



II CONEPETRO

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

ANÁLISE E MODELAGEM CINEMÁTICA PARA PREVISÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO MECÂNICO APLICADO NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Izabella Carneiro Bastos¹; Lukas Mayr²; Wenzel Maier³

¹ Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciência e Tecnologia – izabella.carneiro@unifal-mg.edu.br

² Montanuniversitaet – University of Leoben, Austria, - mayr.lukas@gmx.at

³ Technischen Universität Graz – University of Graz – Austria - maier.wenzel2@gmx.at

RESUMO

Quando a própria pressão do poço não é suficiente para elevar seus fluidos de forma economicamente viável se faz necessário à utilização de algum método de elevação artificial. O bombeio mecânico com hastes é o método de elevação mais utilizado no mundo, por isso conhecer seu funcionamento é muito importante. Estima-se que 90% da elevação artificial no mundo utilize o sistema de bombeio mecânico.

Este trabalho propõe um estudo detalhado do sistema de bombeamento mecânico (BM) e o desenvolvimento de um modelo matemático baseado no comportamento cinemático do sistema. Este modelo será simulado em software e uma análise técnica da posição, velocidade, aceleração, torque dentre outras características de uma bomba utilizada atualmente em um campo de petróleo será realizada. Como resultado tem-se análise imediata do comportamento de qualquer sistema de bombeio em função da produção do poço bem como utilizar tais estudos para análise dinâmica das hastes em projetos futuros.

Palavras – chave: Modelagem, Bombeio Mecânico, Produção, Petróleo, Análise

1. INTRODUÇÃO

Poços de petróleo que no início de sua vida produtiva, possuem energia suficiente para que os fluidos sejam produzidos naturalmente são chamados poços surgentes. Isto ocorre devido à pressão no fundo do poço ser superior a todas as perdas de pressão que o fluido sofre ao longo da elevação. Quando esta pressão começa a diminuir, a diferença entre a pressão no fundo e todas as perdas de pressão começa a cair, causando uma diminuição do fluxo que chega à superfície. Para que este poços voltem a produzir ou até

mesmo para aumentar a produção de poços surgentes, métodos de elevação artificial são utilizados. Esses métodos atuam fornecendo energia adicional ao poço necessária para elevar os fluidos. Um dos métodos de elevação artificial mais utilizados mundialmente é o Bombeio Mecânico. Este sistema é a forma mais comum de elevação artificial e estima-se que 90% utilize o sistema de bombeio mecânico para aumentar a produção de poços [1-4].

www.conepetro.com.br

br

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

2. SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO

O bombeio mecânico é a forma mais comum de elevação artificial e é amplamente utilizada em aplicações onshore devido ao baixo custo de investimento, manutenção e a possibilidade de operar com fluidos de diferentes composições e viscosidades em uma larga faixa de temperatura. O seu baixo custo versus capacidade de produção ao longo da vida produtiva do poço é um dos fatores que contribuem constantemente para a implementação de novas instalações.

Existe uma divisão básica de componentes no BM. Os componentes de superfície e os componentes de fundo [1]. Os componentes de superfície são: o motor (prime mover), a caixa de redução (gear box), a unidade de bombeio (pumping unit) e a haste polida (polished rod). Já os componentes de fundo são: a coluna de hastes (rod string) e a bomba de fundo (downhole pump). A figura 1 exhibe as principais partes de um sistema de bombeio mecânico de superfície.

Esta bomba convencional tem um design mecânico muito complexo cujo princípio de funcionamento é baseado no movimento rotativo de um motor elétrico o qual é transformado em movimento alternativo pela unidade de bombeamento de superfície. Uma coluna de hastes transfere o movimento para a

parte inferior que aciona uma bomba capaz de elevar os fluidos do reservatório até à superfície. A bomba em si é constituída por um cilindro, também chamado de barril, com válvulas que serão acionadas para deslocar o fluido para a superfície. As válvulas consistem em um anel de vedação e uma esfera que é movida pelo movimento da bomba em combinação com a pressão do fluido. A extremidade superior da coluna de hastes está ligada a uma haste polida que está em movimento alternativo acionado pela unidade de bombeamento. Para entender todo o conceito é útil comparar o sistema de hastes de bombeio com uma linha de transmissão. Na extremidade superior há o receptor e na extremidade inferior o transmissor. Informações sobre o fundo de poço e a condição bomba é transmitida ao longo das hastes de bombeio e monitorada na superfície por um dinamômetro [5].

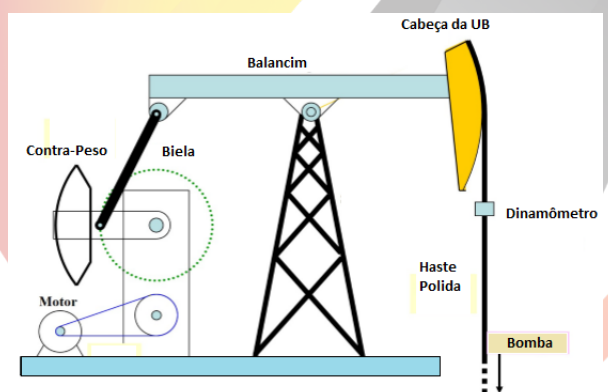


Figura 1: Principais partes do sistema de bombeio de superfície.

O dinamômetro corresponde a maioria das técnicas de diagnóstico atuais para bombeamento mecânico e é baseado nas medições de carga impostas por todo o sistema. Aplicado diretamente sobre a haste polida sua função é medir simultaneamente a carga e o movimento (posição) da haste polida durante a operação do sistema de bombeamento (carta dinamométrica de superfície)[5].

Alguns softwares já preveem o comportamento do sistema baseado em suas configurações mecânicas, seja no tamanho da própria unidade de bombeio mecânico de superfície ou até mesmo no tipo de material da coluna de hastes e assim por diante. No entanto para todo e qualquer análise, uma modelagem matemática do sistema é necessária. Este trabalho fornece um modelo matemático baseado na análise cinemática da bomba de superfície. Este modelo poderá ser utilizado em qualquer sistema de bombeamento e pode servir como base tanto para construções matemáticas complexas (modelo matemático dinâmico) ou até para uma operação ótima do Sistema de Bombeio Mecânico.

3. ANÁLISE CINEMÁTICA DE UM SISTEMA DE BOMBEIO MECÂNICO

A fim de calcular a posição, velocidade e aceleração da haste polida em

função do ângulo de manivela, é necessário utilizar um ramo da mecânica clássica chamada cinemática que descreve os pontos sem ter em conta as causas do movimento. Para descrever o movimento do sistema de bombeio mecânico o uso de método cinemático é importante para estudar a trajetória dos pontos escolhidos, linhas e as propriedades diferenciais, como velocidade e aceleração [6-8]. Para isso, a representação do vetor é a melhor escolha para a análise do mecanismo da unidade de bombeamento. Para aplicar o método cinemático para a bomba de campo, em primeiro lugar, é necessário obter a sua dimensão geométrica. Para isso, o código da bomba e a utilização do manual API (American Petroleum Institute) são indispensáveis. A dimensão geométrica API e o sentido de rotação da bomba pode ser representado na Figura 2 e 3 respectivamente e os seus valores estão descritos na Tabela 1 referenciada a partir da unidade de bombeamento manual de Lufkin [9].

A partir do código da bomba utilizada no teste de campo e as dimensões geométricas, é possível calcular o ângulo de qualquer parte e suas variações dependendo da posição do ângulo de manivela. Para isso uma bomba real, código C-640D-365-168 da marca Lufkin [9] foi escolhida cuja suas dimensões podem ser verificadas na Tabela 1.

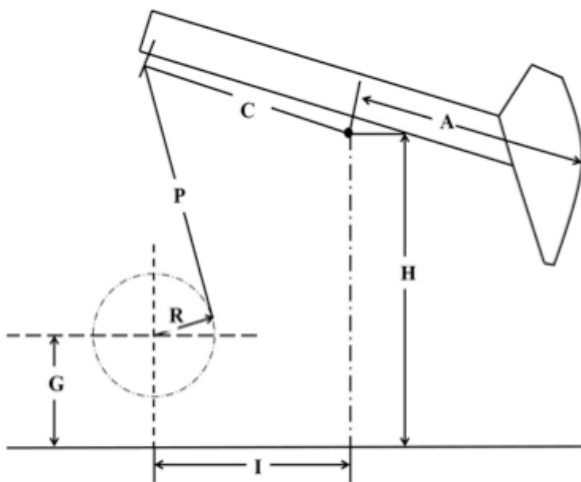


Figura 2: Representação da dimensão pela geometria API [9].

API – Dimensões Geométricas (C-640D-365-168)	Valor [cm]
A	533.40
C	304.88
G	281.94
H	665.48
I	304.80
P	377.19
R	119.38

Tabela 1 – Dimensões geométricas do Sistema de bombeio mecânico código (C-640D-365-168) [9].

Neste trabalho, como primeira etapa, será desenvolvida uma análise cinemática

verificando posição, velocidade e aceleração de determinados pontos do sistema de bombeamento. Um modelo matemático descreverá a transformação do movimento rotativo para o movimento alternado da unidade de bombeio. Este modelo poderá ser aproveitado futuramente para análise dinâmica do sistema. A geometria da unidade do sistema de bombeio convencional e a representação de vetores pode ser verificado na Figura 3.

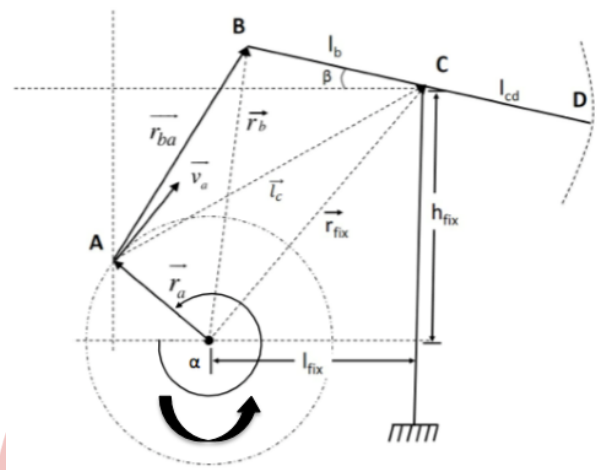


Figura 3: Representação em vetores da unidade de bombeamento convencional.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para efetuar o modelamento matemático do sistema de bombeio de superfície, a utilização de uma área da mecânica clássica denominada cinemática foi aplicada. O intuito é fornecer um modelo



geral que analisa e prevê o comportamento de qualquer tipo de sistema de bombeio contribuindo até mesmo para sua própria eficiência.

Como uma análise da posição, velocidade e aceleração da bomba é necessária para previsão do comportamento do sistema, este modelo a ser apresentado visa não somente facilitar o desenvolvimento de modelos matemáticos futuros para uma análise mais complexa, mas também fornecer um método simples sendo possível a implementação em software por qualquer usuário.

Para dar início, uma análise do movimento dos componentes do sistema mecânico é realizado através da utilização de vetores (figura 3), os quais são caracterizados pela sua magnitude, a direção e sentido. Adotando o sentido anti-horário do movimento e utilizando a teoria da rotação de um corpo em torno de um eixo fixo, o cálculo da velocidade no ponto A, demonstrada na figura 3, pode ser calculada como:

$$\vec{v}_A = \vec{\omega}_a \times \vec{r}_a \quad [1]$$

Onde \vec{r}_a é o vector que representa o movimento da manivela e $\vec{\omega}_a$ a velocidade angular o qual representa a taxa de variação da posição angular (α) em função do tempo (t).

A velocidade no ponto A ao longo da sua trajetória \vec{r}_a é obtida pela equação 2. Observa-se que, devido à rotação anti-horária do sistema de bombeamento, os vetores são multiplicados inversamente como:

$$\vec{v}_A = \begin{pmatrix} -r_a \cos \alpha \\ -r_a \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_a \end{pmatrix} \quad [2]$$

Onde:

$$\vec{v}_A = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ -r_a \cos \alpha & -r_a \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \omega_a \end{vmatrix} \quad [3]$$

Portanto resolvendo a equação 3, a velocidade no ponto A pode ser calculada por:

$$\vec{v}_A = \omega_a \begin{pmatrix} -r_a \sin \alpha \\ -r_a \cos \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad [4]$$

Para o cálculo do vector \vec{r}_a tem-se:

$$\vec{r}_a = r_a \begin{pmatrix} -\cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad [5]$$

O módulo do vector \vec{r}_a representa o seu comprimento, em outras palavras, a variável (R) descrita na Tabela 1. O ponto B se move com velocidade v_B e o ponto A com velocidade v_A em relação ao ponto de referência. Portanto, a velocidade no ponto B



pode ser calculado pela velocidade no ponto A

e a sua velocidade relativa $(\dot{v}_{B/A})$.

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{v}_{B/A} \quad [6]$$

Onde a velocidade relativa $(\dot{v}_{B/A})$ pode ser substituída pela velocidade angular do ponto B e o vetor relativo $(r_{B/A})$ como:

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega}_b \times \vec{r}_{ba} \quad [7]$$

Portanto para dar continuidade a análise, o vetor (\vec{r}_{ba}) pode ser encontrado como:

$$\vec{r}_{ba} = \vec{r}_b - \vec{r}_a \quad [8]$$

The vector \vec{r}_a é descrito pela equação 5 e o vetor \vec{r}_b pode ser então calculado por:

$$\vec{r}_b = \vec{r}_{fix} + \vec{l}_b \quad [9]$$

Como representado pela figura 2 o tamanho do vetor \vec{r}_{fix} pode ser calculado como:

$$\vec{r}_{fix} = \begin{pmatrix} l_{fix} \\ h_{fix} \\ 0 \end{pmatrix} \quad [10]$$

O valor de l_{fix} e h_{fix} pode ser encontrado na tabela 1 como I e $(H-G)$, respectivamente. Para o vetor \vec{l}_b tem-se:

$$\vec{l}_b = |l_b| \begin{pmatrix} -\cos \beta \\ \sin \beta \\ 0 \end{pmatrix} \quad [11]$$

O módulo do vetor \vec{l}_b representa o comprimento, em outras palavras, a variável (C) descrita na tabela 1. Portanto o cálculo do vetor \vec{r}_{ba} pode ser obtido pela subtração do vetor \vec{r}_b e \vec{r}_a (Equação 8) e pode ser escrito como:

$$\vec{r}_{ba} = \begin{pmatrix} l_{fix} - |l_b| \cos \beta \\ h_{fix} + |l_b| \sin \beta \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -r_a \cos \alpha \\ -r_a \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad [12]$$

É importante notar que o vetor \vec{r}_{ba} está em função do ângulo α e β . Como foi demonstrado pelas equações acima, a velocidade no ponto B (\dot{v}_B) pode ser calculada por substituindo a equação 4 e 12 na equação 7. Com isso é possível transformar a matriz em duas equações com duas variáveis.

$$V_b \sin \beta = \omega_a (-r_a \sin \alpha) + \omega_b \dot{v}_b \quad [13]$$

$$V_b \cos \beta = \omega_a (-r_a \cos \alpha) + \omega_b \dot{v}_b \quad [14]$$

A solução da equação 13 e 14 pode ser realizada diretamente no software de simulação. Dando continuidade a demonstração de todos os vetores, tem-se que o vetor \vec{v}_B pode ser calculado como:



$$\vec{v}_b = v_b \begin{pmatrix} \sin \beta \\ \cos \beta \\ 0 \end{pmatrix} \quad [15]$$

Para finalizar o cálculo de todo o sistema em função do ângulo da manivela, é necessário encontrar o ângulo β como demonstrado na figura 4.

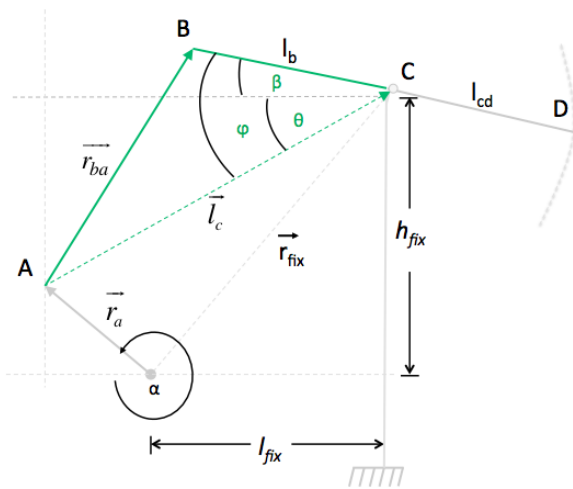


Figura 4: Esquema para calcular todos os ângulos da unidade de bombeamento mecânico.

Na figura 4 os ângulos (φ) , (θ) e o ângulo (β) são representados. Como verificado, para calcular o ângulo (β) é necessário uma equação em função do ângulo φ . Aplicando a lei do cosseno tem-se, pela equação 16, a manipulação das variáveis para o cálculo do ângulo (φ) :

$$(r_{ba})^2 = (l_b)^2 + (l_c)^2 - 2l_b l_c \cos \varphi \quad [16]$$

Substituindo as variáveis, o vetor (\vec{l}_c) pode ser calculado através da equação 17, como:

$$\vec{l}_c = \begin{pmatrix} l_{fix} + r_a \cos \alpha \\ h_{fix} + r_a \sin \alpha \\ 0 \end{pmatrix} \quad [17]$$

Através do cálculo do módulo do vetor \vec{l}_c e a substituição na equação 16 tem-se:

$$\varphi = \arccos \left(\frac{-(r_{ba})^2 + (l_b)^2 + (l_c)^2}{2l_b l_c} \right) \quad [18]$$

Para o ângulo θ :

$$\theta = \arctg \left(\frac{h_{fix} + r_a \sin \alpha}{l_{fix} + r_a \cos \alpha} \right) \quad [19]$$

Portanto para obter o ângulo (β) tem-se:

$$\beta = \varphi - \theta \quad [20]$$

Como o ponto A e B tem sido calculado, o ponto C pode ser encontrado como demonstrado na figura 4. Como as dimensões de l_{cd} esta descrita na tabela 1 como variável A e l_b já foi calculada, a velocidade no ponto D é descrita por:

$$v_D = -v_B \frac{l_{cd}}{l_b} \quad [21]$$

Portanto baseado em todos os cálculos apresentados, é possível calcular a posição e velocidade de cada ponto na bomba. Para este trabalho, a parte mais importante para ser

calculada é o valor do ângulo (α) em função da posição do ângulo da haste polida. Pela análise entre o vetor \vec{r}_b na coordenada y,

$$\frac{h}{\dot{\theta}} \text{ e as distâncias } l_{cd} \text{ and } l_b, \text{ a}$$

relação de posição pode ser calculada em função do ângulo (α). É importante ressaltar que para todos os cálculos mencionados a velocidade da bomba é mantida constante.

Este modelo matemático é uma simples aproximação e pode ser utilizado para diferentes valores de entrada de dados seja através de diferentes tipos de bombas de superfície (dimensões geométricas) ou pela própria taxa de produção (strokes/minute).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O método de análise cinemática é responsável por prever desempenho da bomba baseado em dados como produção por minuto (movimento ascendente e descendente da coluna de haste), posição, velocidade e aceleração do sistema de bombeio. O uso deste procedimento é essencial para outras análises subsequentes como a própria análise mecânica do sistema, vibração, etc.

Através do modelo proposto, uma simulação em software foi realizada. Inicialmente, conforme demonstrado na figura

5 a posição da haste polida versus o ângulo da manivela é realizada.

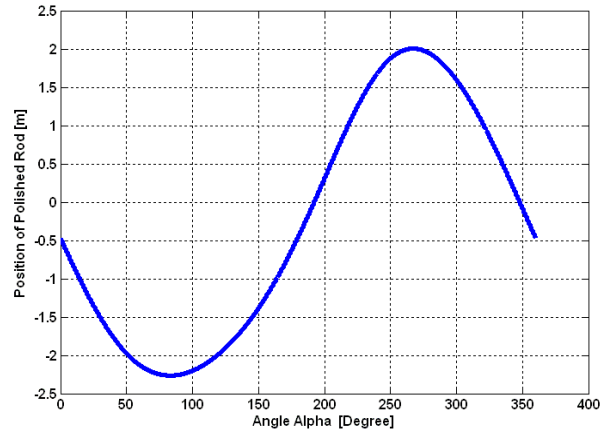


Figura 5: Posição da haste polida versus o ângulo da manivela.

Baseado na equação 4 é possível calcular a velocidade no ponto A (junção entre a manivela e a Biela) e conseqüentemente pela derivação, a aceleração também pode ser encontrada. A figura 6 representa a velocidade e aceleração do ponto A em função do ângulo da manivela.

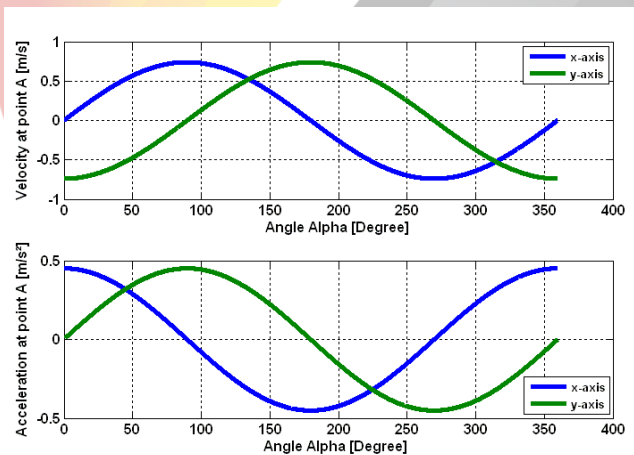


Figura 6: Velocidade e aceleração do ponto A. As linhas azul e verde são os cálculos no eixo x e y do eixo coordenadas, respectivamente.

Com base na Equação 13 a 15, a velocidade e a aceleração no ponto B (junção da biela e o Balancim) podem ser calculadas. A figura 7 demonstra o resultado.

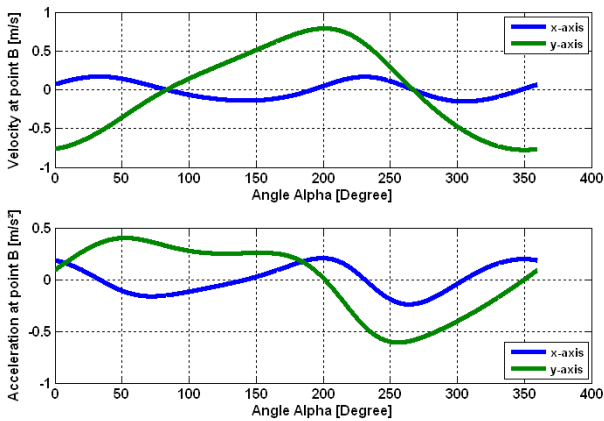


Figura 7: Velocidade e aceleração do ponto A. As linhas azul e verde são os cálculos no eixo x e y do eixo coordenadas, respectivamente.

Para o ponto D (junção entre a cabeça de bombeio e balancim), utilizando o ponto de C como referência, um cálculo simples é desenvolvido e a velocidade e a aceleração no ponto D pode ser resolvido pela Equação 21. A Figura 8 apresenta os resultados:

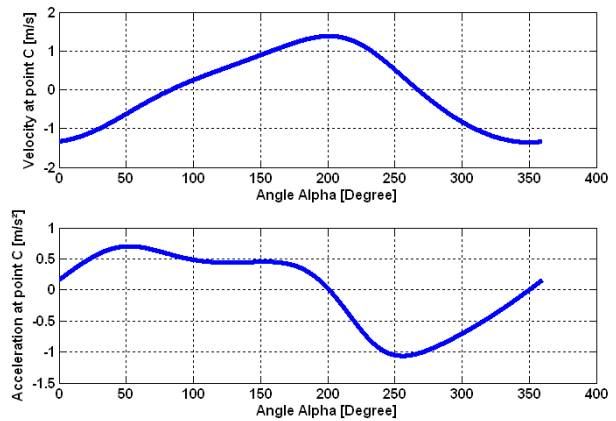


Figura 8: Velocidade e aceleração do ponto D. As linhas azul e verde são os cálculos no eixo x e y do eixo coordenadas, respectivamente

6. CONCLUSÃO

O sistema de elevação artificial mais popular é tradicionalmente o sistema de bombeio mecânico e cerca de 90% de todos os poços de elevação artificial estão equipados por esta bomba. Este trabalho descreve o primeiro passo para melhorar o desempenho do sistema.

O modelo matemático proposto é baseado na análise cinemática do sistema de bombeio mecânico (C-640D-365-168) da empresa Lufkin S/A [9] com uma taxa de produção fixa de 5.8 strokes/minutos. Como uma análise da posição, velocidade e aceleração da bomba é necessária para previsão do comportamento do sistema, este modelo apresentado visa não somente facilitar o desenvolvimento de modelos matemáticos futuros para uma análise mais complexa, mas

também fornecer um método simples sendo possível a implementação em software por qualquer usuário. Os resultados apresentados condizem com uma taxa de produção de 5,8 strokes/minutos.

Todo o sistema foi implementado em software os resultados são avaliados em testes de campo realizados em Gänserndorf, Áustria.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Triggia, A. A., Correia, C. A., Filho, C.V. “Fundamentos de Engenharia de Petróleo”. Second Edition, Interciência, Petrobras, 2004.

[2] Takács, G. “Sucker-Rod Pumping Manual”. Penn Well Corporation. 2003.

[3] Economides, M. J., Hill, A. D. and Economides, C.E. “Petroleum Production Systems”. Prentice Hall PTR, 1993.

[4] Clegg, J.d., “Recommendations and Comparisons for Selecting Artificial-Lift Methods”, Journal of Petroleum Technology (Society of Petroleum Engineers), Volume 45, Number 12, December 1993.

[5] **Eickmeier, J.R.**, “Diagnostic Analysis of Dynamometer Cards”, Journal of Petroleum Technology”, Society of Petroleum Engineers Volume 19, Number 1, January 1967.

[6] Khodabandeh, A., Miska. S., “A simple

Method for Predicting the Performance of a Sucker Rod Pumping System”, SPE Eastern Regional Meeting held in Lexington, Kentucky, October 22-25, 1991.

[7] Johnston, R., Beer, F.P., “Mecânica Vetorial para Engenheiros – Cinemática e Dinâmica”, 5. Edição, Editora Makron, 1991.

[8] Svinos, J.G., Exact Kinematic Analysis of Pumping Units, Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in San Francisco, CA, October 5-8, 1983.

[9] Lufkin Industries, “Pumping Unit General Catalog, Lufkin Oilfield Products Group” 2011.