

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE BOMBEAMENTO MECÂNICO PARA PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

CON-2016-1359

Resumo: Tendo em vista o desenvolvimento o controle de processos da indústria de petróleo e sua apresentação como tendência em tecnologias da área, este trabalho visa construir um modelo e simular as curvas de desempenho de uma bomba mecânica em um sistema de elevação de petróleo em função da carga e do torque requerido, comparando simulador de uso livre, o Matlab, com métodos computacionais comerciais, sendo a partir daí possível validar o modelo proposto. A metodologia do trabalho consiste na revisão bibliográfica referente a sistemas de bombeamento mecânico como método de elevação artificial, tomada de dados de casos reais para construção do modelo e desenvolvimento de simulação em função das características dos fluidos e da bomba, na qual carga, a carta dinamométrica de superfície, o torque, curso efetivo e vazão são parâmetros a serem avaliados. Foram obtidos parcialmente os principais parâmetros e curvas de desempenho através de simulação em software comercial e na programação no Matlab.

Palavras-chave: Bombeamento Mecânico, Desempenho, Simulação, Matlab

1. INTRODUÇÃO

Quando a própria pressão do poço não é suficiente para elevar seus fluidos de forma economicamente viável se faz necessária a utilização de um método de elevação artificial. A escolha deste método depende dos seguintes fatores: profundidade de elevação, vazão de produção, características dos fluidos produzidos, produção de areia e principalmente se vai operar em unidade *onshore* ou *offshore*. Estes fatores devem ser analisados considerando não somente a escolha do método de elevação, mas também a própria análise de desempenho do sistema.

O bombeio mecânico com hastes é o método de elevação mais utilizado do mundo, em função disto, é de grande importância conhecer seus fundamentos. Neste método de elevação, o movimento rotativo do motor na superfície é transformado em movimento alternativo por uma unidade de bombeio localizada próximo a cabeça do poço. Uma coluna de hastes transmite o movimento alternativo para o fundo do poço, acionando uma bomba que eleva os fluidos produzidos pelo reservatório para a superfície. Seus componentes principais são: unidades de bombeio, bomba de fundo, coluna de hastes e motor.

As incertezas quanto a metodologias e influência de parâmetros nestes processos têm sido cada vez mais discutidas e a busca por comparações e modelagem via computacional se torna relevante uma vez que a tendência observada nos processos de extração de petróleo é a de aumento do controle de processos a fim de se manter constante análise do comportamento do sistema de bombeamento, desde o seu projeto até a sua operação quotidiana objetivando a maximização do desempenho do sistema.

O trabalho desenvolvido tem como objetivo a construção de um modelo a partir do qual serão feitas simulações de parâmetros de desempenho de um sistema de bombeamento mecânico com hastes. Procurou-se assim, comparar simuladores industriais com a programação desenvolvida a fim de validar o modelo. Sendo assim, a metodologia empregada foi pautada nos seguintes procedimentos: revisão bibliográfica dos modelos matemáticos que representam sistemas de elevação por bombeio mecânico; desenvolvimento de programação baseada no modelo proposto no Matlab; e realização de simulação no software QRod, da America Echometer.

2. BOMBEAMENTO MECÂNICO COM HASTES

2.1. Sistema de bombeamento

O bombeio mecânico com hastes é o primeiro e o principal método de elevação artificial para a extração de petróleo, sendo empregado em 80% dos poços que operam com necessidade de bombeamento. De forma geral, esta

forma de bombeio se baseia, como afirma Nascimento (2005) na produção de energia necessária para elevação do óleo na unidade de bombeio, situada sobre a superfície da área de extração e transmissão da energia mecânica produzida através de uma coluna de hastes até a bomba de fundo, situada no fundo do poço, a qual efetivamente realiza o bombeio através de movimentos alternativos, como é demonstrado na Fig. 1, a seguir:

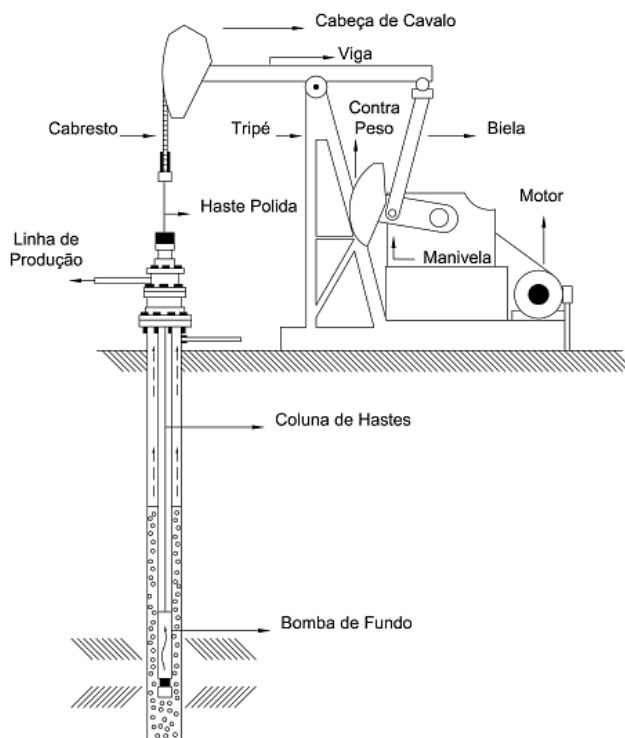


Figura 1. Esquema representativo de um sistema de bombeio mecânico com hastes de Gomes (2009).

A unidade de bombeio é constituída por um gerador de potência, que pode ser um motor elétrico ou motor de combustão interna, que produz energia mecânica através de movimento rotativo. O movimento é transmitido para uma manivela, que por sua vez é ligada à viga por uma biela. Este mecanismo transforma o movimento rotativo em movimento alternativo. A cabeça do cavalo, situada na extremidade da viga suporta, por meio do cabresto, a coluna de hastes que desce até o fundo do poço. A haste exposta na superfície é conhecida como haste polida, pelo fato de necessitar deste tipo de acabamento dado o movimento de entrada e saída na gaxeta situada no topo do poço. A coluna de hastes transmite a energia mecânica produzida na unidade de bombeio até a bomba de fundo, a qual eleva o óleo através de uma tubulação para a superfície.

2.2. Bomba de fundo

Conforme Gomes (2009) bomba de fundo é o componente mecânico gerador do diferencial de pressão que provê energia necessária para elevação do fluido através de movimento alternativo. Assim sendo, é classificada como bomba alternativa de deslocamento positivo, uma vez que opera a partir do movimento de subida e descida de um pistão. A bomba é composta de uma camisa, o pistão, uma válvula inferior, conhecida como válvula de pé e uma válvula superior, conhecida como válvula de passeio. A Fig. 2 a seguir esquematiza como é a bomba de fundo:

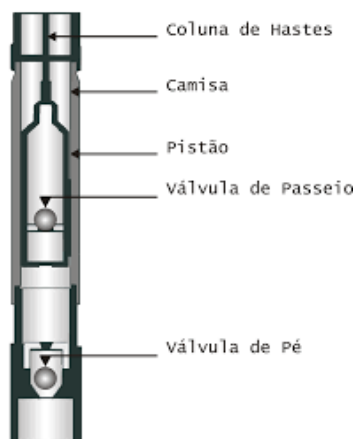


Figura 2. Bomba de fundo de Gomes (2009).

A partir da válvula inferior, o fluido é admitido para o interior da bomba e, uma vez inteiramente carregada, o pistão carrega uma porção do fluido para cima até que o óleo atravesse a válvula de passeio e escoar pela tubulação. O pistão tem seu movimento alternativo gerado a partir da energia mecânica proveniente da coluna de hastes. Este ciclo de bombeio é dividido em dois momentos: o curso ascendente, do movimento de subida do pistão e o movimento descendente, de descida. No ciclo descendente, a válvula de pé se abre para o carregamento da bomba com uma porção de fluido. Já no ciclo descendente, a válvula de passeio é que se abre para que o volume seja bombeado pelo pistão.

2.3. Coluna de Hastes

Segundo Gomes (2009) coluna de hastes é o componente do sistema de bombeamento mecânico responsável pela transferência do movimento alternativo da unidade de bombeio até a bomba de fundo e, por esta razão, é o de maior efeito na ação e no desempenho do sistema de bombeio, uma vez que é continuamente submetido a alternância de esforços mecânicos. Consiste em um conjunto de hastes de aço (ou de fibra de carbono em condições especiais, a depender do grau de corrosão que o poço ofereça), que são ligadas umas às outras através de luvas.

As hastes da coluna são construídas de forma que a haste superior a outra seja suficiente para suportar o peso de todas as hastes situadas abaixo dela. Sendo assim, em geral, as hastes são construídas de forma que os diâmetros das hastes sejam decrescentes da extremidade superior para a inferior. Justamente por isto, a haste polida, que é a haste superior da coluna é a que é submetida aos maiores esforços, uma vez que esta sustenta o peso de todas as demais hastes além da carga de fluido. Esta haste tem a área externa polida para que a vedação na cabeça do poço seja suficiente, já que há contínuo movimento alternativo de entrada e saída no poço. Esta vedação é realizada pela gaxeta no topo do poço.

3. CARTA DINAMOMÉTRICA

De acordo com Nascimento (2005), a análise do desempenho do sistema de bombeio se dá através da verificação da relação entre ao esforço a que a haste polida está sujeita e o curso por ela desenvolvido. Os gráficos que representam esta relação são conhecidos como cartas dinamométricas, como a representação de um destes diagramas na Fig. 3 a seguir:

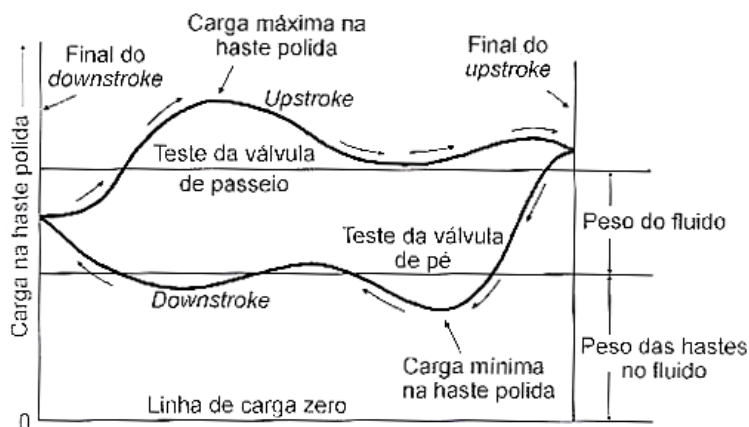


Figura 3. Carta dinamométrica de Gomes (2009).

Uma carta dinamométrica é produzida quando se instala um equipamento para medir o esforço mecânico na haste polida, o dinamômetro. O gráfico produzido é uma curva que relaciona a carga nas haste e a posição da mesma durante um ciclo de bombeio. É ainda de muito interesse na análise do bombeio mecânico, além desta carta dinamométrica de superfície, a carta manométrica de fundo, a qual relaciona a carga com o curso do pistão.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A partir da revisão bibliográfica referente aos sistemas de bombeamento mecânico com hastes foi possível adquirir conhecimento necessário para o desenvolvimento de um modelo matemático que fosse capaz de determinar os principais parâmetros de desempenho destes sistemas. Para verificação do modelo proposto, foram utilizados dados de estudos de casos reais a fim de validá-lo, sendo estes dados relacionados principalmente a características do fluido a ser elevado e da bomba. As principais variáveis consideradas na construção de um modelo matemático que descreva a operação de um sistema de bombeio mecânico com hastes são, segundo Takacs (2002): o peso da coluna de hastes, a força de empuxo a que a coluna de hastes é submetida, os efeitos dinâmicos e as forças de atrito a que está submetida a coluna de hastes além do peso da porção de volume deslocado por ciclo de bombeio.

Construído o modelo matemático, foi então desenvolvida uma programação no Matlab com o intuito de, a partir de simulação onde os dados de entrada são características do sistema, se obter dados de desempenho do sistema, em especial: carga máxima sobre a haste polida, carga mínima sobre a haste polida, carga de fluido no pistão da bomba de fundo e torque máximo. A simulação das curvas de carga em função do curso da haste igualmente podem ser obtidas a partir deste modelo. A fim de avaliar a precisão e concordância dos resultados obtidos no Matlab, foi também realizada simulação em um simulador de processo e gerenciamento de poço da companhia America Echometer, chamado de QRod. Os valores de variáveis de entrada empregadas em ambas as simulações, são oriundos de exemplo de caso disponível no software QRod.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir de simulação realizada tendo como variáveis de entrada do sistema um exemplo de caso disponível no software QRod, o qual é condizente com um poço típico em que é empregado o bombeamento mecânico com hastes, foi possível obter parâmetros e curvas de desempenho deste sistema. Os dados fornecidos pelo caso foram então aplicados como valores das variáveis de entrada do programa desenvolvido com base no modelo matemático proposto na plataforma Matlab e assim, foi possível validar o modelo verificada a concordância dos parâmetros de desempenho obtidos pelo QRod e pela programação no Matlab.

Embora outras variáveis de entrada foram igualmente necessárias para a realização da simulação no software QRod, as principais variáveis empregadas tanto neste programa quanto no código do Matlab tem seus respectivos valores para o caso estudado disponibilizados na Tab. 1 abaixo:

Tabela 1. Valores respectivos das variáveis de entrada para o caso estudado de um sistema de bombeamento mecânico com hastes.

Variável de entrada	Valor da variável
Peso da coluna de hastes (N)	56.546±0,5
Força de empuxo sobre a coluna de hastes (N)	39.237±0,5
Velocidade de bombeamento (ciclos por minuto)	7,8±0,05
Comprimento do curso da haste polida (m)	3,66±0,005
Fator de aceleração (m/s ²)	0,0032±0,0005
Área de seção transversal do pistão (m ²)	0,125±0,0005
Comprimento do pistão (m)	2,79±0,005
Gravidade específica do fluido (m/s ²)	0,025±0,0005

Feita a simulação do código desenvolvido no Matlab foi possível chegar aos dados de carga máxima sobre a haste polida, carga mínima sobre a haste polida, carga de fluido no pistão, contrabalanço na unidade de bombeio e torque máximo, cujos valores estão apresentados na Tab, 2:

Tabela 2. Dados de desempenho do sistema para o caso estudado de um sistema de bombeamento mecânico com hastes na programação desenvolvida no Matlab.

Dado de desempenho do sistema	Resultado obtido
Carga máxima sobre a haste polida (N)	105.169±0,5
Carga mínima sobre a haste polida (N)	42.209±0,5
Carga de fluido no pistão (N)	41.595±0,5
Contrabalanço na unidade de bombeio (N)	73.689±0,5

Torque máximo (N.m)	57.569±0,5
---------------------	------------

Por outro lado, ao ser realizada a simulação no software QRod, foi possível chegar também aos mesmos parâmetros de desempenho, exceto contrabalanço na unidade de bombeio, como pode ser observado na Tab. 3:

Tabela 3. Dados de desempenho para o estudo de caso de um sistema de bombeamento mecânico com hastes no software QRod.

Dado de desempenho do sistema	Resultado obtido
Carga máxima sobre a haste polida (N)	95.046±0,5
Carga mínima sobre a haste polida (N)	32.615±0,5
Carga de fluido no pistão (N)	24.061±0,5
Torque máximo (N.m)	71.958±0,5

Como se pode observar pela comparação dos valores encontrados para os principais parâmetros de desempenho do sistema nas simulações feitas através de programação no Matlab e no software QRod, a diferença entre estes valores de uma simulação para outra é sensivelmente pequena, exceto para o valor de carga de fluido no pistão. A explicação para esta diferença reside no fato de que a programação no Matlab, atualmente ainda em desenvolvimento, não englobou todas as variáveis de entrada que possuem interferência direta sobre o desempenho do sistema.

Um conjunto de variáveis que não foi considerado nesta simulação é aquele que se refere ao efeito de alongamento que sofre a coluna de hastes em função da carga a que é submetida, sendo este fenômeno decorrente da elasticidade inerente do material do qual as hastes são constituídas. Desta forma, dada a elasticidade do material, o tamanho da coluna de hastes varia ao longo do ciclo de bombeio e assim, o comprimento dos cursos do pistão e da haste polida igualmente oscilam, o que modifica ligeiramente o volume de fluido bombeado e, portanto, aspectos dinâmicos do sistema, o que, como se era esperado e se pôde notar pela tabela modifica muito o valor de carga de fluido no pistão.

Outro conjunto de variáveis que também não foi considerado e que tem impacto sobre o desempenho são fatores referentes ao sistema fluidodinâmico. A pressão de sucção na bomba de fundo e a pressão na tubulação, da mesma forma que o efeito de alongamento, modificam a quantidade de fluido bombeada e assim, a dinâmica do sistema perde precisão se tais fatores não forem levados em conta.

Observe-se aqui que em função da programação no Matlab ainda estar em desenvolvimento, outros parâmetros de desempenho importantes na análise do sistema, que se referem à unidade bombeio na superfície, como a potência requerida pela haste polida serão determinados conforme a continuidade da programação fundamentada no modelo matemático proposto. Tal atividade, porém, requer processamento mais complexo de variáveis uma vez que a potência requerida pela haste polida varia continuamente em função da alternância de carga a que a haste é submetida.

Outro conjunto de resultados obtidos, a partir da simulação no software QRod foi a carta dinamométrica de superfície, dada na Fig. 4 seguinte, a curva de velocidade de bombeamento em função do curso da haste polida, dada na Fig.5 e a curva de torque em função do ângulo na unidade de bombeio colocada na Fig. 6.

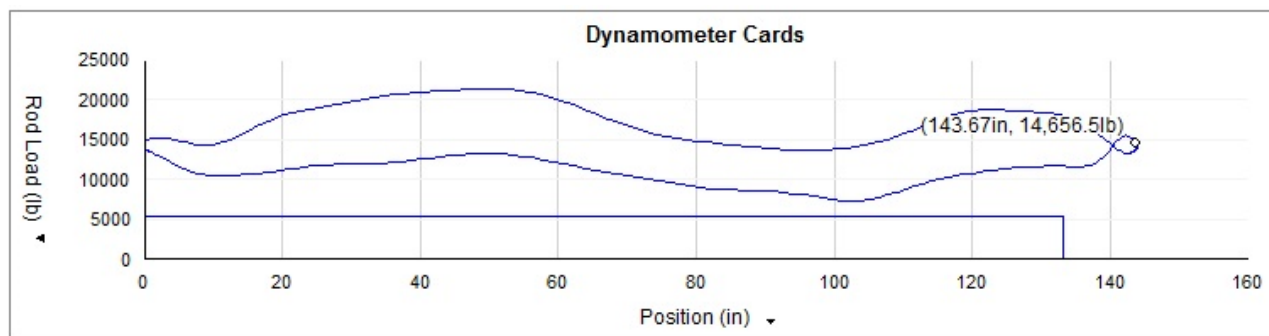


Figura 4. Carta dinamométrica de superfície para o estudo de caso de um sistema de bombeamento mecânico com hastes no software QRod.

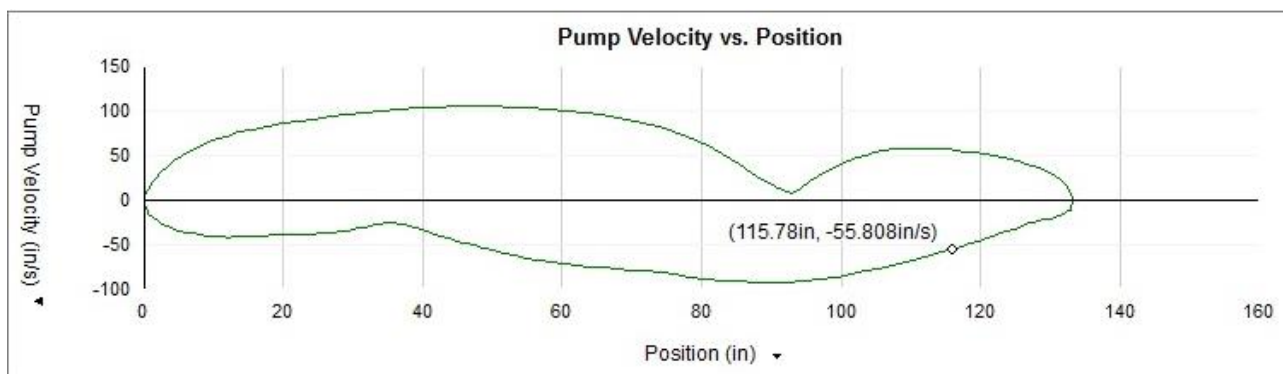


Figura 5. Curva de velocidade de bombeamento em função do curso da haste polida para o estudo de caso de um sistema de bombeamento mecânico com hastes no software QRod.

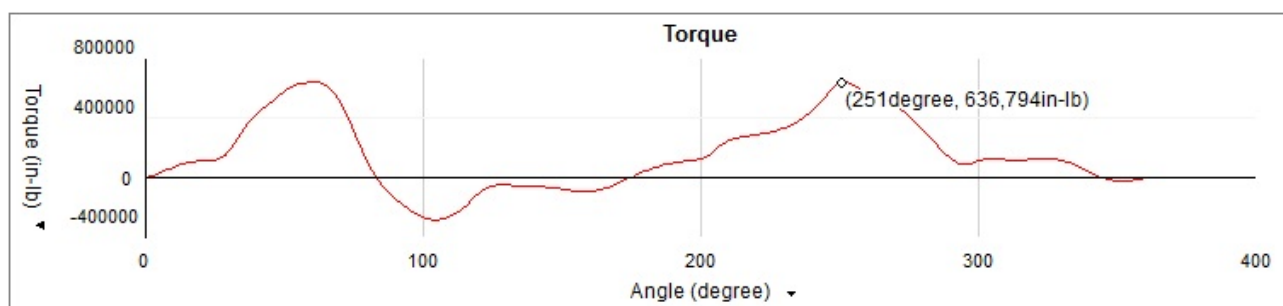


Figura 6. Curva de torque em função do ângulo na unidade de bombeio para o estudo de caso de um sistema de bombeamento mecânico com hastes no software QRod.

A carta dinamométrica assim como a curva de torque em função do ângulo na unidade de bombeio, serão obtidos a partir da programação que ainda está sendo desenvolvida no Matlab e são variáveis que, assim como a potência requerida pela haste polida, exigem processamento mais complexo uma vez que as variáveis de entrada oscilam. Observe-se que tais dados, cuja forma de simulação dos mesmos para um estudo de caso ainda está em desenvolvimento conforme o modelo proposto, embora tão fundamentais na análise do desempenho do sistema como aqueles que já foram aqui expressos como resultados de simulação no Matlab são, por sua vez, os de maior preponderância na análise do desempenho dos sistemas de bombeamento mecânico com hastes.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do trabalho desenvolvido, foi possível estudar um modelo matemático que se aplica à descrição do comportamento de um sistema de bombeamento mecânico com hastes. Observou-se que com base neste modelo, foi possível desenvolver programação no Matlab capaz de, uma vez conhecidos parâmetros de entrada no sistema de bombeamento, determinar parcialmente as principais variáveis de saída que se referem ao desempenho do mesmo, no caso, carga máxima sobre a haste polida, carga mínima sobre a haste polida, carga de fluido no pistão e torque máximo.

Verificou-se, por meio de simulação através do software QRod, que o modelo proposto, através do qual foi feita programação no Matlab, está em conformidade com o comportamento real de um sistema de bombeio mecânico com hastes, sendo observadas distorções sensíveis nos valores de saída comparadas as simulações, que são decorrentes da ausência de fatores que influenciam no desempenho do sistema na programação, como variáveis referentes ao efeito de alongamento na coluna de hastes.

Foi possível obter como resultado ainda, por meio do software QRod, a carta dinamométrica de superfície e demais curvas de desempenho, as quais deverão ser produzidas com base no modelo proposto na programação no Matlab com a continuidade do trabalho que ainda está em desenvolvimento pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

7. REFERÊNCIAS

- GOMES, Heitor P. Desenvolvimento de um sistema inteligente para análise de cartas dinamométricas no método de elevação por bombeio mecânico. 53 folhas. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, Junho de 2009.
- NASCIMENTO, J.M.A. Simulador computacional para poços de petróleo com métodos de elevação artificial por bombeio In: Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 3, 2005. Salvador – BA. *Anais...* Rio de Janeiro: IGP, 2005.
- TAKACS, G., Sucker-rod Pumping Manual, PennWell Books, 2002.585 p.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY OF MODELING AND SIMULATION OF PUMPING MECHANICAL OIL PRODUCTION

Ana Beatriz Soares Benevides, anabeatriz.0103@hotmail.com¹

Sávio Raider Matos Sarkis, savio.sarkis@yahoo.com²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Av. 7 de setembro, 1975 - Centro Manaus - Amazonas Cep: 69020-120

Abstract. *Taking in account the oil companies' development of processing control and their settling as a new technology trend, this paper intends to construct a model and to simulate performance curves of a mechanical pump in an oil elevation system according its weight and the required torque, comparing the free usage simulator, Matlab, with computer commercial methods, that way making possible the validation of the model showcased. This paper's methodology regards a bibliographic review about mechanical pump systems as an artificial elevation method, data with real cases in order to build the model up and the development of simulation according the pump and the fluids features, in which the weight implied, the dynamometric letter of surface, the torque, effective course and the flow are valid parameters that should be evaluated. The main parameters and the performance curves were partially gathered through simulation on commercial software and on Matlab.*

Keywords: *Pumping, Performance, Simulation, Matlab.*