
7 s	1,03	17 s	1,86	27 s	3,79	37 s	3,82	47 s	5,93	57 s	6,15
8 s	1,11	18 s	2,95	28 s	3,89	38 s	3,92	48 s	6,05	58 s	6,27
9 s	1,19	19 s	3,04	29 s	3,99	39 s	4,03	49 s	6,17	59 s	6,40

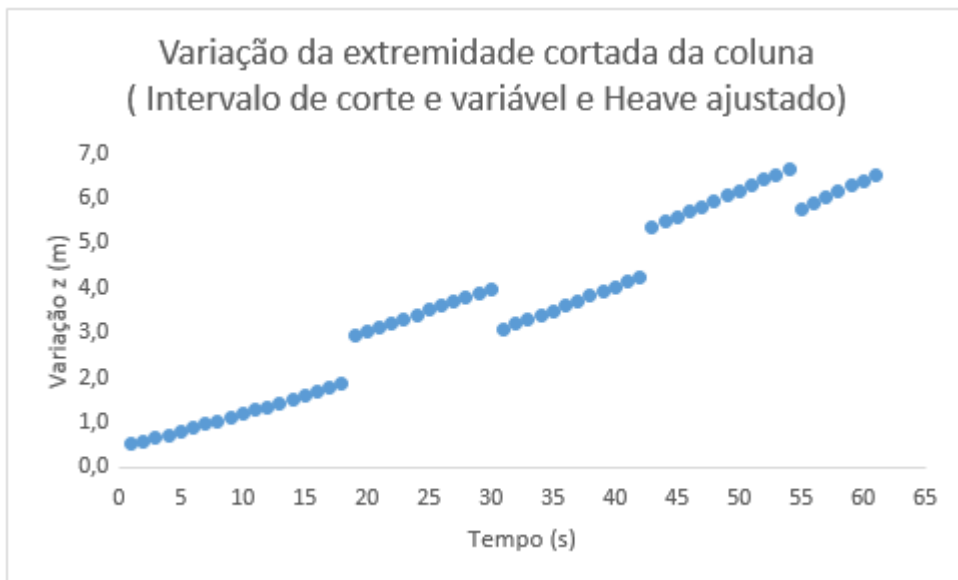


Figura 92 - Cenário 5A com intervalo de corte variável e Heave ajustado

6.5.1.2.2 Heave Teórico

Tabela 55 - Cenário 5A com intervalo de corte variável e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,51	10 s	2,77	20 s	2,27	30 s	5,09	40 s	4,28	50 s	6,79
1 s	1,84	11 s	2,61	21 s	2,52	31 s	5,16	41 s	4,29	51 s	7,12
2 s	2,15	12 s	2,44	22 s	2,82	32 s	5,16	42 s	4,36	52 s	7,40
3 s	2,43	13 s	2,26	23 s	3,15	33 s	5,10	43 s	4,51	53 s	7,62
4 s	2,67	14 s	2,10	24 s	3,50	34 s	5,00	44 s	4,72	54 s	7,77
5 s	2,84	15 s	1,98	25 s	3,86	35 s	4,86	45 s	5,00	55 s	7,86
6 s	2,95	16 s	1,91	26 s	4,20	36 s	4,71	46 s	5,32	56 s	7,89
7 s	3,00	17 s	1,90	27 s	4,50	37 s	4,56	47 s	5,68	57 s	7,86
8 s	2,98	18 s	1,95	28 s	4,76	38 s	4,42	48 s	6,05	58 s	7,77
9 s	2,90	19 s	2,08	29 s	4,96	39 s	4,33	49 s	6,43	59 s	7,66

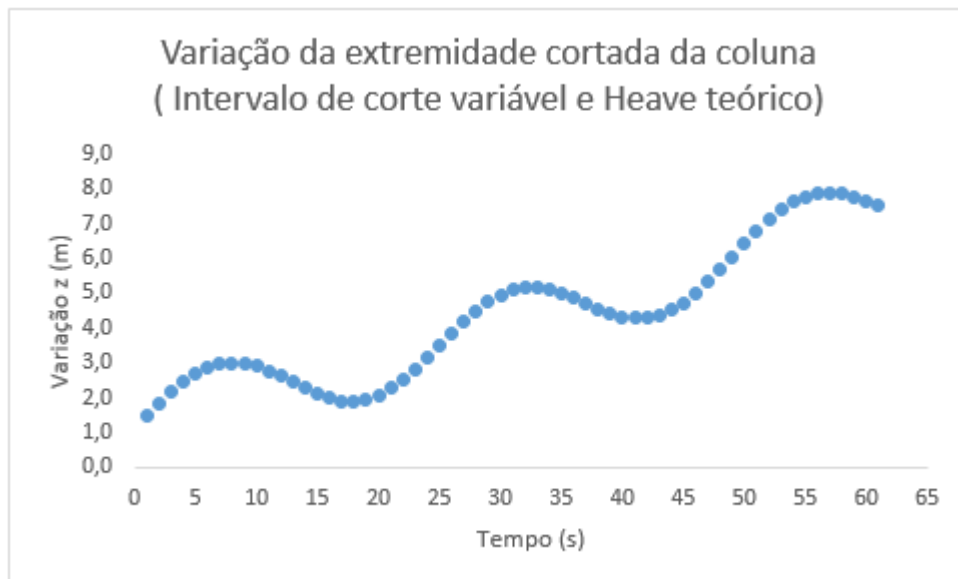


Figura 93 - Cenário 5A com intervalo de corte variável e Heave teórico

6.5.2 5B – Velocidade de deriva baixa

Tabela 56 - Dados do Cenário 5B

Cenário de Simulação		Nº: 05B
Característica: Velocidade de deriva baixa		
Objetivo: Verificar a influência da velocidade de deriva na posição da extremidade da coluna após o corte.		
Entrada de dados		
Densidade do aço:	7900	kg/m ³
Densidade do fluido:	1300	kg/m ³
Carga total da coluna:	500	kN
Diâmetro externo:	114,3	mm
Espessura de parede:	10,92	mm
Lâmina d'água:	1000	m
Deriva inicial:	90	m
Velocidade de deriva:	0,1	m/s
Módulo de elasticidade do aço:	207	Gpa
Amplitude de Heave:	2	m
Período de Heave:	24	s
Ângulo de fase:	0	rad
Intervalo de corte:	8	s

6.5.2.1 Intervalo de corte fixo

6.5.2.1.1 Heave Ajustado

Tabela 57 - Cenário 5B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	-0,18	10 s	-0,18	20 s	1,55	30 s	-0,18	40 s	1,55	50 s	-0,18
1 s	-0,18	11 s	-0,18	21 s	1,55	31 s	-0,18	41 s	1,55	51 s	-0,18
2 s	-0,18	12 s	-0,18	22 s	1,55	32 s	-0,18	42 s	1,55	52 s	-0,18
3 s	-0,18	13 s	-0,18	23 s	1,55	33 s	-0,18	43 s	1,55	53 s	-0,18
4 s	-0,18	14 s	1,55	24 s	1,55	34 s	-0,18	44 s	1,55	54 s	-0,18
5 s	-0,18	15 s	1,55	25 s	1,55	35 s	-0,18	45 s	1,55	55 s	-0,18
6 s	-0,18	16 s	1,55	26 s	-0,18	36 s	-0,18	46 s	1,55	56 s	-0,18
7 s	-0,18	17 s	1,55	27 s	-0,18	37 s	-0,18	47 s	1,55	57 s	-0,18
8 s	-0,18	18 s	1,55	28 s	-0,18	38 s	1,55	48 s	1,55	58 s	-0,18
9 s	-0,18	19 s	1,55	29 s	-0,18	39 s	1,55	49 s	1,55	59 s	-0,18

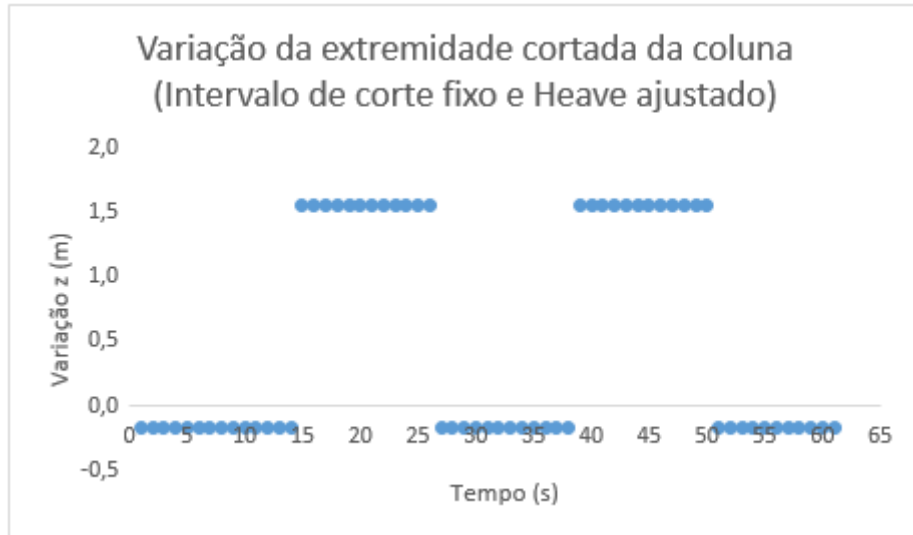


Figura 94 - Cenário 5B com intervalo de corte fixo e Heave ajustado

6.5.2.1.2 Heave Teórico

Tabela 58 - Cenário 5B com intervalo de corte fixo e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	2,42	10 s	0,05	20 s	3,29	30 s	0,05	40 s	2,42	50 s	1,55
1 s	2,00	11 s	0,33	21 s	3,23	31 s	-0,12	41 s	2,78	51 s	1,11
2 s	1,55	12 s	0,69	22 s	3,05	32 s	-0,18	42 s	3,05	52 s	0,69
3 s	1,10	13 s	1,11	23 s	2,78	33 s	-0,12	43 s	3,23	53 s	0,33
4 s	0,69	14 s	1,55	24 s	2,42	34 s	0,05	44 s	3,29	54 s	0,05
5 s	0,33	15 s	2,00	25 s	2,00	35 s	0,33	45 s	3,23	55 s	-0,12
6 s	0,05	16 s	2,42	26 s	1,55	36 s	0,69	46 s	3,05	56 s	-0,18
7 s	-0,12	17 s	2,78	27 s	1,11	37 s	1,11	47 s	2,78	57 s	-0,12
8 s	-0,18	18 s	3,05	28 s	0,69	38 s	1,55	48 s	2,42	58 s	0,05
9 s	-0,12	19 s	3,23	29 s	0,33	39 s	2,00	49 s	2,00	59 s	0,33

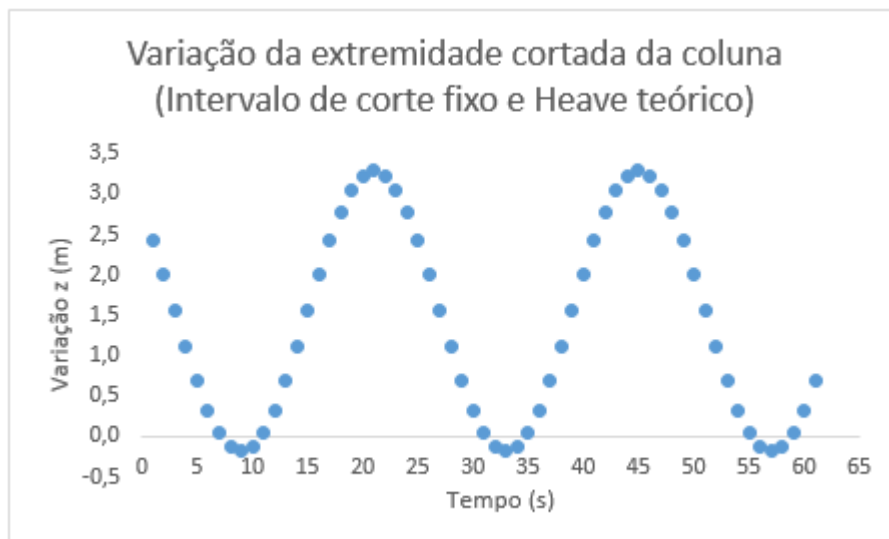


Figura 95 - Cenário 5B com intervalo de corte fixo e Heave teórico

6.5.2.2 Intervalo de corte variável

6.5.2.2.1 Heave Ajustado

Tabela 59 - Cenário 5B com intervalo de corte variável e Heave ajustado

Variação com Heave Ajustado (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	0,51	10 s	0,57	20 s	1,63	30 s	0,69	40 s	0,75	50 s	1,81
1 s	0,51	11 s	0,57	21 s	1,63	31 s	0,69	41 s	0,76	51 s	1,82
2 s	0,52	12 s	0,58	22 s	1,64	32 s	0,70	42 s	1,76	52 s	1,83
3 s	0,52	13 s	0,58	23 s	1,64	33 s	0,71	43 s	1,77	53 s	1,83
4 s	0,53	14 s	0,59	24 s	1,65	34 s	0,71	44 s	1,78	54 s	0,84
5 s	0,54	15 s	0,60	25 s	1,66	35 s	0,72	45 s	1,78	55 s	0,84
6 s	0,54	16 s	0,60	26 s	1,66	36 s	0,73	46 s	1,79	56 s	0,85
7 s	0,55	17 s	0,61	27 s	1,67	37 s	0,73	47 s	1,79	57 s	0,86
8 s	0,55	18 s	1,61	28 s	1,68	38 s	0,74	48 s	1,80	58 s	0,86
9 s	0,56	19 s	1,62	29 s	1,68	39 s	0,74	49 s	1,81	59 s	0,87

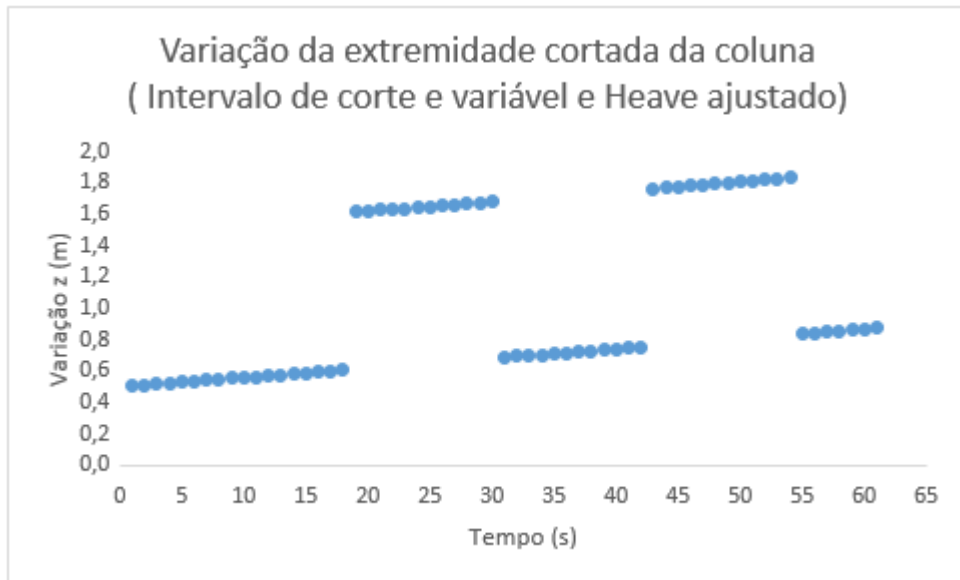


Figura 96 - Cenário 5B com intervalo de corte variável e Heave ajustado

6.5.2.2 Heave Teórico

Tabela 60 - Cenário 5B com intervalo de corte variável e Heave teórico

Variação com Heave Teórico (metros)											
t	z	t	z	t	z	t	z	t	z	t	z
0 s	1,51	10 s	2,07	20 s	0,76	30 s	2,69	40 s	0,88	50 s	2,31
1 s	1,77	11 s	1,83	21 s	0,93	31 s	2,66	41 s	0,79	51 s	2,53
2 s	2,02	12 s	1,58	22 s	1,14	32 s	2,57	42 s	0,76	52 s	2,69
3 s	2,23	13 s	1,32	23 s	1,39	33 s	2,41	43 s	0,80	53 s	2,80
4 s	2,40	14 s	1,09	24 s	1,65	34 s	2,21	44 s	0,91	54 s	2,84
5 s	2,50	15 s	0,89	25 s	1,92	35 s	1,98	45 s	1,07	55 s	2,81
6 s	2,54	16 s	0,74	26 s	2,16	36 s	1,73	46 s	1,29	56 s	2,72
7 s	2,51	17 s	0,64	27 s	2,38	37 s	1,47	47 s	1,54	57 s	2,56
8 s	2,42	18 s	0,61	28 s	2,54	38 s	1,24	48 s	1,80	58 s	2,36
9 s	2,27	19 s	0,65	29 s	2,65	39 s	1,04	49 s	2,07	59 s	2,13

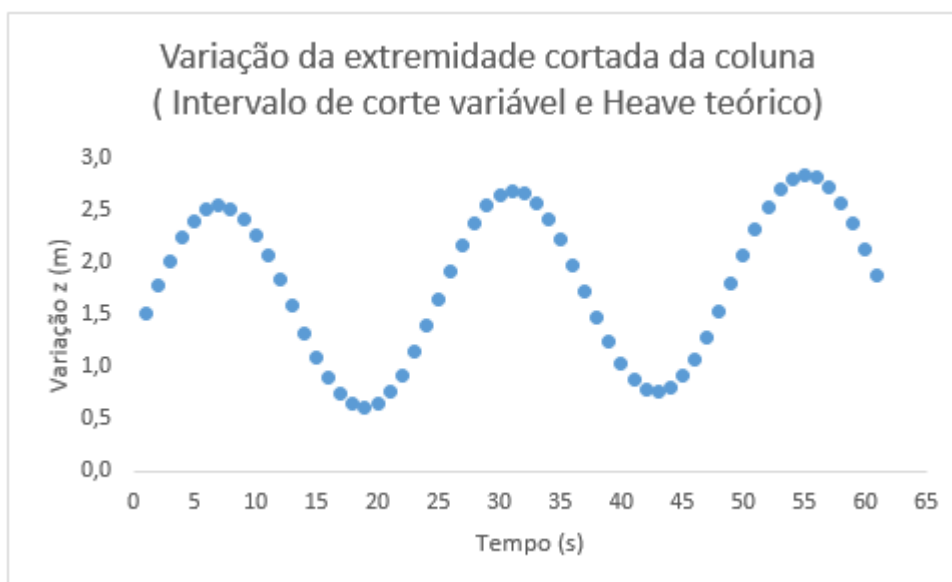


Figura 97 - Cenário 5B com intervalo de corte variável e Heave teórico

6.5.3 Conclusões sobre Cenário 5

Os dois cenários são bastante semelhantes no seu comportamento. No intervalo de tempo fixo há uma pequena diferença no resultado final por conta da velocidade diferente para o mesmo tempo decorrido. No intervalo de corte variável a inclinação da curva tem uma diferença grande de acentuação.

6.5.3.1 Análise 5A x 5B com intervalo de corte fixo

Talvez num cenário onde o intervalo de corte fixado esteja aliado a uma lâmina d'água mais rasa e uma carga mais baixa o efeito provocado pela deriva fixa se torne mais relevante, mas em condições médias ainda é um efeito pouco relevante.

6.5.3.2 Análise 5A x 5B com intervalo de corte variável

O intervalo variável mostra a vantagem já habitual de permitir que a sonda derive por mais tempo para uma melhor posição da extremidade da coluna, mas esse deslocamento possui um limite que não é influenciado pela velocidade ou tempo, mas sim pelo ângulo limite de inclinação da coluna. Portanto, com intervalo de corte variável, a conclusão é de que altas velocidades de deriva dão menos tempo para recuperação da sonda, sem trazer benefício para a EDS.

6.5.3.3 Conclusão do cenário

A velocidade de deriva tem o efeito apenas de acelerar o efeito previsto pela deriva, sem porém aumentá-lo ou diminuí-lo. O algoritmo é capaz de mostrar o tempo necessário para que a EDS ocorra com segurança dentro de uma determinada velocidade de deriva, garantindo a segurança da operação.

7 Conclusão

A demanda por mais segurança e a pressão constante por corte de custos na indústria do petróleo traz a oportunidade da automação de processos na área de segurança. Um procedimento bastante crítico como a sequência de desconexão de emergência exarceba essa necessidade, pelos altos riscos e custos envolvidos numa decisão como essa.

Criar uma solução para esse problema envolve um número muito grande de variáveis e situações específicas e se mostrou um trabalho que necessita muitos passos. A decisão de criar um algoritmo que gere uma informação valiosa, mesmo que aplicável apenas em situações específicas, é um passo interessante e que abre outras oportunidades.

A implementação desse algoritmo também se dá em oportunidades progressivas, primeiro se mostrando um grande instrumento de simulação de situações específicas, que podem ser melhor estudadas com mais agilidade e eficiência. Posteriormente esse algoritmo pode evoluir para um indicador presente durante a operação para auxiliar na tomada de decisão. Finalmente ele pode ser implementado diretamente no sistema da sonda para tomar a decisão por si, alcançando o estágio de automação completa, onde o nível de segurança e agilidade na tomada de decisão o homem não pode alcançar.

Porém o algoritmo proposto não pretende ou tem a intenção de ser uma ferramenta definitiva. É sim uma base para ser evoluída em sua capacidade e com outras funcionalidades adicionadas conforme a demanda exige. Dois exemplos claros são: o dimensionamento mais exato do comprimento da coluna entre a sonda e o BOP, que pode ser feito por uma equação da catenária formada ou diretamente por sensores elétricos percorrendo a coluna, por exemplo; e a previsão mais exata do comportamento oscilatório do afundamento da sonda, que pode utilizar funções complexas que usam dados já existentes na sonda para prever com precisão a posição futura.

Os resultados obtidos com princípios simples e disponíveis na operação atual de uma sonda se mostram de bastante utilidade. Mais que equações novas ou dados inéditos, o que se fez foi unificar os fatores relevantes para o caso estudado num ambiente computacional centralizado e de resposta ágil e integrada num só raciocínio.

As simulações realizadas utilizaram dados realistas e que traduzem situações possíveis. Por isso os resultados são valiosos e as conclusões tiradas importantes, demonstrando o valor da ferramenta construída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DHSG; *Final Report on the Investigation of the Macondo Well Blowout*, Los Angeles, EUA, 2011.
- [2] HORTON, S; *Macondo – What Happened and What Can We Learn*, Los Angeles, EUA, 2011.
- [3] MANSANO, R B; *Engenharia de Perfuração e Completação em Poços de Petróleo*, UFSC, Florianópolis, Brasil, 2004.
- [4] THOMAS, J E; *Fundamentos de Engenharia do Petróleo*, 2ª ed, Rio de Janeiro, Brasil, Editora Interciência, 2001.
- [5] HIBBELER, R C; *Resistência dos Materiais*, 3ª ed, Rio de Janeiro, Brasil, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.
- [6] SANTIAGO, R; *Dimensionamento de Colunas de Perfuração*, UFERSA, Mossoró, Brasil, 2015.
- [7] MATHIAS, V M; *Coluna de Perfuração em Poços de Petróleo*, UFRN, Natal, Brasil, 2016.
- [8] SILVA, V P; FRUCHTENGARTEN, J; *Dimensionamento de Estruturas de Aço*, USP, São Paulo, Brasil, 2012.
- [9] BURIN, F S, *Modelagem do Comportamento Mecânico de Cabos Suspensos Através de Métodos Analíticos e Numéricos*, UFRS, Porto Alegre, Brasil, 2010.
- [10] WANG, Y; GAO, D; FANG, J; *Mechanical Behavior Analysis and Testing of Marine Riser in Deepwater Drilling*, China University of Petroleum, Pequim, China, 2016.
- [11] KUCHLER S et al; *Heave Motion Estimation of a Vessel Using Acceleration Measurements*, University of Stuttgart, Stuttgart, Alemanha, 2011.
- [12] BERGDAHL L; *Wave-Induced Loads and Ship Motions*, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suécia, 2009.
- [13] PLÁCIDO, J. C. R. *Colunas de perfuração e brocas*. Instituto Brasileiro de Petróleo, Rio de Janeiro, 2013.
- [14] MITCHELL, R.F. (Ed.) AND MISKA S.Z. (Ed.). *Fundamentals of Drilling Engineering*, Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [15] PLÁCIDO, J. C. R.; PINHO, R. *Brocas de Perfuração de Poços de Petróleo*. PUC-RIO. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2010.
- [16] ROCHA, L. A. S. et al. *Perfuração Direcional*. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.
- [17] BAR-COHEN, Y. (Ed.); ZACNY K. (Ed.) *Drilling in Extreme Environments: Penetration and Sampling on Earth and Other Planets*, Wiley-VCH, 2009
- [18] CRUZ, D. F.; *New Petrobras Concepts for WSOG*. Rio de Janeiro, Brasil. 2014.
- [19] PALLAORO, A. A.; *Well Specific Operation Guidelines Concepts*. Rio de Janeiro, Brasil. 2013.
- [20] MOREIRA, J. R. F.; *The Use of Dynamically Posiotioned Units in Subsea Completions Offshore Brazil*. Rio de Janeiro, Brasil. 1991.
- [21] BARUSCO, P.; *The Accident of P-36 FPS*. Houston, EUA. 2002.
- [22] JUINITI, R.; PALLAORO, A.; OHARA, S.; *Restriction Diagrams: How to Work with DP Rigs in Close Proximity*. Houston, EUA. 1998.