

MODELAGEM DO ESBOÇO DA CARTA DINAMOMÉTRICA DE SUPERFÍCIE POR MEIO DE MÉTODO NÃO INVASIVO

Email:

Abstract— Sketch modeling of the surface dynamometrical cards, on offshore sucker rod pumping is discussed. The proceeding is based on the stroke length of polished rod obtained by means of relationships between the mechanical and dynamic structure of the pumping unit; and in the load of polished rod sketched from informations of the induction machine as voltage, nominal frequency, number of poles, electric current of the stator and estimated parameters of the equivalent electric circuit by phase. The identification algorithm has characteristics no linear. The objective is the sketch of the surface dynamometrical card without the use of traditional invasive methods. Simulations and experimental results associated to proposed algorithm are presented.

Keywords— Modeling, dynamometrical cards, non-invasive method, sketched.

Resumo— A modelagem do esboço da carta dinamométrica de superfície, em unidades de bombeio mecânico de petróleo terrestres por hastes é discutida. O procedimento é baseado no curso da haste polida obtido por relações da estrutura mecânica e dinâmica da unidade de bombeio, e no peso da haste polida estimado a partir de informações do motor de indução como tensão de alimentação, frequência nominal, número de polos, corrente elétrica do estator e parâmetros estimados do circuito elétrico equivalente por fase. O algoritmo de identificação tem características não lineares. O objetivo é o esboço da carta dinamométrica de superfície sem a utilização de métodos invasivos tradicionais. Simulações e resultados experimentais associados à aplicação são do algoritmo proposto apresentados.

Palavras-chave— Modelagem, cartas dinamométricas, método não invasivo, esboço.

1 Introdução

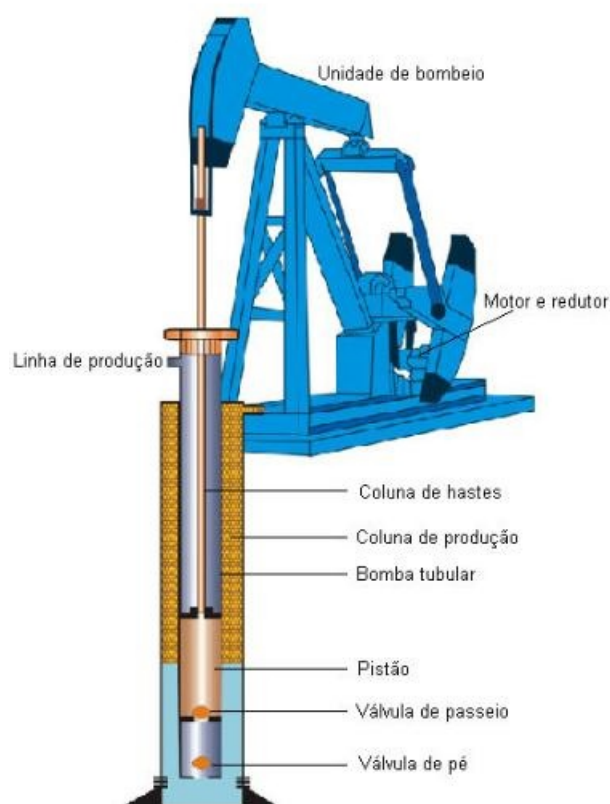
O bombeio mecânico é um dos métodos de elevação artificial de petróleo mais utilizado no mundo. No Brasil, este método é aplicado em estações de bombeio terrestres e no mundo, representa mais de 60% dos poços produtores. Diante disto, é importante dispor de formas para análise de desempenho de cada estação, durante o ciclo de funcionamento, que contribuam para a tomada de decisão quanto a manutenções preventivas, livrando o sistema de perdas de produção por falhas (Gauto, 2016).

A elevação do fluido presente no poço de uma unidade de bombeio mecânico ocorre por meio de uma bomba alternativa colocada no fundo do poço. Um movimento alternativo, provocado por um motor elétrico de indução, é produzido na superfície da unidade é transmitido ao pistão da bomba de fundo por uma coluna de hastes. Assim, a cada ciclo de movimento alternativo, certa quantidade de fluido é elevada para a superfície (Barros et al., 2013).

Em geral um sistema de bombeio Mecânico possui os seguintes componentes: motor, redutor, haste polida, mesa do cabresto, tripé, balancim, cabeça do cavalo, contrapesos, pistão, válvula de passeio e válvula de pé. A Figura 1 ilustra alguns destes elementos citados.

Normalmente, uma das formas de monitorar o desempenho das estações de bombeio utiliza a análise das curvas características de funcionamento, chamadas de carta dinamométrica de fundo e superfície. As cartas dinamométricas de fundo que registram as cargas no fundo do poço, logo acima da bomba, em função do curso

Figura 1: Componentes da unidade de bombeio.



Fonte: (Rossi., 2003)

da mesma; representam uma das ferramentas utilizadas no acompanhamento de sistemas de bombeio mecânico por hastes e diagnóstico de falhas no sistema, visto que, por meio delas, é possível saber as condições da bomba de fundo. Contudo, medições no fundo de poços durante a operação da unidade de bombeio são dificultadas pela dimensão das hastes de bombeio em relação aos equipamentos sensores e cabos, que estariam submetidos às condições mecânicas extremas ao transmitir os dados coletados à superfície (Porciuncula et al., 2014).

Uma carta dinamométrica é um gráfico que, escrito na forma cartesiana, relaciona no eixo da ordenadas a carga na haste polida medida, geralmente, em libra força e, no eixo das abscissas, o deslocamento da mesma haste (medidos em polegadas), durante um ciclo de funcionamento de uma unidade de bombeio mecânico por hastes. Pode ser utilizada como ferramenta prática para diagnóstico de funcionamento de uma Unidade de Bombeio Mecânico de Petróleo, visto que informações como as variações progressivas ascendentes ou descendentes da carga estática podem ser observadas (Bezerra, 2010).

Em sistemas de bombeio por hastes, as medições primárias que contribuem para a obtenção da carta dinamométrica de superfície são a medição da carga na haste polida e a posição da haste polida. Para a medição da posição da haste polida podem ser utilizados como métodos: a chave de posição, transdutores de efeito hall e inclinômetros. Tratando da medição da carga na haste polida as metodologias usualmente utilizadas são medidores de deformação elástica (*strain gauge* ou dinamômetro), montado na viga de sustentação da cabeça do cavalo mecânico, células de carga da haste polida e, mais recentemente, a inferência da carga na haste polida por meio de medições no motor elétrico de indução da estação de bombeio (Allison, 2015).

Contudo, qualquer falha nos elementos sensores que contribuem na composição da curva característica das cartas dinamométricas, sobretudo a carta dinamométrica de superfície, pode comprometer a análise e diagnóstico de problemas relacionados com a unidade de bombeio (Lima, 2014).

Alguns sistemas de medição voltados à obtenção da carta dinamométrica, em estações de bombeio mecânico, utilizam medidores duais que medem a carga e a posição da haste em um único dispositivo. Este fato reduz o custo na instrumentação, pela redução da quantidade de dispositivos, mas compromete a precisão da medição, quando se compara a medição individualizada da carga e posição da haste polida.

Modernos inversores de frequência são capazes de calcular o torque de saída do eixo do motor, baseado na medição de corrente do

estator. Se a geometria da unidade de bombeio é conhecida, como também o ângulo da manivela e o torque produzido pelo motor, é possível inferir a carga da haste polida. O uso desta metodologia fornece a informação da carga de haste polida sem a instalação de sensor específico e cabo de alimentação que pode se romper durante a operação de bombeamento.

Para que os inversores de frequência citados sejam capazes de realizar os cálculos de torque, baseados na corrente do estator, e estabelecer relação entre corrente no estator e torque produzido no eixo do motor, é necessário uma sintonia de rotação com o motor desacoplado na unidade de bombeio, visto que qualquer carga acoplada ao motor, poderia influenciar na relação torque versus corrente. Contudo, como o custo para desacoplar o motor e realizar os procedimentos necessários é relativamente alto, pois envolve a parada na unidade de produção de petróleo e equipe especializada, o que se observa na prática é a realização de uma sintonia não rotacional, na qual a corrente em vazio é parametrizada manualmente no inversor de frequência ou calculada a partir da medição da resistência medida no estator do motor.

A parametrização manual do inversor de frequência com o valor da corrente em vazio do motor ou da resistência do estator, pressupõe que estes valores sejam fornecidos pelo fabricantes ou medidos em campo. Geralmente, os fabricantes indicam a corrente nominal dos motores nos dados de placa. Corrente em vazio e resistência de estator são grandezas elétricas que, usualmente, necessitam de medição, o que pode interferir na produção da unidade de bombeio, visto que a unidade deve estar parada para tais medições.

A inferência da carga na haste polida, a partir de inversores de frequência, pode eliminar a necessidade do uso de sensores tais como células de carga e *strain gauge* e contribuir para o esboço da carta dinamométrica de superfície. Os cálculos para a obtenção do valor inferido da carga na haste polida depende, dentre outros fatores, da precisão na instalação, parametrização e sintonia do motor acoplado ao inversor de frequência. Na prática a sintonia é não rotacional, ou seja, depende da informação da corrente em vazio ou da resistência do estator, que é informada ao inversor manualmente, podendo se constituir em fonte de erro.

Diante disto, este artigo se propõe em apresentar um método alternativo para o sistema de medição colocado entre a cabeça do cavalo e a haste polida. A metodologia utilizada consiste em determinar o torque eletromecânico do eixo do motor, por meio dos parâmetros elétricos do circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico, estimados por meio de um algoritmo desenvolvido com aspectos de inteligência compu-

tacional. Com o torque eletromecânico calculado por meio dos parâmetros estimados pelo algoritmo, considerando a variação do escorregamento do motor, obtém-se o torque mecânico produzido na unidade de bombeio, multiplicando o inverso do fator de redução, da caixa de redução da unidade, com a relação entre o raio do redutor e o raio da polia do motor e o torque eletromecânico citado. A razão entre o torque mecânico da unidade de bombeio e o fator de torque determina a carga na haste polida.

Com a metodologia proposta, a carga da haste polida é estimada sem a utilização de sistema de medição específico, envolvendo sensores invasivos tais como células de carga ou dinamômetros, livrando o sistema da dependência exclusiva da instrumentação industrial; além disto, é possível utilizar a metodologia como alternativa e redundância na obtenção da carta dinamométrica de superfície, uma vez que estabelecendo uma relação cartesiana entre a carga na haste polida e o curso da haste polida é possível traçar a característica da carta citada. O traçado da carta pode contribuir para monitorar a operação na unidade de bombeio, visto que é possível identificar falhas ou características específicas de operação que podem indicar defeitos nos equipamentos envolvidos no bombeio do petróleo.

Para o cálculo do curso da haste polida, que contribui para esboçar a carta dinamométrica de superfície características mecânicas da estação de bombeio tais como peso dos contrapesos, comprimento do balancim e características geométricas da estação foram necessárias. Os resultados apresentados foram obtidos a partir de medições e dados reais de uma estação experimental instalada na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia e discutidos na conclusão deste artigo.

2 Metodologia Proposta

O motor de indução trifásico possui parâmetros elétricos que podem ser obtidos por meio dos ensaios de rotor livre e bloqueado. Os ensaios citados são realizados, geralmente, em laboratório sob condições descritas em norma. Os parâmetros do modelo elétrico do motor de indução trifásico são a impedância do rotor referente ao estator, a reatância indutiva do rotor referente ao estator, a reatância do estator, a resistência do estator, a resistência que representa as perdas no entreferro a reatância de magnetização no entreferro (Chapman, 2013).

O método proposto consistiu em obter o torque eletromecânico produzido pelo eixo do motor, por meio de parâmetros do modelo elétrico do motor de indução trifásico, estimados por

algoritmos genéticos elaborados em software iterativo. O uso dos algoritmos genético baseou-se na possibilidade de empregar uma estratégia de busca paralela e estruturada, mas aleatória, voltada à busca de pontos ótimos, ou seja, valores nos quais a função a ser minimizada tem pontos que melhor contribuem para a minimização desejada, considerando um universo de valores e restrições pré-definidas e ajustáveis.

A função minimizada pelo método numérico de mínimos quadrados foi a função custo que comportava a diferença entre o quadrado da corrente do estator medida, em regime permanente, e a corrente do estator, calculada a partir dos parâmetros estimados do modelo elétrico do motor de indução trifásico. Ou seja, a cada interação do algoritmo buscava-se minimizar a diferença entre o quadrado da corrente medida, com o quadrado da corrente calculada a partir dos parâmetros estimados do modelo elétrico do motor.

Além da corrente do estator, medida por uma sonda de corrente e armazenada em planilha, o algoritmo utilizou dados do motor tais como tensão eficaz de alimentação, frequência em Hertz, número de polos, rotação do rotor em rpm e escorregamento medidos, durante o regime permanente, e apresentados como entradas para o algoritmo. O universo de busca para cada parâmetro foi determinado a partir de ensaios com rotor livre e bloqueado. Serviram como restrições para o processamento computacional o número de interações e a tolerância mínima de erro na função custo.

Após seguir os critérios de parada e observar as restrições, o algoritmo apresentou os valores dos parâmetros elétricos do circuito elétrico equivalente do motor de indução. Estes parâmetros serviram para calcular o torque eletromecânico do eixo do motor. O motor de indução em uma estação de bombeio de petróleo, está coplado ao restante da estrutura da unidade, por meio da caixa de redução, polias e engrenagens. Os valores desses parâmetros mecânicos bem como dados da estrutura da unidade tais como relação da caixa de redução mecânica, peso e número dos contrapesos, comprimento do balancim e características geométricas da estação, que influenciavam na cinemática do sistema de bombeio.

Com os valores de torque no eixo do motor em função da variação do escorregamento, dados da geometria da Unidade de bombeio tais como, raio da polia, relação das engrenagens da caixa de redução, comprimento do balancim em metros, distância de apoio do balancim à polia e os ângulos relativos à cinemática do movimento do cavalo mecânico, foi possível calcular a carga mecânica na haste polida, sem utilização invasiva de sensores específicos como, por exemplo, dinamômetros e células de carga.

O torque produzido na unidade de bombeio contribuiu para o movimento ascendente e descendente da haste polida. O curso na haste polida pode ser calculada considerando torque da manivela, massa de cada contrapeso, distância de cada contrapeso até o eixo de saída do redutor, número de contrapesos, e o desbalanceamento estrutural, a partir do arranjo geométrico da unidade de bombeio mecânico que neste trabalho considerou o arranjo geométrico convencional balanceado no balancim, referente à estação de bombeio em estudo. A relação gráfica entre variação do curso da haste polida em função da carga na haste polida foi possível compor a carta dinamométrica de superfície.

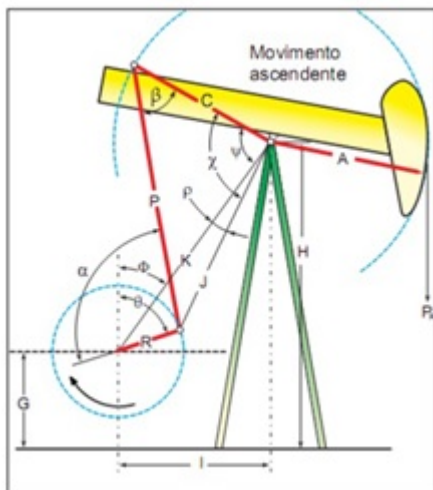
3 Detalhamento Matemático

Para o cálculo do torque mecânico da unidade de bombeio envolvido no ciclo de bombeamento de petróleo, é importante o entendimento da cinemática da unidade. Este entendimento pode favorecer o estudo da posição, velocidade e aceleração da haste polida, e a relação com o peso do volume de petróleo durante o bombeamento.

A metodologia para o cálculo da cinemática da unidade de bombeio por hastes foi primeiramente proposta no começo da década de 60 e posteriormente recebeu contribuições na década de 80, levando em consideração os dados geométricos representados por letras e ângulos na Figura 2.

A Figura 2 apresenta o modelo geométrico

Figura 2: Componentes da unidade de bombeio.



Fonte: (Lins, 2010)

da unidade bombeio que foi utilizado neste trabalho. Este modelo é normatizado pela norma API SPEC 11E que recomenda o cálculo do deslocamento da haste polida em função do ângulo da manivela e dos dados geométricos citados anteriormente. Apesar de existir vários modelos que

descrevem a transformação do movimento rotativo do motor para o movimento alternativo da unidade de bombeio, este modelo é que apresenta maior precisão.

A equação 1 serviu para calcular o deslocamento ou curso da haste polida em função do ângulo θ da cinemática da unidade de bombeio apresentada na Figura 2:

$$Sub(\theta) = A. (\psi_b - \psi_{ub}(\theta)) \quad (1)$$

Onde,

A - distância do tripé até a cabeça do cavalo;

$$\psi_b = \cos^{-1} \left(\frac{C^2 + K^2 - (P + R)^2}{2CK} \right); \quad (2)$$

$$\psi_{ub} = \sin^{-1} \left(\frac{P \cdot \sin(\beta)}{J} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{P \cdot \sin(\theta - \phi)}{j} \right); \quad (3)$$

Para calcular ϕ , J e β são utilizadas respectivamente as equações 4, 5 e 6.

$$\phi = \sin^{-1} \left(\frac{1}{K} \right); \quad (4)$$

$$J = \sqrt{R^2 + K^2 - 2RK \cos(\theta - \phi)}; \quad (5)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{C^2 + P^2 - K^2 - R^2 + 2KR \cos(\phi - \theta)}{2PC} \right) \quad (6)$$

Além do curso da haste polida, foi necessário o cálculo da carga na haste polida, a partir dos aspectos geométricos da cinemática de operação da unidade de bombeio mecânico. A Equação (7) pode representar a expressão para a carga da haste polida:

$$Chp = \frac{Tub}{FT} \quad (7)$$

Onde,

Tub: torque produzido na unidade de bombeio com o auxílio do motor;

FT: Fator de torque.

O valor do Tub pode ser obtido pela Equação (8):

$$Tub = \frac{1}{\gamma} \frac{R_{redutor}}{R_{motor}} T(s) \quad (8)$$

Onde,

- γ : fator de redução;
- $R_{redutor}$: raio da polia do redutor;
- R_{motor} : raio da polia do motor;
- $T(s)$: torque eletromecânico do motor em função do escorregamento;
- Tub: torque produzido na unidade de bombeio.

O FT é calculado pela Equação (9):

$$FT = \frac{R.A.\text{sen}(\alpha)}{C.\text{sen}(\beta)} \quad (9)$$

Onde,

- R, A e C: estão relacionados com a geometria da unidade de bombeio ilustrada na Figura 2;
- β : ângulo calculado pela Equação (6) e relacionado com a cinemática da estação de bombeio;
- α : ângulo calculado pela Equação (10) e relacionado com a cinemática da estação de bombeio.

$$\alpha = \beta + \psi_{ub} - (\theta - \psi) \quad (10)$$

A relação gráfica entre variação do curso da haste polida em função da a carga na haste polida contribui para compôr a carta dinamométrica.

4 Resultados Experimentais

Foram realizados ensaios de rotor livre e rotor bloqueado com dois Motores de indução trifásicos, Fabricação WEG, tipo gaiola de esquilo, CAT N, frequência 60Hz, potência 0,75 kW(1cv), 1720 rpm, tensão nominal 220VAC, corrente nominal 3,02A, IP55; e mais um motor com características semelhantes, integrante de uma bancada didática WEG composta de um gerador de corrente contínua, controlador de carga, medidor de torque rotativo e velocidade, modelo DATAFLEX 22/20, torque nominal de 20 Nm; error linear incluindo a histerese menor que 0,5% e relação entre tensão de saída e torque de 2,5V/10Nm.

Os motores foram escolhidos para os testes por possuírem características idênticas àqueles identificadas no motor instalado e operando na estação experimental em estudo. Os ensaios realizados nos MITs citados serviram para estabelecer os limites de busca do algoritmo, no que se referir aos parâmetros do circuito equivalente por fase. Dessa forma os limites escolhidos foram:

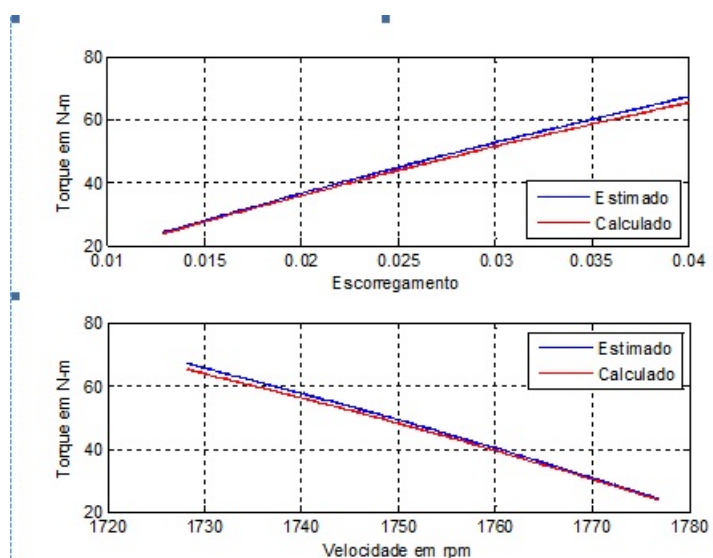
- Resistência por fase efetiva do estator: $0 < R1 < 6\Omega$;
- Reatância de dispersão por fase do estator: $0 < X1 < 6\Omega$;
- Resistência por fase do rotor referida ao estator: $0 < R2' < 3\Omega$;
- Reatância de dispersão por fase do rotor referida ao estator: $0 < X2' < 6\Omega$;

- Resistência que representa perdas no núcleo: $0 < Rm < 130\Omega$;
- Reatância de magnetização do núcleo: $0 < Xm < 90\Omega$;

Na Figura 3 são apresentadas as curvas do torque em função do escorregamento do motor e a curva de torque em função da velocidade de rotor do motor, obtidas após o número de 1000 interações e considerando a tolerância de erro da função custo na ordem de 10^{-4} . Os traçados apresentados foram calculados matematicamente e estimados pelo algoritmo o que permitiu a comparação.

Quando se analisa o torque mecânico em

Figura 3: Curvas de torque mecânico em função do escorregamento e da velocidade do eixo do motor.



Fonte: própria autoria

função do escorregamento, a medida que o escorregamento aumenta o valor estimado do torque tende a divergir do valor calculado. Quando o motor tende a velocidade síncrona o torque estimado tende a se aproximar do valor calculado.

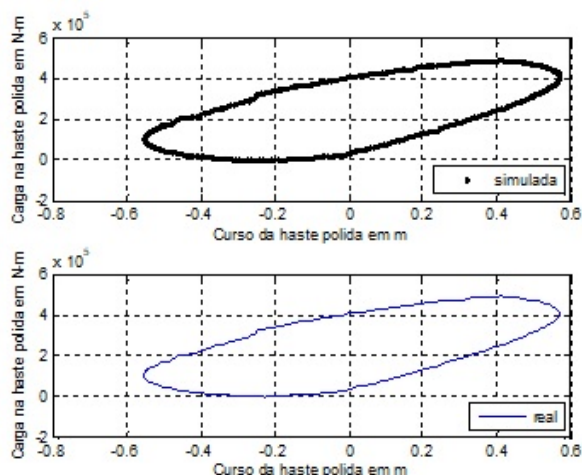
Na Figura 4 é apresentado o traçado da Carta dinamométrica de superfície obtido pelo método proposto comparado o traçado simulado pelo algoritmo e calculado matematicamente.

Observando cuidadosamente os traçados ilustrados na Figura 4, é possível perceber que ambos revelam que a estação em estudo está desbalanceada, devido ao formato elíptico tendendo ao ângulo de 45° , e as curvas são muito semelhantes.

5 Conclusões

A partir dos parâmetros estimados do circuito equivalente do motor, por meio de algoritmos ge-

Figura 4: Curvas de torque mecânico em função do escorregamento e da velocidade do eixo do motor.



Fonte: própria autoria

néticos, o uso de variáveis elétricas tais como frequência em Hertz, tensão nominal de alimentação, valor eficaz de corrente no estator e número de polos do motor, e utilizando torque eletromecânico do eixo do motor, foi possível calcular valores de torque, no eixo do motor, em função do escorregamento. Com os valores de torque em função da variação do escorregamento, dados da geometria da UBM tais como, raio da polia do sistema mecânico, relação entre as engrenagens da caixa de redução e o fator de redução, comprimento do balancim em metros, distância de apoio do balancim à polia, e os ângulos relativos à cinemática do movimento do cavalo mecânico, foi possível calcular a carga mecânica na haste polida, sem a utilização dos sensores tradicionalmente utilizados.

O torque produzido na unidade de bombeio contribui para o movimento ascendente e descendente da haste polida. A curso na haste polida pôde ser calculada considerando torque da manivela, massa de cada contrapeso, distância de cada contrapeso até o eixo de saída do redutor, número de contrapesos, e o desbalanceamento estrutural, a partir do arranjo geométrico da UBM que neste trabalho considerou o arranjo geométrico convencional balanceado no balancim. A relação gráfica entre variação do curso da haste polida em função da a carga na haste polida foi possível compor a carta dinamométrica de superfície

Agradecimentos

Sinceros agradecimentos são dedicados ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, e em especial, aos meus professores respinsáveis pela orientação e coorientação do trabalho. Contribuições

de professores do Departamento de Engenharia Elétrica internos e externos, ligados ao programa de pós-graduação citado, foram ajudaram na evolução do trabalho.

Referências

- Allison, A. (2015). *Accurate Load Position Measurement Is Critical to Quality Dynamometer Analysis*, 11th Annual Sucker Rod Pumping Workshop, Oklahoma City, Oklahoma.
- Barros, Y. B., Sousa, L. A., Leite, M., Sousa, M. G. and Araújo, P. J. (2013). *Aplicação do bombeio mecânico com hastes na elevação do petróleo*, Vol. 1, Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas -UNIT, Rio Grande do Norte.
- Bezerra, M. A. D. (2010). *Aplicação de redes neurais artificiais no reconhecimento de padrões de cartas dinamométricas de fundo em sistemas de bombeio mecânico de petróleo.*, Dissertação de mestrado em engenharia mecatrônica., Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica e Instituto de Matemática, Salvador, Bahia.
- Chapman, S. J. (2013). *Fundamentos de Máquinas elétricas. tradução: Anatólio Laschuk.*, 5ª edn, Editora Bookman, Porto Alegre, RS.
- Gauto, M. (2016). *Petróleo e gás - princípios de exploração, produção e refino*, Bookman Companhia Editora Ltda, Porto Alegre - RS.
- Lima, F. (2014). *Direção e classificação de modos de operação do bombeio mecânico via cartas dinamométricas.*, Dissertação de mestrado., Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, Natal, RN.
- Lins, F. C. d. A. (2010). *Modelagem e simulação de um sistema de bombeio mecânico em poços direcionais utilizando parâmetros concentrados.*, Dissertação de mestrado., Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo., Natal, RN.
- Porciuncula, T. F. C., Pereira, R. L. O., De Lima, F. S., Silva, D. R. C. and Guedes, L. A. (2014). *Reconhecimento de modos de operação em sistemas de bombeio mecânico via descritores de Fourier e PCA.*, Vol. 1, Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, MG.
- Rossi, N. C. M. D. (2003). *Direção e classificação de modos de operação do bombeio mecânico via cartas dinamométricas.*, Bombeio Mecânico: apostila Universidade Corporativa PETROBRAS.