



CARACTERIZAÇÃO DO MOVIMENTO DE PENEIRA VIBRATÓRIA INDUSTRIAL

JULIA P. A. SILVA^{1*}, KAOANDER ANTONIO¹, RAFAEL Y. M. BARBOSA², RUBENS GEDRAITE², VINÍCIUS P. BARBOSA², RICARDO A. MALAGONI¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

²Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química

*e-mail: julia.silva.btu@gmail.com

RESUMO – As peneiras vibratórias possuem grande importância no subprocesso de controle de sólidos após a perfuração de poços de petróleo. O peneiramento realiza a separação do cascalho proveniente do poço e o fluido de perfuração que foi injetado na intenção de lubrificar e resfriar a broca durante a perfuração. O formato do movimento executado pela máquina é um dos elementos de projeto que interferem no resultado da separação. Diante disso, o objetivo do presente trabalho foi caracterizar o movimento ao longo da peneira *MONGOOSE PRO Shaker*, por meio de um sensor acelerômetro, e avaliar de que forma esse afetou o deságue da suspensão. Para a identificação da elipse, acoplou-se um acelerômetro de eixo triplo, compatível com Arduino, de modelo MPU-6050 nas regiões inicial e final da peneira. O comportamento das elipses encontradas foi elíptico progressivo, coerente ao apresentado no manual do equipamento.

INTRODUÇÃO

A perfuração das rochas para a extração de petróleo é feita através de uma sonda, que consiste em um conjunto de equipamentos que possibilitam aplicar uma ação rotativa de uma broca existente na extremidade da coluna de perfuração. Tal ação gera fragmentos de rocha, que devem ser removidos por bombeamento de um fluido de perfuração (Thomas, 2001).

Segundo o Instituto Americano de Petróleo (API), fluido de perfuração é um fluido circulante usado para tornar viável a operação de perfuração.

O fluido de perfuração que retorna de um poço deve ser reutilizado para minimizar os custos e impactos ambientais do processo de perfuração. Para isso, tal fluido é passado em série através de vários dispositivos de separação sólido-líquido para maximizar a remoção de sólidos antes da reutilização (Pereira Junior, 2021).

A unidade de controle de sólidos é de extrema importância no quesito ambiental, já

que é necessário a adequação dos resíduos de perfuração às leis ambientais vigentes e cada vez mais restritas.

Os equipamentos utilizados em uma unidade típica de controle de sólidos para separação sólido-líquido são divididos em três grupos sequenciais: peneiras vibratórias, bateria de hidrociclones (desareidores e dessiltadores) e centrífuga decantadora (Lobato et al., 2011).

As peneiras vibratórias são os primeiros dispositivos a processar o fluido, elas são responsáveis por remover as partículas maiores que 74 μm (cascalhos e grãos maiores que areia) que ficam retidas sobre a tela, deixando que uma grande quantidade do fluido de perfuração passe pela tela para seguir para as próximas etapas de remoção. Portanto, os outros equipamentos de separação de sólidos podem operar eficientemente apenas se as peneiras estiverem funcionando de forma adequada. Consequentemente, são considerados os dispositivos de controle de sólidos mais importantes em uma sonda de perfuração (Hoferock, 1980; Raja, 2012).

O fluido de perfuração flui para baixo, para dentro e através das telas da peneira. Se a tela estiver estacionária, uma carga significativa precisaria ser aplicada ao fluido de perfuração para forçá-lo através da tela (Asme, 2005).

Nesse sentido, é necessário que motovibradores sejam acoplados ao sistema para que apliquem uma força sobre as telas da peneira, fazendo com que o fluido seja separado com maior eficiência.

O movimento ascendente move o fluido de perfuração através da tela. Sólidos grandes não seguem a tela no movimento descendente, então eles podem ser impulsionados a partir da superfície da tela. Quando a tela se move de forma descendente, os sólidos grandes são suspensos acima da tela e entram em contato com a tela em um ponto mais distante em direção à extremidade de descarga do agitador. Esta é a razão pela qual as telas de movimento elíptico, circular e linear transportam sólidos (Asme, 2005).

O movimento da peneira vibratória através do fluido de perfuração faz com que a peneira corte o fluido. Isso diminui a viscosidade e é um componente eficaz para permitir que o agitador processe o fluido de perfuração (Asme, 2005).

O peneiramento é o resultado do uso da energia desenvolvida por uma massa excêntrica rotativa e da aplicação dessa força a uma superfície porosa. A energia faz com que a tela vibre em uma órbita ou caminho fixo (Asme, 2005).

O movimento produzido pelas telas é resultado da combinação da quantidade e posição dos motovibradores ao longo do equipamento. Ainda segundo Asme (2005) existem 4 movimentos característicos de peneiras: elíptico balanceado, elíptico desbalanceado, circular e linear.

De acordo com o manual do equipamento fornecido pela empresa *M-I SWACO*, a peneira utilizada nesse estudo possui movimentação dupla. Ela combina a tecnologia de movimento elíptico balanceado e progressivo para um equipamento que se adapta à medida que as condições de perfuração mudam.

Ambos os movimentos são produzidos quando existem dois motovibradores acoplados com um ângulo ao centro de gravidade da cesta

da peneira. No movimento elíptico balanceado, os pesos giram em sentido divergente, enquanto no elíptico progressivo o giro é em sentido convergente.

O agitador no modo elíptico balanceado é especialmente eficaz durante a perfuração de seções superiores do poço de petróleo, onde geralmente são encontrados sólidos pesados e de alto volume. Nesses intervalos, o equipamento precisa gerar altos valores de Fator G para mover de forma rápida e eficaz grandes volumes de sólidos pelas telas.

O perfil elíptico desse movimento é ilustrado na Figura 1.

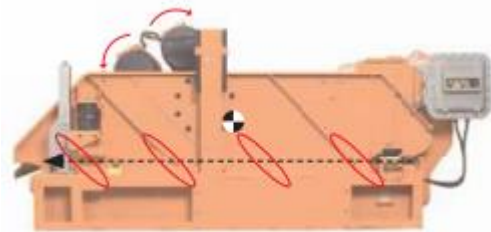


Figura 1: Perfil elíptico do movimento balanceado.

Por outro viés, o equipamento é operado no movimento elíptico progressivo sempre que o volume de processamento é reduzido, tipicamente em seções inferiores dos poços de petróleo. O movimento elíptico progressivo ainda permite o transporte rápido de sólidos para fora da piscina de fluido, semelhante ao balanceado, mas quando o volume de processamento atinge a tela de descarga, a taxa de transporte é reduzida para permitir um tempo de secagem prolongado e a recuperação do fluido de perfuração. A eficiência desse movimento permite taxas de processamento mais altas, diminuindo a umidade do sólido.

As elipses resultantes desse movimento ao longo da peneira são ilustradas na Figura 2.

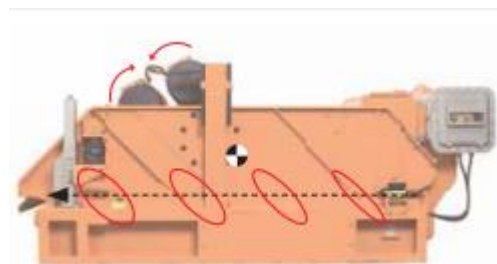


Figura 2: Perfil elíptico do movimento progressivo.

Tendo em vista a formação das elipses a partir das acelerações realizadas no equipamento nos eixos x e y , foi utilizado um acelerômetro de eixo triplo Adafruit MPU-6050 para a detecção do movimento.

Além de ser um acelerômetro triaxial, este sensor também conta com um giroscópio triaxial e um medidor de temperatura. Entretanto, essas funções não serão exploradas neste trabalho.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi caracterizar o movimento da peneira vibratória através de acelerômetro e discutir, do ponto de vista teórico, como o movimento identificado influencia o processo de deságue em peneiras vibratórias.

MATERIAL E MÉTODOS

Material

Para este estudo foi utilizado a biblioteca Adafruit, assim como o sensor acelerômetro de modelo MPU-6050, uma placa Arduino modelo Uno R3 e quatro *jumpers*.

Sensor Acelerômetro e Placa Arduino

O acelerômetro mede a aceleração (taxa de variação da velocidade do objeto). Ele detecta forças estáticas como gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$) ou forças dinâmicas como vibrações ou movimento. O MPU-6050 mede a aceleração nos eixos X , Y e Z .

A comunicação com o microcontrolador se faz a partir da interface Inter-integrated Circuit (I2C) e, por isso, realiza as comunicações através de dois canais, sendo um destinado para receber e transmitir os dados e o outro pelo sincronismo da comunicação.

O sensor possui oito pinos com funções distintas, como ilustra a Figura 3.



Figura 3: Sensor acelerômetro triaxial modelo MPU-6050.

Nesse estudo, utilizaram-se apenas quatro pinos, sendo eles: “VCC”, “GND”, “SCL” e “SDA”.

O pino “VCC” realiza a alimentação do circuito, o “GND” o aterramento do sistema, o “SCL” é o temporizador enquanto o “SDA” é o transmissor dos dados.

Percebe-se que o sensor possui em sua estrutura a identificação da direção e sentido dos eixos x e y , que deverão ser respeitados no momento da coleta dos dados.

A placa Arduino utilizada nesse estudo foi a de modelo R3 que, assim como o sensor, possui comunicação com o microcontrolador via interface I2C.

O hardware possui quatro pinos de alimentação, três entradas analógicas, um conector de alimentação e um conector USB, como ilustra a Figura 4.



Figura 4: Principais elementos do hardware.

No presente trabalho, utilizaram-se apenas dois pinos de alimentação, duas entradas analógicas, o conector de alimentação e o conector USB.

Para realizar a ligação entre o sensor acelerômetro e a placa Arduino utilizaram-se quatro *jumpers*. A ordem dos jumpers e suas respectivas conexões são mostradas na Figura 5.

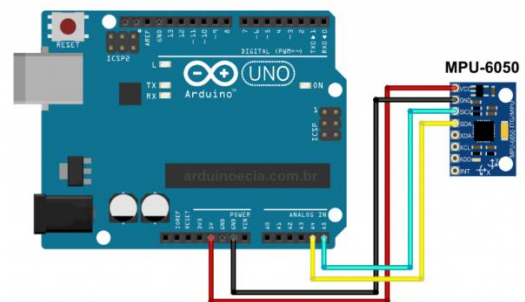


Figura 5: Conexões entre o sensor acelerômetro e a placa Arduino.

O primeiro *jumper* conecta os pinos de terra, enquanto o segundo conecta o pino de alimentação do sensor ao de 5V no Arduino. Os pinos “SCL” e “SDA” do sensor são conectados nos pinos “A5” e “A4” do Arduino, respectivamente.

Código Arduino

Existem diferentes maneiras de se obter leituras do sensor. Neste trabalho, utilizou-se a biblioteca *Adafruit MPU6050*.

O primeiro passo do código da programação é incluir as bibliotecas que serão úteis. Nesse caso, além da *Adafruit MPU6050*, utilizou-se a *Adafruit_Sensor*, *math.h* e *wire.h*. A biblioteca *wire.h* permite a comunicação entre os dispositivos I2C, enquanto a biblioteca *math.h* fornece um conjunto de funções para operações matemáticas.

Em razão do ruído presente no sinal captado pelo sensor, foi necessário calibrar o filtro de banda em 260Hz. Como os ruídos possuem frequência muito maior que o do sinal de interesse, o filtro permite apenas a passagem de frequências mais baixas no sinal final, restando as frequências mais altas. Dessa forma o ruído ficou retido.

O *range* de aceleração foi definido em 8G, ou seja, até oito vezes o valor da gravidade. Esse valor foi definido de acordo com as especificações da peneira, que determinam o *range* de operação em 6,5G.

As linhas principais do código possuem a função “*loop()*”. Essa função é um comando de repetição de tarefa. Sendo assim, foram obtidas recorrentes leituras do sensor que foram mostradas no *Monitor Serial* do Arduino. A aceleração foi medida em m/s^2 a cada 100 milissegundos.

Coleta de Dados

Com as linhas de código já escritas, posicionou-se o sensor na lateral da estrutura da peneira para que os dados fossem coletados.

A posição do sensor deve respeitar os eixos mostrados na estrutura dele.

Para o estudo das elipses foi suficiente coletar dados no início e final da peneira, ou seja, na região onde a suspensão é inserida na tela até a região onde o sólido seco é depositado, respectivamente, como ilustra a Figura 6.



Figura 6: Regiões de fixação do sensor na estrutura do equipamento.

É importante calibrar a posição do sensor através da observação dos dados no *Monitor Serial*. A posição está correta em relação aos eixos quando os valores coletados no eixo z estão muito próximos de zero.

Sendo assim, inicializou-se o código e o sensor transmitiu os dados coletados para o *Monitor Serial*.

Tratamento dos Dados

De posse dos dados coletados pelo sensor, foi possível caracterizar o perfil do movimento através da plotagem das acelerações realizadas nos eixos y e x.

Neste trabalho o sensor foi posicionado de forma invertida em relação ao plano vertical. Por isso foi necessário descontar o valor da gravidade nos dados coletados para o eixo y.

Conforme a literatura, uma elipse é descrita de forma canônica pela Equação 1.

$$\left(\frac{a'_x}{m}\right)^2 + \left(\frac{a'_y}{M}\right)^2 - 1 = 0 \quad (1)$$

Sendo:

$$a'_x = a_x \cos\theta + a_y \sin\theta \quad (2)$$

$$a'_y = a_y \cos\theta - a_x \sin\theta \quad (3)$$

As Equações 2 e 3 foram obtidas a partir da aplicação da matriz de transformação $T(2)$, Equação 4, ao vetor aceleração $[ax, ay]T$, de forma a expressar uma rotação de θ no plano cartesiano (Boldrini et al., 1986).

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para a determinação da equação canônica, os parâmetros θ , M e m devem ser especificados.

Analisando a Equação 1, atribui-se arbitrariamente valores para os parâmetros a serem determinados. A soma em módulo de todos os resultados para cada ponto do conjunto de dados, resulta nos valores corretos caso esse módulo tenha valor mínimo, de acordo com a Equação 5.

$$F(\theta, m, M) = \min: \sum_i \left| \left(\frac{a'_{xi}}{m} \right)^2 + \left(\frac{a'_{yi}}{M} \right)^2 - 1 \right| \quad (5)$$

Para este estudo, foram utilizados 403 pontos para cada conjunto de dados.

Concluído o processo de otimização da função objetivo, dado pela Equação 5, obtém-se a equação canônica da elipse. Contudo, por não ser útil para aplicação em modelos, deve-se determinar a equação paramétrica da elipse.

A equação paramétrica da elipse pode ser obtida através de uma adaptação do procedimento definido por Chen et al. (2020).

Tem-se pelas Equações 6 e 7 a trajetória das acelerações em função do tempo, para a direção x e y , respectivamente, com $\omega = 2\pi f$, sendo a velocidade angular, e f a frequência de vibração fornecida pelo inversor de frequências associado à peneira.

$$a_x = -\omega^2 A_x \sin(\omega t + \gamma_x) \quad (6)$$

$$a_y = -\omega^2 A_y \sin(\omega t + \gamma_y) \quad (7)$$

Instituindo os valores de γ_x e γ_y , os ângulos iniciais, determinados pelas Equações 8 e 9, para movimento de sentido horário, respectivamente.

$$\gamma_x = \arctan\left(\frac{M}{m} \cot\theta\right) \quad (8)$$

$$\gamma_y = -\arctan\left(\frac{M}{m} \tan\theta\right) \quad (9)$$

As amplitudes de movimento harmônico, A_x e A_y , podem ser calculadas através das Equações 10 e 11, para x e y na devida ordem.

$$A_x = \frac{\sqrt{(m \cos\theta)^2 + (M \sin\theta)^2}}{\omega^2} \quad (10)$$

$$A_y = \frac{\sqrt{(m \sin\theta)^2 + (M \cos\theta)^2}}{\omega^2} \quad (11)$$

Com os parâmetros já estabelecidos, define-se as equações paramétricas das

acelerações, as quais podem ser plotadas em comparação aos dados experimentais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizado o procedimento experimental descrito acima, obteve-se um gráfico de dispersão dos valores de aceleração no eixo y , “ a_y ”, em função da aceleração em no eixo x , “ a_x ”, para o sensor posicionado no início e final da peneira, como mostra as Figuras 7 e 8, respectivamente.

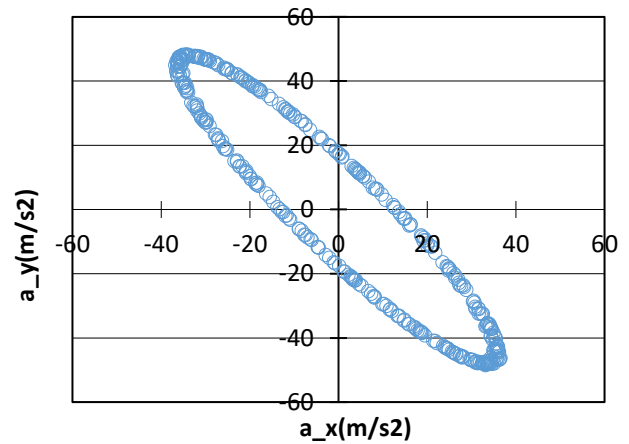


Figura 7: Dispersão das acelerações no início da peneira.

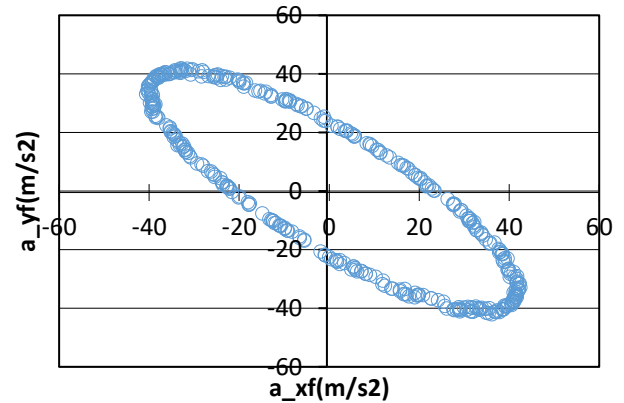


Figura 8: Dispersão das acelerações no final da peneira.

Nota-se que os dados se dispersam em uma elipse, o que garante a coerência da coleta de dados, visto que o manual de operações já indica a realização desse movimento pelo equipamento.

Para encontrar os valores otimizados dos parâmetros θ , m e M , define-se para essas variáveis um valor inicial de 1. Através da Equação 5, minimizou-se a soma dos módulos

desses parâmetros utilizando a ferramenta *Solve* do Excel.

Os valores otimizados dos parâmetros estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Valores otimizados dos parâmetros da equação objetivo.

	θ	m	M
Início	0,63	10,68	59,18
Final	0,79	17,28	55,15

Em posse dos parâmetros, definiram-se as equações canônicas das elipses, inicial e final da elipse respectivamente.

$$\left(\frac{a_x \cos 0,63 + a_y \sin 0,63}{10,68}\right)^2 + \left(\frac{a_y \cos 0,63 - a_x \sin 0,63}{59,18}\right)^2 - 1 = 0 \quad (12)$$

$$\left(\frac{a_{xf} \cos 0,79 + a_{yf} \sin 0,79}{17,28}\right)^2 + \left(\frac{a_{yf} \cos 0,79 - a_{xf} \sin 0,79}{55,15}\right)^2 - 1 = 0 \quad (13)$$

Todavia para melhor aplicação em modelos matemáticos, deve-se definir a equação paramétrica da elipse.

A frequência da peneira em operação foi de 1870 rpm, ou 31,1667 Hz.

Os valores de ângulos iniciais de fase e amplitudes do movimento harmônico encontrados através das equações 8, 9, 10 e 11, respectivamente, foram mostradas na Tabela 2.

Tabela 2: Dados de frequência de operação, ângulos iniciais de fase e amplitudes da elipse.

	$\omega(\text{Hz})$	γ_x	γ_y	A_x	A_y
Início	31,17	1,44	-1,33	0,04	0,05
Final	31,17	1,27	-1,27	0,04	0,04

Obtidos os valores necessários, definiu-se as equações paramétricas das elipses, demonstradas na Equação 14 e 15, para a posição inicial, e Equação 16 e 17 para a posição final.

$$a_x = -31,17^2 \cdot 0,04 \sin(31,17t + 1,44) \quad (14)$$

$$a_y = -31,17^2 \cdot 0,05 \sin(31,17t - 1,33) \quad (15)$$

$$a_{xf} = -31,17^2 \cdot 0,04 \sin(31,17t + 1,27) \quad (16)$$

$$a_{yf} = -31,17^2 \cdot 0,04 \sin(31,17t - 1,27) \quad (17)$$

A comparação entre os valores coletados pelo sensor acelerômetro e os valores obtidos através da modelagem matemática foram plotadas em um gráfico de dispersão, mostrado na Figura 9, para a posição inicial, e Figura 10 para posição final.

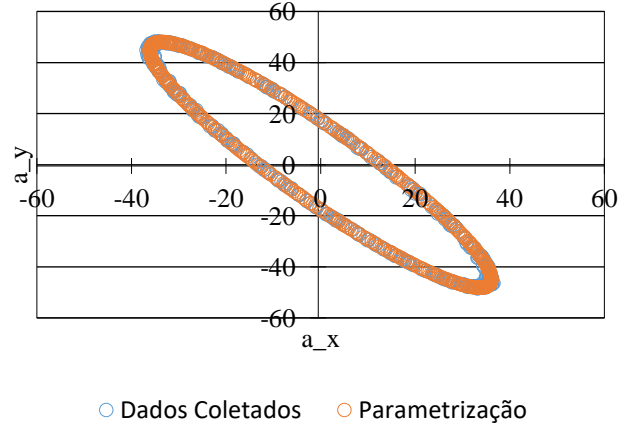


Figura 9: Dispersão dos dados coletados e da curva paramétrica no início da peneira.

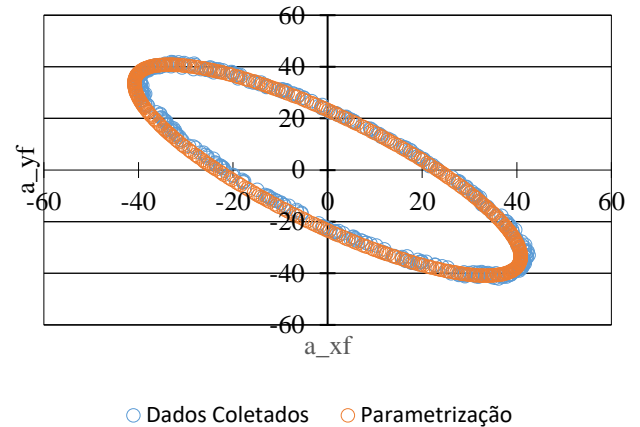


Figura 10: Dispersão dos dados coletados e da curva paramétrica no final da peneira.

Através dos gráficos obtidos (Figuras 9 e 10), percebe-se que a orientação dos eixos maiores das elipses formadas no final da região de alimentação e na região de descarga de sólidos da cesta tem um grande impacto no transporte de sólidos.

Estudiosos desse estilo de movimento em telas vibratórias indicam que as elipses inclinadas permitem que o sólido permaneça sobre a tela por mais tempo. Isso implica em um maior tempo de residência e, conseqüentemente, um sólido menos úmido na descarga.

Ao analisar cada elipse, percebe-se que a elipse referente à região de alimentação possui menor valor de amplitude do eixo menor quando comparada à elipse formada na região de descarga.

Maiores ângulos de eixo menor, ou ângulo dos motovibradores em relação uns aos outros, produzem uma elipse mais ampla que retarda o transporte de sólidos. Ou seja, uma elipse fina transporta os sólidos mais rapidamente que uma elipse larga.

Tais características justificam o perfil do deságue ao longo da peneira e explicam a região de “piscina” formada nas primeiras telas da peneira.

Sendo assim, a elipse fina apresenta maior amplitude de vibração no eixo y quando comparada com a elipse grossa, o que faz com que a aceleração na direção normal seja maior que a aceleração na direção horizontal em relação à tela. A aceleração normal favorece a passagem de fluido pelas aberturas da tela, mas em contrapartida também favorece um transporte mais rápido de sólidos.

A região inicial da peneira requer um movimento com elipse mais fina, já que nessa região há uma maior concentração de líquido, sendo interessante favorecer o seu deságue.

Já na região de descarga, a concentração de líquido é baixa e, por isso, o maior interesse é favorecer o tempo de residência do sólido sobre a tela, no intuito de garantir um produto com a menor umidade possível.

CONCLUSÃO

Com base no estudo desenvolvido neste trabalho foi possível caracterizar o movimento do equipamento através da detecção das acelerações pelo sensor acelerômetro e discutir, do ponto de vista teórico, o deságue da suspensão sobre as telas.

As elipses levantadas a partir dos dados experimentais apresentaram ótima aproximação às elipses plotadas a partir das manipulações matemáticas.

O movimento identificado neste estudo foi o elíptico progressivo. Esse movimento explica o maior potencial de deságue no início da peneira, onde forma a região de “piscina”, ou seja, onde as elipses possuem menor amplitude, e um maior tempo de residência no final da

peneira, que favorece a deposição de sólidos menos úmidos na região de descarga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela CAPES, FAPEMIG e CNPq por meio das bolsas de pós-graduação e iniciação científica concedidas à PETROBRAS.

NOMENCLATURA

a_x	: aceleração no eixo x [m/s^2]
a_y	: aceleração no eixo y [m/s^2]
A_x	: amplitude de vibração no eixo x [m]
A_y	: amplitude de vibração no eixo y [m]
m	: semi-eixo menor da elipse [m]
M	: semi-eixo maior da elipse [m]
θ	: ângulo de rotação [rad]
ω	: velocidade angular [Hz]
f	: frequência de vibração [Hz]
γ_x	: ângulo inicial do eixo x
γ_y	: ângulo inicial do eixo y

REFERÊNCIAS

- ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). Drilling Fluid Processing Handbook, Burlington, Estados Unidos: Gulf Professional Publishing, 2005.
- BOLDRINI, J. L., COSTA, S. I. R., FIGUEIREDO, V. L., WETZLER, H. G., Álgebra Linear. 3ª ed. Harbra, 1986.
- CHEN, Z., Numerical Investigation on the Sieving Performance of Elliptical Vibrating Screen, Publisher of Open Access Journals, 2020.
- HOBEROCK, L. L., A Study of Vibratory Screening of Drilling Fluids, Journal of Petroleum Technology, v. 32, 1980.
- LOBATO, F. S., OLIVEIRA-LOPES, L. C., GEDRAITE, R., NEIRO, S. M. S., MURATA, V., Identificação de modelos para unidades de recuperação do fluido de perfuração. In: IV Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás, Foz do Iguaçu - PR, 2011.
- PEREIRA JUNIOR, W. V., Automação de uma peneira vibratória tipicamente utilizada

na separação de cascalho e fluido de perfuração em plataformas de petróleo, 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

RAJA, V. Shale Shaker Model and Experimental Validation. 292f. Tese (Doctor of Philosophy) – Chemical Engineering, University of Akron, Akron, 2012.

THOMAS, J. E., Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.