

# COMPARATIVO DE PARÂMETROS MODAIS PARA O MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE UM MODELO DE COLUNA DE PERFURAÇÃO PETROLÍFERA DE DOIS GRAUS DE LIBERDADE

Luciano da Silva<sup>1</sup>, Imyra Poconé Lima<sup>2</sup>, Nady Jane dos Santos<sup>3</sup>, Laisla Kalika Fontes Leão<sup>4</sup>, Anny Karollinny Santos Nascimento<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Tecnologia e Ciências - FTC, Unidade Acadêmica de Engenharias (Elétrica, Mecatrônica, Civil e Ambiental) – [trixluc@hotmail.com](mailto:trixluc@hotmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Tiradentes - UNIT, Unidade Acadêmica de Engenharia de Petróleo – [myrinh@hotmail.com](mailto:myrinh@hotmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Tiradentes - UNIT, Unidade Acadêmica de Engenharia de Petróleo – [nady.matias@hotmail.com](mailto:nady.matias@hotmail.com)

<sup>4</sup> Universidade Tiradentes - UNIT, Unidade Acadêmica de Engenharia de Petróleo – [laisla\\_kalila@hotmail.com](mailto:laisla_kalila@hotmail.com)

<sup>5</sup> Universidade Tiradentes - UNIT, Unidade Acadêmica de Engenharia de Petróleo – [aknascimento@gmail.com](mailto:aknascimento@gmail.com)

## RESUMO

A coluna de perfuração de petróleo está submetida a constantes vibrações durante o seu funcionamento, ocasionando empenamentos, paradas e até colapso. O acompanhamento desse comportamento durante o regime de trabalho pode ser percebido pela mudança de frequência fundamental e do fator de amortecimento. Neste trabalho foi construído um modelo de coluna de perfuração de dois graus de liberdade para a análise de parâmetros modais e monitoramento. A utilização da Transformada de Hilbert-Huang (HHT) e a Transformada de Fourier (FT) detectam os parâmetros modais a partir do sinal da coluna. e os resultados mostram que o melhor rendimento se dá na utilização da HHT.

Palavras-chave: Monitoramento, Modelagem, Parâmetros Modais, Coluna de Perfuração, Transformada de Hilbert-Huang.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a demanda por energia tem sido cada vez mais crescente e para a obtenção do petróleo passa-se por muitas dificuldades, dessa forma o investimento na área petrolífera torna-se muito caro, porém necessário pois essa fonte de energia tem um papel fundamental na sociedade atual. Das dificuldades encontradas pode-se destacar o sistema de perfuração petrolífera que através da perfuração da formação a coluna produz e sofre muitas vibrações podendo até em certos

casos entrar em colapso. É necessário um monitoramento dessas vibrações para que possam ser tomadas medidas para evitar problemas com a coluna e dessa forma aumentar sua vida útil. Conhecendo-se os parâmetros de projetos, pode-se, através da transformada de Hilbert-Huang (HHT) e da Transformada de Fourier (FT) monitorar essas frequências e tomar medidas para seu controle caso haja alguma diferença entre os parâmetros modais de projeto e os parâmetros modais de funcionamento.



**II CONEPETRO**

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS  
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Caso não se conheça os parâmetros de projeto pode-se calcular analiticamente para um modelo linear (nosso caso) esses dados utilizando a técnica de [SOBRAL, 2009] obtendo-se os parâmetros e comparando com os resultados de cada Transformada.

## 2. MODELAGEM DINÂMICA DA COLUNA DE PERFURAÇÃO

Modelo matemático é um conjunto de equações cuja solução é uma aproximação da resposta de um processo real, e, como tal, apresenta inúmeras limitações. No entanto, alguns modelos são melhores que outros em descrever certos sistemas físicos e de engenharia. Para propósitos de análise e controle, simplificações são necessárias a fim de facilitar a manipulação das equações. Nesse contexto, os modelos de parâmetros concentrados, e.g., modelos em equações diferenciais ordinárias, conduzem a uma análise e simulação do sistema mais simples em comparação com os modelos de parâmetros distribuídos, e.g., modelos em derivadas parciais. [ARCIERI, 2013].

A ideia de usar modelos dinâmicos para representar as condições de operação da coluna de perfuração tem sido um grande desafio. Diversos modelos de parâmetros concentrados foram propostos na literatura para descrever a resposta torcional da coluna,

estes modelos consideram que a broca tem o comportamento de um pêndulo torcional, que pode ser descrita como um pêndulo de torção simples impulsionado por um sistema de rotação (motor elétrico); que os tubos de perfuração se comportam como uma mola de torção, que pode ser representada por uma mola linear de constante  $k$  e amortecimento torcional  $c$ , e que o contato entre a broca e a formação pode ser descrito por um modelo de atrito não-linear. [ARCIERI, 2013]. O modelo utilizado para a análise modal é baseado em uma broca de perfuração petrolífera de três graus de liberdade de Navarro-López & Cortés [2007] conforme Figura 1 e as nomenclaturas dos símbolos na Tabela 1.

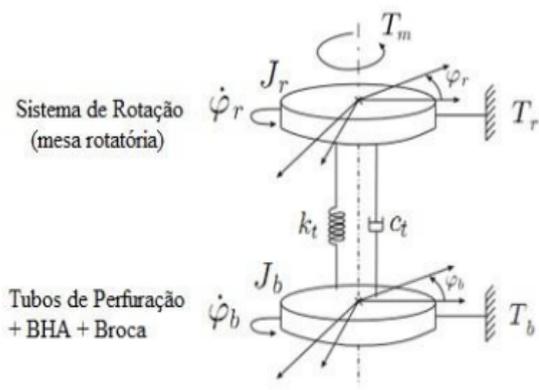


Figura 1. Modelo torcional de uma coluna de perfuração vertical de 2 graus de liberdade.

Em que:

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

(83) 3322.3222

[contato@conepetro.com.br](mailto:contato@conepetro.com.br)



Tabela 1. Descrição da simbologia da modelagem.

Símbolo	Nomenclatura
$T_m$	Torque do motor
$T_b$	Torque sobre a broca
$T_r$	Torque na mesa rotativa
$J_b$	Inércia da broca
$J_r$	Inércia da mesa rotativa
$k_t$	Coefficiente de rigidez torcional entre mesa e tubos
$c_t$	Coefficiente de amortecimento torcional entre a mesa e os tubos
$c_b$	Coefficiente de amortecimento torcional entre o BHA e a broca
$\varphi_r, \dot{\varphi}_r$	Deslocamento e velocidade angular do sistema de rotação
$\varphi_b, \dot{\varphi}_b$	Deslocamento e velocidade angular da broca

Definindo o vetor de estados, tem-se que:

$$\mathbf{x} = [\varphi_r \ \dot{\varphi}_r \ \varphi_b \ \dot{\varphi}_b]^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T \quad [1]$$

A modelagem pode ser dada por:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{J_r} (-(k_t)x_1 - (c_t + c_r)x_2 + (k_t)x_3 + (c_t)x_4 + T_m) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{J_b} ((k_t)x_1 + (c_t)x_2 - (k_t)x_3 - (c_t + c_b)x_4 - T_{fb}(\mathbf{x})) \end{cases} \quad [2]$$

Onde  $T_{fb}$  representa o torque entre a broca e a formação.

A equação de Espaço de Estados que rege o sistema é dada por:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u + \mathbf{T}_f\mathbf{x}(t) \quad [3]$$

Em que,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{T}_f$  são matrizes discriminadas abaixo:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_t}{J_r} & -\frac{(c_t + c_r)}{J_r} & \frac{k_t}{J_r} & \frac{c_t}{J_r} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_t}{J_b} & \frac{c_t}{J_b} & -\frac{k_t}{J_b} & -\frac{(c_t + c_b)}{J_b} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{T}_f = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -T_{fb}(\mathbf{x})/J_b \end{bmatrix} \quad [4]$$

Os valores das variáveis estão registrados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores das variáveis.

Variável	Valor
$T_m$	6 Nm
$c_r$	425 Nms/rad
$c_b$	50 Nms/rad
$J_b$	471,9698 kg m <sup>2</sup>
$J_r$	2122 kg m <sup>2</sup>
$k_t$	698,063 Nm/rad
$c_t$	139,6126 Nms/rad

### 3. MONITORAMENTO DE PARÂMETROS MODAIS

A engenharia estrutural está sempre procurando e estudando técnicas para descobrir e interpretar as condições de uma



estrutura em um ambiente hostil quando o acesso humano se torna muito arriscado para a saúde ou até o risco de morte. Seja no fundo do mar ou em uma formação a quilômetros da superfície há a necessidade de monitorar a integridade instrumentos e para isso deve-se conhecer alguns métodos de análise de dados.

### 3.1 Métodos mais Utilizados em Análise de Dados

#### 3.1.1 Método analítico

A frequência fundamental e o fator de amortecimento podem ser obtidos através dos autovalores da matriz  $A$ , considerando os autovalores da matriz  $A$  da forma  $s_i = \alpha_i + \beta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), os parâmetros modais podem ser determinados pelas equações abaixo:

$$w_n = \sqrt{\frac{\alpha_i^2 + \beta_i^2}{2\pi}}, [Hz]$$
$$\xi_i = \frac{\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}} \times 100, [\%]$$

[5]

#### 3.1.2 Método da Transformada de Fourier (FT)

A análise espectral de Fourier é bastante aplicada, porém possui restrições. O sistema tem que ser necessariamente linear e

estacionário, além do que não se consegue obter a informação do fator de amortecimento, somente o das frequências fundamentais do sistema. [NEVES, 2012] A equação abaixo mostra o espectro FT em função do tempo.

$$X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right)]$$

[6]

em que  $a_0$ ,  $a_n$  e  $b_n$  são constantes de Fourier,  $T$  é o período e  $t$  é o tempo.

#### 3.1.3 Método da Transformada de Hilbert-Huang (HHT)

A Transformada de Hilbert-Huang (HHT) foi desenvolvida por Huang et al. (1996, 1998, 1999) com o objetivo de analisar processos não lineares e não estacionários. A HHT consiste numa decomposição em modos oscilatórios empíricos (EMD — “empirical mode decomposition”) do registro temporal para obter funções intrínsecas ao sistema (IMF — “intrinsic mode function”), seguida da aplicação da Transformada de Hilbert às IMF. Esta técnica fornece informações sobre as frequências e amplitudes instantâneas, de cada IMF, ao longo do tempo. Ao contrário da análise de Fourier que fornece informações sobre a série global. O conjunto das frequências e amplitudes instantâneas, para



todas as IMF, gera o espectro de Hilbert, o qual permite identificar processos não estacionários e não lineares. [NEVES, 2012].

A HHT usa o Modo de Decomposição Empírico para decompor um sinal multicomponente em um conjunto de Funções de Modo Intrínseco (IMFs), e uma vez de posse das IMFs acha-se a frequência instantânea de cada IMF pela Transformada de Hilbert. Em uma IMF o número de zeros cruzados e extremos deve ser igual ou diferir de um em todos os dados do conjunto, e o valor médio da envoltória definido por um local de máximo e um local de mínimo é zero em todo o tempo. Por meio dessas IMFs de um sinal qualquer, o sinal  $x(t)$  pode ser reconstruído por:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r(t) \quad [7]$$

em que  $C_i(t)$  representa as IMFs e  $r(t)$  é o resíduo. Depois de obter todas as IMFs, a Transformada de Hilbert pode ser aplicada para cada IMF, e assim o sinal original pode ser expresso por:

$$x(t) = Re\left(\sum_{i=1}^n a_i(t) * e^{j\varphi_i(t)}\right) \quad [8]$$

em que  $a_i(t)$  é a função amplitude de cada componente e  $\varphi_i(t)$  é a correspondente função fase. A frequência instantânea de cada componente é definida pela derivada temporal da função de fase

$$w_i(t) = d\varphi_i(t)/dt \quad [9]$$

A equação [8] pode ser escrita como:

$$H(w,t) = Re\left(\sum_{i=1}^n a_i(t) * e^{j\int w dt}\right) \quad [10]$$

que é conhecido como Espectro de Hilbert-Huang, onde a amplitude do sinal varia com o tempo e a frequência, e portanto é uma distribuição de energia em tempo-frequência [TERRO, 1999].

Utilizando as equações de resposta livre de um sistema sob vibração e a equação de frequência amortecida pode-se obter os gráficos de fase e de logaritmo e extraindo o coeficiente angular desses gráficos pode-se chegar aos parâmetros modais do sistema.

Através dessas técnicas pode-se conhecer e monitorar os parâmetros modais de qualquer sistema.

#### 4. RESULTADOS

Os resultados dos três métodos serão colocados separados e no final haverá uma



tabela comparativa para extração das conclusões.

## 4.1 Método Analítico

Substituindo as variáveis na matriz  $A$  calcula-se os autovalores que estão abaixo:

$A =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ -0.3290 & -0.2661 & 0.3290 & 0.0658 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ 1.4790 & 0.2958 & -1.4790 & -0.0894 \end{bmatrix}$$

Os autovalores dessa matriz são:

$ans =$

$$\begin{aligned} & -0.1137 + 1.3305i \\ & -0.1137 - 1.3305i \\ & -0.0000 \\ & -0.1280 \end{aligned}$$

Usando o conjunto de equações [5] os parâmetros modais calculados estão na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3. Parâmetros Modais – Método Analítico.

Modos	Parâmetros modais – M. Analítico	
	$w_n$ (Hz)	$\xi$ (%)
Modo 1	0,2125	8,5100
Modo 2	0,0204	100,00

## 4.2 Método da Transformada de Fourier (FT)

Tanto para a Transformada de Fourier como para a Transformada de Hilbert-Huang é necessário o sinal do sistema. O sinal usado foi o da velocidade da broca conforme Figura 2.

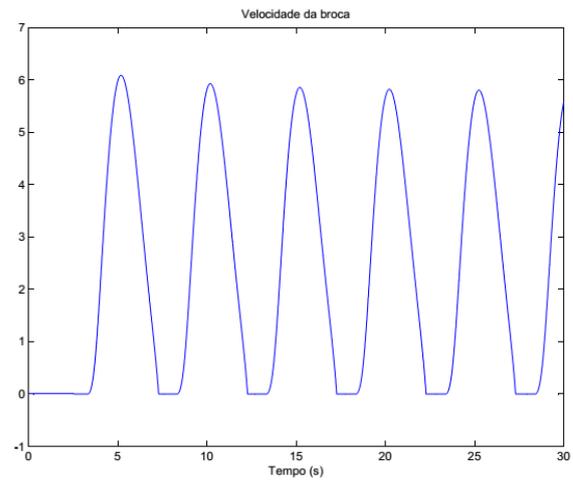


Figura 2. Sinal da velocidade angular da broca.

Aplicando-se a Transformada de Fourier obtém-se o gráfico abaixo conforme Figura 3:

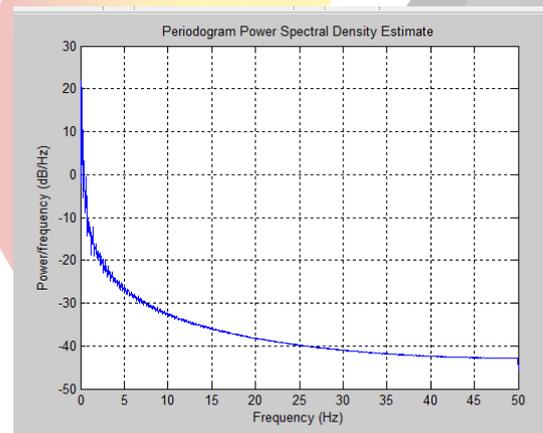


Figura 3. Transformada de Fourier.

Os picos de frequência mostrados na Figura 3, além do que existe no sistema se dá

pelo fato de que a coluna está submetida a perturbações de diferentes frequências, porém as frequências do sistema podem ser vista dando um zoom na figura, conforme Figura 4.

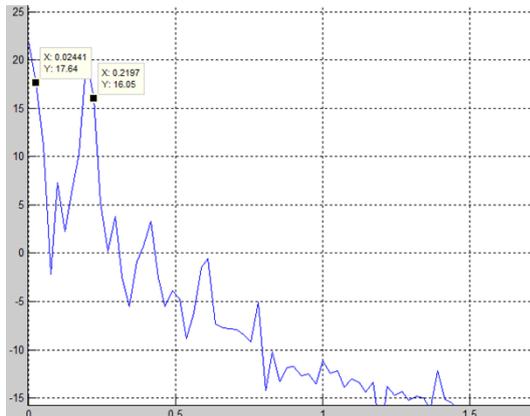


Figura 4. FT: Modo 1 – 0,2197 Hz, Modo 2 – 0,0244 Hz.

O resultado desse método pode ser visto na Tabela 4.

Modos	Parâmetros modais – M. Analítico	
	$w_n$ (Hz)	$\xi$ (%)
Modo 1	0,2197	-
Modo 2	0,0244	-

### 4.3 Método da Transformada de Hilbert-Huang (HHT)

O sinal do sistema possui todas as frequências que atual no sistema inclusive as

perturbações. Dessa forma nesse método utiliza-se um filtro passa faixa para cada Modo.

#### 4.3.1 Modo 1

O sinal do Modo 1 está na Figura 5:

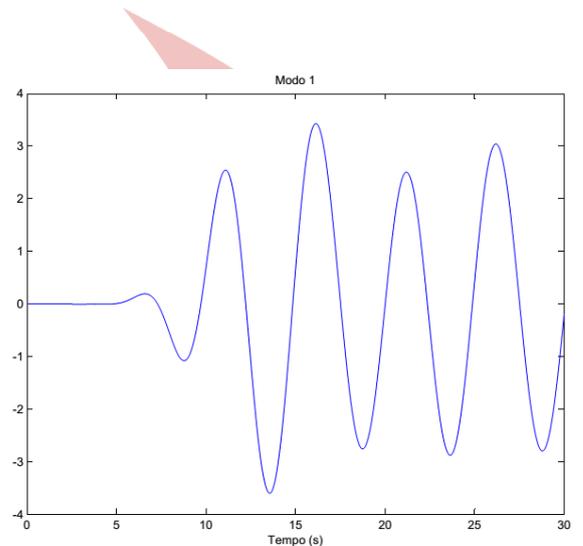


Figura 5. Sinal da velocidade angular do Modo 1.

O próximo passo é obter as IMF's que é dado conforme a Figura 6.

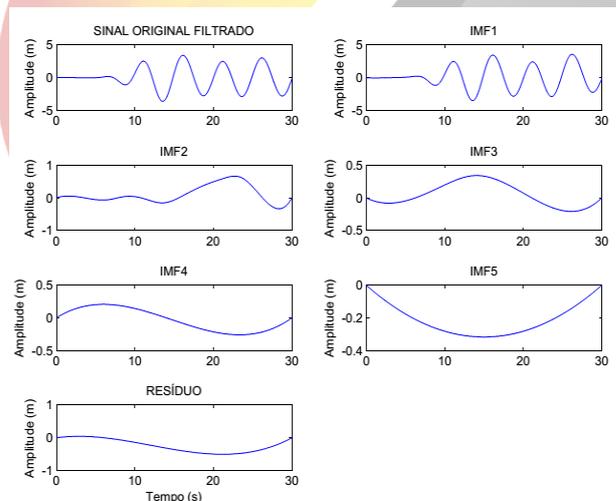


Figura 6. IMF's do Modo 1.



Para o estudo e cálculo dos parâmetros modais utiliza-se a 1°IMF e por conseguinte a 1° HHT porque estes sinais possuem ricas informações do sistema podendo assim desprezar as outras IMF's e HHT's [PENG, 2005] e [JING, 2008].

Aplicando a integral de Hilbert em cima das IMF's obtêm-se as HHT, conforme Figura

7.

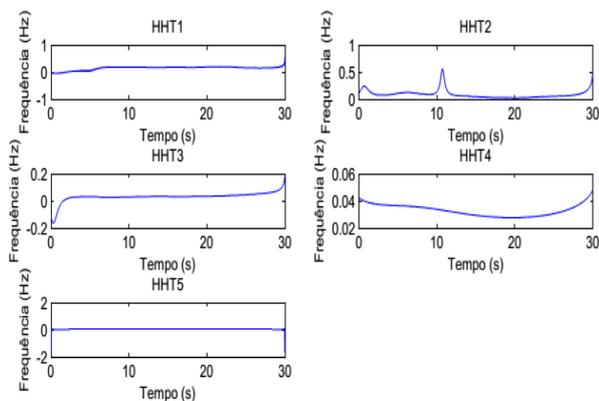


Figura 7: HHT's do Modo 1.

Aplica-se agora as equações de resposta livre de vibrações que contêm a amplitude e a frequência amortecida plotando os gráficos de fase e de logaritmo conforme Figura 8 e Figura 9.

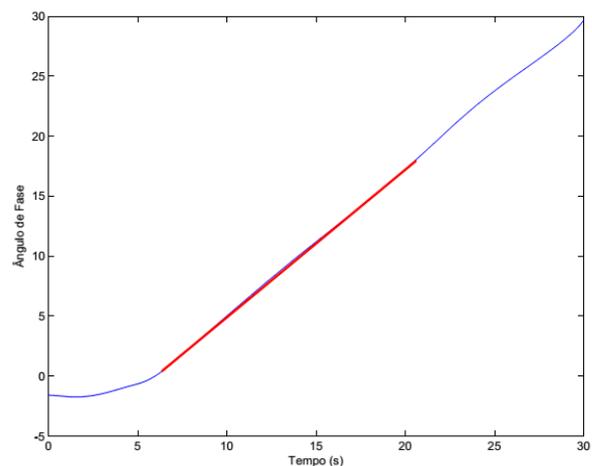


Figura 8: Fase do Modo 1.

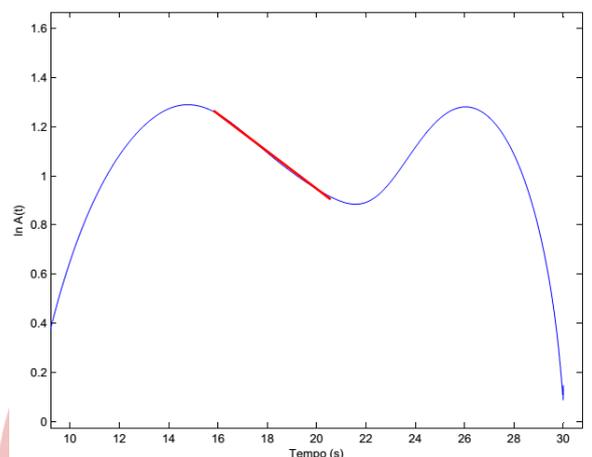


Figura 9: Logaritmo do Modo 1.

Os resultados do Modo 1 encontrados foram:

$$w_n'' = 0,1980 \text{ Hz} \quad e \quad \xi'' = 8,0200 \%$$

## 4.3.2 Modo 2

Procedendo da mesma forma que o modo

1 tem-se:

O sinal do Modo 2 está na Figura 10.

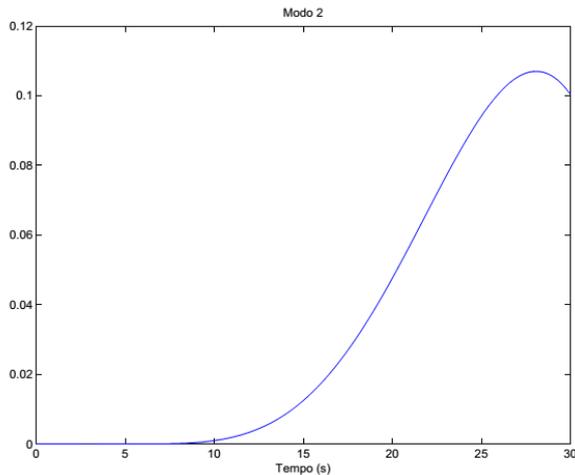


Figura 10: Sinal Modo 2.

em seguida extrai-se as IMF's desse sinal conforme Figura 11.

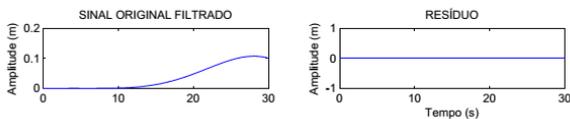


Figura 11: IMF's do Modo 2. Nesse caso a IMF é única; é o próprio sinal.

Agora segue o gráfico da HHT's conforme Figura 12.

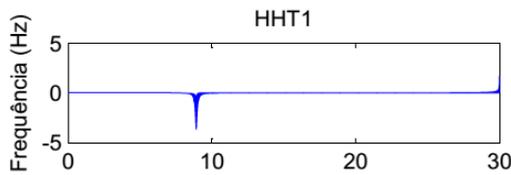


Figura 12: HHT's do Modo 2.

Obtêm-se agora o gráfico de fase e de logaritmo conforme Figura 13 e Figura 14.

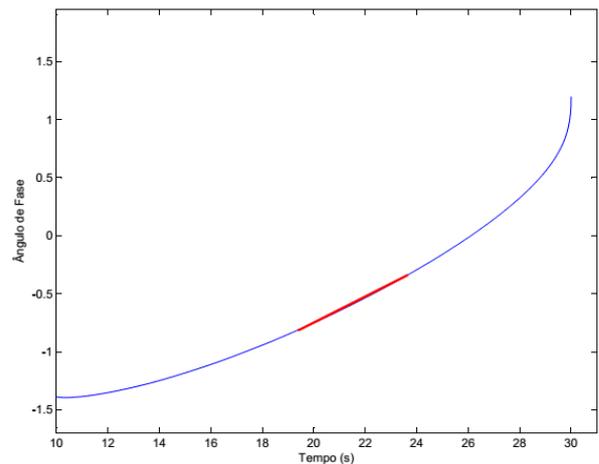


Figura 13: Fase do Modo 2.

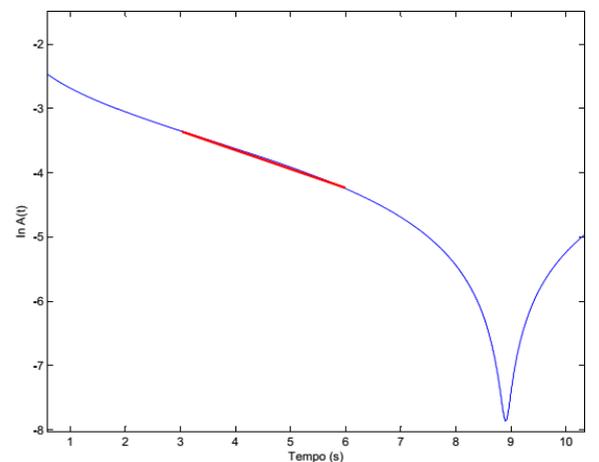


Figura 14: Logaritmo do Modo 2.

Os resultados do Modo 2 encontrados foram:

$$w_n'' = 0,0254 \text{ Hz} \text{ e } \xi'' = 65,78 \%$$

A Tabela 5 mostra o resultado da HHT e a Tabela 6 compara todos os resultados.

Tabela 5. Parâmetros Modais – Método HHT.

Modos	Parâmetros modais – HHT	
	$w_n''$ (Hz)	$\xi''$ (%)
Modo 1	0,1980	8,0200



Tabela 6. Parâmetros Modais -  
Comparativo.

M	M. Analítico		M.FT	M. HHT	
	$w_n$	$\xi$	$w_n'$	$w_n''$	$\xi''$
M1	0,2125	8,5100	0,2197	0,1980	8,0200
M2	0,0204	100,00	0,0244	0,0254	65,7800

## 5. CONCLUSÕES

Após a aplicação desses três métodos pode-se concluir que:

- O sistema apesar de ser linear sofre perturbações; isso se dá devido a vários fatores, por exemplo, vários motores funcionando ao mesmo tempo no sistema, vibração no final da broca diferente do resto da coluna devido ao impacto do solo e etc... O gráfico de Fourier revela isso.
- Para valores de frequências de um modo geral, a FT e a HHT estão aproximadamente perto do método analítico, considerando aqui este como padrão, pois para conhecer os parâmetros de projeto utilizam-

se as constantes mostradas na tabela.

- Para valores de amortecimento, a FT não participa do processo e a HHT tem valores bem comportados nos dois primeiros modos, porém no último, há um erro considerável, em outros estudos esse erro advém não do método, mas sim do filtro, o ideal seria usar HHT com um filtro mais refinado.
- Devido as perturbações esse sistema possui uma certa dificuldade para a interpretação da faixa de pontos ideais nos gráficos de fase e de logaritmo.
- De uma forma geral a HHT se mostra como uma boa ferramenta para monitoramento pois apenas com o sinal pode-se conhecer os parâmetros modais e assim acompanhar o desempenho do sistema. O método F.T não calcula o fator de amortecimento.
- Em outras pesquisas, feitas por este grupo, aplicando-se HHT em outros sistemas os resultados foram muito mais aproximados do método analítico do que este caso. Isso ocorre devido as várias perturbações que a coluna de



perfuração sofre. Uma sugestão de melhoramento é usar o HHT com o sinal mascarado (uma outra técnica da HHT) assim espera-se, conforme os resultados obtidos na literatura, uma maior aproximação do método analítico.

- A vantagem do HHT se dá no caso em que se queira fazer um monitoramento de uma estrutura ou um equipamento dinâmico, pois, através da obtenção de um sinal, pode-se extrair as frequências fundamentais e os fatores de amortecimentos e compará-los com os de projeto. Caso haja algum desencontro nos dados, o sistema já não possui o mesmo fator de segurança do qual foi projetado, isso pode ser revelado através de perda de massa, empenamento da estrutura dentre outros. Diante desse problema deve-se tomar medidas para descobrir as causas e minimizar ou eliminar uma possível falha da estrutura ou equipamento.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os professores que ajudaram a construir essa gama de conhecimento que resultaram nessa pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCIERI, M. A. S. *Controle de Vibrações Mecânicas Tipo "Stick-Slip" em Colunas de Perfuração*. 2013, 115p Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão – SE.

HUANG N. E.; Z. SHEN; S.R. LONG; M. C. WU. *The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis*. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 454, p. 903-995, 1998

HUANG, N. E.; S. R. LONG; Z. SHEN. *The mechanism for frequency downshift in nonlinear wave evolution*. Adv. Appl. Mech., v. 32, p. 59-111, 1996.

HUANG, N. E.; Z. SHEN; S. R. LONG. *A new view of nonlinear water waves. The Hilbert spectrum*. Annual Rev. Fluid Mech., v. 31, p. 417-457, 1999.

JING, H.; YUAN, H.; ZHAO, Y. and YANG, Y. *Applying Hilbert-Huang transform to identifying structural modal parameters*. International Workshop on Education technology and training and 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing. 2: 617-621, 2008.



**II CONEPETRO**

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE  
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS  
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

NAVARRO-LÓPEZ, E. M.; CORTÉS, D.  
*Avoiding harmful oscillations in a  
drillstring through dynamical analysis.*  
Journal of Sound and Vibration, 307(1-2):  
152-171, 2007.

NEVES, C. F. *Aplicação da transformada de  
Hilbert-Huang para caracterização da  
dinâmica costeira – parte 1: grandezas  
escalares.* Revista Brasileira de Recursos  
Hídricos, 17(2): 143-156, 2012.

PENG, Z. K., PETER W. T, CHU, F. L. *An  
improved Hilbert–Huang transform and its  
application in vibration signal analysis.*  
Journal of Sound and Vibration 286(1):187–  
205, 2005.

SOBRAL, T. E. L. *Análise modal em  
estruturas com controle em malha fechada  
utilizando o método de identificação por  
subespaços.* 2005, 123p. Trabalho de  
Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica,  
Universidade Federal de Sergipe, São  
Cristóvão-SE.

TERRO M. J., M. S. MAHMOUD, M.  
ABDEL-ROHMAN, *Multi-loop feedback  
control of offshore steel jacket platforms.*  
Computers and Structures, 70 1999, pp.  
IS5-202.



[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

(83) 3322.3222

[contato@conepetro.com.br](mailto:contato@conepetro.com.br)