CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Análise da Vibração Torcional-Longitudinal-Lateral de Colunas de Perfuração a partir de Modelos Não-Suaves

Luciano Pereira Peixoto de Moraes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais, PPEMM, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais

Orientador: Marcelo Amorim Savi

Rio de Janeiro
Abril/2016

Análise da Vibração Torcional-Longitudinal-Lateral de Colunas de Perfuração de a partir de Modelos Não-Suaves

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais, PPEMM, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais

Luciano Pereira Peixoto de Moraes

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professor Dr. Marcelo Amorim Savi (orientador)

_____

Professora Dra. Luciana Loureiro da Silva Monteiro

_____

Professor Dr. Arthur Martins Barbosa Braga (PUC/RJ)

Rio de Janeiro
Abril/2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M827 Moraes, Luciano Pereira Peixoto de
Análise da vibração torcional-longitudinal-lateral de colunas de perfuração a partir de modelos não-suaves / Luciano Pereira Peixoto de Moraes.—2016.
xi, 60f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.
Bibliografia : f. 58-60
Orientador : Marcelo Amorim Savi

1. Engenharia mecânica. 2. Poços de petróleo – Perfuração. 3. Vibração. I. Savi, Marcelo Amorim (Orient.). II. Título.

CDD 622.3381

Agradecimentos

Agradeço à Deus, por tornar tudo possível.

À minha mãe, irmã, tia e namorada por estarem sempre ao meu lado me apoiando, pela sua paciência e por toda e qualquer ajuda que certamente precisei.

Ao meu professor e orientador, Marcelo Savi, pelo conhecimento compartilhado, paciência e orientação.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Análise da Vibração Torcional-Longitudinal-Lateral de Colunas de Perfuração a partir de Modelos Não-Suaves

Luciano Pereira Peixoto de Moraes

Orientador: Marcelo Amorim Savi

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos de necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais

Durante a operação, uma coluna de perfuração pode ser submetida a fortes vibrações que resultam em um processo oneroso e ineficiente. As vibrações das colunas de perfuração podem ser analisadas considerando-se três modos diferentes: axial, torcional e lateral. A análise combinada desses modos fornece uma compreensão adequada da dinâmica da coluna e esclarece várias respostas de vibração consideradas críticas. Neste sentido, é importante destacar o *bit-bounce*, associado a perda de contato entre a broca e o leito marinho; *stick-slip*, relacionado as paradas na rotação; *whirl*, caracterizado pela flexão da coluna em torno do centro do poço. Muitos modelos têm sido propostos visando investigar todos os fenômenos relacionados com as vibrações de colunas de perfuração. A questão mais importante relacionada ao seu estudo dinâmico são as não-linearidades impostas por interações broca-rocha e pelo contato entre a paredes da coluna e do poço. Em geral, o uso de modelos com parâmetros concentrados apresenta uma boa descrição da dinâmica de uma coluna. Neste trabalho, considera-se um modelo não-suave de parâmetros concentrados com quatro graus de liberdade acoplando os três modos vibração. O modelo considera ainda excentricidade e forças hidrodinâmicas de arrasto devido à resistência do fluido a flexão lateral. Uma análise paramétrica é realizada visando entender como as vibrações interagem entre seus modos e avaliar condições operacionais críticas. Simulações numéricas investigam uma grande variedade de condições que são qualitativamente comparadas às observações experimentais.

Palavras Chave: Perfuração, Sistemas Não-Suaves, Vibrações Críticas, Petróleo, Óleo e gás.

Rio de Janeiro
Abril/2016

ABSTRACT

Torcional-Longitudinal-Lateral Vibrations Analysis of Drill-Strings as a Nonsmooth System

Luciano Pereira Peixoto de Moraes

Advisor: Marcelo Amorim Savi

Abstract of dissertation submited to Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, as a partial of the requirements for the degree of Master in Mechanical Engineering and Materials Technology.

During oil drilling operations the drill-string can be subjected to severe vibrations, which leads to an onerous and inefficient process. In essence, drill-string dynamics may be analyzed by considering different vibration modes: axial, torsional and lateral. The coupled analysis of these modes gives a proper comprehension of the drill-string dynamics, elucidating several critical vibration responses. In this regard, it is important to highlight *bit-bounce*, associated with drill-string contact lost; *stick-slip*, related to drill-string rotating stops; *whirl*, characterized by a rotational response of a deflected drill-string around the well center. Many models have been proposed in order to investigate all related phenomena of drill-string vibrations. The most important issue related to drill-string dynamics is nonsmooth nonlinearities imposed by bit-rock interactions and contact between the drill-string and the wellbore. In general, lumped models present a proper description of the system dynamics. A four-degrees of freedom nonsmooth model is adopted considering the coupling between modes, bit-rock and wellbore interaction, eccentricity and hydrodynamic forces due to fluid resistance to lateral bending. A parametric study is done through phase spaces and bifurcation diagrams. The goal is to understand how the vibration modes interact with each other and to assess under what operational conditions the drill-string exhibits critical vibrations. Numerical results are qualitatively compared with experimental field observations confirming the main conclusions.

Keywords: Drilling, Nonsmooth systems, Critical Vibrations, Petroleum, Oil and gas.

Rio de Janeiro
April/2016

Índice

I. Introdução **1**
I.1 Revisão de Literatura 2
I.2 Organização do Trabalho 4
II. Aspectos Gerais de uma Coluna de Perfuração **5**
II.1 Aspectos Construtivos 5
II.2 Aspectos Dinâmicos de uma Coluna de Perfuração 8
II.2.1 Vibrações Axiais 8
II.2.2 Vibrações Torcionais 10
II.2.3 Vibrações Laterais 11
III. Modelo Matemático **14**
III.1 Avaliação dos Parâmetros 20
IV. Simulações Numéricas **22**
IV.1 Respostas Típicas 23
IV.1.1 Comportamento Normal da Coluna 23
IV.1.2 Fenômeno de *Whirl* 25
IV.1.3 Fenômeno de Bit-bounce 28
IV.1.4 Fenômeno de *Stick-slip* 30
IV.1.5 Influência Combinada do *Bit-bounce* e do *Stick-slip* 34
IV.1.6 Influência Combinada do *Bit-bounce* e do *Whirl* 36
IV.2 Avaliação de Vibrações Críticas Quanto a Configuração e Condições Operacionais 39
IV.2.1 Variação de Profundidade e Condições Iniciais para Diferentes Pesos Sobre a Broca 39
IV.2.2 Avaliação da Comportamento Dinâmico da Coluna para um Diâmetro de Broca Elevado 48
IV.2.3 Variação Contínua da Rotação sob Diferentes Pesos Sobre a Broca 49
V. Conclusões **56**
VI. Trabalhos Futuros **57**
VII. Referências Bibliográficas 58

Lista de Figuras

Figura II.1 Esquema Representativo de uma Estrutura Básica de Perfuração e Seus Principais Componentes 6
Figura II.2 Componentes do Sistema de Movimentação 7
Figura II.3(a) Mesa Rotativa e Kelly 8
Figura II.3(b)) Top Drive 8
Figura II.5 Fenômeno de Bit-Bounce 9
Figura II.6 Padrão da Formação Gerado pela Interação com Brocas Tricônicas 9
Figura II.7 Forças agindo em um cortador da broca PDC 10
Figura II.8 Consequência do Stick-Slip na Velocidade de Perfuração 11
Figura II.9 Relação entre o Stick-Slip e o Peso Sobre a Broca 11
Figura II.10 Comparação entre as vibrações dominantes no uso de brocas PDC e Tricônicas (Rockbit). Vibrações laterais (VIBXY3D = 1) dominantes na broca PDC e vibrações axiais (VIBZ3D = 1) dominantes nas brocas tricônicas 12
Figura II.11 Deflexão Lateral da Coluna devido ao Desbalanceamento 13
Figura II.12 (A) Forward Whirl (B) Backward Whirl 13
Figura III.1Esquemático da Coluna de Perfuração e Sistemas Massa-Mola-Amortecedor Equivalentes 14
Figura III.2Variação da Força de Atrito 17
Figura III.3Variação Contínua da Força de Atrito 17
Figura III.4 Velocidades Tangenciais do Movimento de Giro e Rotação 18
Figura III.5 Esquemático do Leito Marinho e Irregularidade 19
Figura IV.1Espaço de Fase Axial 24
Figura IV.2Espaço de Fase Torcional 24
Figura IV.3 Espaço de Fase de Deflexão 25
Figura IV.4 Espaço de Fase de Giro 25
Figura IV.5 Espaço de Fase de Deflexão 26
Figura IV.6 Espaço de Fase de Giro 26
Figura IV.7Espaço de Fase de Giro (T_{OP}) 26
Figura IV.8 Espaço de Fase de Giro ($T_{OP}/2$) 26
Figura IV.9 Trajetória da Coluna 27
Figura IV.10 Espaço de Fase Axial 27
Figura IV.11 Espaço de Fase Torcional 27
Figura IV.12Espaço de Fase Axial 28
Figura IV.13 Espaço de Fase Torcional 29
Figura IV.14 Espaço de Fase de Deflexão 30
Figura IV.15 Espaço de Fase de Giro 30
Figura IV.16 Trajetória da Deflexão 30
Figura IV.17Espaço de Fase Torcional 31
Figura IV.18Espaço de Fase Axial 31
Figura IV.19 Espaço de Fase Radial 32
Figura IV.20 Evolução Temporal da Posição Radial [m] 32
Figura IV.21 Evolução Temporal Velocidade Angular [rad/s] 32
Figura IV.22 Espaço de Fase de Giro 33
Figura IV.23 Trajetória da Coluna 33
Figura IV.24 Espaço de Fase Axial 34
Figura IV.25 Espaço de Fase Torcional 35
Figura IV.26 Espaço de Fase de Deflexão 35
Figura IV.27 Espaço de Fase do Movimento de Giro 36
Figura IV.28 Trajetória da Coluna 36
Figura IV.29 Espaço de Fase Axial 37
Figura IV.30 Espaço de Fase Lateral 37
Figura IV.31 Espaço de Fase de Movimento de Giro 38
Figura IV.32 Trajetória da Coluna 38
Figura IV.33 Espaço de Fase Torcional 39
Figura IV.34 Diagrama do Modo Axial [22,24 kN] 40
Figura IV.35 Diagrama do Modo Torcional [22,24 kN] 41
Figura IV.36 Diagrama do Modo Lateral [22,24 kN] 41
Figura IV.37 Ampliação do Intervalo de Diagrama do Modo Lateral [22,24 kN] 41
Figura IV.38 Espaço de Fase do Modo Axial [L = 7000 m] 42
Figura IV.39 Espaço de Fase do Modo Torcional [L = 7000 m] 42

Figura IV.40 Espaço de Fase Radial do Modo Lateral [L= 7000 m]....42
Figura IV.41Espaço de Fase de Giro do Modo Lateral [L=7000 m]....42
Figura IV.42 Diagrama do Modo Axial para Condições Reiniciadas [22,24 kN] 43
Figura IV.43 Diagrama do Modo Torcional para Condições Reiniciadas [22,24 kN]....43
Figura IV.44Diagrama do Modo Lateral para Condições Reiniciadas [22,24 kN] 44
Figura IV.45Diagrama do Modo Axial [66,72 kN]....44
Figura IV.46Diagrama do Modo Torcional [66,72 kN] 45
Figura IV.47Diagrama do Modo Lateral [66,72 kN] 45
Figura IV.48Ampliação do Intervalo de Diagrama do Modo Lateral [66,72 kN]....45
Figura IV.49Espaço de Fase Axial [L = 5470 m]....46
Figura IV.50Espaço de Fase Torcional [L = 5470 m] 46
Figura IV.51Espaço de Fase Radial [L = 5470m] 46
Figura IV.52 Espaço de Fase de Giro [L = 5470 m] 46
Figura IV.53Diagrama do Modo Axial para Condições Reiniciadas [66,72 kN]....47
Figura IV.54Diagrama do Modo Torcional para Condições Reiniciadas [66,72 kN]....47
Figura IV.55Diagrama do Modo Lateral para Condições Reiniciadas [66,72 kN]....47
Figura IV.56 Diagrama do Modo Axial....48
Figura IV.57 Diagrama do Modo Torcional....49
Figura IV.58 Diagrama do Modo Lateral 49
Figura IV.59(a) Diagrama Axial de Rotação Crescente 50
Figura IV.59(b) Diagrama Axial de Rotação Decrescente....50
Figura IV.60(a) Diagrama Axial de Rotação Crescente 51
Figura IV.60(b) Diagrama Axial de Rotação Decrescente....51
Figura IV.61(a) Diagrama Axial de Rotação Crescente 51
Figura IV.61(b) Diagrama Axial de Rotação Decrescente....51
Figura IV.62(a) Diagrama Lateral de Rotação Crescente....52
Figura IV.62(b) Diagrama Lateral de Rotação Decrescente 52
Figura IV.63(a) Diagrama Lateral de Rotação Crescente....52
Figura IV.63(b) Diagrama Lateral de Rotação Decrescente 52
Figura IV.64(a) Diagrama Lateral de Rotação Crescente....53
Figura IV.64(b) Diagrama Lateral de Rotação Decrescente 53
Figura *IV.65*(a) Diagrama Axial de Rotação Crescente 53
Figura *IV.65*(b) Diagrama Axial de Rotação Decrescente....53
Figura IV.66(a) Diagrama Axial de Rotação Crescente 54
Figura IV.66(b) Diagrama Axial de Rotação Decrescente....54
Figura IV.67(a) DiagramaLateral de Rotação Crescente....54
Figura IV.67(b) Diagrama Lateral de Rotação Decrescente 54
Figura IV.68(a) Diagrama Lateral de Rotação Crescente....55
Figura IV.68(b) Diagrama Lateral de Rotação Decrescente 55

Lista de tabelas

Tabela IV.1 Parâmetros Utilizados em todas as Simulações 23
Tabela IV.2 Parâmetros utilizados para o Comportamento Normal da Coluna 23
Tabela IV.3 Parâmetros Utilizados para o Fenômeno de Whirl 26
Tabela IV.4 Parâmetros Utilizados para o Fenômeno de Bit-Bounce 28
Tabela IV.5 Parâmetros Utilizados para o Fenômeno de Stick-Slip 30
Tabela IV.6 Parâmetros Utilizados para a Combinação do Bit-Bounce e Stick-Slip 34
Tabela IV.7 Parâmetros Utilizados para a Combinação do Bit-Bounce e Whirl 37
Tabela IV.8 Parâmetros Utilizados nos Diagramas de Bifurcação 40

Lista de Símbolos

c_1	Constate Empírica da Taxa de Penetração da Broca	[adm.]
c_2	Constate Empírica da Taxa de Penetração da Broca	[adm.]
c_a	Coeficiente de Amortecimento Axial	[N s/m]
c_{ma}	Coeficiente de Massa Adicionada	[adm.]
C_d	Coeficiente de Arrasto	[adm.]
C_h	Coeficiente de Amortecimento Hidrodinâmico	[N s²/m²]
C_v	Coeficiente de Amortecimento Viscoso	[N m s]
Di_{TP}	Diâmetro Interno dos Tubos de Perfuração	[m]
De_{TP}	Diâmetro Externo dos Tubos de Perfuração	[m]
Di_{CO}	Diâmetro Interno do Comando	[m]
De_{CO}	Diâmetro Externo do Comando	[m]
D_P	Diâmetro do Poço	[m]
e_o	Excentricidade do Centro de Massa da Coluna	[m]
E	Módulo de Elasticidade	[GPa]
F_o	Peso Estático sobre a Broca	[N]
F_{ob}	Força sobre a Broca	[N]
F_r	Força de Contato Radial	[N]
F_Θ	Força de Contato Tangencial	[N]
G	Módulo de Cisalhamento	[GPa]
J	Momento de Inércia de Massa da Coluna	[Kg m²]
k_a	Rigidez da Axial da Coluna	[N/m]
k_c	Rigidez da Formação do Poço	[N/m]
K_L	Rigidez lateral da Coluna	[N/m]
K_t	Rigidez Torcional da Coluna	[N/m]
L_{CO}	Comprimento do Comando	[m]

L_{TP}	Comprimento dos Tubos de Perfuração	[m]
m	Massa da Coluna	[Kg]
m_{fl}	Massa do fluido	[kg]
N_b	Constante da Broca	[adm.]
T_{ob}	Torque sobre a broca	[N m]
w_{mr}	Velocidade da Mesa Rotativa	[rad/s]
μ_{fl}	Viscosidade do Fluido de Perfuração	[N s/m²]
ρ	Massa específica do aço	[Kg/m³]
ρ_{fl}	Massa específica do Fluido de Perfuração	[Kg/m³]
μ_e	Coeficiente de Atrito Estático	[adm.]
μ_d	Coeficiente de Atrito Dinâmico	[adm.]
ζ	Coeficiente de Corte Empírico	[adm.]

I. Introdução

O petróleo é um dos elementos mais importantes para a economia mundial. Estima-se que o consumo diário para 2015 será de 93,6 milhões de barris. Um mercado com essas proporções só pode ser abastecido por uma estrutura produtiva bem elaborada, englobando a exploração, prospecção, refino e distribuição desta *commodity*.

Entretanto, a crescente demanda de um bem não renovável implica na busca em lugares mais difíceis de exploração. Estes necessitam não apenas de aporte financeiro e uma cadeia produtiva organizada, mas também de uma maior capacidade tecnológica. Percebe-se no Brasil esse novo cenário, em que a cadeia produtiva desloca-se cada vez mais para áreas marítimas de maior profundidade.

Dentre todas as etapas que compõe a exploração do petróleo, a perfuração é a mais cara representando 85% do custo total envolvido Rosenblatt (2006). O processo de perfuração é uma das primeiras etapas na exploração do petróleo e também a etapa que oferece maiores riscos e custos. Boa parte disso se deve a necessidade pela busca de petróleo em profundidades cada vez maiores. Os milhares de metros necessários tornam a coluna de perfuração (estrutura na qual a broca é montada) menos rígida e susceptível a vibrações. Consequentemente, sua operação inadequada pode acarretar acidentes chegando em último grau a inviabilizar toda a extração.

Se por um lado tem-se um sistema dinâmico com baixa rigidez, por outro não faltam carregamentos que estimulem uma dinâmica indesejada. Um exemplo são as forças devidas ao desbalanceamento associado a excentricidade entre o eixo de simetria da coluna e seu centro de massa. Forças de contato entre a coluna e o solo marinho ou a parede do poço representam outra situação importante. Assim como as forças de atrito, essas forças possuem características não-suaves. Todos esses fatores são fontes de vibrações indesejadas na coluna.

A vibração de uma coluna de perfuração pode ser classificada em três modos diferentes: axial, lateral e torcional. Embora vibrações elevadas ocorram em um modo específico, é comum elas se desenvolverem em mais de um modo, de forma acoplada. Como o avanço da broca é somente possível pela rotação e compressão do solo, uma interdependência entre os modos axial e torcional é algo natural. Além disso é de amplo conhecimento que as forças de desbalanceamento são dependentes da rotação.

Assim todos os modos são acoplados o que torna a resposta dinâmica muito rica. Dentre todas as possibilidades, tem-se especial interesse nos casos em que a coluna se comporta de maneira crítica, pois oferecem maiores riscos à operação. Cada uma dessas situações está relacionada a um modo de vibração específico: o *whirl*, associado à dinâmica lateral, é caracterizado quando a coluna passa a obter um movimento de rotação em torno do centro do poço; *bit-bounce*, associado ao modo axial, consiste na perda intermitente de contato entre a broca e o leito marinho; o *stick-slip*, associado a rotação e caracterizado pela ausência de rotação da broca seguido de um incremento súbito de seu valor.

Desta maneira, muitos modelos foram propostos para o estudo da dinâmica envolvida durante a perfuração. Entretanto, mesmo com os grandes avanços obtidos ainda não existe um consenso quanto ao modelo mais adequado, quer seja pela sua exatidão ou maneira como os fatores são englobados na análise. Um método que se mostrou bem-sucedido é o uso de modelos discretos. Muitos modelos se propõe a estudar apenas modos de vibrações específicos o que prejudica as conclusões visto que a dinâmica é conhecidamente acoplada. Assim sendo, uma análise dinâmica de um modelo discreto envolvendo o acoplamento axial-torção-flexão é relevante e permite uma caracterização completa dos modos de vibração existentes.

Este trabalho utiliza o modelo discreto proposto por Christoforou e Yigit (2002) descrito por quatro equações diferenciais de segunda ordem. O sistema discreto simula uma coluna de perfuração possuindo não-linearidades do tipo não-suaves. Todos os fenômenos críticos são capturados e aspectos importantes quanto ao acoplamento entre os modos são discutidos. O baixo custo computacional é uma vantagem fundamental da formulação que permite uma investigação mais profunda da dinâmica do sistema.

Simulações numéricas permitem desenvolver uma análise paramétrica capturando diversos aspectos da dinâmica de uma coluna, em especial aquelas sujeitas à comportamentos ditos críticos. Esses comportamentos podem ocorrer de forma isolada ou de maneira acoplada e, desta forma, pode-se investigar a influência de um sobre o outro. Dentre os vários aspectos, busca-se analisar os mecanismos de acoplamento entre os modos de vibrações, as maneiras de induzir ou mitigar um comportamento crítico e quais parâmetros operacionais devem ser alterados para este fim. Outra informação relevante estudada neste trabalho compreende a identificação das faixas de profundidade e rotação em que a coluna se submete a repostas dinâmicas indesejadas e quais são elas.

I.1 Revisão de Literatura

Um dos primeiros estudos na área de perfuração é feito por Finnie e Bailey (1960). Nele foi investigado métodos experimentais para a medição axial de forças resultantes e deslocamentos no topo da coluna. Pouco tempo depois conclusões importantes a respeito do modo axial já eram feitas. Garret (1962) concluiu por medições feitas em campo que a frequência de excitação das brocas tricônicas é da ordem de três vezes a frequência de rotação da coluna. Baseado nesta informação um dos primeiros modelos quanto ao modo axial é proposto por Kreisle e Vance (1970). Nele o deslocamento da broca e não uma força é idealizada segundo uma função senoidal prescrita no tempo como meio de indução de vibrações.

Em seguida fenômenos relacionados a vibração torcional foram estudados. Particularmente na década de 80 muitos estudos foram feitos. Hasley et al. (1986) investigou a influência do amortecimento e rotação no fenômeno de *stick-slip* a partir de medições observadas no campo. Dawson et al. (1987) observaram flutuações de torque no top drive e atribuíram essa variação a interrupção do movimento da broca causada pelo atrito com o fundo do poço. Também foi percebido uma relação entre os modos axial e torcional. Aarrestad et al. (1986) apresentaram um estudo teórico e experimental quanto a isso, concluindo que o acoplamento entre os modos axial e torcional pode provocar grandes flutuações na rotação.

Com isso motivou-se o estudo de modelos de corte em que o modo axial e torcional estejam acoplados e não mais prescritos no tempo. Spanos et al. (1995) investigaram o acoplamento entre os modos torcional e axial baseado em observações quanto ao padrão de corte deixado por brocas tricônicas e pelas observações feitas por Garret (1962). Além disso, uma relação empírica para a taxa de penetração também é apresentada assim como torque de reação do solo durante o corte. É visto boa correlação qualitativa entre o forçamento axial e torcional para com os valores obtidos em uma coluna real. Outro modelo de corte é proposto por Detournay et al. (1992) e destina-se ao estudo da interação broca-rocha em brocas do tipo PDC. Nele os esforços obtidos para um cortador são generalizados para a broca inteira.

Ritto et al. (2009) propuseram uma abordagem alternativa para interação broca-rocha ao considerar os aspectos estocásticos dessa interação. Em seu modelo a grande variedade de possibilidades quanto a orientação e intensidade dos esforços são mostrados como uma fonte de acoplamento entre os modos de vibração.

Anjos (2013) analisou vibrações torcionais a partir de um modelo axial-torcional. Maior enfoque foi dado a interação broca-rocha. Foram testadas duas teorias: a clássica baseada no decaimento logarítmico do torque baseado em observações no campo e a proposta por Detournay et al. (1992). Foi visto uma boa correlação entre elas proporcionando resultados qualitativos semelhantes e em alguns casos até com a mesma ordem de grandeza. Uma conclusão importante obtida em seu estudo foi que para baixas parcelas de atrito o aumento da velocidade angular pode mitigar ou induzir o *stick-slip*. Assim, não se pode garantir que o aumento das rotações sempre atenue as vibrações torcionais.

A combinação entre os modos axial e torcional também foi estudada por Divenyi (2009) e Divenyi et al. (2012). Uma análise dinâmica do comportamento axial-torcional é feita a partir do modelo proposto por Christoforou e Yigit (2002). Diversas condições operacionais foram testadas e seus resultados mostraram estar de acordo com as observações feitas em campo e aferidas em outros trabalhos. São exemplos disso a incidência do *bit-bounce* em profundidades elevadas e a possibilidade de ocorrer devido a presença do *stick-slip*.

O acoplamento entre as vibrações axiais e torcionais também é investigado em Vasconcellos (2010), porém focou-se no uso de brocas PDC. Baseado no modelo utilizado por Divenyi (2009) diagramas e espaços de fase foram obtidos para diferentes condições. Em especial destaca-se a variação da rigidez equivalente do solo. Seguindo a relação proposta por Hareland and Rampersad (1994), ela pode variar de acordo com o peso sobre a broca, área de corte e número de cortadores da broca PDC. Seus resultados mostraram-se qualitativamente de acordo com diversas observações do campo.

O estudo das vibrações laterais foi mais recente. A primeira análise de medições feitas em campo é atribuída a Vandiver e Shyu (1990). Pouco depois Jansen (1991) propôs um dos primeiros modelos para o estudo de vibrações laterais considerando o *bottom hole assembly (BHA)* modelado como um rotor desbalanceado suportado por dois mancais. Essa consideração é muito utilizada até hoje.

Diante do conhecimento dos três modos de vibração e da melhor compreensão individual desses modos, um maior esforço foi direcionado para a compreensão de sua dinâmica acoplada. Contudo dúvidas quanto ao nível de importância dos modos com relação a dinâmica da coluna existia, pois frequentemente um dos modos era desconsiderado.

Um estudo dos modos axial e lateral é feito por Christoforou e Yigit (1997) que propuseram que as vibrações laterais são causadas por carregamentos axiais. Assim, sua dinâmica é analisada pra diferentes valores de carregamentos axiais. Uma análise é feita considerando e desconsiderando esse acoplamento. Foi visto que ao considerá-lo a dinâmica se torna aparentemente caótica para parâmetros que antes não forneciam este tipo de resposta. Além disso, foi visto a contribuição de carregamentos axiais compressivos no desenvolvimento de deflexões na coluna. É importante observar que nesses tipos de modelos ao desconsiderar o modo torcional a rotação se torna inexistente e com isso, perde-se um aspecto importante da resposta.

Análises quanto aos modos lateral e torcional também foram conduzidos por Christoforou e Yigit (1999). Desta vez sendo o desbalanceamento e a rotação as fontes de excitação lateral da coluna. O fenômeno de *stick-slip* foi identificado, estando de acordo com as observações no campo. Foi visto que na ausência de contato lateral, vibrações laterais pouco influem no modo torcional. Além disso foi observado que o aumento da rotação inibe a presença do *stick-slip*, porém existe a possibilidade de estimular a presença do *whirl*.

Um outro modelo torcional-lateral é proposto por Leine (2002). Nele a fonte de excitação é o próprio fluido que circunda uma coluna descentralizada e o desbalanceamento é desconsiderado. Apesar de a interação fluido-estrutura utilizada se limitar a uma folga muito inferior à que ocorre em uma

situação real, ela se mostrou qualitativamente adequada aos testes experimentais. Uma conclusão importante obtida foi a dificuldade de ocorrer *stick-slip* e *whirl* simultaneamente, pois sua combinação foi capturada apenas em pequenos intervalos testados. Além disso, foi identificado que o *forward-whirl* ocorre quando não há contato com as paredes do poço e o *backward-whirl* na existência deste

Um dos modelos dedicados ao estudo da dinâmica global é proposto por Christoforou e Yigit (2002). Nele os três modos de vibrações estão acoplados em um sistema de cinco graus de liberdade: dois laterais, um axial, um torcional e um grau correspondente as variações de carga requerida pelo motor. Seu intuito ao incorporar o motor como grau de liberdade era possibilitar um mecanismo de atenuação das vibrações de uma coluna por meio do controle da rotação. Por meio apenas deste controle e para uma configuração específica da coluna foi mostrado que uma dinâmica periódica e adequada é possível para baixos valores de rotação. Contudo, foi também observado que o seu aumento pode induzir fenômenos críticos como *bit-bounce* e *whirl*.

Liu et al. (2012) discretizaram a coluna de perfuração em um sistema com oito graus de liberdade, se dividindo em relação aos tubos de perfuração e ao BHA. O modelo conseguiu capturar os fenômenos críticos quanto aos três modos de vibração e sua dinâmica se mostrou qualitativamente coerente com observações de campo. Contudo, o aumento do número de graus de liberdade não forneceu resultados além dos obtidos em outros trabalhos com sistemas mais simples.

Nesse contexto, um estudo importante é conduzido por Ahmandian et al. (2007). Utilizou-se um modelo em que os modos laterais-torcionais-axiais estão acoplados e, em paralelo, foi feito outro onde o modo torcional não foi incluído. Foi observado uma menor incidência de impactos laterais de pequena intensidade quando comparado ao modelo totalmente acoplado. Isso se deve a perda de rotação que a coluna sofre durante o contato com a parede do poço, o que a afastada velocidade crítica responsável pelo seu deslocamento contra esta superfície. Como a rotação é constante no modelo lateral-axial, essa perda não ocorre e o sistema continua na velocidade crítica, expondo assim a necessidade de estudar os modos de maneira acoplada.

Outros trabalhos dedicaram-se a comprovar que modelos de baixo custo computacional podem capturar importantes aspectos dinâmicos de uma coluna. Dentre eles, Richard et al. (2007) estudaram um modelo discreto utilizando o modelo de corte proposto por Detournay et al. (1992). Uma das principais limitações da abordagem foi a redução da coluna a dois graus de liberdade. Entretanto, segundo os autores, os resultados obtidos comparados aqueles obtidos pelo método dos elementos finitos apontaram uma relação qualitativa adequada.

Liao et al. (2011) utilizou-se de métodos experimentais para validar a utilização de modelos discretos. Um modelo torcional-lateral é proposto por meio de um sistema de três graus de liberdade (dois laterais e um torcional). A coluna é analisada como um rotor e o desbalanceamento de uma massa concentrada é a fonte excitadora do modo lateral. Esse arranjo pode ser associado a um rotor Jeffcot e seus resultados foram comparados com um teste experimental, mostrando boa correlação. Desta forma, concluiu-se mais uma vez que um modelo discreto é capaz de representar a dinâmica dos modos lateral e torcional da coluna de perfuração.

I.2 Organização do Trabalho

Este trabalho é divido em cinco capítulos. O primeiro é dedicado a fornecer uma concepção básica dos principais aspectos que serão estudados e seu posicionamento em relação a literatura. O segundo capítulo se divide quanto a abordagem dos aspectos constitutivos e dinâmicos do processo de perfuração. Nesta primeira etapa destacam-se além dos componentes da própria coluna, os sistemas de içamento e rotação. Estes são responsáveis pelos dois únicos parâmetros operacionais

controláveis durante a perfuração. Em seguida discutem-se as respostas dinâmicas da coluna quanto as vibrações axiais, torcionais e laterais. Observações feitas no campo e em outros trabalhos são apresentadas, o que possibilita uma análise qualitativa dos resultados numéricos obtidos e validar o modelo.

As equações, hipóteses e parâmetros que compõe o modelo são apresentados no capítulo quatro. No quinto são discutidos os resultados numéricos. Esse capítulo se inicia pelo estudo dos espaços de fase, o qual é subdivido em casos, cada um representando um comportamento crítico da coluna. Por meio desta ferramenta é possível compreender os mecanismos de acoplamento e uma mudança local nos parâmetros operacionais. A análise dos diagramas de valores máximos vem em seguida, onde uma vasta quantidade de condições e situações são testadas e a incidência dos comportamentos críticos capturados. Nesta etapa também é testada a sensibilidade da coluna quanto as condições iniciais e identificados intervalos caóticos.

II. Aspectos Gerais de uma Coluna de Perfuração

Uma coluna de perfuração é definida basicamente como uma sequência de tubos em cuja extremidade é montada uma broca. Seu avanço, segundo o método de perfuração rotativa, é dado pela ação combinada da rotação e compressão ao solo. Apesar de ser um processo teoricamente simples, um conjunto enorme de equipamentos, sistemas e estruturas são necessários para uma operação bem sucedida.

Este capítulo se inicia com a discussão dos aspectos construtivos de uma coluna. Devido à grande quantidade de componentes entende-se por construtivos apenas aqueles que se relacionam diretamente a dinâmica da coluna. Dessa maneira serão abordados, além das partes que a compõe, os sistemas responsáveis por sua rotação e movimentação axial. Esses sistemas são responsáveis pelos únicos parâmetros operacionais controláveis durante a perfuração.

Mesmo quando bem projetada, uma coluna pode ter sua operação comprometida devido a uma dinâmica indesejada. Por possuir milhares de metros de comprimento, sua rigidez é pequena e isso a expõe à vibrações que distorcem sua dinâmica para um comportamento ineficiente. Nessa situação, escolhas equivocadas para os valores de rotação e compressão da broca podem induzir ou facilitar vibrações mais severas.

Sabe-se que uma coluna pode vibrar em três modos diferentes: axial, lateral e torcional. Cada um desses modos possui, sob certas condições, um comportamento crítico característico. Neste contexto, finaliza-se o capítulo com a discussão dos aspectos dinâmicos de uma coluna de perfuração. Cada modo de vibração é abordado individualmente junto com seus comportamentos críticos e principais consequências associadas a eles.

II.1 Aspectos Construtivos

Ao conjunto de todos os elementos necessários para a perfuração é dado o nome de sonda. Apesar de ser de vários tipos, sua estrutura produtiva básica se mantem a mesma. Uma representação dela é mostrada na figura II.1. Como pode ser observado, sua elevada quantidade de componentes torna inviável uma caracterização individual adequada. Desta maneira será dado enfoque a coluna e aos sistemas de içamento ou movimentação e rotação.

Na representação feita é visto que a coluna é montada a partir de uma sucessão de dutos que se diferenciam pelo diâmetro e sua espessura. Isto se deve a função que desempenham. Os tubos de perfuração são destinados apenas a fornecer comprimento suficiente para broca alcançar a profundidade necessária. A resistência ou rigidez da coluna é dada pelos comandos e, por essa razão, apresentam elevados diâmetros e espessura. Consequentemente seu comprimento não deve ser elevado e chega a poucas centenas de metros. Já os tubos de alto peso visam oferecer uma transição entre as dimensões destes dois tubos abordados.

Outro elemento importante são os estabilizadores que são montados entre os comandos a fim de eliminar ou reduzir sua deflexão a um patamar aceitável. Além disso, são cuidadosamente posicionados para garantir que o ponto neutro se encontre nos comandos e não nos tubos de perfuração. Com isso, controla-se a carga de flambagem induzindo-a a, se acontecer, ocorra neles.

Por fim, é montada a broca na extremidade da coluna. Elas podem ser de partes móveis, representadas principalmente pelas brocas tri-cônicas, ou partes fixas, em que se destacam as do tipo PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*). Há ainda um terceiro tipo, denominado brocas quimeras, que se compõe de partes móveis e fixas. Entretanto, seu uso ainda é mais restrito que as demais.

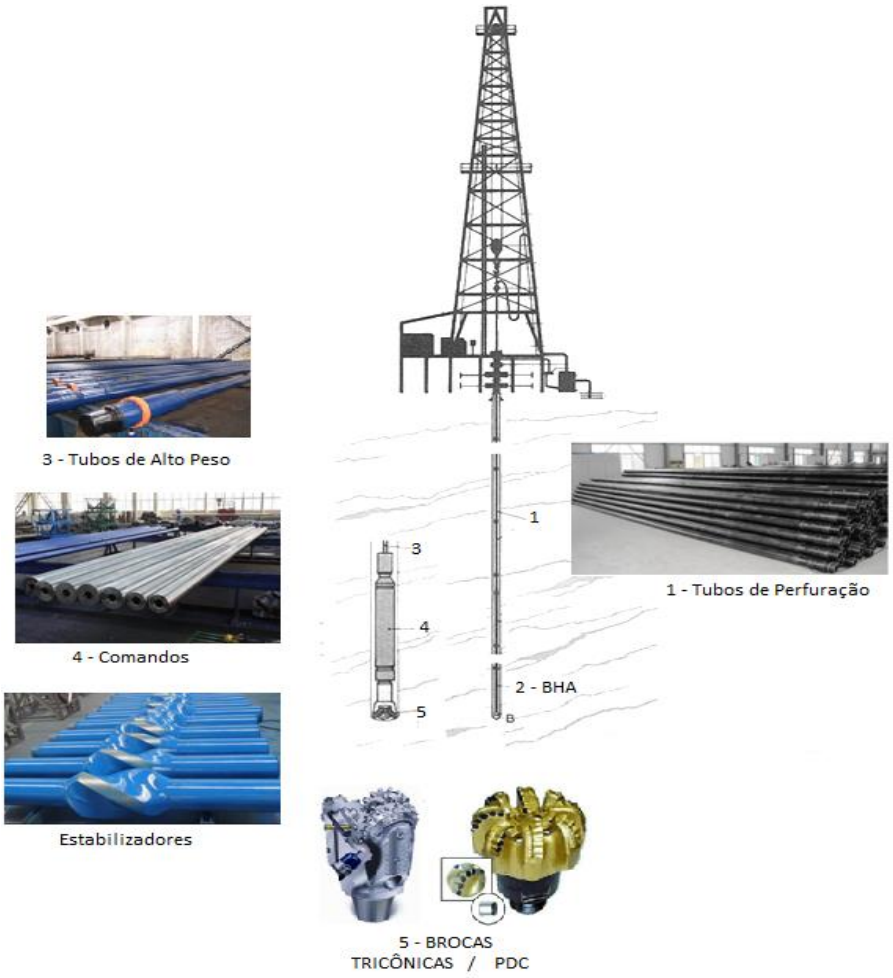


Figura II.1 Esquema Representativo de uma Estrutura Básica de Perfuração e Seus Principais Componentes

Adaptado de http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/petroleum.html (08/02/2016)

As brocas com partes móveis possuem de um a quatro cones rolantes, apresentando fileiras de dentes em cada um. Conforme a broca é rotacionada, a rocha é triturada pelos seus cones e seus dentes são solidariamente rotacionados. Seu mecanismo de corte envolve a combinação de raspagem, lascamento, esmagamento e erosão por jato de lama (fluido de perfuração). Dependendo das características da broca, um mecanismo se sobrepõe aos outros. Por exemplo, para perfuração em rochas moles, o efeito de raspagem é predominante e para as rochas duras, o mecanismo de esmagamento (Thomas, 2001; Plácido, 2007). Já o mecanismo de corte das brocas PDC é predominantemente de cisalhamento.

É comum agrupar os comandos, estabilizadores e a broca em uma sub-região da coluna denominada BHA (*Bottom Hole Assemble*). Por interagir diretamente com a formação submarina, ela é submetida a carregamentos e torques que podem induzir fortes vibrações. Essas estão relacionadas ao tipo de broca usado. Segundo Chevallier (2000), brocas do tipo PDC são mais susceptíveis a vibrações torcionais e laterais enquanto que as tricônicas a vibração axial é mais significativa.

Além disso, o BHA é responsável por fornecer o peso necessário a compressão do solo marinho. Esse controle é possível pelo conjunto de equipamentos que compõe o sistema de movimentação, cujo esquema é mostrado na figura II.2. Observe o bloco de coroamento onde se encontra um conjunto de polias fixas. Por meio de cabos se conectada ao seu par móvel conhecido como catarina. Seu deslocamento é possível por meio de um guincho dotado de freios, o que torna possível controlar o movimento axial e a quantidade de peso que é usada para o avanço da broca. A carga que comprime o solo é dada o nome peso sobre a broca sendo um parâmetro operacional importante da perfuração.

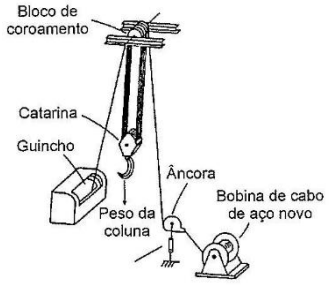


Figura II.2 Componentes do Sistema de Movimentação
FONTE: www.tecnicodepetroleo.ufpr.br (02/08/2015)

O sistema de rotação é composto basicamente pela mesa rotativa e por um tubo não-circular conhecido como *kelly*, ambos são apresentados na figura II.3(a). A rotação da mesa é transferida à coluna e a sua seção transversal do *kelly* é não-circular para facilitar a aplicação do torque. Outra variante desse sistema é mostrada na figura II.3(b). Conhecido como top drive, esse mecanismo dispensa o *kelly* e a rotação é aplicada diretamente à coluna. Além disso, possibilita a coluna ser manobrada com rotação e circulação de fluido de perfuração, o que é de grande valor para poços de alta inclinação ou horizontais. O controle da rotação é feito pelo motor acoplado à mesa rotativa.

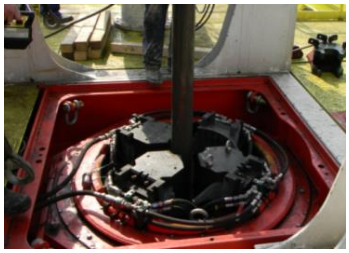


Figura II.3(a) Mesa Rotativa e Kelly



Figura II.4(b) Top Drive

FONTE: WWW.WEIKU.COM (02/08/2015)

II.2 Aspectos Dinâmicos de uma Coluna de Perfuração

Boa parte das ineficiências ou mesmo acidentes durante a perfuração são consequência de vibrações indesejáveis. Atribui-se a elas a redução da rotação transmitida à broca; falhas mecânicas não programadas devido à fadiga ou ao desgaste excessivo; e falhas consequentes das altas cargas de impacto com as paredes do poço. Essas cargas podem danificar os instrumentos de medição necessários a continuidade segura da operação, ou mesmo comprometer a integridade do poço e/ou da coluna. Isso pode se traduzir em um elevado prejuízo devido ao tempo gasto para a sua retirada e desvio do poço, Divenyi (2009).

Esse cenário pode ser minimizado pelo conhecimento dos modos de vibração e dos seus mecanismos de interação. Isso ajuda a evitar a escolha errada de parâmetros operacionais durante uma situação crítica. Visando uma melhor compreensão da vibração da coluna, apresenta-se uma introdução aos principais aspectos de cada modo de vibração.

II.2.1 Vibrações Axiais

As vibrações axiais excitam a coluna de perfuração ao longo de seu comprimento e, por consequência, influenciam ao peso sobre a broca, sendo responsável por sua variação. A figura II.4 mostra a variação no tempo do peso sobre a broca.

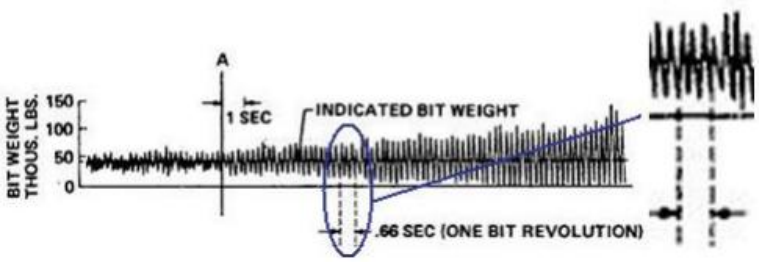


Figura II.4 Surgimento das Vibrações Associadas ao Padrão Lobular da Superfície da Rocha

FONTES: DAREING, 1982 / DYVENI, 2009

Quando as amplitudes das excitações axiais são grandes o suficiente para a broca perder o contato com a formação, tem-se o caso crítico deste modo denominado *bit-bounce* (figura II.5). Esse fenômeno é caracterizado por fortes impactos entre a broca e o fundo do poço, acarretando uma abrupta redução de sua vida útil (Chevallier, 2000). Além disso, esses esforços podem causar uma deflexão do BHA, acoplando-se ou mesmo excitando a vibração lateral da coluna (Shyu, 1989; Dunayevsky, 1993).

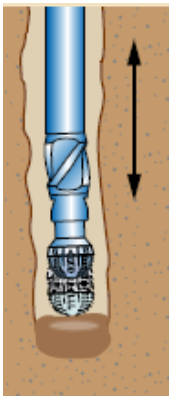


Figura II.5 Fenômeno de Bit-Bounce

FONTE: http://www.slb.com/resources/other_resources/brochures/drilling/drillstring_vibrations.aspx (02/08/2015)

O modo de vibração axial está fortemente relacionado à interação broca-rocha. A dureza da formação, suas irregularidades e o tipo de broca são características essenciais dessa interação. Desta forma, qualquer combinação destes fatores pode induzir uma resposta dinâmica diferente para a coluna.

Através de observações no campo é conhecida a maior propensão que as brocas de cones rolantes possuem quanto a este modo de vibração. Uma suposta causa é apresentada por Dareing (1982) que, por meio de amostras perfuradas, identificou um padrão de três picos em suas superfícies (figura II.6). A rotação da broca sobre esse padrão introduz uma excitação axial (Li et al., 2007), sendo uma das principais fontes de acoplamento torcional-axial, o que explica as observações feitas por Garret (1962), e corrobora com os modelos propostos por Kreisle e Vance (1970) e Spanos et al. (1995).



Figura II.6 Padrão da Formação Gerado pela Interação com Brocas Tricônicas

FONTES: DAREING, 1982; DIVENYI, 2009

No caso das brocas PDC, a excitação axial é proveniente da maneira como os *bits* da broca estão dispostos, pois o ângulo por eles formados, conforme figura II.7, é responsável por induzir uma componente de força axial durante o corte. A maior rigidez axial conferida por essa broca é consequência do mecanismo de fragmentação da rocha, que neste tipo é por cisalhamento e não por compressão. Segundo Christoforou e Yigit (2002), para as brocas sem partes móveis a frequência de excitação axial pode ser considerada da mesma ordem da frequência de rotação da coluna.

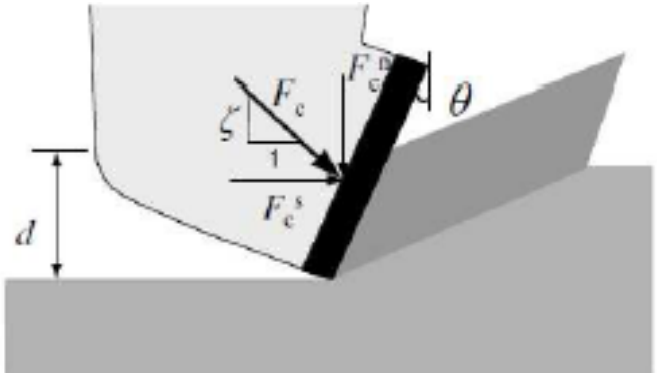


Figura II.7 Forças agindo em um cortador da broca PDC
FONTE: HOFFMAN, 2006

II.2.2 Vibrações Torcionais

Uma vez que a maior parte da coluna é composta por tubos de perfuração e estes possuem pequena seção transversal e grandes comprimentos, sua rigidez torcional é pequena. Isso torna a coluna propensa a vibrar neste modo. Com isso, a rotação constante fornecida à coluna não necessariamente se traduz na rotação constante da broca, Chevallier (2000). Esse tipo de vibração é responsável por falhas por fadiga, principalmente, nas conexões dos comandos e dos tubos de perfuração, danos as brocas e aumento do tempo de perfuração da sonda (Brett, 1992; Elasayed, 1997).

As vibrações torcionais são geralmente detectadas na superfície, pois a variação de rotação induz uma flutuação na potência de alimentação do motor (Ashkey et al., 2001; Wu et al., 2012). Sua causa está relacionada principalmente com a interação broca-rocha, contudo outros tipos de interação desempenham papel significativo, como a interação entre as paredes da coluna-poço (Sananikone et al., 1992).

O comportamento crítico do modo torcional conhecido como *sitk-slip* é definido pela combinação intermitente de duas fases. A primeira, conhecida como *stick*, é caracterizada pela ausência de rotação da broca devido ao torque resistivo por ela encontrado. Nessa fase, a coluna armazena energia torcional até ser o suficiente para vencer essa imposição. Quando isso ocorrer, tem-se a fase seguinte conhecida como *slip*, em que toda a energia armazenada é liberada sob a forma de energia cinética de rotação em um intervalo muito curto de tempo. Nessa fase, percebem-se amplitudes muito superiores aos valores da rotação da mesa. Normalmente, a diferença é da ordem de duas a três vezes o valor fornecido pela mesa rotativa, conforme mostrado na figura II.8.

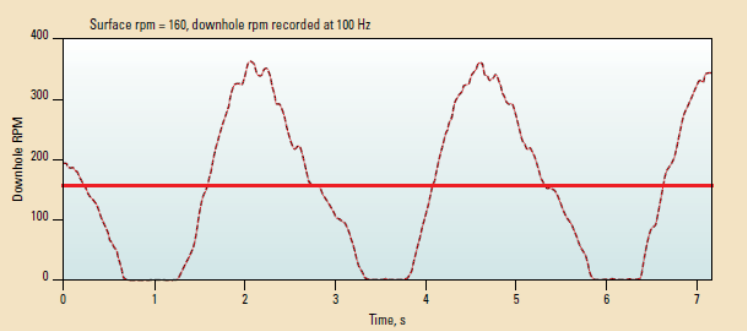


Figura II.8 Consequência do Stick-Slip na Velocidade de Perfuração
FONTE: http://www.slb.com/resources/other_resources/brochures/drilling/drillstring_vibrations.aspx (02/08/2015)

O *stick-slip* é um caso de vibração auto excitada sob baixas rotações e costuma desaparecer com o seu aumento. Entretanto, segundo Christoforou e Ygit (2002), o aumento indiscriminado da rotação pode induzir amplitudes laterais suficientes para permitir o contato com as paredes do poço. É importante observar que outros fatores além da rotação podem causar o fenômeno de *stick-slip*. A figura II.9 mostra o caso do peso sobre a broca excessivo desempenhando um papel importante no desenvolvimento de oscilações deste caso crítico (Richard, 2001).

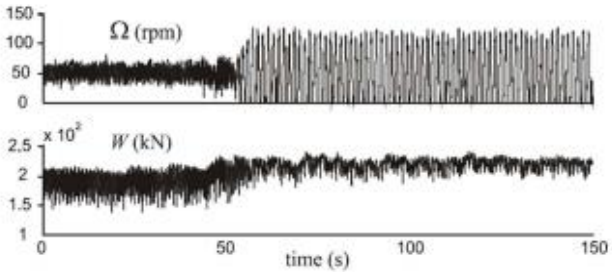


Figura II.9 Relação entre o Stick-Slip e o Peso Sobre a Broca
FONTE: RICHARD, 2001

II.2.3 Vibrações Laterais

O modo de vibração lateral foi o último a ser identificado e investigado. Isso se deve ao fato de grande parte das vibrações laterais estarem contidas na região conhecida como BHA. Por estar sob compressão, essa parte da coluna tem sua rigidez diminuída, tornando-se mais propensa a deflexões. Esse efeito compressivo é consequência direta da resistência ao avanço da broca pelo leito marinho e torna o modo axial e o lateral acoplados.

As vibrações laterais possuem alta amplitude e frequência (Chevallier, 2000), sendo dissipadas rapidamente (Payne, 1995; Divenyi, 2009) devido ao fluido de perfuração e sua restrição pelo contato com as paredes do poço.

Outra possível fonte de excitação deste modo é o desalinhamento entre o eixo de simetria e o centro de massa da coluna causado por variações nos processos de fabricação, montagem da coluna, acoplamento de sensores no BHA, dentre outros. Sabe-se que essas forças de desbalanceamento são diretamente relacionadas à rotação da coluna, acoplando o modo torcional ao lateral.

Dentre os três tipos de vibrações, o lateral é crítico para 75% das falhas na coluna de perfuração, sendo boa parte por fadiga (Berlioz et al., 1996; Sotomayor et al., 1997; Krieselset al.,1999, Zhu e Liu, 2013). Essas vibrações também podem causar danos severos as paredes do poço, comprometendo sua integridade e da própria coluna (Mason e Sprawls, 1998).

Sugiura e Jones (2007) observaram que vibrações laterais são mais predominantes nas brocas PDC, o que pode ser confirmado a partir da figura II.10 que mostra a comparação entre vibrações com diferentes brocas. Isso justifica a maior direcionabilidade exibida pelas brocas tricônicas (Borycz, 2012). Essa maior propensão quanto aos modos laterais pode ser explicado pela menor frequência de excitação axial das brocas PDC, permitindo maiores rotações e com isso amplificando forças de desbalanceamento existentes na coluna.

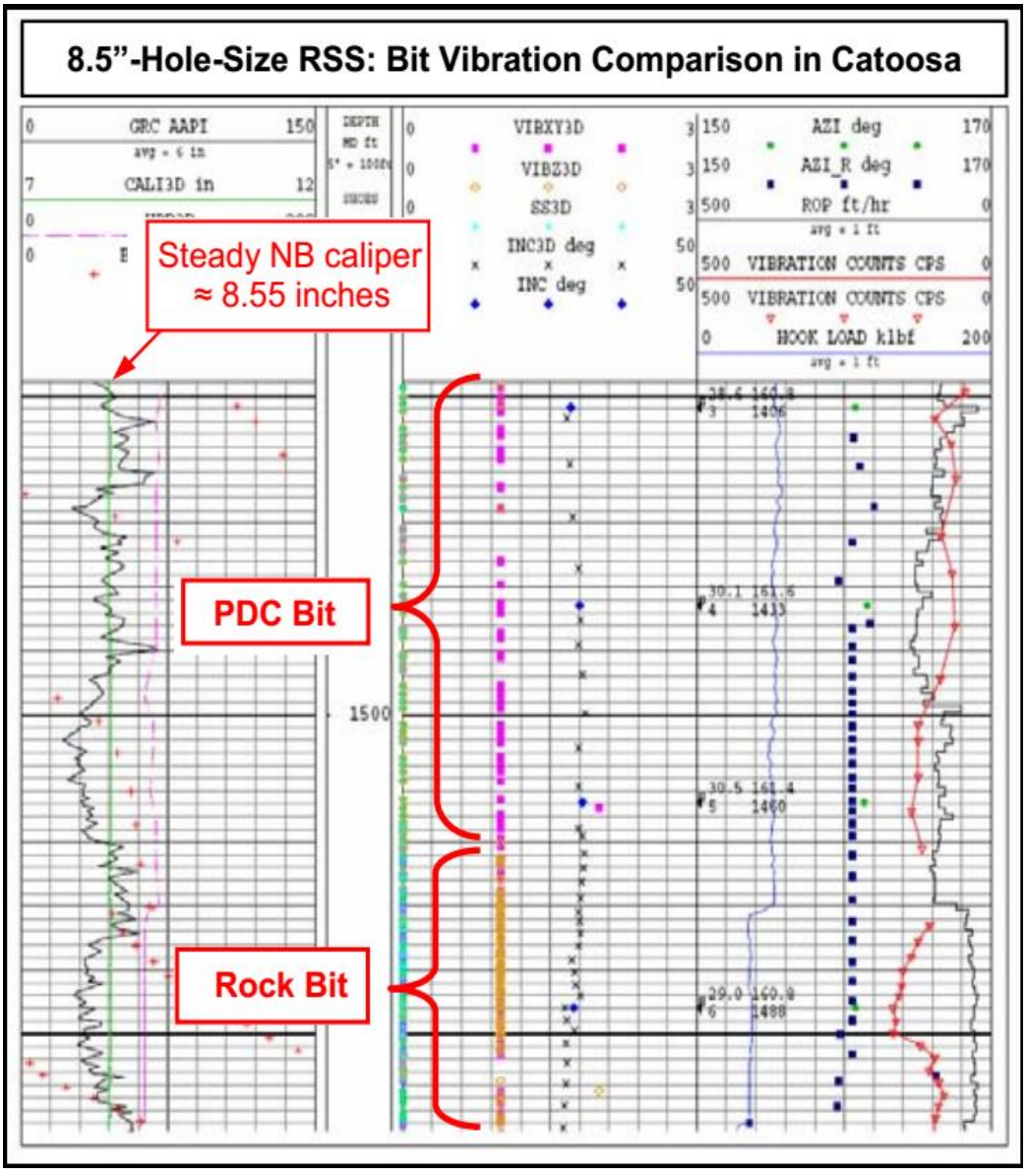


Figura II.10 Comparação entre as vibrações dominantes no uso de brocas PDC e Tricônicas (Rockbit). Vibrações laterais (VIBXY3D = 1) dominantes na broca PDC e vibrações axiais (VIBZ3D = 1) dominantes nas brocas tricônicas

*FONTE: **SUGIURA** E JONES 2007*

Entretanto, é importante observar que vibrações laterais em trechos superiores da coluna podem ser detectados na superfície pelo movimento da catarina, fenômeno conhecido como chicoteamento, ou *whipping*.

Assim como os outros modos, o modo lateral apresenta um caso crítico próprio conhecido como *whirl*. Esse tipo de comportamento é comum em máquinas rotativas desbalanceadas. Da mesma forma que nas maquinas rotativas, oscilações laterais são causadas principalmente pelo desbalanceamento de massa, ou qualquer desalinhamento existente. Isso induz uma força que tende a causar uma deflexão na coluna ou no eixo de um rotor (figura II.11).

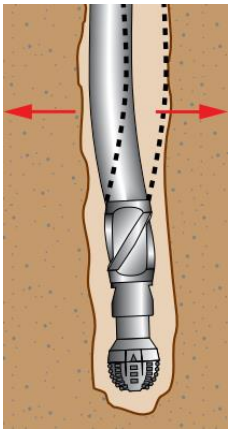


Figura II.11 Deflexão Lateral da Coluna devido ao Desbalanceamento

FONTE: *http://www.slb.com/resources/other_resources/brochures/drilling/drillstring_vibrations.aspx (02/08/2015)*

A ação conjunta dessa deflexão sob a ação da rotação provida pela mesa rotativa confere a coluna um segundo movimento de rotação, dessa vez em torno do eixo do poço. Baseado na orientação deste movimento, o *whirl* pode manifestar-se de duas maneiras distintas: caso esse movimento seja solidário à rotação tem-se o *forward whirl* e se contrário, um *backward whirl*. Uma representação destes fenômenos é mostrada na figura II.12.

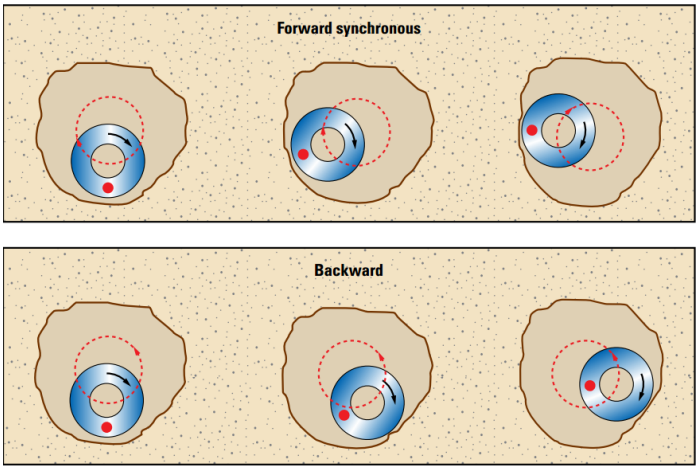


Figura II.12 (A) Forward Whirl (B) Backward Whirl

FONTE: *http://www.slb.com/resources/other_resources/brochures/drilling/drillstring_vibrations.aspx (02/08/2015)*

O motivo para estes dois comportamentos distintos se deve as forças de atrito. Em certas magnitudes elas são capazes de impor à rotação em torno do centro do poço um sentido contrário ao provido pela mesa rotativa. Consequentemente é possível iniciar um *backward whirl* a partir de um caso de *forward whirl* quando ocorre o contato com as paredes do poço. Outro aspecto importante é que apesar dos problemas gerados em decorrência da direcionabilidade impostos pela vibração lateral, em certas ocasiões ela é desejada, como no caso da perfuração direcional (Payne, 1992; Dykstra, 1996).

III. Modelo Matemático

Este capítulo apresenta um modelo matemático para descrever a dinâmica de uma coluna de perfuração. O modelo proposto é baseado no trabalho de Christoforou e Yigit (2002). A partir do esquema mostrado na figura III.1, a coluna pode ser considerada como um sistema discreto segundo a abordagem de parâmetros concentrados. Nesses sistemas, as resistências quanto às deformações mecânicas são substituídas pela rigidez equivalente de molas e os mecanismos dissipativos por amortecedores. Detournay et al. (2007) e Liao et al. (2011) mostraram que modelos discretos deste tipo representam de forma consistente a dinâmica de uma coluna.

Os graus de liberdade do sistema estão relacionados aos modos de vibração torcional, axial e lateral da coluna. Na figura III.1 as reações decorrentes das interações broca-rocha (F_{ob} e T_{ob}) e entre as paredes do poço e coluna (Fc_r e Fc_θ) tornam o sistema não-suave devido a existência ou não do contato. Além disso, tais reações são as principais responsáveis pelo acoplamento entre os modos. Ainda nessa figura estão representados a rigidez equivalente dos modos axial, torcional e lateral pelas molas k_a, k_t, k_r e seus mecanismos dissipativos pelos amortecimentos c_a, c_t, c_r e c_θ. Note também que a excentricidade e_o também é considerada no modelo. Apenas a massa do BHA é considerada para o modo lateral, pois apenas esta região da coluna está sob compressão.

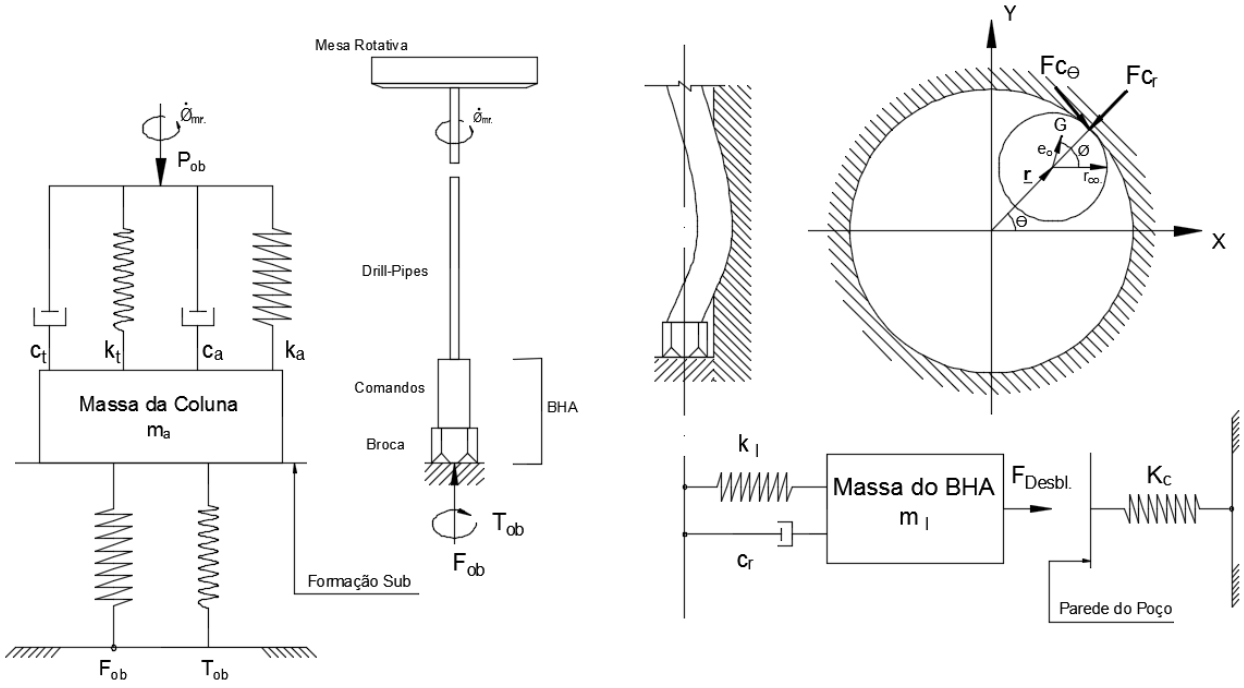


Figura III.1Esquemático da Coluna de Perfuração e Sistemas Massa-Mola-Amortecedor Equivalentes

O modo lateral pode ser analisado com o auxílio do esquema mostrado na figura III.1. Nele a posição da coluna é caracterizada por duas componentes: radial e angular. Desta forma, necessitam-se dois graus de liberdade para esse modo. Para a descrição do movimento lateral, o centro do poço é considerado como a origem do sistema coordenado. Com base nisso, aplica-se a segunda lei de Newton.

$$\sum F = m_{lateral}\ddot{\boldsymbol{r}} \qquad \text{[III.1]}$$

onde o vetor aceleração é obtido a partir da derivação sucessiva da posição lateral da coluna.

$$\boldsymbol{r} = (r + e_o\cos(\emptyset - \theta)\,\boldsymbol{r_0} + e_o\text{sen}(\emptyset - \theta)\boldsymbol{\theta_o}\ddot{\boldsymbol{r}} \qquad \text{[III.2]}$$

$$\ddot{\boldsymbol{r}} = \left(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 - e_o\dot{\emptyset}^2\cos(\emptyset - \theta) - e_o\ddot{\emptyset}\text{sen}(\emptyset - \theta)\right)\boldsymbol{r_0} + (r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} - e_o\dot{\emptyset}^2\text{sen}(\emptyset - \theta) + e\ddot{\emptyset}\cos(\emptyset - \theta))\boldsymbol{\theta_0} \qquad \text{[III.3]}$$

Dessa maneira, são apresentadas as equações pertinentes ao modo de vibração lateral. Onde, a equação III.4 refere-se ao grau de liberdade radial e a equação III.5 à rotação em torno do eixo do poço.

$$\left(m + m_f\right)\left(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2\right) + k_r r + c_h\dot{r} = (m + mf)e_0\left[\dot{\emptyset}^2\cos(\emptyset - \theta) + \ddot{\emptyset}\text{sen}(\emptyset - \theta)\right] - F_r \qquad \text{[III.4]}$$

$$(m + mf)\left(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}\right) + c_h r\dot{\theta} = \left(m + m_f\right)e_0\left[\dot{\emptyset}^2\text{sen}(\emptyset - \theta) - \ddot{\emptyset}\cos(\emptyset - \theta)\right] - F_\theta \qquad \text{[III.5]}$$

É importante notar na equação III.4 que a coluna mesmo em uma condição operacional eficiente, irá apresentar um *whirl* de baixa amplitude devido a existência da excentricidade. A rotação em torno de um eixo que não seja o de simetria é indesejado, porém esta somente se tornará crítica quando ocorrer contato com as paredes do poço. Nesta situação problemas como desgaste excessivo, perda de sensores e outros acessórios podem ocorrer, além de outras consequências mais graves já vistas. Caso contrário a presença do um *whirl* de baixa amplitude não deve implicar em problemas durante a operação. Isto será verificado durante as simulações numéricas. Observe também que na equação III.5 não há outro mecanismo dissipativo além do amortecimento devido ao arrasto hidrodinâmico. Desta maneira este grau de liberdade é mais sensível a variações bruscas em suas respostas.

As equações que definem os modos axial e torcional podem ser obtidas pela segunda lei de Newton considerando o esquema mostrado na figura III.1. Iniciando o estudo pelo modo axial e considerando como positivas qualquer força atuante no sentido da gravidade tem-se:

$$\sum F = m_{coluna}\ddot{z} \qquad \text{[III.6]}$$

$$-k_a z - c_a\dot{z} - F_o + m_{caluna}g - F_{ob} = m_{coluna}\ddot{z} \qquad \text{[III.7]}$$

Um parâmetro importante está implícito na equação III.7. De acordo com o princípio da perfuração rotativa, apenas a rotação não é suficiente para o avanço da broca. Uma componente axial a favor deste deslocamento deve existir. Com isso a tração que suporta a coluna deve ser inferior ao peso dela própria. Esta componente é conhecida como peso sobre a broca (P_{ob}) e trata-se de um parâmetro operacional controlável assim como a rotação da coluna. Desta maneira a equação que representa o modo axial é então obtida.

$$m_{coluna}\ddot{z} - c_a\dot{z} - k_a z = P_{ob} - F_{ob} \quad \text{[III.8]}$$

Ainda com base na figura III.1 o modo torcional é avaliado. A segunda lei de Newton é aplicada em relação ao centro de massa e deve considerar os forçamentos dos modos lateral e axial que induzem torques.

$$\sum M = J\ddot{\emptyset} \quad \text{[III.9]}$$

$$-k_t\emptyset - c_t\dot{\emptyset} - c_r e_o \text{sen}(\emptyset - \theta) + c_\theta e_o \cos(\emptyset - \theta) + T_{ob} - F_r e_o \text{sen}(\emptyset - \theta) + F_\theta\left(\frac{De_{co.}}{2} - e_o \cos(\emptyset - \theta)\right) = J\ddot{\emptyset}$$

Rearranjando,

$$J\ddot{\emptyset} + c_t\dot{\emptyset} + k_t\emptyset + c_r e_o \text{sen}(\emptyset - \theta) - c_\theta e_o \cos(\emptyset - \theta) = T_{ob} - F_r e_o \text{sen}(\emptyset - \theta) + F_\theta\left(\frac{De_{co.}}{2} - e_o \cos(\emptyset - \theta)\right) \quad \text{[III.10]}$$

A seguir as componentes não-suaves são descritas. Para o modo lateral elas se fazem presentes quando a deflexão é elevada o suficiente para haver contato com as paredes do poço. Nessa situação as paredes do poço exercem uma reação radial (Fc_r) que se opõe a deflexão da coluna. Como a rigidez equivalente da formação rochosa (k_c) é muito superior à da coluna é suposto a condição de choque elástico, consequentemente não há amortecimento. Além disso, o deslocamento relativo entre estas duas superfícies induz uma reação tangencial (Fc_θ) referente ao atrito.

As equações (III.11) e (III.12) representam as reações radial e tangencial respectivamente.

$$Fc_r = \begin{cases} k_c\left(r + \frac{De_{co.} - D_{well}}{2}\right), \text{ se } r + \frac{De_{co}}{2} > \frac{D_p}{2} \\ 0, \quad \text{se } r + \frac{De_{co}}{2} < \frac{D_p}{2} \end{cases} \quad \text{[III.11]}$$

$$Fc_\theta = \begin{cases} \mu Fc_r = f(V_{rel})Fc_r, \quad \text{se } r + \frac{De_{co.}}{2} > \frac{D_p}{2} \\ 0, \quad \text{se } r + \frac{De_{co}}{2} < \frac{D_p}{2} \end{cases} \quad \text{[III.12]}$$

onde De_{co} representa o diâmetro externo dos comandos e D_p o diâmetro do poço.

Por ser uma reação de atrito, Fc_θ, deve variar quando a coluna está em repouso (condição de atrito estático), ou em movimento (atrito dinâmico). Para isso o atrito deve ser definido por meio de uma função como na equação III.12 e representada por $f(V_{rel})$.

A forma mais usual de tratar a variação entre estes extremos de atrito é por meio de funções de salto. Com isso a transição entre as forças dissipativas são caracterizadas seguindo um padrão semelhante à figura III.2.

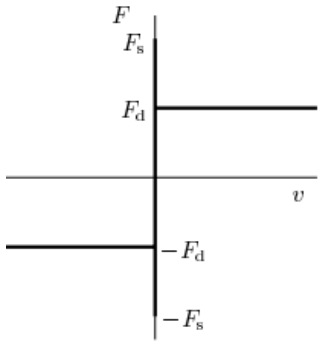


Figura III.2Variação da Força de Atrito

FONTE: BIFURCATIONS IN DISCONTINUOUS MECHANICAL SYSTEMS OF FILIPPOV-TYPE, LEINE

Entretanto, esta abordagem não representa de forma realista a variação do atrito. Uma maneira mais adequada seria a suavização desta, como mostrada na figura III.3.

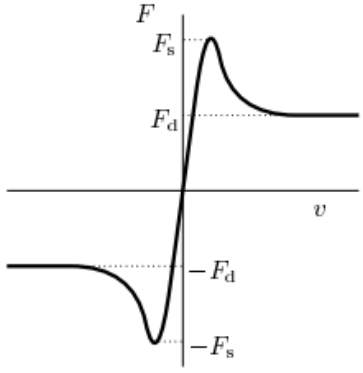


Figura III.3Variação Contínua da Força de Atrito

FONTE: BIFURCATIONS IN DISCONTINUOUS MECHANICAL SYSTEMS OF FILIPPOV-TYPE, LEINE

Uma forma de suavizar a função de salto foi elaborada por Leine (2002) e apresentada em Divenyi (2009) e Divenyi et al. (2012). Prescrita em termos de variáveis relacionadas a velocidade, esta função é definida para esse modo a equação III.13.

$$f(V_{rel}) = \frac{2}{\pi}\arctan(\varepsilon V_{rel})\left(\frac{\mu_{est.}-\mu_{din.}}{1+\tau|V_{rel}|}+\mu_{din.}\right) \quad \text{[III.13]}$$

Nela $\mu_{est.}$e $\mu_{din.}$representam os atritos estáticos e dinâmicos. Os parâmetros ε e τ são coeficientes numéricos adimensionais responsáveis pela suavização da curva de atrito. A velocidade utilizada, V_{rel}, é a velocidade relativa entre a coluna e o poço, ou seja, a velocidade atuante entre as duas superfícies.

Durante o contato, há dois movimentos ocorrendo simultaneamente: a rotação em torno do eixo de simetria do poço (definido a partir deste momento como giro) e a rotação em torno do eixo de simetria da coluna. Isto é representado na figura III.4.

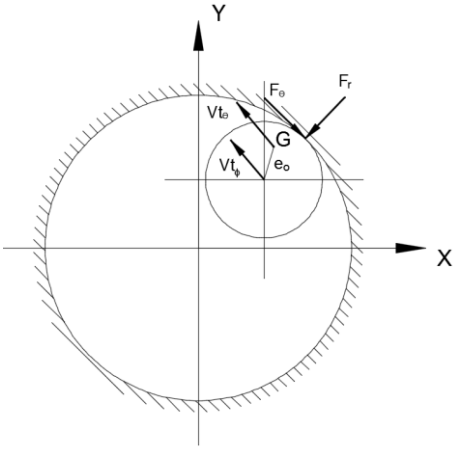


Figura III.4 Velocidades Tangenciais do Movimento de Giro e Rotação

Assim a velocidade relativa, definida pela equação III.14, é um somatório das componentes tangenciais destes dois movimentos.

$$V_{rel} = \dot{\emptyset} r_{co.} + \dot{\theta} r \qquad \text{[III.14]}$$

Outra característica importante da equação III.13 é que ao relacionar o atrito com a velocidade, a função também captura as mudanças de sentido da força de atrito. Isto pode ocorrer durante a transição entre o *forward* e o *backward whirl* por exemplo.

Os modos axial e torcional compartilham a mesma condição de contato por estarem relacionados a rotação e ao avanço da broca. Seus forçamentos não suaves representados pela força sobre a broca (F_{ob}) e torque sobre a broca (T_{ob}) compõe o modelo de interação broca-rocha proposto por Spanos et al. 1995. Utilizado em Divenyi 2009 e Divenyi et al. 2012 ele mostrou-se capaz de descrever as principais características dinâmicas reportadas para o modo axial e torcional incluindo seu acoplamento.

Ao contrário do sugerido no esquema da figura III.1, o leito marinho não é perfeitamente plano e apresenta irregularidades aleatórias. Contudo, observações feitas no campo após a perfuração mostram um perfil senoidal de três picos na formação quando se perfura com uma broca tricônica. Isso é representado na figura III.5.

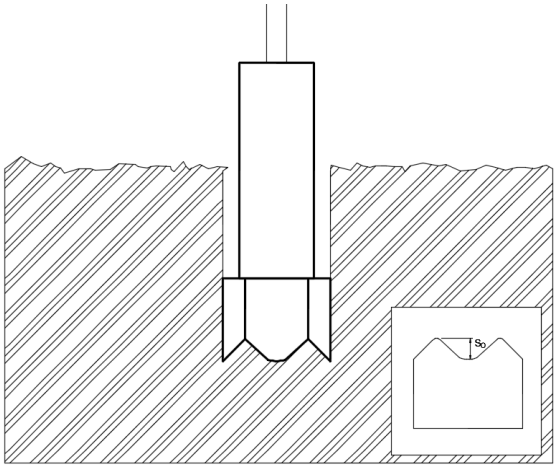


Figura III.5 Esquemático do Leito Marinho e Irregularidade

Com base nisso, são apresentados as não suavidades do modo axial e torcional:

$$F_{ob} = \begin{cases} k_c[z - s_o \text{sen}(n_b \emptyset)], & \text{se } z < S_o \text{sen}(n_b \emptyset) \\ 0, & \text{se } z > S_o \text{sen}(n_b \emptyset) \end{cases} \quad \text{[III.15]}$$

$$T_{ob} \begin{cases} F_{ob}\left[\frac{2}{3} r_h f(\dot{\emptyset}) + \zeta \sqrt{\frac{D_p}{2}\delta_c}\right], se \quad z < S_o \text{sen}(n_b \emptyset) \\ 0, \quad \text{se } z > S_o \text{sen}(n_b \emptyset) \end{cases} \quad \text{[III.16]}$$

Segundo o modelo, a formação submarina é substituída por uma mola de elevada rigidez (k_c) e seu deslocamento é uma função da rotação ($\emptyset$). Além disso uma irregularidade (s_o) e um fator de correção para o tipo de broca (n_b) são admitidos para reproduzir o padrão de três elevações deixados na superfície.

Observe que n_b deve ser igual a 3 para o caso de se utilizar uma broca tri-cônica. Christoforou e Yigit (2002), Divenyi (2009 e 2012) e Anjos (2013) indicaram que o valor apropriado para brocas PDC é 1. Nesta situação o forçamento axial é proporcional a rotação, visto que tais brocas não produzem este padrão de três picos.

O torque sobre a broca é definido por uma soma de duas parcelas. A parcela referente ao corte é uma relação empírica dependente do raio do poço (r_h), de uma constate adimensional (ζ), que representa a força necessária de corte e da profundidade de perfuração média (δ_c). Essa é dada pela razão entre a taxa de penetração (T_p) e a velocidade da mesa rotativa (ϕ_{mr}), conforme a equação III.17.

$$\delta_c = \frac{2\pi T_p}{\phi_{mr}} \quad \text{[III.17]}$$

A taxa de penetração respeita a relação empírica mostrada na equação III.18.

$$T_p = c_1 P_b \sqrt{\phi_{mr}} + c_2 \quad \text{[III.18]}$$

Onde c_1 e c_2 são constantes empíricas.

A parcela referente ao atrito é regida por uma função dependente da rotação dada pela equação III.19.

$$f(\dot{\phi}) = \frac{2}{\pi} arctan(\dot{\phi}) \left(\frac{\mu_e - \mu_d}{1 + \tau|\dot{\phi}|} + \mu_d \right) \quad \text{[III.19]}$$

Baseado na discussão individual das equações que compõe o modelo, apresenta-se o sistema de equações de movimento que governa a dinâmica da coluna de perfuração. Vale lembrar que, na ausência de contato, todas as forças não-suaves assumem valor nulo modificando o sistema. Dessa forma, até quatro sistemas distintos podem existir baseado nas condições de contato.

$$(m + m_f)(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) + k_r r + c_h \dot{r} = (m + mf) e_0 \left[\dot{\emptyset}^2 \cos(\emptyset - \theta) + \ddot{\emptyset} \text{sen}(\emptyset - \theta) \right] - F_r \quad \text{[III.4]}$$

$$(m + mf)(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}) + c_h r\dot{\theta} = (m + m_f) e_0 \left[\dot{\emptyset}^2 \text{sen}(\emptyset - \theta) - \ddot{\emptyset} \cos(\emptyset - \theta) \right] - F_\theta \quad \text{[III.5]}$$

$$m_a \ddot{z} + c_a \dot{z} + k_a z = F_0 - F_{ob} \quad \text{[III.8]}$$

$$J\ddot{\emptyset} + c_t \dot{\emptyset} + k_t \emptyset + c_h \dot{r} e_o \text{sen}(\emptyset - \theta) - c_h r \dot{\theta} e_o \cos(\emptyset - \theta) = T_{ob} - F_r e_o \text{sen}(\emptyset - \theta) + F_\theta \left(\frac{De_{co.}}{2} - e_o \cos(\emptyset - \theta) \right) \quad \text{[III.10]}$$

III.1 Avaliação dos Parâmetros

Os parâmetros utilizados nas equações do modelo baseiam-se nas definições propostas por Christoforou e Yigit (2002).

A massa do BHA, m_{BHA}, corresponde a massa resultante dos comandos e a do fluido adicionado e é definida como:

$$m_{BHA} = m_{comando} + m_{fluido}$$

$$m_{BHA} = \frac{\rho \pi (De_{co}^2 - Di_{co}^2) l_{co}}{4} + \frac{\rho_{fl} \pi (Di_{co}^2 + c_{ma} De_{co}^2) l_{co}}{4} \quad \text{[III.20]}$$

onde l_{co}, De_{co} e De_{co} representam respectivamente o comprimento, diâmetro externo e interno dos comandos. A massa especifica do fluido é dada por ρ_{fl} e c_{ma} é o coeficiente de massa adicionada e representa a massa equivalente do fluido que se desloca solidária ao deslocamento da coluna.

Para o modo axial a massa dos tubos de perfuração deve ser considerada, com isso tem-se:

$$m_a = m_{comando} + m_{fluido} + \frac{\rho_{aço}\pi\left(De_{tp}^2 - Di_{tp}^2\right)}{12} l_{tp} \quad \text{[III.21]}$$

As componentes l_{tp}, De_{tp} e Di_{tp} definem o comprimento, diâmetro externo e interno dos tubos de perfuração. A massa específica dos tubos de perfuração é representada pela massa específica do aço, $\rho_{aço}$.

Como a equação do modo torcional é baseada na segunda lei de Newton quanto ao momento, não há massa e sim o momento de inércia, J, o qual define-se como:

$$J = \frac{\rho\pi\left(De_{co}^4 - Di_{co}^4\right)}{32} l_{co} + \frac{1}{3}\left[\frac{\rho\pi\left(De_{tp}^4 - De_{tp}^4\right)}{32} l_{tp}\right] \quad \text{[III.22]}$$

A compressão e o torque atuam para reduzir a resistência flexão (Rao, 2008). A partir da figura III.1 observa-se que o BHA está sujeito a essa condição devido a interação broca-rocha. Christoforou e Yigit (2002) propuseram a seguinte expressão para estimar a rigidez equivalente (k_r). Note que a presença de componentes axial e torcional tornam este parâmetro um mecanismo de acoplamento entre os modos.

$$k_r = \frac{EI\pi^4}{2l_{co}^2} - \frac{T_{ob}\pi^3}{2l_{co}^3} - \frac{F_{ob}\pi^3}{2l_{co}} \quad \text{[III.23]}$$

A rigidez equivalente à resistência axial é dada como:

$$k_a = \frac{\left(E\pi De_{tp.}^2 - Di_{tp}^2\right)}{4l_{tp}} \quad \text{[III.24]}$$

A rigidez equivalente de torque é dada a partir da hipótese de que apenas os tubos de perfuração estão sujeitos à torção. Isto é justificado pela diferença significativa entre as seções transversais desses tubos e a dos comandos. Assim, este é parâmetro é definido como:

$$k_t = \frac{G\pi\left(De_{tp}^4 - Di_{tp}^4\right)}{32l_{tp}} \quad \text{[III.25]}$$

onde G é o módulo de elasticidade quanto ao cisalhamento. Note que tal parâmetro não foi corrigido para o ponto de estudo (centro de massa). Isto se explica por uma breve análise desta variável e

do método dos eixos paralelos. Sua dependência quanto ao comprimento cuja ordem de grandeza é de milhares de metros torna o quadrado dos poucos milímetros da excentricidade (e_o) desprezível.

A deflexão da coluna induz uma reação por parte do fluido. Em Jansen (1991) e Christoforou e Yigit (2002) essa reação é assumida como um arrasto hidrodinâmico ao movimento lateral e é dada pela equação III.26.

$$c_h = \frac{2}{3\pi}\left(\rho_{fl} C_d De_{co} l_{co}\right)|\boldsymbol{V}| \qquad \text{[III.26]}$$

onde C_d, $D_{poço}$ e De_{co}representam os coeficiente de arrasto hidrodinâmico, o diâmetro do poço e o diâmetro externo dos comandos respectivamente. O parâmetro $\boldsymbol{V}$ define o vetor velocidade em relação ao eixo de simetria da coluna e é calculada pela equação III.27:

$$\boldsymbol{V} = \dot{r}\boldsymbol{r_o} + \theta r\boldsymbol{\theta_o} \qquad \text{[III.27]}$$

O amortecimento do modo torcional é dado pela equação III.28

$$c_v = \frac{\pi \mu_{fl} De_{co}^3 l_{co}}{2\left(D_{poço.} - De_{co}\right)} \qquad \text{[III.28]}$$

onde μ_{fl} é a viscosidade dinâmica do fluido de perfuração

Para o amortecimento axial não há um método analítico para defini-lo. Christoforou e Yigit (2002) assim como Divenyi (2009 e 2012) assumiram para esse parâmetro o valor de 4000 Ns/m, o qual será utilizado no modelo. Em outros trabalhos foram utilizados valores diferentes, porém todos próximos a este.

IV. Simulações Numéricas

Este capítulo é dedicado ao estudo da dinâmica de uma coluna de perfuração. Para isso, realizam-se simulações numéricas das equações de movimento do sistema discreto. Para isso, aplica-se o método de Runge-Kutta de quarta ordem com passo variável para tratar adequadamente as não-suavidades do modelo.

Os resultados são apresentados na forma de espaços de fase e diagramas de bifurcação. Os diagramas de bifurcação consideram valores máximos permitindo avaliar a influência da variação de parâmetros, identificando os comportamentos críticos da resposta do sistema.

IV.1 Respostas Típicas

Esta seção apresenta uma discussão sobre algumas respostas típicas da dinâmica da coluna de perfuração. Uma situação normal de funcionamento é apresentada assim como as respostas críticas de *bit-bounce*, *stick-slip* e *whirl* e suas combinações. Depois disso, avalia-se a influência de cada um deles em outros modos de vibração. A combinação do *stick-slip* e *whirl* mais severo não foi capturada, isso mostra que se tais fenômenos ou são concorrentes, ou são um fenômeno raro durante a operação. Tal observação é feita também em Leine (2002).

Os parâmetros utilizados em todas as simulações estão de acordo com os praticados na API-RP7G e em outros trabalhos da área como Ahmadian et al. 2007, Divenyi (2009) e Divenyi et al. (2012). Na indução dos diferentes comportamentos críticos alguns parâmetros são modificados. A tabela IV.1 apresenta os parâmetros utilizados em todas as simulações.

Tabela IV.1 Parâmetros Utilizados em todas as Simulações

E	210	GPa	c_2	$-1.9\ 10^{-4}$	adm.
G	78	GPa	μ_{fl}	0.2	N s/m²
ρ	7850	GPa	μ_e	0.35	adm.
ρ_{fl}	1500	Kg/m³	μ_d	0.3	adm.
e_o	0.5 |	pol | m	c_a	4000	N s/m
c_1	$1.35\ 10^{-8}$	adm.	c_{ma}	1.7	adm.
ζ	0.1	adm.	C_d	1.0	adm.
k_c	25000	kN/m	S_o	0.001	m

IV.1.1 Comportamento Normal da Coluna

O comportamento normal de uma coluna de perfuração é representado por um comportamento periódico e dentro de amplitudes aceitáveis. Tal dinâmica é obtida considerando os parâmetros apresentados na tabela IV.2.

Tabela IV.2 Parâmetros utilizados para o Comportamento Normal da Coluna

F_o	10000 lbf	44,763 KN	$De_{Drill\text{-}Pipes}$	6,625 in	0,1683 m
w_{mr}	30 RPM	3,14 rad/s	Di_{BHA}	3 in	0,0762 m
L_{BHA}	914,4 ft	300 m	De_{BHA}	9 in	0,2286 m
$L_{Drill\text{-}Pipes}$	658,2 m	2000 m	$D_{poço}$	15 in	0,3810 m
$Di_{Drill\text{-}Pipes}$	5,3545 in	0,1358 m	N_b	3	[BrocaTricônica]

Na figura IV.1 apresenta-se o espaço de fase axial mostrando um comportamento periódico caracterizado por uma curva fechada. Observe que a amplitude de vibração está associada a

valores menores que a irregularidade admitida (S_o), portanto não ocorre perda de contato. A figura IV.2 mostra o espaço de fase de rotação que também apresenta comportamento periódico semelhante ao modo axial. Note que a velocidade da broca está próxima a velocidade da mesa rotativa.

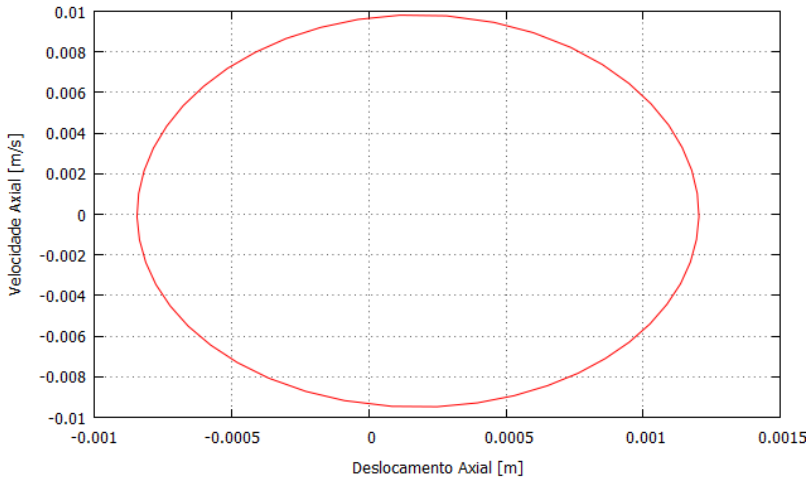


Figura IV.1Espaço de Fase Axial

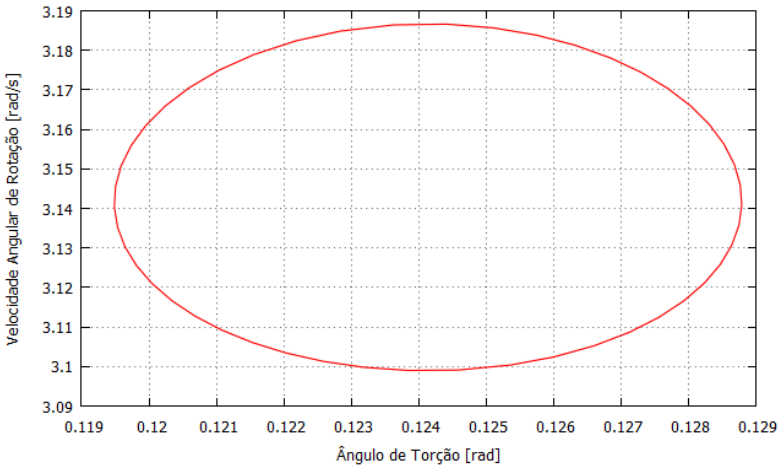


Figura IV.2Espaço de Fase Torcional

O espaço de fase radial representado pela figura IV.3 exibe mais uma vez um comportamento periódico. Isto condiz com um modelo acoplado, pois a periodicidade de um modo deve interferir nos outros. Apesar do aspecto bem comportado deste espaço de fase, a pequena diferença entre os valores máximo e mínimo do deslocamento radial indicam uma rotação da coluna em torno do centro do poço. Essa dinâmica caracteriza o *whirl*. A periodicidade dos outros modos dentro de valores adequados e a baixa amplitude deste fenômeno sugerem que esta deflexão é consequência direta do desbalanceamento. Isso também mostra que o desbalanceamento lateral da coluna sob condições operacionais adequadas não causa grandes distúrbios em sua dinâmica. A avaliação do espaço de fase de giro, mostrado na figura IV.4 confirma isso, pois sua velocidade é muito próxima da rotação da mesa. Além disso, percebe-se nele um comportamento periódico semelhante ao de um pêndulo e que sua velocidade é sempre positiva, o que classifica o *whirl* como *forward-whirl*.

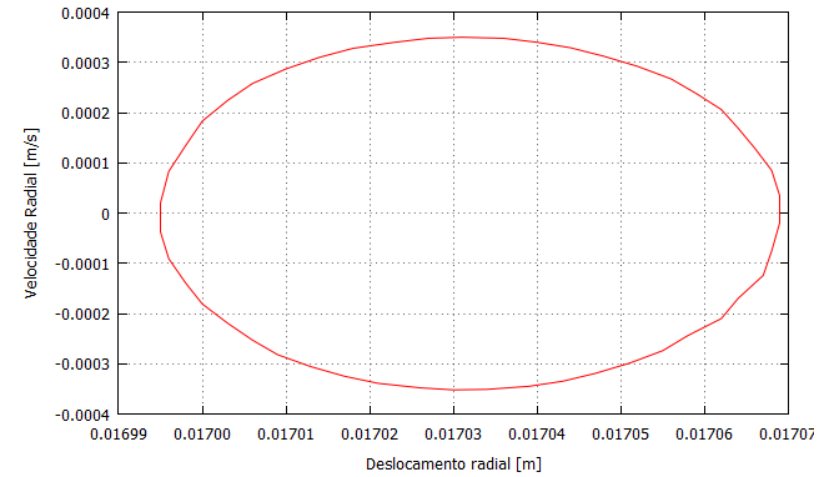


Figura IV.3 Espaço de Fase de Deflexão

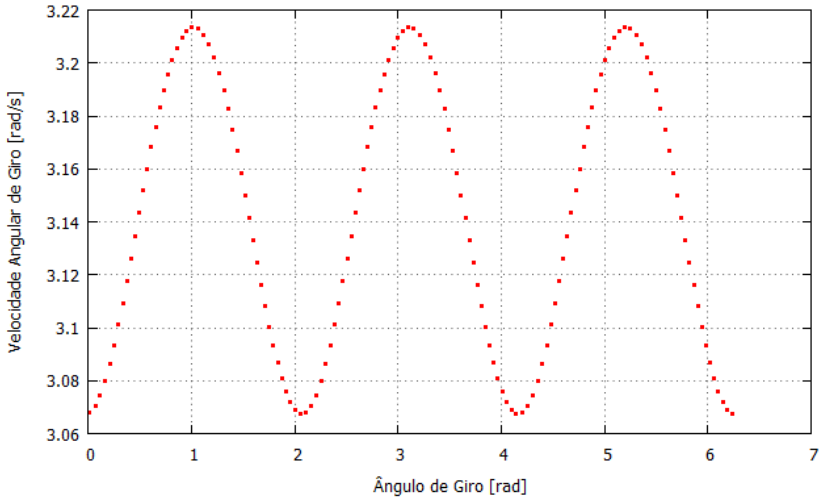


Figura IV.4 Espaço de Fase de Giro

IV.1.2 Fenômeno de *Whirl*

Considere uma resposta dinâmica da coluna apresentando o fenômeno de *whirl*, especificamente quando a deflexão é suficiente para causar contato entre a coluna e a parede do poço. Essa situação caracteriza um comportamento crítico da coluna. Visando obter esse comportamento, a rotação da coluna e o seu comprimento são aumentados, intensificando as forças devidas ao desbalanceamento e reduzindo a rigidez radial. Utiliza-se uma broca do tipo PDC o que evita a possibilidade de ocorrer *bit-bounce* pelo aumento da rotação. A tabela IV.3 apresenta os parâmetros utilizados nesta situação.

Tabela IV.3 Parâmetros Utilizados para o Fenômeno de Whirl

F_o	10000 lbf	44,482 kN	$De_{Drill-Pipes}$	6,625 in	0,1683 m
w_{mr}	40 RPM	4,188 rad/s	Di_{BHA}	3 in	0,0762 m
L_{BHA}	914,4 ft	300 m	De_{BHA}	9 in	0,2286 m
$L_{Drill-Pipes}$	16404,2 ft	5000 m	$D_{poço}$	15 in	0,3810 m
$Di_{Drill-Pipes}$	5,3545 in	0,1358 m	N_b	1	[Broca PDC]

A figura IV.5 representa o espaço de fase radial da resposta com *whirl*. A pequena variação entre os valores de deflexão máximo e mínimo indicam a presença do *whirl*, mostrando que a deflexão é mantida praticamente constante. Além disso, os valores das deflexões são elevados o suficiente para haver um contato permanente entre a coluna e as paredes do poço.

O espaço de fase de giro é mostrado na figura IV.6. Note que a presença de velocidades angulares negativas indica um *backward-whirl*. A vasta quantidade de pontos torna impraticável a avaliação. Afim de reduzi-los tempos sucessivamente menores de operação (T_{op}) são simulados e seus resultados estão representados nas figuras IV.7 e IV.8. Pode-se ver então que uma sucessão de curvas periódicas de três picos defasadas entre si compõe o espaço de fase. A figura IV.9 mostra uma trajetória típica de *whirl*.

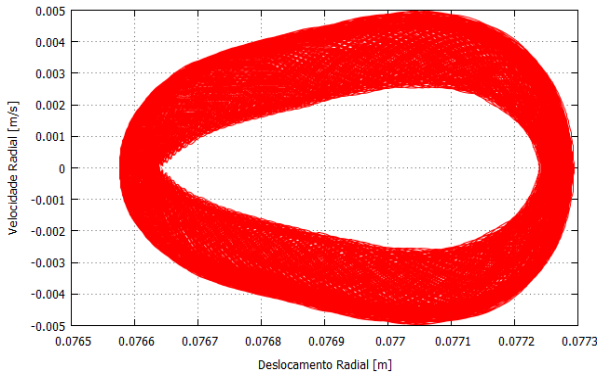


Figura IV.5 Espaço de Fase de Deflexão

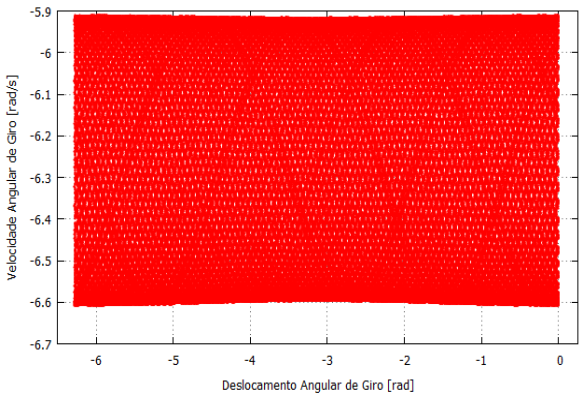


Figura IV.6 Espaço de Fase de Giro

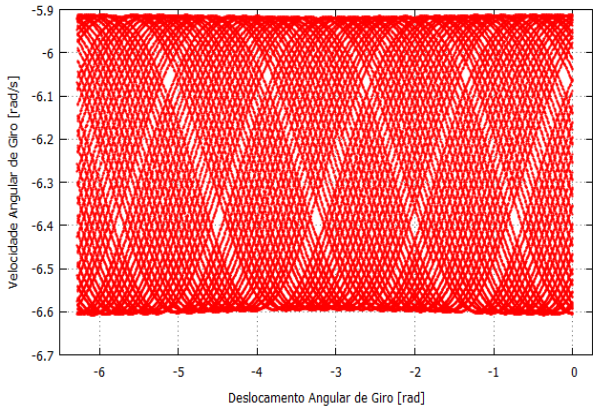


Figura IV.7 Espaço de Fase de Giro (T_{OP})

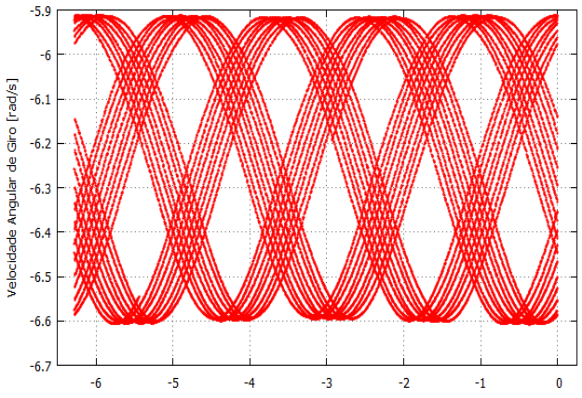


Figura IV.8 Espaço de Fase de Giro ($T_{OP}/2$)

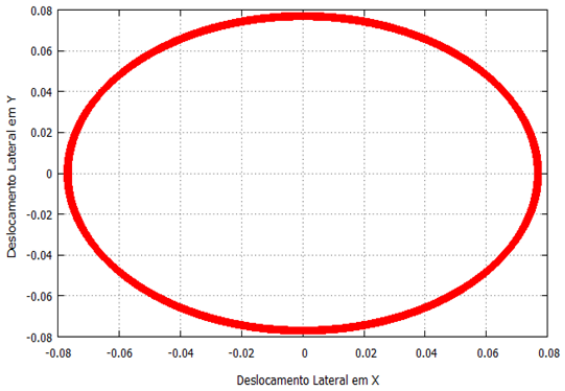


Figura IV.9 Trajetória da Coluna

Como houve poucas variações nas amplitudes de deflexão e velocidade angular de giro, é esperado que não haja elevadas vibrações axiais e torcionais. Isso é verificado nos espaços de fase axial e torcional representados nas figuras IV.10 e IV.11 respectivamente. Note que seus aspectos se assemelham aos vistos no estudo do comportamento normal.

Vibrações no modo torcional se traduzem em flutuações na rotação e podem ser percebidos na variação de carga no motor elétrico que aciona a mesa rotativa. Já as vibrações axiais podem ser identificadas na superfície pela variação do peso sobre a broca. Como estes parâmetros se mantiveram quase que inalterados o contato lateral da coluna passaria desapercebido na superfície.

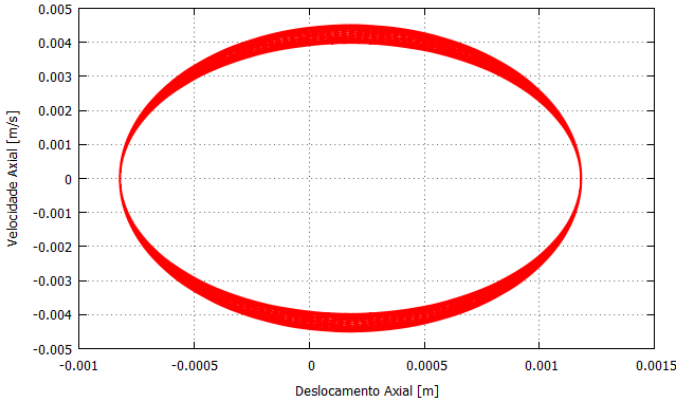


Figura IV.10 Espaço de Fase Axial

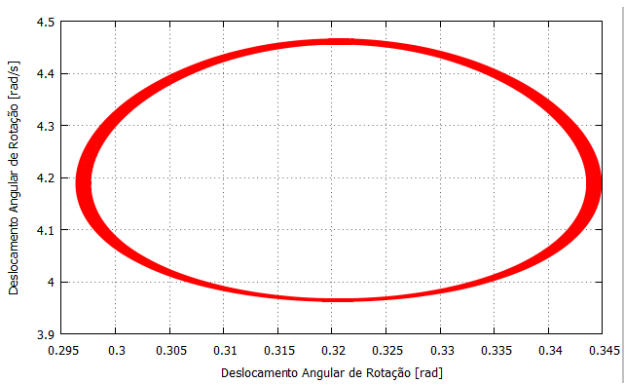


Figura IV.11 Espaço de Fase Torcional

IV.1.3 Fenômeno de Bit-bounce

Considere o fenômeno de *bit-bounce* na dinâmica da coluna. Para isso, alguns parâmetros devem ser alterados a partir dos utilizados no caso de comportamento normal da operação. Todos são mostrados na tabela IV.4.

Com a diminuição do peso sobre a broca e da rotação espera-se que a coluna esteja mais propensa a vibrar axialmente. Já a redução da rotação visa diminuir a importância do desbalanceamento. Entretanto isso poderia também induzir o *stick-slip*, que não ocorre devido à redução do peso sobre a broca.

Tabela IV.4 Parâmetros Utilizados para o Fenômeno de Bit-Bounce

F_o	5000 lbf | 22,382 k	$De_{Drill-Pipes}$	6,625 in | 0,1683 m
w_{mr}	30 RPM | 3,14 rad/s	Di_{BHA}	3 in | 0,0762 m
L_{BHA}	914,4 ft | 300 m	De_{BHA}	9 in | 0,2286 m
$L_{Drill-Pipes}$	8229,6 ft | 2700 m	$D_{poço}$	15 in | 0,3810 m
$Di_{Drill-Pipes}$	5,3545 in | 0,1358 m	N_b	3 [Broca Tricônica]

A figura IV.12 apresenta o espaço de fase axial mostrando uma curva típica de uma dinâmica com impacto. O aspecto da curva ilustra uma mudança de rigidez de acordo com a posição no espaço. Note que o lado direito da curva possui uma configuração mais achatada, consequência da alta rigidez da formação. A parte da esquerda está relacionada a rigidez da coluna que é significativamente menor.

Os valores negativos do deslocamento axial também são um indicativo da perda de contato axial, pois estes superam o valor da irregularidade considerada. Desta maneira, tem-se uma curva típica de impacto com perdas de contato o que caracteriza o fenômeno de *bit-bounce*.

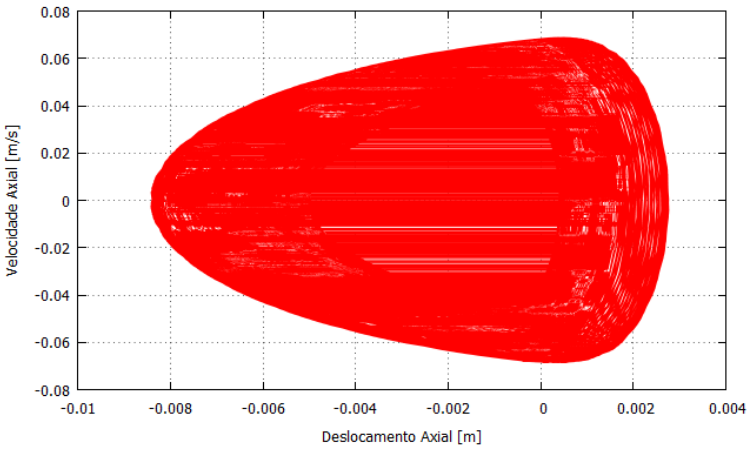


Figura IV.12 Espaço de Fase Axial

O espaço de fase torcional descrito pela figura IV.13 é influenciado pelo *bit-bounce*. Observe que a curva varia em torno de 3 rad/s, que corresponde aproximadamente a rotação da mesa rotativa. A coluna oscila em torno deste valor tendendo a rotações superiores e inferiores da ordem de 50%. Isso é consequência do impacto axial que induz elevados torques resistivos que desparecem na perda de contato. Assim, flutuações desta magnitude na rotação também podem ser esperadas mesmo na ausência de *stick-slip* e podem ser utilizadas como um meio indireto de identificar o fenômeno de *bit-bounce*.

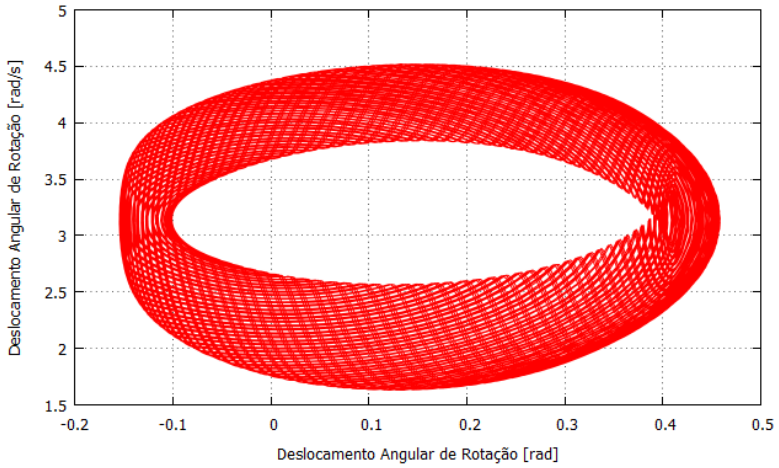


Figura IV.13 Espaço de Fase Torcional

Na figura IV.14 é exibido o espaço de fase radial. Sua curva difere bastante da apresentada no estudo do *whirl*. Note que existem duas regiões distintas, uma de baixa amplitude de velocidade radial (à esquerda) e outra de grande amplitude (à direita). Em instantes de contato axial tem-se uma força compressiva de alta intensidade atuando na coluna. Como são carregamentos de impacto as regiões de maiores deflexões devem possuir maiores amplitudes de velocidade radial. Durante a perda de contato axial, a coluna ainda sofre uma deflexão, porém menor do que quando estava em contato com a formação. O que induz esta deformação é a alta rotação da coluna nestes instantes, conforme pode ser verificado no espaço de fase torcional.

Tanto na simulação do comportamento típico quanto na do *whirl* o espaço de fase de giro apresentou apenas curvas de três picos com uma amplitude. Nesse momento percebe-se na figura IV.15 duas regiões caracterizadas por curvas de amplitudes diferentes. Uma variando em torno de 0.5 a 5 rad/s e outra em de 3 a 5 rad/s. Isso mostra, assim como no espaço de fase radial, a influência de impactos axiais no modo lateral.

A trajetória do deslocamento lateral representada na figura IV.16 revela com mais clareza o comportamento lateral da coluna. Vê-se uma trajetória de aspecto circular com uma deflexão definida típica de *whirl*, a qual é distorcida para valores maiores durante o impacto da coluna com a formação submarina. A medida que esse impacto é dissipado ao longo da operação a deflexão retorna ao seu valor original.

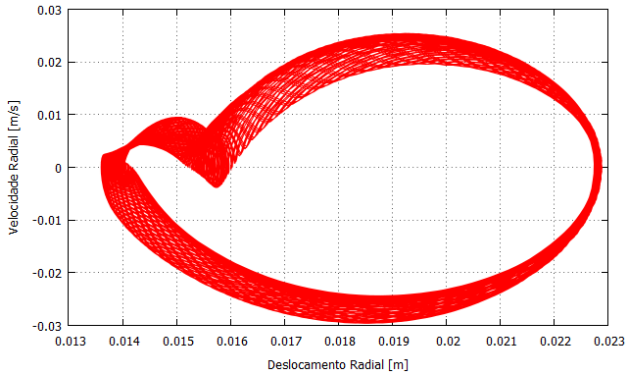


Figura IV.14 Espaço de Fase de Deflexão

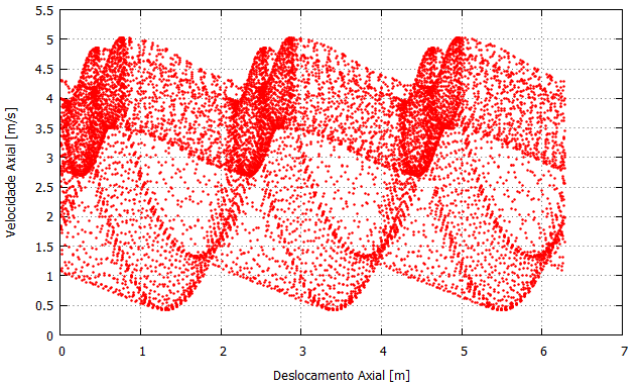


Figura IV.15 Espaço de Fase de Giro

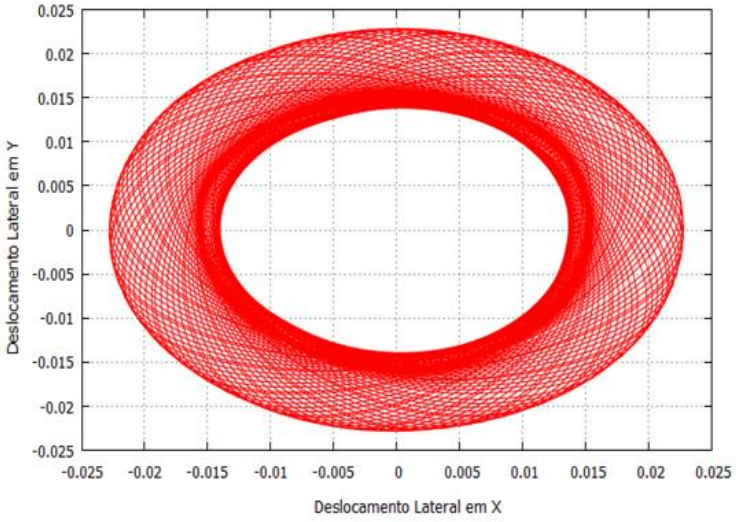


Figura IV.16 Trajetória da Deflexão

IV.1.4 Fenômeno de *Stick-slip*

O efeito do *stick-slip* na dinâmica da coluna é estudado nesta seção. O objetivo é avaliar como as respostas torcionais são distorcidas quando a coluna está sujeita a esse comportamento crítico e analisar sua interferência nos outros modos de vibração. Considera-se uma broca tipo PDC e diminui-se a rotação da coluna e o diâmetro da broca é aumentado. Os parâmetros utilizados são mostrados na tabela IV.5.

Tabela IV.5 Parâmetros Utilizados para o Fenômeno de Stick-Slip

F_o	10000 lbf | 44,482 k	$De_{Drill-Pipes}$	6,625 in | 0,1683 m
w_{mr}	20 RPM | 2.094rad/s	Di_{BHA}	3 in | 0,0762 m
L_{BHA}	914,4 ft | 300 m	De_{BHA}	9 in | 0,2286 m
$L_{Drill-Pipes}$	16404,2 ft | 5000 m	$D_{poço}$	26 in | 0,6604m
$Di_{Drill-Pipes}$	5,3545 in | 0,1358 m	N_b	1 [Broca PDC]

O espaço de fase torcional descrito na figura IV.17 é típico de um comportamento de *stick-slip*. Trata-se de uma curva com uma região horizontal de velocidade nula, associada a fase sem velocidade *stick*. Por isso, a oscilação ocorre entre um valor mínimo e um máximo que pode ser o dobro, ou até o triplo da rotação da mesa. Na figura IV.18 é mostrado o espaço de fase axial onde se percebe que não houve perda de contato, visto que o deslocamento axial mínimo é inferior a irregularidade. Além disso pode ser observado que a velocidade axial da coluna tende a ser periodicamente nula e ocorre nos instantes de *stick*. Já os valores máximos das respostas axiais estão associados a fase de *slip*.

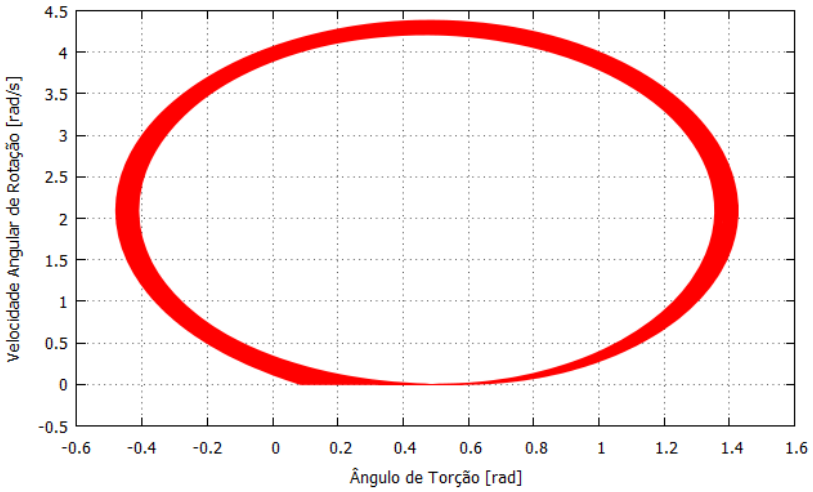


Figura IV.17Espaço de Fase Torcional

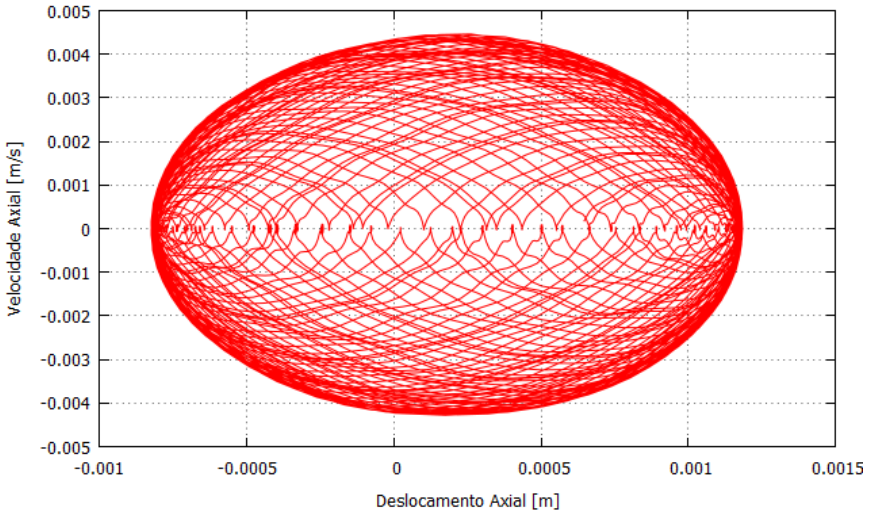


Figura IV.18Espaço de Fase Axial

O espaço de fase radial é apresentado na figura IV.19. Sua comparação com os resultados obtidos no estudo do comportamento típico revela pouca diferença nos valores de deflexão, porém as curvas diferem significativamente. As deflexões vistas nesse momento devem decorrer do *stick-slip*, já que esse modo oferece variações mais bruscas em suas respostas. Contudo ainda não está claro

como isso afeta o modo lateral. Para isso utiliza-se a evolução temporal. A figura IV.20 mostra como as velocidades radiais evoluem e a figura IV.21 a velocidade angular de rotação.

Percebe-se que o ponto de velocidade radial mais elevado se relaciona ao *slip*, isso é visto no instante de 2263s na figura IV.21. Além disso, o pico próximo de -0.005 m/s na figura IV.19 relaciona-se aos momentos de *stick* como é indicado nos instantes 2060 e 2066s. Já os ciclos menores à esquerda e à direita no espaço de fase radial são consequência do o aumento e a diminuição de rotação em torno do *slip*. Eles são representados pelos picos próximos a 0.01 m/s na figura IV.20.

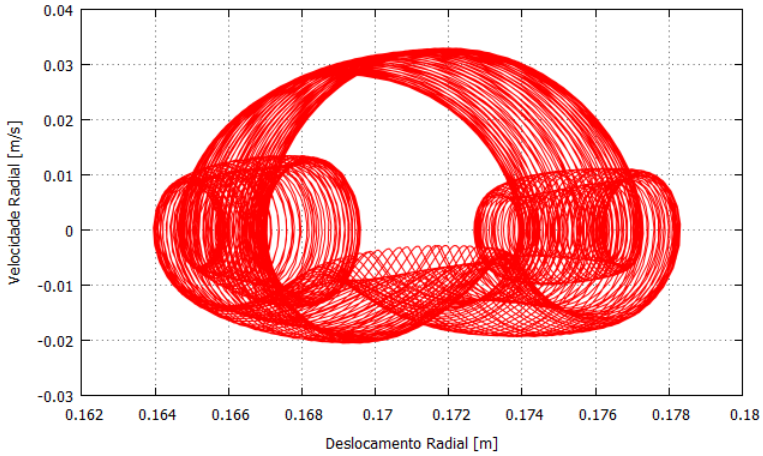


Figura IV.19 Espaço de Fase Radial

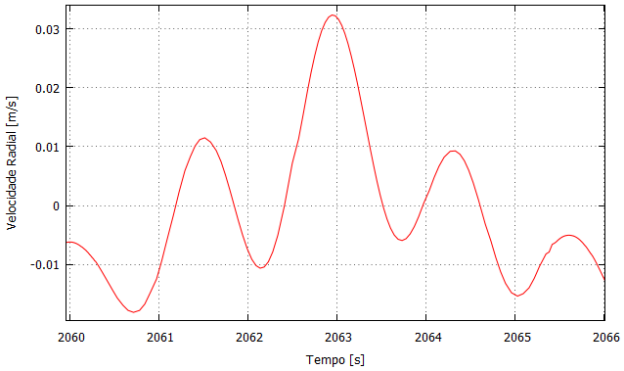


Figura IV.20 Evolução Temporal da Posição Radial [m]

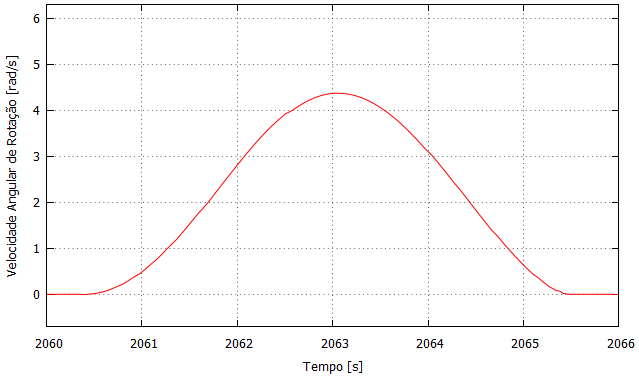


Figura IV.21 Evolução Temporal Velocidade Angular [rad/s]

O espaço de fase referente ao giro é apresentado na figura IV.22, note que seus valores da velocidade são proporcionais aos da rotação durante o *slip*. É importante observar também que há uma região no espaço de fase que se destaca por ser mais densa. Uma análise mais atenta indica que esta região se encontra próxima do intervalo médio da velocidade de giro. A velocidade aumenta durante o *slip*, contudo no *stick*, ela não se reduz rapidamente devido à ausência de mecanismos dissipativos. Assim, após uma pequena redução, a velocidade de giro volta ao máximo. Consequentemente ela cruza este intervalo médio duas vezes, no aumento e no decremento, conferindo a densa região vista no espaço de fase.

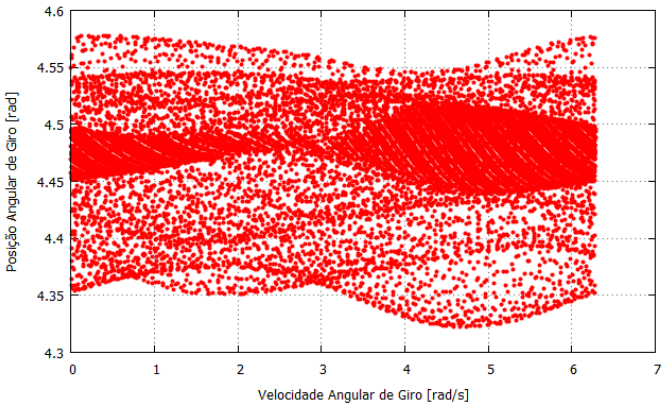


Figura IV.22 Espaço de Fase de Giro

A figura IV.23 mostra a trajetória da coluna e revela o *whirl*, porém sem amplitude suficiente para o contato lateral. Ela indica também que muitos fenômenos podem ocorrer em meio as densas curvas que compõe uma trajetória de aspecto simples.

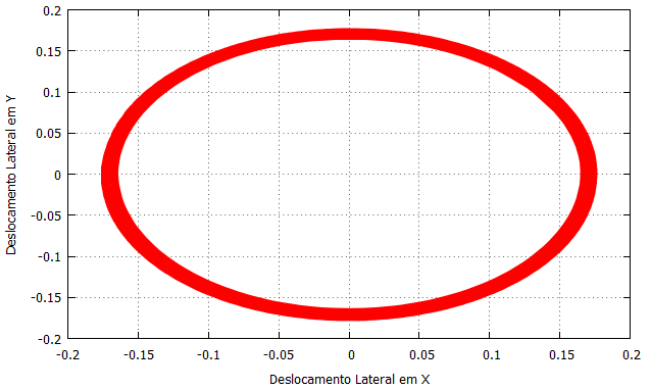


Figura IV.23 Trajetória da Coluna

IV.1.5 Influência Combinada do *Bit-bounce* e do *Stick-slip*

Nesse momento analisa-se a dinâmica da coluna sujeita a combinação do *bit-bounce* e *stick-slip*. Para isso, reutilizam-se os parâmetros da resposta com *stick-slip*, porém uma broca tricônica é usada. A maior propensão de apresentar *bit-bounce* por estas brocas é explorada nesta simulação para induzir um fenômeno acoplado. Os parâmetros utilizados são mostrados na tabela IV.6.

Tabela IV.6 Parâmetros Utilizados para a Combinação do Bit-Bounce e Stick-Slip

F_o	10000 lbf	44,482 kN	$De_{Drill\text{-}Pipes}$	6,625 in	0,1683 m
w_{mr}	20 RPM	2.094 rad/s	Di_{BHA}	3 in	0,0762 m
L_{BHA}	914,4 ft	300 m	De_{BHA}	9 in	0,2286 m
$L_{Drill\text{-}Pipes}$	16404,2 ft	5000 m	$D_{poço}$	26 in	0,6604m
$Di_{Drill\text{-}Pipes}$	5,3545 in	0,1358 m	N_b	3	[Broca Tri-cônica]

O espaço de fase axial é mostrado na figura IV.24 e apresenta o aspecto característico do *bit-bounce* e isso está de acordo com o comportamento esperado pela alteração do tipo de broca. Devido a baixa rotação da mesa, pode-se inferir que este comportamento foi induzido pelo *stick-slip*. Os saltos da rotação durante o slip se mostraram suficientes para induzir o *bit-bounce*, o que não ocorreu com o uso da broca de PDC.

A figura IV.25 exibe o espaço de fase torcional, os valores nulos e elevados de rotação confirmam a presença do *stick-slip*. Contudo, as respostas deste modo diferem totalmente das apresentadas no caso em que este fenômeno foi estudado isoladamente. Note que entre as fases de *stick-slip* a rotação tende a da mesa rotativa, algo em torno de 2 rad/s, o que indica a perda de contato axial entre elas. Isso confirma a hipótese de que o *bit-bounce* identificado foi induzido pelo *stick-slip*.

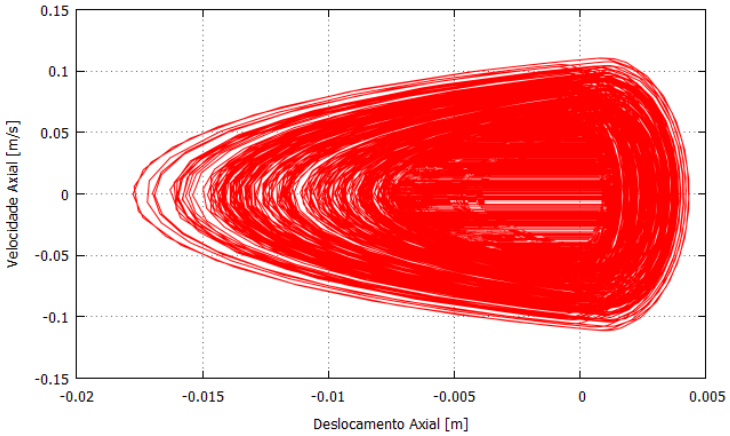


Figura IV.24 Espaço de Fase Axial

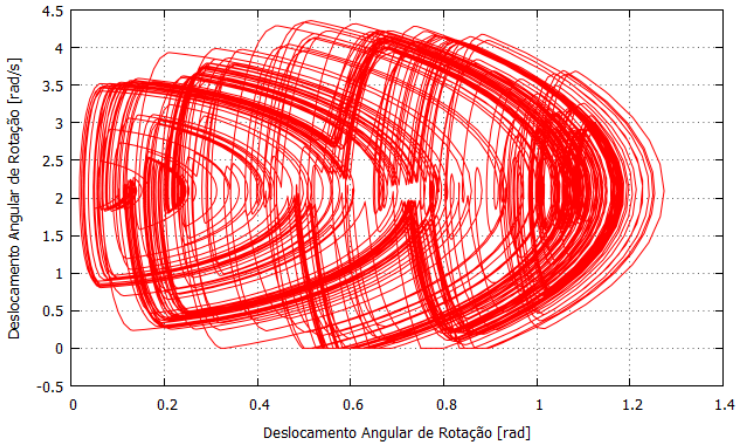


Figura IV.25 Espaço de Fase Torcional

O espaço de fase radial é mostrado na figura IV.26 e é influenciado pela dinâmica dos outros modos. Nesse caso, a coluna está sujeita a grandes flutuações de rotação e a impactos axiais. Estas condições dificultam a presença do *whirl* e de qualquer dinâmica bem definida, pois a deflexão é constantemente alterada por essas flutuações. Isso é evidenciado nas grandes variações de velocidade radial em intervalos pequenos de deflexão identificados pelas marcações no espaço de fase.

A figura IV.27 representa o espaço de fase do movimento de giro. Nele é possível perceber que a velocidade angular de giro é fortemente influenciada pela rotação. Note que seus valores estão restringidos a valores de rotação próximos à fase de *slip*. A velocidade de giro não é influenciada pelas baixas na rotação devido à pequena variedade de mecanismo dissipativos e pela alta frequência com que a rotação é alterada.

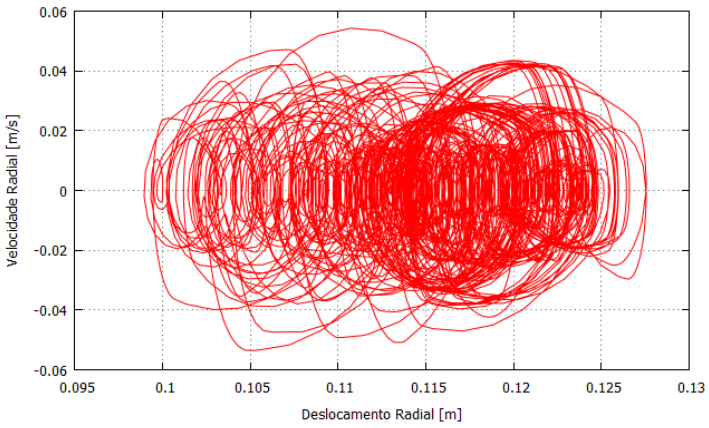


Figura IV.26 Espaço de Fase de Deflexão

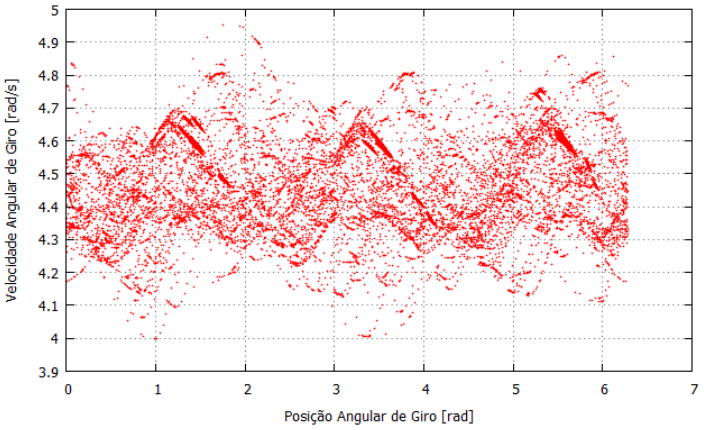


Figura IV.27 Espaço de Fase do Movimento de Giro

A ausência do *whirl* é confirmada pela trajetória exibida na figura IV.28. Pela curva descrita é evidente que não há uma deflexão fixa da coluna associado ao movimento de giro. A coluna descreve uma trajetória não periódica o que implica na densa quantidade de curvas exibidas.

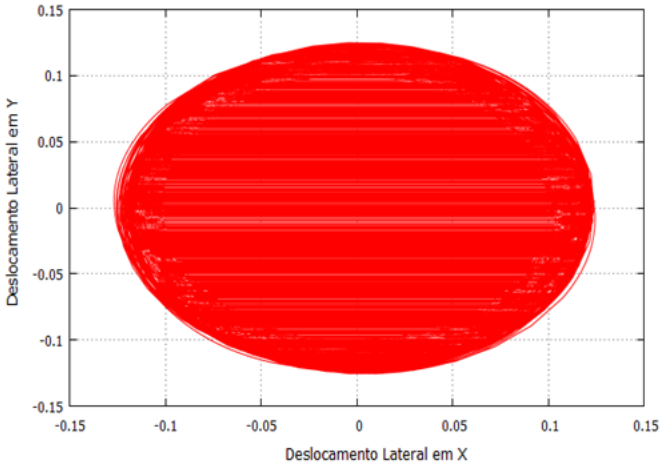


Figura IV.28 Trajetória da Coluna

IV.1.6 Influência Combinada do *Bit-bounce* e do *Whirl*

A influência da combinação do *bit-bounce* e *whirl* na dinâmica da coluna é vista. Para a indução de ambos os fenômenos parte dos parâmetros utilizados no estudo da combinação *bit-bounce* e *stick-slip* serão aproveitados. Contudo, a rotação foi aumentada com o intuito de eliminar o *stick-slip* e intensificar os efeitos do desbalanceamento.

É esperado com base nos valores utilizados que a coluna ainda esteja sujeita ao *bit-bounce* e que os impactos axiais aliados a uma maior rotação induzam o *whirl* de elevada amplitude. Todos os parâmetros utilizados são mostrados na tabela IV.7.

Tabela IV.7 Parâmetros Utilizados para a Combinação do Bit-Bounce e Whirl

F_o	10000 lbf	44,482 k	$De_{Drill-Pipes}$	6,625 in	0,1683 m
w_{mr}	40 RPM	4,188 rad/s	Di_{BHA}	3 in	0,0762 m
L_{BHA}	914,4 ft	300 m	De_{BHA}	9 in	0,2286 m
$L_{Drill-Pipes}$	16404,2 ft	5000 m	$D_{poço}$	15 in	0,3810 m
$Di_{Drill-Pipes}$	5,3545 in	0,1358 m	N_b	3 [Broca TriCônica]	

O espaço de fase axial, mostrado na figura IV.29, confirma a presença do *bit-bounce*. A figura IV.30 representa espaço de fase radial. Nele é facilmente percebido a influência do modo axial, basta observar a semelhança no aspecto de suas curvas. Isso revela que os impactos axiais da coluna induziram impactos laterais com as paredes do poço.

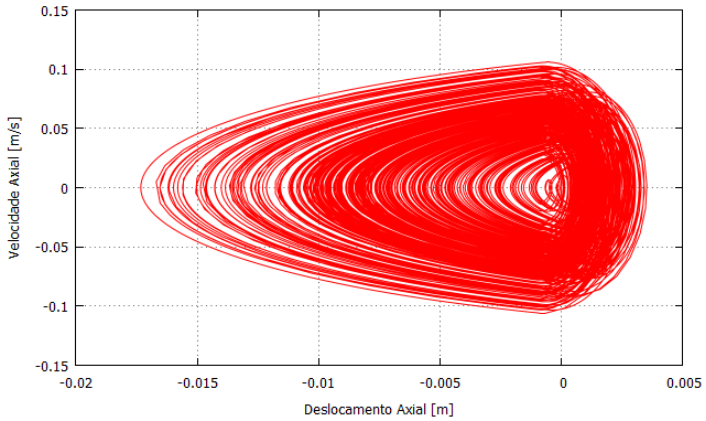


Figura IV.29 Espaço de Fase Axial

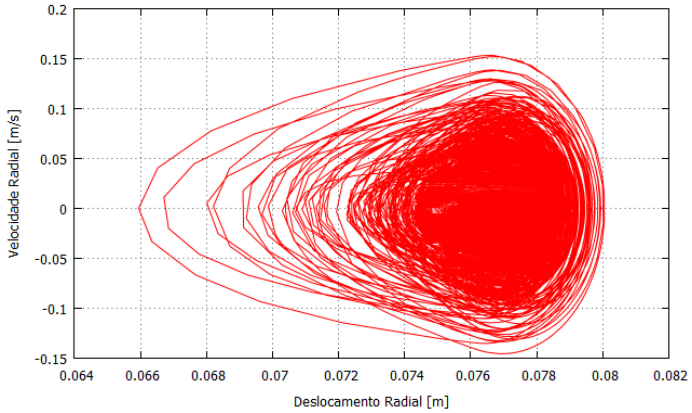


Figura IV.30 Espaço de Fase Lateral

Na figura IV.31 é visto o espaço de fase do movimento angular de giro. A presença de velocidade angulares negativas indica que se trata de um caso de *backward whirl*. Há grandes flutuações na velocidade de giro, as quais estão associadas a variações na deflexão e na rotação durante a perda

de contato axial. Foi observado que a velocidade angular de giro mínima corresponde a um valor muito próximo ao da rotação da mesa. Com isso, nestes breves instantes o único efeito significativo é o desbalanceamento. Valores mais elevados estão associados aos menores valores de deflexão, pois nessa situação a força de atrito é menor.

A trajetória da coluna é vista na figura IV.32. Ela revela, assim como no espaço de fase radial, que a dinâmica do modo lateral é dominada por choques axiais, pois raramente seu deslocamento tende para valores menores. Existe um percurso dominante que é distorcido em certos instantes pela ausência do impacto axial.

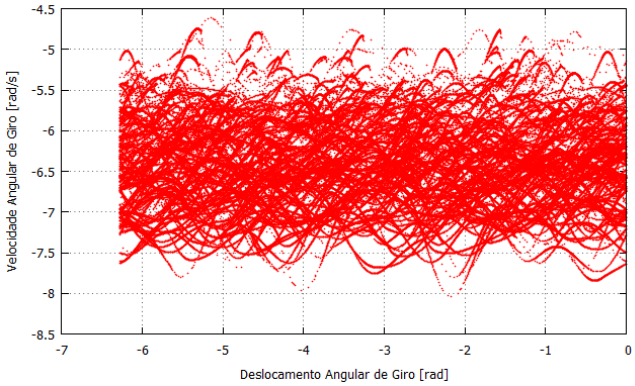


Figura IV.31 Espaço de Fase de Movimento de Giro

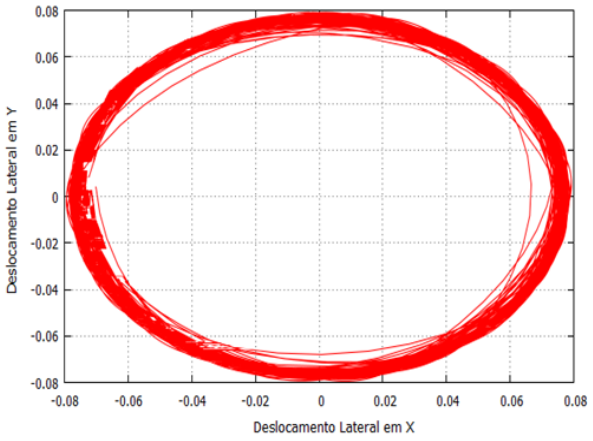


Figura IV.32 Trajetória da Coluna

O espaço de fase torcional é exibido na figura IV.33. Os efeitos dos modos axial e lateral são perceptíveis. Há valores significativamente abaixo e acima da rotação da mesa. Os valores abaixo desta rotação são consequência do alto torque resistivo de atrito proveniente do carregamento axial de impacto durante o *bit-bounce*. Já os valores acima do fornecido pela mesa rotativa é provida essencialmente da energia torcional armazenada que durante a perda de contato axial é subitamente liberada.

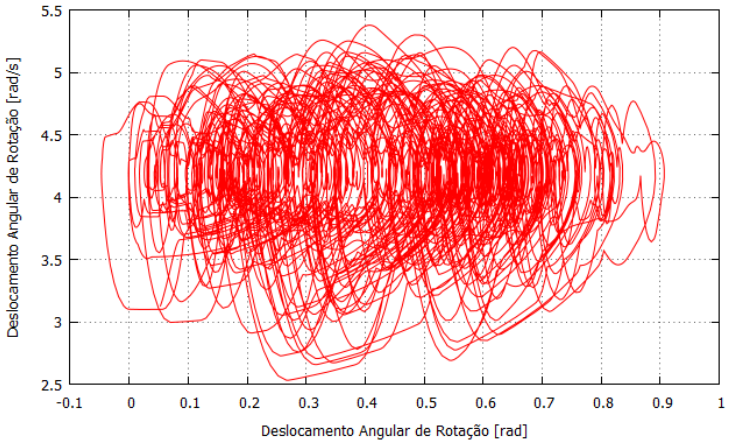


Figura IV.33 Espaço de Fase Torcional

IV.2 Avaliação de Vibrações Críticas Quanto a Configuração e Condições Operacionais

Até agora, apresentou-se uma análise de diferentes tipos de resposta, utilizando espaços de fase para mostrar os resultados. A partir de agora, a dinâmica da coluna é estudada por meio de diagramas de valores máximos que permite avaliar a influência de um parâmetro de interesse nas respostas do sistema. A ideia é monitorar deslocamentos axiais, radias e da rotação da coluna, conforme discutido em Divenyi (2009) e Divenyi et al. (2012).

Inicialmente, considera-se a variação do comprimento sob diferentes valores de peso sobre a broca. O objetivo é identificar os comportamentos críticos e avaliar a influência deste parâmetro operacional na dinâmica global da coluna. Para a identificação, as respostas dinâmicas são avaliadas quanto as condições de contato acrescidas de um pequeno valor de tolerância ao longo da simulação. Isso se justifica, pois não necessariamente a coluna está com rotação nula para entrar no *stick*, ela pode assumir um *stick-slip* para um valor muito próximo de zero. Outra consideração desse tipo é feita para o modo lateral, onde um valor próximo do necessário ao contato é utilizado.

Em seguida, varia-se o aumento do diâmetro de poço. A etapa seguinte considera variações da rotação. Desta forma, todos os parâmetros operacionais controláveis da coluna são analisados em diferentes profundidades (comprimento da coluna) tirando conclusões a respeito de suas influências na dinâmica.

IV.2.1 Variação de Profundidade e Condições Iniciais para Diferentes Pesos Sobre a Broca

Neste momento, investiga-se a influência na resposta de uma variação progressiva do comprimento da coluna sob três valores de peso sobre a broca diferentes. Os parâmetros utilizados nas simulações estão mostrados na tabela IV.8. A dinâmica é estudada utilizando-se das mesmas condições iniciais para todos os valores de comprimento e com peso sobre a broca de 5000 lbf (22,24 kN) até 15000 lbf (67,72 kN).

Tabela IV.8 Parâmetros Utilizados nos Diagramas de Bifurcação

F_o	5000 - 15000 lbf | 22,24 - 67,72 kN	$De_{Drill-Pipes}$	6,625 in | 0,1683 m
w_{mr}	30 RPM | 4,188 rad/s	Di_{BHA}	3 in | 0,0762 m
L_{BHA}	914,4 ft | 300 m	De_{BHA}	9 in | 0,2286 m
$L_{Drill-Pipes}$	914,4 - 32808,4 ft | 300 - 10000 m	$D_{poço}$	15 in | 0,3810 m
$Di_{Drill-Pipes}$	5,3545 in | 0,1358 m	N_b	3 [Broca Tricônica]

Os diagramas referentes aos modos axial, torcional e lateral para o peso sobre a broca de 5000 lbf são mostrados nas figuras IV.34 a IV.36. Através de sua análise, é visto que a coluna apresenta uma maior variedade de respostas à medida que seu comprimento aumenta. Isso está associado a redução da rigidez equivalente com o aumento da coluna. Tal característica é mais perceptível no diagrama do modo lateral onde o deslocamento radial, ou deflexão, possui um aumento da amplitude com o aumento do comprimento.

O diagrama do modo axial (figura IV.34) mostra que a presença do *bit-bounce* elevou o deslocamento da coluna contra o leito marinho quando comparado a intervalos sem este fenômeno. Esta consequência aparentemente benéfica está de acordo com o exposto em Chevallier (2000), entretanto o *bit-bounce* deve ser evitado, visto as grandes desvantagens associadas a ele. Este ganho no deslocamento pode ser melhor visto na região próxima de 2000 metros. Nela há um intervalo de transição na incidência do *bit-bounce* onde é observado um aumento instantâneo do deslocamento axial.

Vale notar que há regiões dos diagramas que apresentam flutuações em suas respostas, como entre 2000 e 4000 metros, por exemplo. Observe que nesta faixa os diagramas do modo axial e torcional se assemelham, mostrando com clareza um acoplamento entre estes modos. Isso é consequência da flutuação na intensidade dos impactos axiais. Esse comportamento desenvolve torques resistivos também variáveis que deixam de existir na perda do contato. Contudo, tal comportamento não é visto no diagrama do modo lateral, o que indica que a rigidez do BHA ainda é elevada para esta faixa de valores.

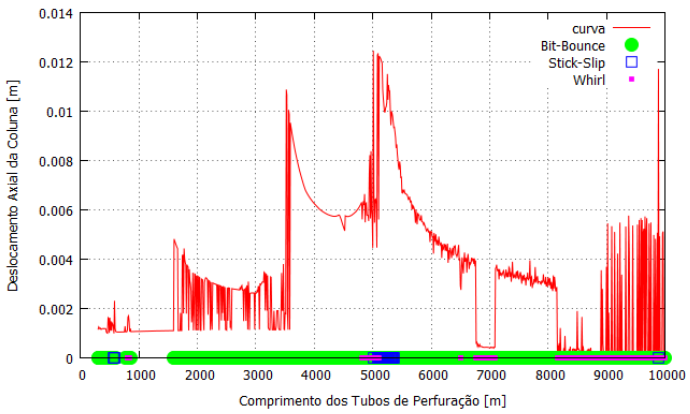


Figura IV.34 Diagrama do Modo Axial [22,24 kN]

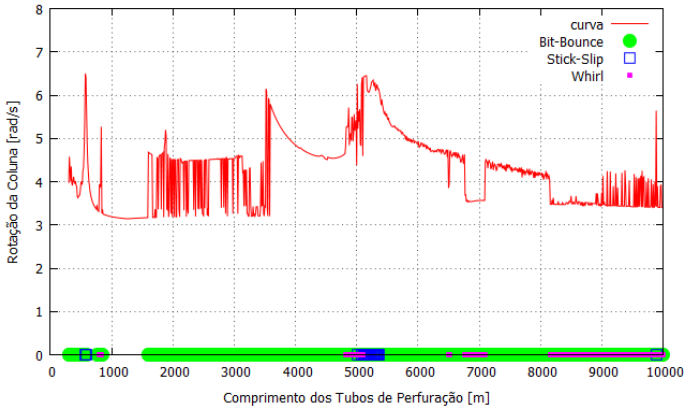


Figura IV.35 Diagrama do Modo Torcional [22,24 kN]

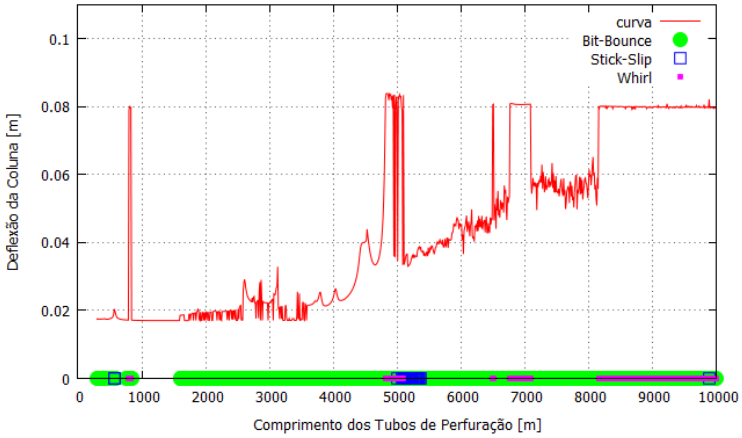


Figura IV.36 Diagrama do Modo Lateral [22,24 kN]

A partir de aproximadamente 5000 metros a coluna apresenta um significativo aumento da deflexão da coluna (figura IV.36). Neste intervalo pode-se notar também um salto nas respostas dos outros modos e flutuações na deflexão, indicando um maior acoplamento entre os modos a partir deste valor. Estas variações na deflexão são consequência da presença do *stick-slip* e das variações das cargas de impacto do *bit-bounce* como visto na ampliação deste intervalo na figura IV.37. Note a diferença nos valores de deflexão a partir de 5100 metros, onde este intervalo é dominado pelo *bit-bounce* e *stick-slip*. Além disso, esta ampliação sugere que o *stick-slip* e o *whirl* raramente acontecem juntos.

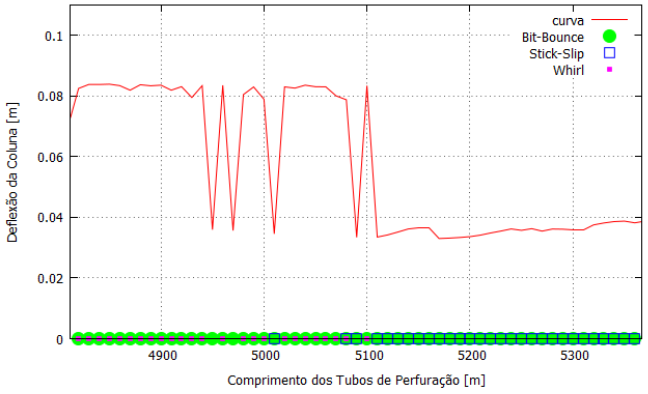


Figura IV.37 Ampliação do Intervalo de Diagrama do Modo Lateral [22,24 kN]

Outro comportamento peculiar da coluna devido ao acoplamento dos modos ocorre em um intervalo próximo a 7000 metros. Através dos diagramas é visto um aumento abrupto na deflexão e paralelo a isso, uma abrupta redução no deslocamento axial e na rotação. Para uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos neste comportamento uma análise dos espaços de fase deve ser feita.

O espaço de fase axial mostrado na figura IV.38 indica a presença dos carregamentos elevados de impacto. A rotação vista no espaço de fase torcional e representada pela figura IV.39 altera-se pouco e se encontra próximo aos valores da mesa rotativa. Assim as deflexões observadas são consequência da interação com o modo axial. Isso é claramente exposto no espaço de fase radial visto na figura IV.40, onde as curvas do modo axial e radial se assemelham.

O espaço de fase de giro na figura IV.41 revela um fenômeno de *backward-whirl*. Assim como no estudo do bit-bounce e whirl, as velocidades de giro são superiores a rotação da coluna. Isso é um indicativo de que o atrito durante o contato lateral é contrário rotação e a favor do movimento de giro. Isso explica a redução vista no diagrama do modo torcional, que devido ao acoplamento também impacta da mesma forma o modo axial.

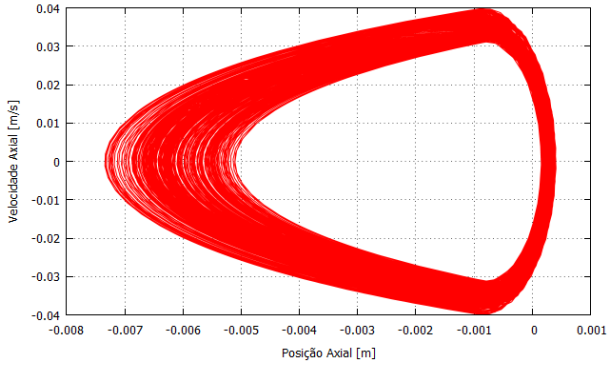


Figura IV.38 Espaço de Fase do Modo Axial [L = 7000 m]

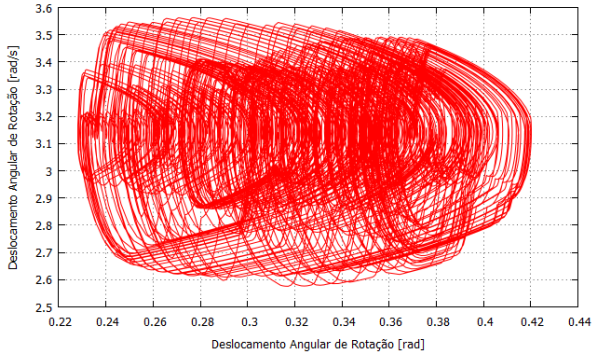


Figura IV.39 Espaço de Fase do Modo Torcional [L = 7000 m]

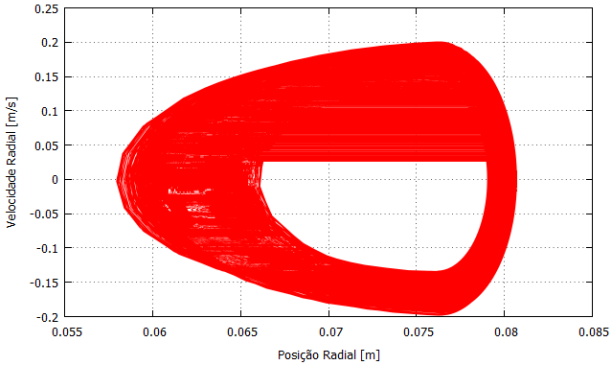


Figura IV.40 Espaço de Fase Radial do Modo Lateral [L= 7000 m]

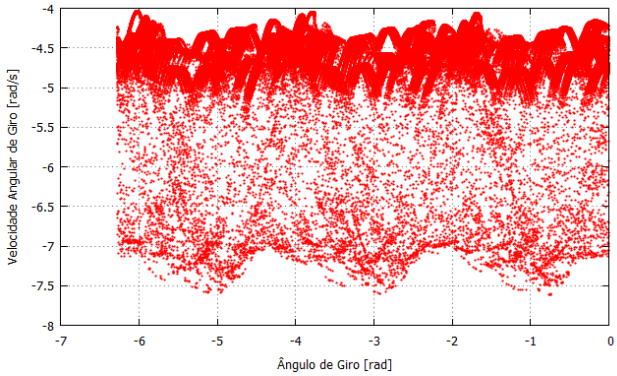


Figura IV.41Espaço de Fase de Giro do Modo Lateral [L=7000 m]

Visando avaliar outras possibilidades na resposta considera-se os diagramas anteriores avaliados sob condições iniciais diferentes. Seguindo a abordagem utilizada em Divenyi (2009) e Divenyi et al. (2012), os vários comprimentos da coluna são testados utilizando as condições iniciais da interação anterior. Com isso, suas condições inicias são reiniciadas a cada interação. Os diagramas do modo axial, torcional e lateral são mostrados, nesta ordem, nas figuras IV.42 a IV.44.

Nessas condições, o *bit-bounce* começa em torno de 7000 metros (figura IV.42), muito acima do valor previsto no diagrama axial da figura IV.34. A partir deste valor de comprimento, a coluna

apresenta variações em seus valores máximos, em especial uma abrupta queda próxima a 9000 metros. Esse comportamento se deve as condições inicias e reforça sua participação nas respostas dinâmicas da coluna durante a perfuração.

Chama a atenção ainda que, próximo ao intervalo entre 9000 e 9500 metros, a coluna apresenta um comportamento de baixa amplitude somente sob influência do *bit-bounce*. Pouco depois, é visto um salto nas respostas máximas em todos os modos de vibração coincidindo com uma estreita faixa dominada pelo whirl. Isso revela a possibilidade de que sob certas condições o *whirl* possa induzir o *bit-bounce*. O mecanismo para isso é o atrito durante o conto lateral, caso seja orientado a favor da rotação é possível que esta força incremente seu valor o suficiente para induzir vibrações axiais elevadas. Esse incremento pode ser visto no diagrama do modo torcional na figura IV.43.

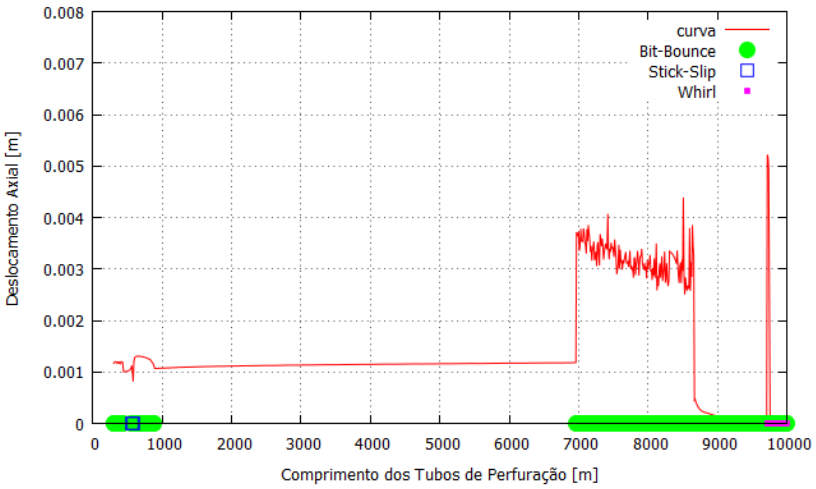


Figura IV.42 Diagrama do Modo Axial para Condições Reiniciadas [22,24 kN]

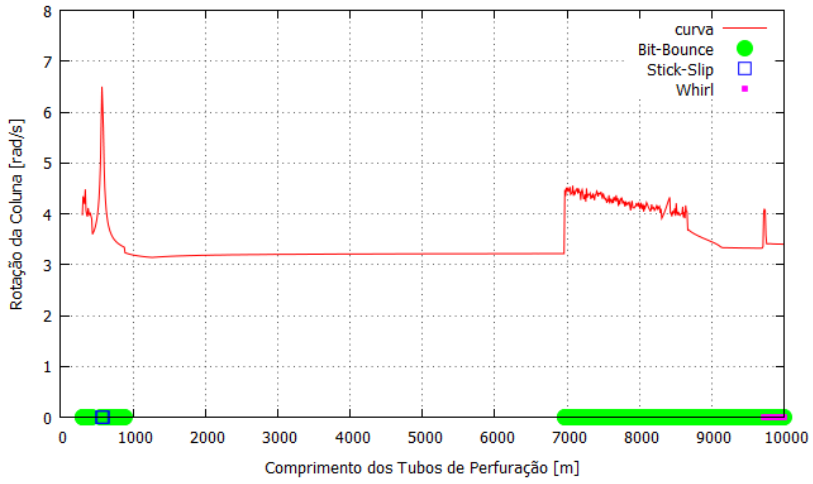


Figura IV.43 Diagrama do Modo Torcional para Condições Reiniciadas [22,24 kN]

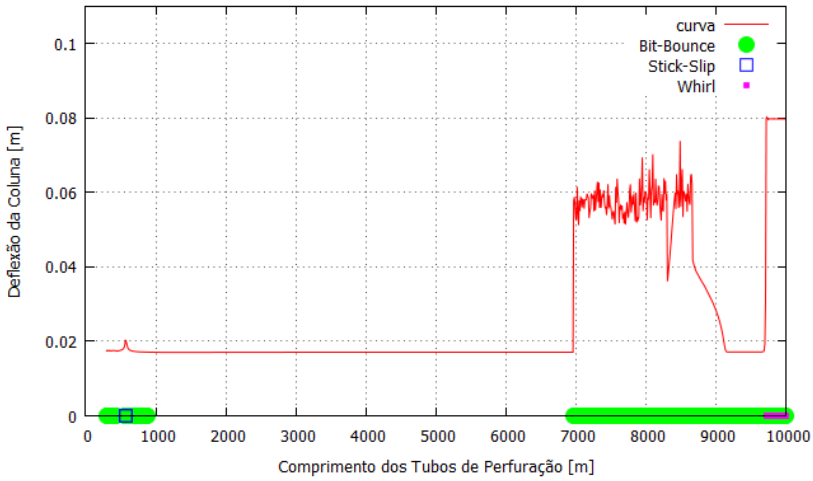


Figura IV.44 Diagrama do Modo Lateral para Condições Reiniciadas [22,24 kN]

A seguir, nas figuras IV.45 até IV.47, estão expostos os diagramas referentes ao peso sobre a broca com o valor aumento para 66,72 kN. O aumento deste parâmetro tornou a coluna mais propensa ao *stick-slip* e *whirl* para profundidades elevadas. Contudo, para esse valor de peso sobre a broca a coluna manteve um comportamento desejável por um faixa de comprimentos maiores. Nesse momento o *bit-bounce* se encontra mais presente à partir de 3000 metros. Pode-se aferir então, que o aumento isolado do peso sobre a broca se mostrou eficaz no controle de vibrações severas da coluna para baixas e médias profundidades. Entretanto, para profundidades maiores tal ação não se revelou eficaz.

O aumento do peso sobre a broca em profundidades elevadas foi responsável por vibrações severas de outros modos durante a operação. Os picos dos diagramas do modo torcional e lateral, mostrados nas figuras IV.46 e IV.47 foram sensivelmente aumentados bem como sua faixa de incidência. Note também que agora há *whirl* em uma ampla faixa de comprimentos que começa em 5500 metros aproximadamente.

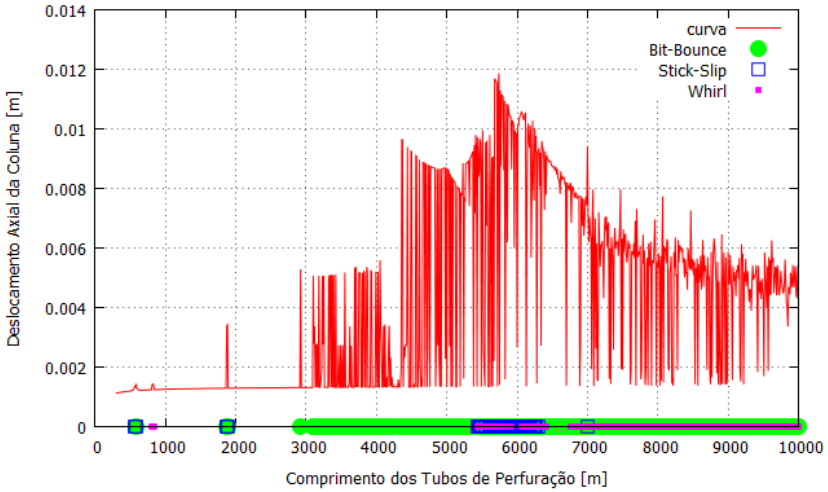


Figura IV.45 Diagrama do Modo Axial [66,72 kN]

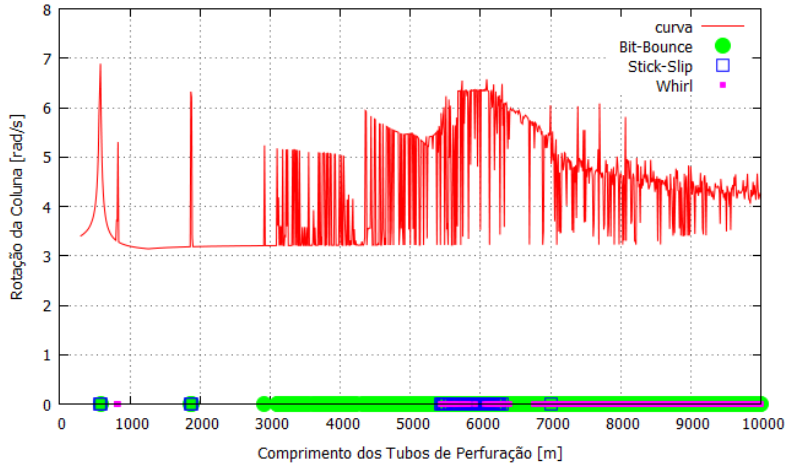


Figura IV.46 Diagrama do Modo Torcional [66,72 kN]

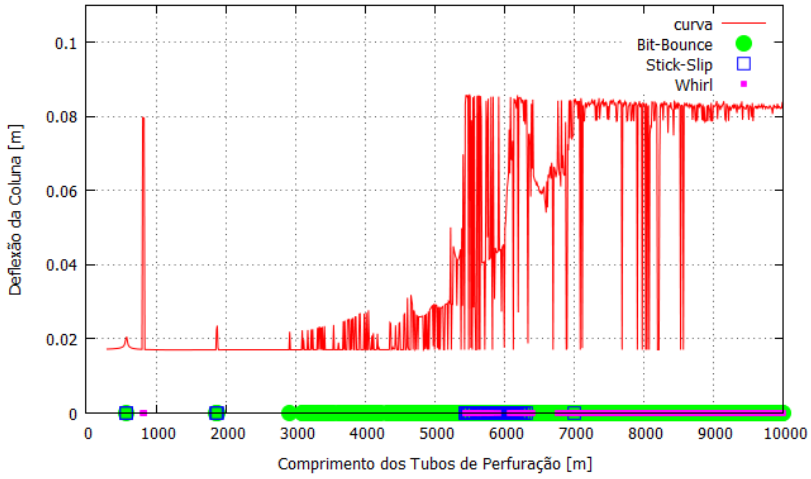


Figura IV.47 Diagrama do Modo Lateral [66,72 kN]

Assim como nos diagramas sujeitos ao peso sobre a broca de 22,4 kN, há uma região onde os três fenômenos críticos podem ser identificados. Ela é maior e compreende um intervalo entre 5400 a 6400 metros aproximadamente, sua ampliação é mostrada na figura IV.48. Observe que a maior compressão do BHA e os maiores torques resistivos possibilitaram ao *whirl* e ao *stick-slip* atuarem em conjunto com o *bit-bounce*. Note também que se trata de uma circunstância rara, pois a existência dos três fenômenos críticos se faz presente em apenas certas regiões de um pequeno intervalo do diagrama.

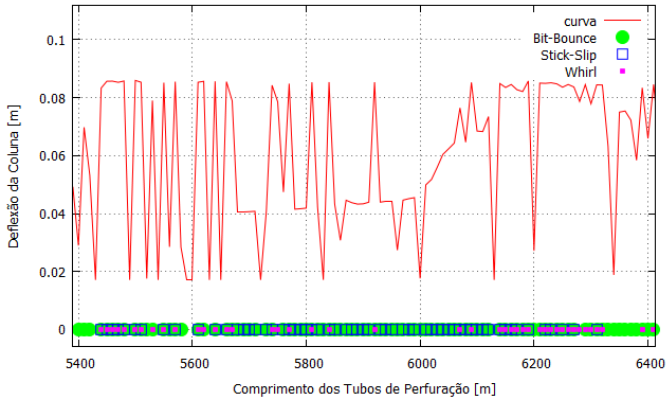


Figura IV.48 Ampliação do Intervalo de Diagrama do Modo Lateral [66,72 kN]

De posse da figura IV.48 é possível estudar o comportamento da coluna regido pela ocorrência simultânea dos três fenômenos críticos. A identificação dos parâmetros que propiciam este comportamento seria uma tarefa impossível visto sua pequena incidência. Com este artifício, uma análise dos espaços de fase foi realizada para o comprimento de 5470 metros.

O espaço de fase do modo axial (figura IV.49) apresenta uma curva característica do comportamento de *bit-bounce*. O mesmo é válido para o espaço de fase do modo torcional e radial, conforme figuras IV.50 e IV.51. Sua curva se assemelha qualitativamente ao estudo do comportamento regido pelo *bit-bounce* e *stick-slip* e pelo *bit-bounce* e *whirl* respectivamente. O espaço de fase referente ao giro (figura IV.52) se assemelha ao visto para o comprimento de 7000 m e peso sobre a broca de 22.24 kN. Isso é esperado uma vez que o diâmetro da coluna e rotação são os mesmos. Como o atrito é contrário a rotação a velocidade de giro é favorecida em detrimento da rotação.

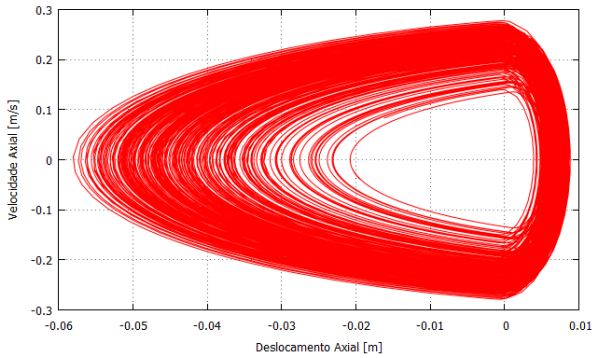


Figura IV.49 Espaço de Fase Axial [L = 5470 m]

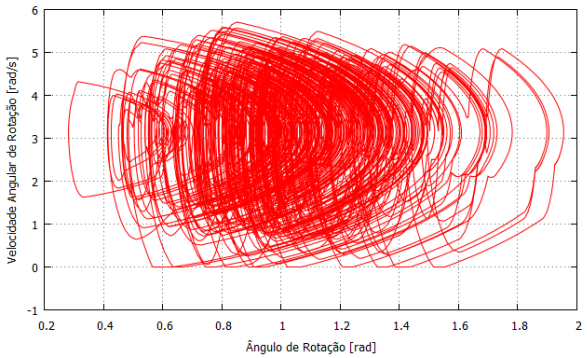


Figura IV.50 Espaço de Fase Torcional [L = 5470 m]

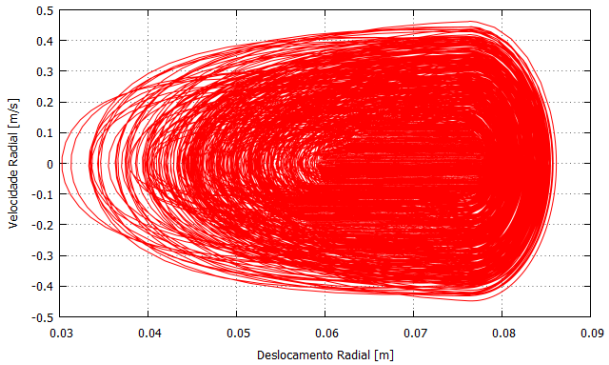


Figura IV.51 Espaço de Fase Radial [L = 5470m]

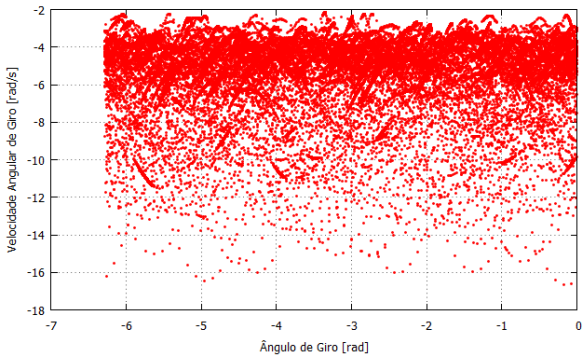


Figura IV.52 Espaço de Fase de Giro [L = 5470 m]

As figuras IV.53 a IV.55 mostram os diagramas axial, torcional e radial com as condições iniciais reiniciadas. O efeito do aumento do peso sobre a broca é nítido nesse tipo de diagrama. É possível observar um salto das repostas dinâmicas próximas de 500 metros devido a presença do *stick-slip* e *bit-bounce*.

Apenas próximo de 10000 metros são capturados outros comportamentos críticos novamente. É possível observar a influência do *whirl* nas respostas máximas dos outros modos. O aumento do deslocamento radial induziu um sensível aumento na rotação, isso é visto comparando seus

respectivos diagramas nas figuras IV.54 e IV.55. Contudo, no diagrama do modo axial (figura IV.53) o incremento na rotação não foi o suficiente para induzir uma resposta axial diferente da obtida nos comprimentos imediatamente anteriores.

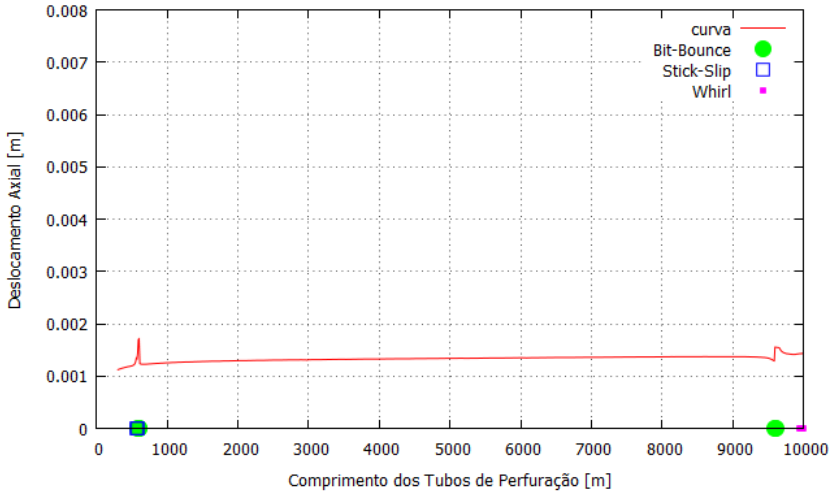


Figura IV.53 Diagrama do Modo Axial para Condições Reiniciadas [66,72 kN]

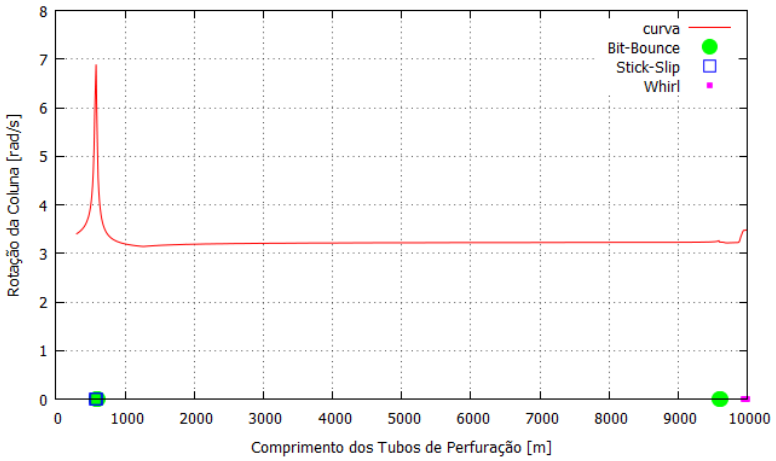


Figura IV.54 Diagrama do Modo Torcional para Condições Reiniciadas [66,72 kN]

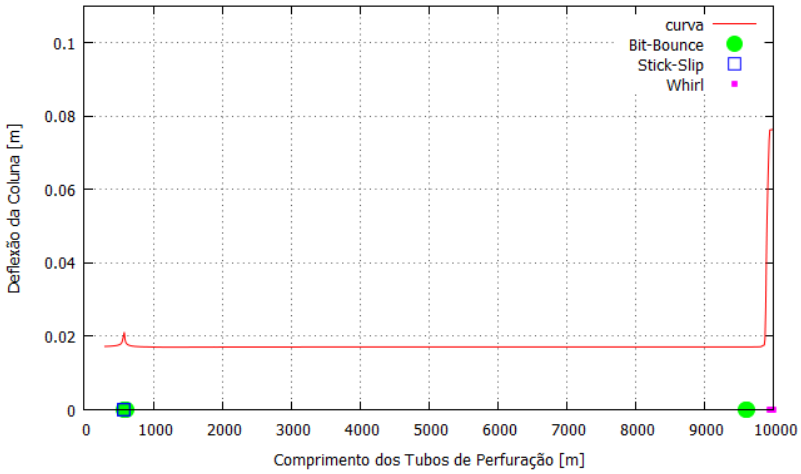


Figura IV.55 Diagrama do Modo Lateral para Condições Reiniciadas [66,72 kN]

IV.2.2 Avaliação da Comportamento Dinâmico da Coluna para um Diâmetro de Broca Elevado

O aumento do diâmetro da broca pode induzir um novo conjunto de resultados. Como nos diagramas anteriores foi utilizado um valor médio para esse diâmetro, neste momento será utilizado um valor próximo do máximo praticado no campo. Essa situação corresponde ao momento de abertura do poço, um valor típico para seu diâmetro é de 26 polegadas e este será usado. Para esse novo valor de diâmetro o peso sobre a broca analisado será o de 22,24 kN, todos os outros parâmetros permanecerão idênticos.

Os diagramas dos modos axial, torcional e lateral são apresentados nas figuras IV.56 a IV.58. Pode-se ver que houve um salto na quantidade de incidência do *stick-slip*. Além disso, em regiões abaixo de 2000 metros, não há mais um intervalo dominado por uma dinâmica desejável (figura IV.34). A existência do stick-slip induziu o *bit-bounce* para esse intervalo. A inexistência de *whirl* também é percebida nos diagramas, contudo não se pode afirmar se sua presença é dificultada pelo *stick-slip* e/ou pelo aumento da deflexão necessária para o contato lateral.

É possível identificar no diagrama do modo lateral (figura IV.58) que há apenas três picos onde a deflexão é significativa. Contudo, tais valores não são suficientes para permitir o contato lateral, o que demonstra que tal fenômeno crítico não é uma preocupação para os primeiros estágios da perfuração. A maior propensão ao *stick-slip* é uma consequência natural, pois a broca possui maior superfície de contato com a formação.

Isso também torna a coluna mais vulnerável as oscilações do modo torcional. Com um diâmetro da broca elevado qualquer vibração axial amplifica torques de atrito e corte. Com isso parte da energia é armazenada e liberada toda vez que a compressão do solo varia, o que gera um aumento da rotação. Veja no diagrama do modo torcional, figura IV.57, que em 7000 metros, mesmo não estando sob *stick-slip* o valor da rotação é significativamente superior ao da mesa. Outra conclusão importante é que, para esta etapa, o aumento do peso sobre a broca se mostra como um diagnóstico equivocado para o trato do *bit-bounce*. Uma vez que boa parte deste fenômeno é induzido pelo *stick-slip*, uma ação mais promissora seria a mudança nos valores da rotação.

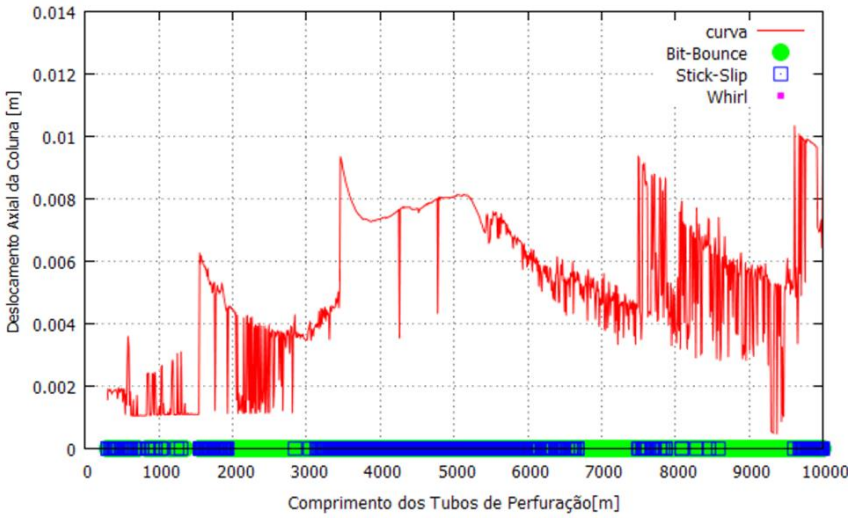


Figura IV.56 Diagrama do Modo Axial

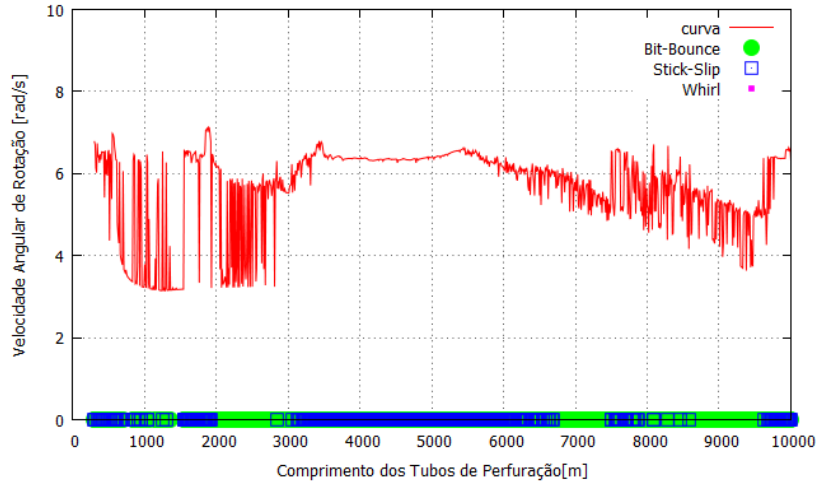


Figura IV.57 Diagrama do Modo Torcional

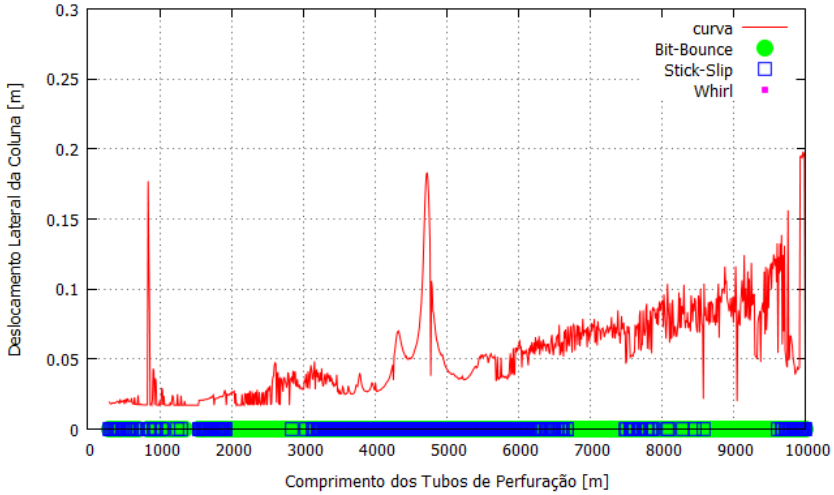


Figura IV.58 Diagrama do Modo Lateral

IV.2.3 Variação Contínua da Rotação sob Diferentes Pesos Sobre a Broca

De posse do conhecimento das respostas dinâmicas que a coluna demonstrou nas condições estudadas, resta saber que influência a rotação pode oferecer à perfuração. Para isso um comprimento específico é estudado sob diferentes pesos sobre a broca e com uma variação continua na sua rotação. Partindo de um valor baixo a rotação é continuamente aumentada e o oposto ocorre para sua redução. O objetivo é avaliar se uma variação suave desse parâmetro é suficiente para mitigar vibrações críticas antes identificadas em outros diagramas, porém também se espera que novos comportamentos sejam capturados.

Isso também permite obter conclusões quanto as condições iniciais, uma vez que o mesmo valor de velocidade pode ser atingido a partir da variação crescente ou decrescente da rotação. Assim, os diversos comportamentos que uma coluna pode oferecer são finalmente estudados e fornecem uma conclusão ampla a respeito das maneiras de mitigar ou induzir dinâmicas críticas.

Em operações com brocas de grande diâmetro o *whirl* não se mostrou um problema significativo ao contrário do *stick-slip* e *bit-bounce*. Com isso o aumento isolado do peso sobre a broca não representa uma ação recomendável. Entretanto essas conclusões se limitam apenas ao valor de

rotação estudado. Visando um estudo mais amplo, uma coluna com um valor de comprimento médio de 5000 metros e broca de 26 polegadas é inicialmente estudada. Todos os parâmetros restantes da análise se encontram na tabela IV.8.

Os diagramas do modo axial para a condição de peso sobre a broca de 22,24 kN são estudados. A figura IV.59(a) representa a variação crescente da rotação. Nela é visto uma incidência do *stick-slip* e *bit-bounce* em torno de 2 rad/s. A ausência do *stick-slip* para valores logo acima dessa rotação sugere que o bit-bounce é um fenômeno induzido. Em seguida há um intervalo em torno de 3 rad/s onde uma dinâmica desejável é dominante. Assim, os comportamentos críticos foram atenuados pelo aumento contínuo desse parâmetro.

Um fato importante é que essa coluna, partindo de 3 rad/s, apresentou *stick-slip* e *bit-bounce*, como mostrado na figura IV.56. Isso mostra que o aumento contínuo desse parâmetro operacional se revelou um meio adequado ao trato de vibrações críticas para a condição estudada. Contudo, o mesmo não foi percebido no decréscimo. Note, na figura IV.59(b), que o intervalo de comportamento desejável foi eliminado e uma maior incidência do *stick-slip* é nitidamente percebido.

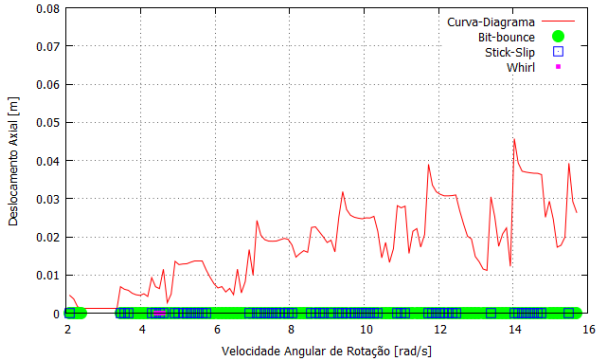


Figura IV.59(a) Diagrama Axial de Rotação Crescente

(Wob = 22,24 kN)

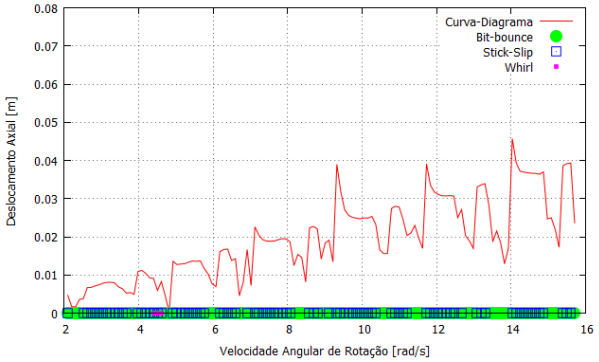


Figura IV.60(b) Diagrama Axial de Rotação Decrescente

(Wob = 22,24 kN)

De maneira análoga, as figuras IV.60 e IV.61 representam os pares de diagramas crescente e decrescente do modo axial para os pesos sobre a broca de 44.48 e 66.72 kN. Nos diagramas de rotação crescente é nítido que o aumento da rotação sob pesos maiores prolongam o intervalo de dinâmica desejável. Além disso, de acordo com o esperado, é perceptível que as amplitudes do modo axial foram reduzidas com o aumento do peso.

Contudo, a comparação entre as figuras IV.60(a) e IV.61(a) mostra que o aumento indiscriminado dessa carga axial pode aumentar significativamente a presença do *whirl*. Vale lembrar que este não foi identificado em nenhuma faixa de comprimento anteriormente testada e revela o cuidado necessário no controle do peso sobre a broca. Um aumento sensível de intervalos sujeitos ao *stick-slip* também é visto, em especial em baixas e médias rotações. Essa tendência com relação ao modo torcional é vista em maior proporção nos diagramas de rotação decrescente, sobretudo na figura IV.61(b). É importante notar pela comparação das figuras IV.60(b) e IV.61(b), que para a redução da rotação foram identificados poucos casos de *whirl*.

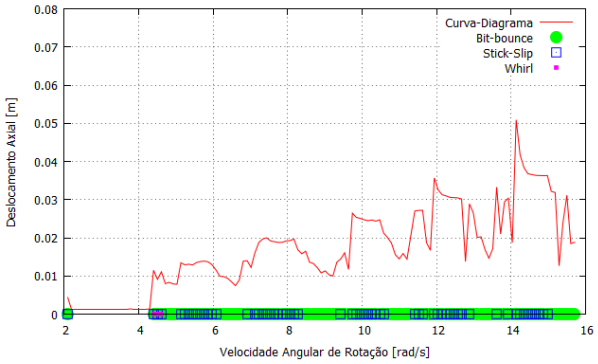


Figura IV.61(a) Diagrama Axial de Rotação Crescente

(Wob = 44.48 kN)

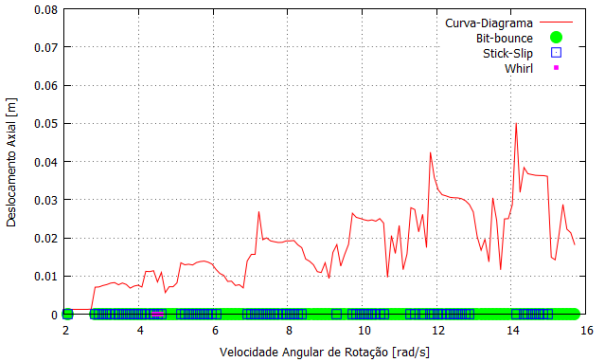


Figura IV.62(b) Diagrama Axial de Rotação Decrescente

(Wob = 44.48 kN)

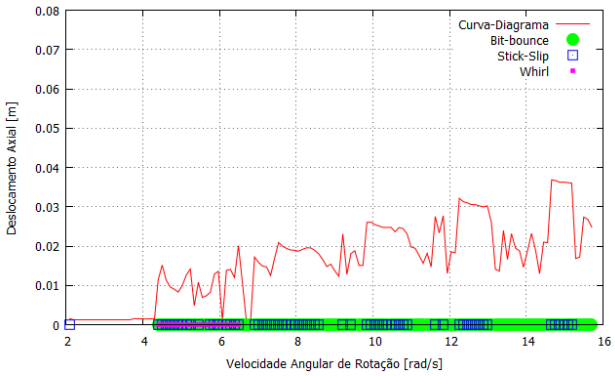


Figura IV.63(a) Diagrama Axial de Rotação Crescente

(Wob = 66.72 kN)

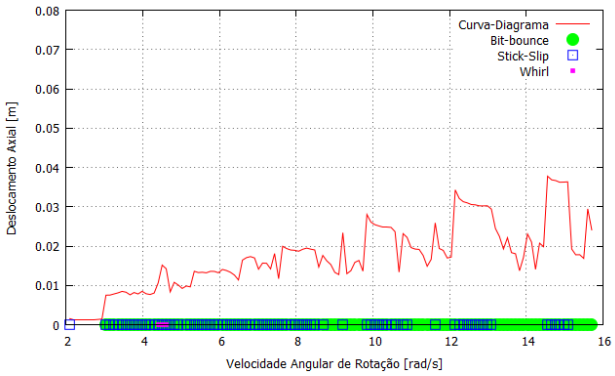


Figura IV.64(b) Diagrama Axial de Rotação Decrescente

(Wob = 66.72 kN)

Os diagramas do modo lateral para o peso sobre a broca de 22.24 kN são apresentados nas figuras IV.62 e representam os casos de rotação crescente e decrescente. Pode-se ver claramente o acoplamento entre os modos quando a coluna opera a 2 rad/s. Os elevados carregamentos de impacto durante o *bit-bounce* e as variações bruscas da rotação pelo *stick-slip* induziram uma elevada deflexão da coluna. Com o aumento da rotação e a eliminação destas fontes de excitação as deflexões se tornam pequenas.

Na figura IV.62(a) é possível perceber a participação do desbalanceamento aumentando solidariamente com a rotação dentro do intervalo dito como desejável. Essa tendência permanece até a dinâmica da coluna degenerar para o caso crítico de *bit-bounce* e *stick-slip,* os quais induzem um novo salto na deflexão. Outro fato relevante ocorre no intervalo de dinâmica desejável e mostra que embora deflexões elevadas possam ocorrer, estas não prejudicaram o deslocamento axial da coluna caso não haja contato lateral. Isso é percebido na ausência de qualquer perturbação significativa do modo axial na figura IV.59(a) e justifica classificar apenas o *whirl* que ofereça contato lateral como um comportamento crítico.

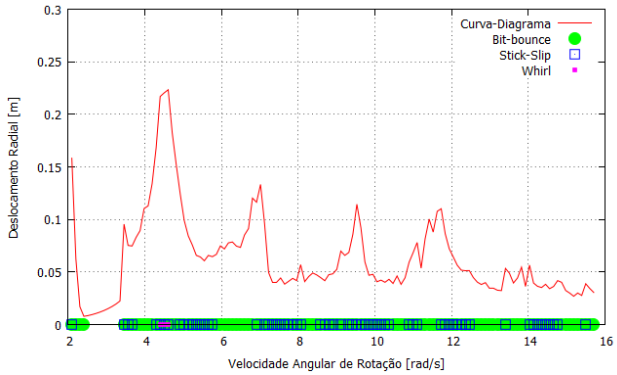


Figura IV.65(a) Diagrama Lateral de Rotação Crescente

(Wob = 22,24 kN)

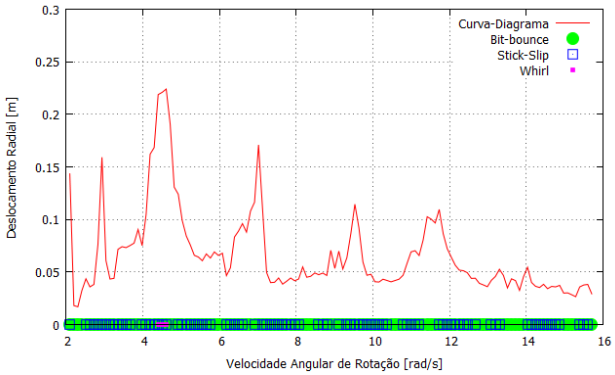


Figura IV.66(b) Diagrama Lateral de Rotação Decrescente

(Wob = 22,24 kN)

As figuras IV.63 representam os diagramas do modo lateral para o peso sobre a broca de 44.48 kN para rotação crescente e decrescente respectivamente. Para essa condição o aumento contínuo da deflexão provido pelo desbalanceamento pode ser melhor visto. No geral há pouca diferença qualitativa entre as amplitudes que se vê nos diagramas do modo lateral com rotação crescente e decrescente.

Entretanto, diferenças importantes começam a surgir nos diagramas de peso sobre a broca de 66.72 kN, figuras IV.64. Nos diagramas de rotação crescente, figura IV.64(a), é visto uma região dominada por *whirl* e caracterizada por uma deflexão quase constante que cresce sensivelmente para rotações maiores. Em seguida esse fenômeno é dissipado e apenas *bit-bounce* e *stick-slip* são vistos. Já no diagrama de rotação decrescente, figura IV.64(b) o intervalo dominado pelo *whirl* é significativamente menor e sua dinâmica se assemelha a vista na figura IV.63(b). Apesar de em todos os diagramas as deflexões tenderem a diminuir para valores altos de rotação, sua redução mostrou-se uma solução mais eficaz para a eliminação do *whirl* visto seu menor intervalo.

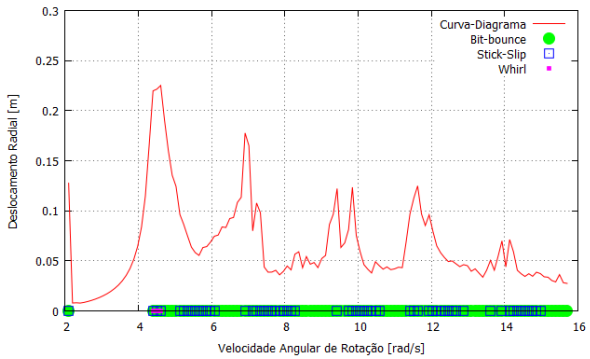


Figura IV.67(a) Diagrama Lateral de Rotação Crescente

(Wob = 44.48 kN)

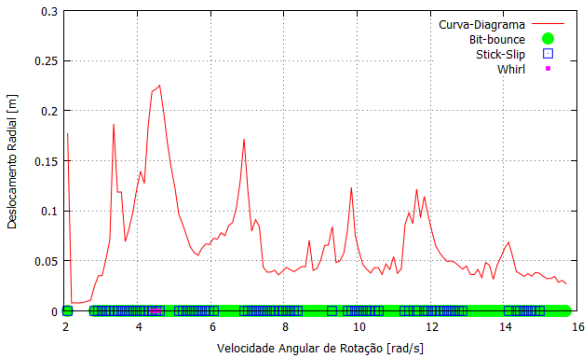


Figura IV.68(b) Diagrama Lateral de Rotação Decrescente

(Wob = 44.48

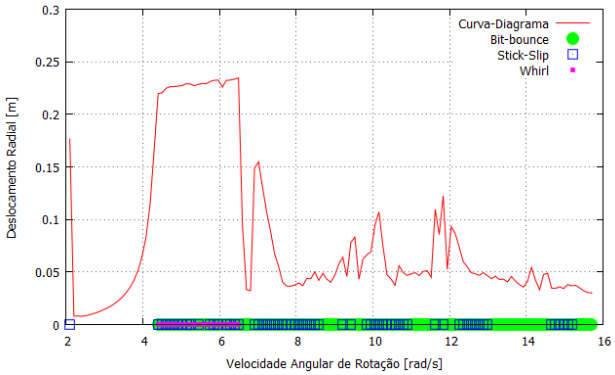


Figura IV.69(a) Diagrama Lateral de Rotação Crescente

(Wob = 66.72 kN)

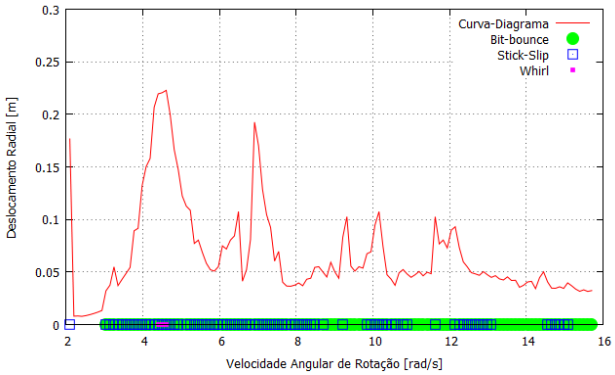


Figura IV.70(b) Diagrama Lateral de Rotação Decrescente

(Wob = 66.72 kN)

Um segundo conjunto de diagramas é obtido a partir do estudo dessa mesma coluna, porém a um diâmetro de broca de 15 polegadas. Essa é uma escolha natural, pois uma grande quantidade de informações importantes já foi obtida para essa configuração. Diante da redução do diâmetro do poço é esperado uma maior participação do *whirl* em detrimento do *stick-slip*.

Os diagramas axiais de rotação crescente e decrescente são apresentados de forma análoga para o peso sobre a broca de 22.24 kN nas figuras IV.65. Há uma grande discrepância nas amplitudes quando ambos os diagramas são comparados, sobretudo nas regiões sob maiores rotações. Isso se deve a presença do *whirl* nos diagramas de rotação crescente, que para essa situação se opõe a rotação e consequentemente limita o deslocamento axial. Já na figura IV.65(b) observa-se que os saltos dinâmicos observados estão relacionados ao *stick-slip*. O mesmo ocorre para o peso sobre a broca de 66.72 kN nos diagramas axiais de rotação crescente e decrescente, figuras IV.66. Uma comparação entre os diagramas de rotação decrescente revela um pequeno aumento da incidência de *stick-slip* quantos aos valores mais elevados de rotação. Já nos diagramas de rotação crescente, figuras IV.65(a) e IV.66(a), o aumento do *stick-slip* não é perceptível.

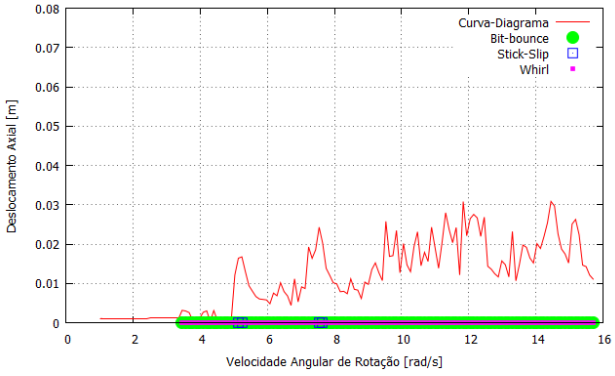


Figura *IV.71*(a) Diagrama Axial de Rotação Crescente

(Wob=22.24 kN)

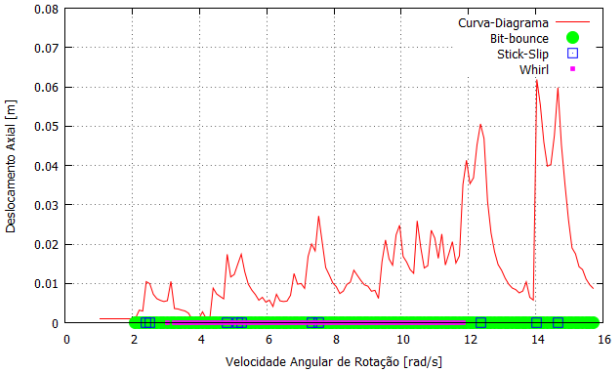


Figura *IV.72*(b) Diagrama Axial de Rotação Decrescente

(Wob = 22.24 kN)

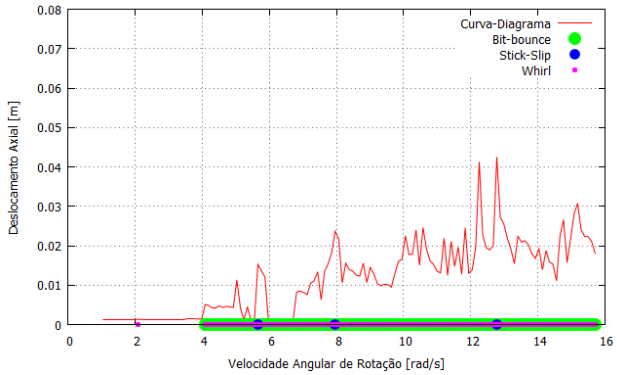


Figura IV.73(a) Diagrama Axial de Rotação Crescente

(Wob = 66.72 kN)

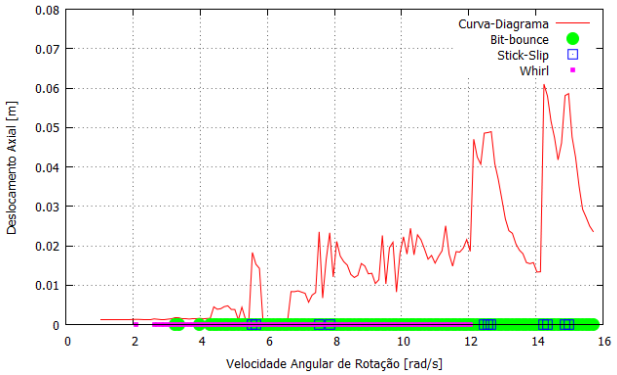


Figura IV.74(b) Diagrama Axial de Rotação Decrescente

(Wob = 66.72 kN)

As figuras IV.67 representam os diagramas laterais de rotação crescente e decrescente para o peso sobre a broca de 22.24 kN. É possível concluir, para a situação estudada, que o aumento ou redução contínua da rotação não é uma maneira adequada para o trato de vibrações laterais. Uma ampla faixa sob a presença do *whirl* é vista até que esse fenômeno seja eliminado. Em contrapartida reiniciar a operação já com uma rotação elevada se mostra mais apropriado na eliminação do *whirl*. Isso é justificado nos diagramas laterais de rotação decrescente, onde os maiores valores de velocidade não se encontram sujeitos a esse comportamento crítico.

O mesmo é observado nos diagramas com peso sobre a broca de 66.72 kN para rotação crescente e decrescente, figuras IV.68. Na figura IV.68(a) é visto com maior destaque a deflexão sendo aumentada até o contato lateral a partir de 4 rad/s. O aumento do peso sobre a broca eliminou a região anterior a esse valor de rotação antes dominado pelo *bit-bounce* e *whirl* visto na figura IV.68(a). Contudo, com o aumento dessa carga axial uma maior incidência de *whirl* auto induzido é observada e é indicada nos valores de rotação dominado apenas por este fenômeno crítico. Uma faixa de intervalos onde o *whirl* é identificado pode ser visto na figura IV.68(b) entre 2 a 4 rad/s. Ela mostra, para esta situação, que a redução da rotação não é viável quando a coluna já se encontra em baixas rotações.

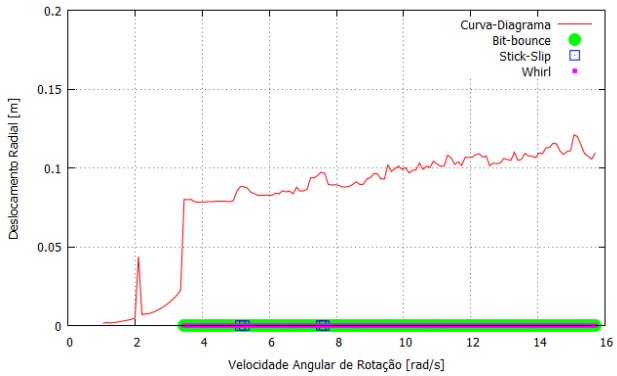


Figura IV.75(a) DiagramaLateral de Rotação Crescente

(Wob = 22.24 kN)

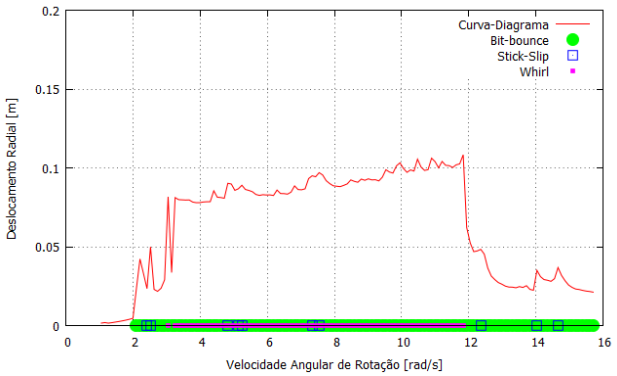


Figura IV.76(b) Diagrama Lateral de Rotação Decrescente

(Wob = 22.24 kN)

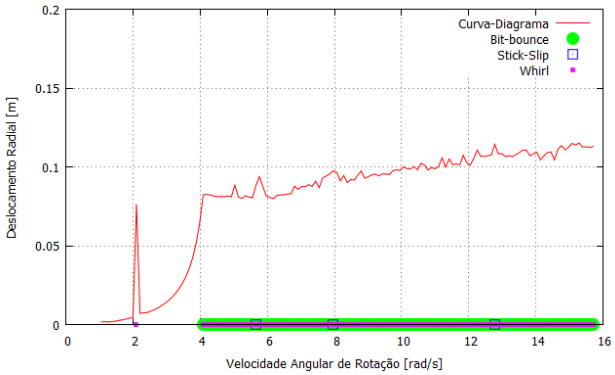


Figura IV.77(a) Diagrama Lateral de Rotação Crescente

(Wob = 66.72 kN)

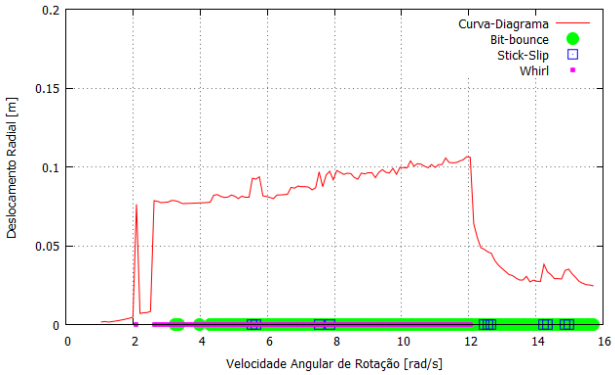


Figura IV.78(b) Diagrama Lateral de Rotação Decrescente

(Wob = 66.72 kN)

V. Conclusões

Esse trabalho dedicou-se ao estudo das vibrações que ocorrem durante a perfuração, em especial as que induzem comportamentos críticos capazes de prejudicarem severamente a coluna e toda a operação. Tal dinâmica é causada principalmente pela interação broca-rocha e pelo contato com as paredes do poço, que são representadas por não linearidades do tipo não suave.

Um sistema discreto baseado no modelo proposto por Christophoru e Yigit (2003) é utilizado para descrever a dinâmica da coluna. Ele é composto por equações diferenciais de segunda ordem que representam os modos de vibração axial, torcional e lateral da coluna. Além disso, são incorporados importantes aspectos como a redução da rigidez de flexão por cargas compressivas e torque, o desbalanceamento e a interação broca-rocha.

Simulações numéricas são realizadas visando apresentar uma análise paramétrica explorando uma ampla quantidade de comportamentos qualitativamente de acordo com os vistos em medições de campo e em outros trabalhos da área. Inicialmente, explora-se uma série de comportamentos, dando destaque aos comportamentos críticos, *bit-bounce*, *stick-slip* e *whirl*, e suas interações.

Sob as mesmas condições, uma coluna apresenta o *bit-bounce* ao utilizar uma broca tricônica e o *stick-slip* quando usa uma broca tipo PDC. Essa tendência confirma a observação feita em Chevallier (2000). A redução do peso sobre a broca e da rotação da coluna também se mostraram como meios de indução do *bit-bounce* e *stick-slip*. Já o aumento da rotação induziu o *whirl* devido à amplificação do desbalanceamento. Modificações desses dois parâmetros operacionais também induzem comportamentos críticos combinados. A atuação conjunta de *bit-bounce* e *whirl* foi conseguida pelo aumento do peso sobre a broca e da rotação. Por essa ação foi mostrado que o aumento da rotação também pode induzir o *bit-bounce* como visto em Divenyi et al. (2012). Com relação ao *whirl*, este é induzido pela amplificação do desbalanceamento e pela maior compressão a qual o BHA é submetido. Isso confirma as observações feitas em Christophoru e Yigit (1998).

A combinação de *stick-slip* e *bit-bounce* é induzida pelo aumento do peso sobre a broca e redução da rotação. A existência do *bit-bounce* sob baixas rotações da mesa rotativa e a própria análise dos espaços de fase indicam que esse fenômeno é induzido e não auto-excitado. Dessa maneira, os saltos de rotação durante as fases de *slip* se mostraram capazes de induzir um comportamento axial crítico como mostrado em Divenyi et al. (2012). A atuação simultânea do *stick-slip* e *whirl* não foi reproduzida o que confirma que tal comportamento é raro (Leine et al., 2002).

A análise paramétrica é expandida a partir da utilização de diagramas de valores máximos. Por meio dessa ferramenta é possível testar múltiplas condições operacionais para diferentes configurações da coluna. Nesse tipo de diagrama as amplitudes máximas dos modos de vibração são capturadas para cada variação de um parâmetro escolhido.

Inicialmente considera-se o aumento do comprimento da coluna, ou da profundidade, revelando que esse parâmetro é um fator importante na indução de vibrações críticas. Isso se deve a redução da rigidez da coluna com o aumento de seu comprimento. A variação desse parâmetro foi investigada para valores de pesos sobre a broca maiores. Foi identificado amplitudes axiais menores e um maior intervalo de profundidades com uma dinâmica desejável a medida que o peso sobre a broca era aumentado. Entretanto, a variação crescente deste parâmetro operacional induziu uma maior incidência do *stick-slip* e do *whirl*.

A comparação entre os modos de vibração revela que os modos axial e torcional são estritamente dependentes. Os desenvolvimentos de suas amplitudes máximas se mostraram qualitativamente semelhantes para todos os comprimentos testados. Entretanto, para o modo lateral, essa relação

direta entre as respostas de outros modos só ocorreu em profundidades elevadas. Um resultado importante é obtido no diagrama de variação do comprimento é quando ocorre uma queda abrupta da rotação e do deslocamento axial na presença do *whirl*. Isso ocorre devido a orientação da força de atrito durante o contato lateral. A velocidade que tangencia as paredes do poço tem na rotação a sua maior parcela. Com isso, há uma queda brusca na rotação provida por essa não suavidade e consequentemente uma queda também no deslocamento axial.

A análise de diagramas construídos a partir de diferentes condições iniciais permite avaliar condições de operação diferentes. Um extenso intervalo de comprimentos com uma dinâmica desejável é identificado sob essa circunstância. Isso indica que um comportamento periódico é capaz de se propagar se o sistema partir de uma trajetória suave. Essa informação é de particular interesse em fases pós complementação do poço, onde a coluna é reposicionada para novamente iniciar a perfuração.

Um estudo quanto a perfuração de poços de grande diâmetro também é realizada para diferentes profundidades. Os resultados obtidos apontam que o *stick-slip* e o *bit-bounce* são os fenômenos críticos mais importantes, sendo identificados na maior parte dos valores simulados. O elevado diâmetro da broca torna a coluna extremamente susceptível ao *stick-slip* que é capaz de induzir vibrações axiais severas. Também foram percebidos intervalos onde apenas o *bit-bounce* ocorre e isso é consequência da redução da rigidez pelo o aumento do comprimento da coluna.

A importância da variação da rotação também é investigada avaliando se a dinâmica dominada por algum comportamento crítico pode tornar-se eficiente. Dessa maneira um comprimento médio foi escolhido e analisado para os dois diâmetros de broca testados. No caso de poços de grande diâmetro o aumento continuo da rotação mostrou-se mais eficaz que o aumento do peso sobre a broca, pois foi visto um intervalo onde suas respostas dinâmicas são desejáveis. Contudo, seu aumento para além desse intervalo induziu o *whirl* que anteriormente não foi visto em nenhum dos valores simulados no diagrama de variação do comprimento. O *whirl* surgiu para um vasto intervalo de rotação com a diminuição diâmetro de broca.

VI. Trabalhos Futuros

O estudo da dinâmica acoplada dos três modos de vibração durante a perfuração é extenso, por essa razão optou-se principalmente pelo modelo de corte clássico. Outra abordagem já bem definida é o modelo de corte proposto por Detournay et al. 1992. Uma comparação entre os dois modelos é feita por Anjos (2013) apenas para o modo torcional. Sua extensão para outros modos restantes posiciona-se como uma evolução natural desse trabalho. Outra frente possível é a utilização das conclusões obtidas para a elaboração de um controle numérico de vibrações. Seu intuito seria tornar a dinâmica durante a operação eficiente para quaisquer valores de peso sobre a broca e rotação.

VII. Referências Bibliográficas

AARRESTAD, T.V., TONNESEN, H.A., KYLLINGSTAD, A. “Drilling vibrations: comparison between theory and experiments on a full scale research drilling rig.” SPE/IADC 14760, Drilling Conference in Dallas (1986).

AHMADIAN, H., NAZARI S., JALALI H. “Drill String Vibration Modeling Including Coupling Effects.” International Journal of Enginnering Science, pp 59-66, 2007.

API RP 7G, Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits. 16ª Edição. 1998.

ASHLEY, D.K., MCNARY, X.M., TOMLINSON, J.C. “Extending BHA Life with Multi-Axis Vibration Measurements.” Proceedings of SPE/IADC# 67696, IADC/SPE Drilling Conference, 2001 s.d.

BAILEY, J.R., BIEDIGNER, E., SUNDARARAMAN, S., Carson, A.D., Elks, W.C., Dupriest, F.E. “Development and Application of BHA Vibration Model.” Proceedings of the International Petroleum Technology Conference, 2008

CHIN, W.C. “Wave Propagation in Petroleum Engineering.” Gulf Publishing Co., Houston, 1994

CHISTOFOROU A.P., YIGIT A.S. “Dynamic Modelling of Rotating Drillstrings with Borehole Interactions.” Journal of Sound and Vibration, v. 206, pp 243-260, 1997.

CHRISTOFOROU A.P., YIGIT A.S. “Fully Coupled Vibrations of Actively Controlled Drillstrings.” Journal of Sound and Vibration v. 267, pp. 1029-1045, 2002.

DAREING, D. “Drill Collar Length is a Major Factor in Vibration Control.” Journal of Petroleum Technology V. 36, No. 4, pp 637-644, 1984.

DAREING, D. “Rotatory Speed, Drill Collars Control Drillstring Bounce.” Oil and Gas Journal, pp 63-68, 1983.

DETOURNAY, E., DEFOURNY,P. “A phenomenological model of the drilling action of drag bits.” International Journal of Rock Mechanics, pp 13-23, 1992.

DIVENYI, S. “Nonlinear Dynamics and Chaos in Systems with Discontinous Support.” Journal of Schock and Vibration, pp 315-326, 2007.

DIVENYI, S. Dinâmica de Sistemas Não-Suaves Aplicada à Perfuração de Poços de Petróleo. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2009, s.d.

DIVENYI, S., SAVI, M., WIERCIGROCH, M., PAVLOSKAIA, E., “Drill-String Vibration Analysis Using Non-Sniitg Dynamics Approach.” Nonlinear Dynamics, pp. 1017-1035, 2012.

DUNAYEVSKY, V.A., ABBASIAN, F., JUDZLS, A. “Dynamic Stability of Drillstring under Fluctuating Weight on Bit.” SPE Annual Technical Conference and Exhibition 1985.

DYKSTRA, M.W. E D.C.K., WARREN, T.M. CHEN. “Experimental Evaluations of Drill Bit and Drill String Dynamics.” IADC/SPE Drilling Conference 1994.

GARRET, W.R. “The effect of a down hole shock absorber on drill bit and drill stem performance.”, ASME paper No. 62, pp 11, 1962.

GHASEMLOONIA, A., D.G. RIDEOUT E BUTT S. D. “A review of drillstring vibration modeling and suppression methods.” Journal of Petroleum Science and Engineering, pp 150-164, 2015.

HALSEY, G.W., KYLLINGSTAD, A., AARRESTAD, T.V., LYSNE, D. “Drillstring Torsional Vibrations: Comparison Betwwen Theory and Experiment on a Full-Scale Research Drilling Rig.” SPE Annual Technical Conference and Exhibition (1986).

HEISIG, G., NEUBERT, M. “Lateral Drillstring Vibrations in Extended-Reach Wells.” Proceedings of the IADC/SPE# 59235, IADC/SPE Drilling Conference, 2000.

JANSEN, J. “Non-Linear Rotor Dynamics as Applied to Oilwell Drillstring Vibrations.” Journal of Sound and Vibrations, pp 115-135, 1991.

JOGI, P.N., MACPHERSON, J.D., NEUBERT, M. “Field Verification of Model-Derived Natural Frequencies of a Drilling.” ASME Journal of Energy Resources and Technologies, pp 154-162, 2002.

KREISLE, L.F., VANCE, J.M. “Mathematical analysis of the shock sub on the longitudinal vibrations of an oiwell drillstring.” SPE J. 10(4), pp 349-356, 1970.

KYLLINGSTAD A., HASLEY, G.W. “A Study of the *Stick-slip* Motion of the Bit.” Annual Technical Conference and Exhibition (1987).

LEINE, R.I. “Bifurcations in Discontinous Mechanical Systems of Filippov-Type.” Ph.D. Thesis, Technische Universiteit Eindhoven (2000).

LIAO, C.M., VLAJIC, N., KARKI, H., BALACHANDRAN, B. “Parametric Studies on Drill-Sring Motions.” International Journal of Mechanical Sciences v. 54, pp 260-268, 2011.

MELAKHESSOU H., BERLIOZ A., FERRARIS G. “A nonlinear well-drillstring interaction model.” ASME Journal of Vibration Acoustics, pp 46-52, 2003.

MIHAJLOVIC N., VAN DE WOUW N., ROSIELLE P.C.J.N. E NIJMEIJER H. “Interaction Between Torsional and Lateral Vibrations in Flexible Rotor Systems with Discontinous Friction.” Nonlinear Dyn 2007.

NAVARRO-LOPEZ, E.M., CORTES, D. “Avoiding harmfull oscillations in a drillstring through dynamical analysis.” v. 307, pp 152-171, 2007.

OKEWUNMI, S., et al. “BHA selection and Drilling Practives to Successfully Drill and Underream Difficult Deepwater GOM Salt Section, a Case History.” American Associantion of Drilling Engineers Abril de 2007.

P., PARIMAL A. E CATALIN T. “A comparative review of modelling and controlling torsional vibrations and experimentation using laboratory setups.” Journal of Petroleum Science and Engineering, pp 227-238, 2013.

R.I., LEINE, VAN CAMPEN D.H. E KEULTJES W.J.G. “*Stick-slip Whirl* Interaction in Drillstring Dynamics.” Journal of Vibration and Acoustics v. 124, pp 209-220, 2002.

RUDAT, J. E D. DASHEVSKIY. “Develpoment of an Innovate Model Based *Stick-slip* Control System.” Proceedings of The SPE 139996, SPE IADC Drilling Conference and Exhibition 2011.

SCHLUMBERGER. “Drillstring Vibration and Vibration Modeling.” Technical Report (2010).

SPANOS, P.D., CHEVALLIER A.M., POLITIS N.P., PAYNE M.L. “Oil and Gas Well Drillin: A Vibrations Perspective.” The Shock and Vibration Digest 2000.

SPANOS, P.D., SENGUPTA, A.K., CUNNINGHAM, R.A., PASLAY, P.R. “Modelling of Roller Cone Bit Lift-Off Dynamics in Rotatory Drilling,.” ASME Journal of Energy Resources Technology v. 117, pp. 197-207, 1995.

THOMAS, J.E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Editora Interciência, 2001.

VIJAYAN K., VLAJIC N., FRISWELL M.I. “The Influence of Drillstring-Borehole Interaction on *Backward Whirl*.” Proceedings of ISMA (2014).

W., LU E CHU F. “Rotor, Radial and Torsional Vibrations Characteristics of a Rub.” Springer Science+Business 2013.

YIGIT A.S., CHRISTOFOROU A.P. “Coupled Torsional and Bending Vibrations of Drillstrings Subjects to Impact With Friction.” Journal of Sound and Vibration, pp 167-181, 1998.