

Sistema Embarcado Para Monitoramento do Torque no Eixo do Redutor de Unidades de Bombeio Através dos Parâmetros Elétricos do Motor

Ruan D. Gomes¹, Abel C. Lima Filho², Francisco A. Belo², Tássio A. B. da Silva² e Josemar B. Júnior²

¹Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

²Universidade Federal da Paraíba, Brasil

ruan@dsc.ufcg.edu.br, {abel,belo}@les.ufpb.br, borgestassio@gmail.com, josemarbj@gmail.com

Resumo — O torque, quando excede determinado valor, pode danificar completamente a engrenagem redutora, cujo custo equivale a aproximadamente 50% do valor total de uma unidade de bombeio de petróleo. O método de cálculo proposto pela *American Petroleum Institute* (API), usado por décadas para a determinação do torque, tem uma incerteza na faixa de 10%, para as melhores condições de operação. Neste trabalho é sugerida uma solução para determinação do torque em redutores com exatidão potencial maior e custo menor que o método proposto pela API. O instrumento desenvolvido consiste em um sistema embarcado, capaz de adquirir os dados e tensão e corrente do motor, realizar a computação do torque e disponibilizar as informações através de uma interface com fio ou através de comunicação por rádio frequência, utilizando o padrão IEEE 802.15.4. Testes de laboratório demonstraram que o sistema tem potencial para substituir o atual método de determinação do torque, oferecendo maior exatidão e menor custo.

Index Terms— Sistemas embarcados, unidade de bombeio de petróleo, torque, IEEE 802.15.4

I. INTRODUÇÃO

O método de bombeamento mecânico, que é o mais utilizado no mundo para extração de petróleo, apresenta um sério desafio no que diz respeito ao torque excedido no eixo de saída da engrenagem redutora. O torque, quando excede determinado limite, faz com que a caixa de redução, cujo valor equivale a aproximadamente 50% do custo total de uma Unidade de Bombeio Mecânico (UBM) utilizadas na extração de petróleo, danifique-se, se tornando inutilizável [1]. Além do seu alto custo, deve-se atentar que o tempo entre a quebra e a sua substituição pode ocasionar em vários dias sem produção, o que deve ser evitado, principalmente em um mercado competitivo como o petrolífero.

A curva de torque é uma informação fundamental para as empresas que utilizam o bombeio mecânico como forma de extração de petróleo. Através dela têm-se como determinar se a carga no redutor excede o limite tolerável e se a unidade de bombeio está trabalhando de forma balanceada. O método de cálculo empregado durante décadas para obtenção do torque de saída do redutor na maioria das UBM, sugerido pela API

(*American Petroleum Institute*), possui uma incerteza de 10% para as melhores condições de operação segundo a API 11E, 1994. Porém se verifica que este erro pode ser bem maior devido a problemas de descalibração da célula de carga e pelo acúmulo do erro no dimensionamento das partes constituintes de uma UBM que entram no cálculo da API. Para o caso dos motores de alto escorregamento (*ultrahigh-slip*), os erros do torque computado podem chegar a 70%, se não são considerados os efeitos inerciais no cálculo em engrenagens redutoras de UBM [2].

Na equação de determinação do torque no eixo, a partir da equação proposta pela API, não são levados em consideração o desbalanço estrutural com a mudança do ângulo da manivela, os efeitos inerciais da viga, do peso da viga, do equalizador, do virabrequim, da manivela e do contrapeso da manivela, e os atritos dos mancais [3]. Além disso, são 16 variáveis envolvidas no cálculo, onde cada uma possui o seu erro de medida e a propagação destes erros é refletida no cálculo do torque [4].

Existe uma alternativa que mede o torque diretamente no eixo do redutor transmitindo-o, sem fios, para uma estação base com grande precisão. Porém, nem todas as UBMs possuem espaço suficiente para acoplar este equipamento. Esse equipamento será utilizado como referência para validação da nossa solução [5].

Será mostrado como foi desenvolvido o método de medição de torque no eixo de saída do redutor baseado nos parâmetros elétricos e na velocidade angular. O instrumento consiste em um sistema embarcado contendo sensores de corrente e tensão, uma unidade de processamento e interfaces de comunicação serial, além de um módulo de comunicação por rádio frequência.

A comunicação com o instrumento pode ser feita através da interface serial com fio ou através do módulo de comunicação sem fio. Quando o acesso é feito através da interface com fio, é utilizado o padrão RS-232 para realizar a transmissão física dos dados. Quando o acesso é feito através do módulo de rádio frequência, é utilizado o padrão IEEE 802.15.4.

Também foi desenvolvido um sistema cliente que se comunica com o instrumento, permitindo ao usuário visualizar os dados gerados, e salvá-los para posterior análise.

II. ANÁLISE DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MOTOR E DETERMINAÇÃO DO TORQUE

A técnica de amostragem digital tem sido utilizada há algum tempo para determinação da potência em motores de indução [6-9]. Esta técnica tem servido como suporte para a maioria dos estudos na área de instrumentação e controle, inclusive em estudos relacionados à determinação da eficiência e torque de motores de indução.

A determinação do torque no entreferro é feita através da amostragem digital das tensões e correntes que alimentam o motor e da velocidade angular do eixo. Estes dados são processados e é fornecido o sinal do torque.

O cálculo do torque do entreferro (T_{ag}) é definido a partir da sua relação com o fluxo de acoplamento do enrolamento do estator, que é dado de acordo com a equação abaixo [10]:

$$T_{ag} = \frac{p\sqrt{3}}{6} [i_a(\Psi_c - \Psi_b) + i_b(\Psi_a - \Psi_c) + i_c(\Psi_b - \Psi_a)]$$

Onde Ψ_a , Ψ_b e Ψ_c são os fluxos magnéticos de acoplamento, i_a , i_b e i_c são as correntes de linha na entrada do motor e p é o número de pólos do motor.

O fluxo de acoplamento em cada fase é dado pela equação abaixo:

$$\Psi_a = \int (v_a - r i_a) dt$$

$$\Psi_b = \int (v_b - r i_b) dt$$

$$\Psi_c = \int (v_c - r i_c) dt$$

Onde r é a resistência do enrolamento do estator por fase e v_a , v_b , v_c são as tensões fase-terra. Relacionando-se as equações acima e simplificando, é obtida a seguinte equação [11].

$$T_{ag} = \frac{p\sqrt{3}}{6} \left\{ (i_a - i_b) \int [v_{ca} + r(2i_a + i_b)] dt + (2i_a + i_b) \int [(v_{ab} - r(i_a - i_b))] dt \right\}$$

Através da equação acima se percebe que a medida do torque no entreferro pode ser simplificada utilizando apenas dois sensores de corrente e dois sensores de tensão.

Para o cálculo do torque resultante, devem ser consideradas as perdas mecânicas (atrito e ventilação) e perdas adicionais do motor. Onde ω é a velocidade angular do motor.

$$T = T_{ag} - \frac{L_{mec}}{\omega} - \frac{L_{ar}}{\omega}$$

Finalmente, o torque no eixo do redutor pode ser dado através da seguinte equação:

$$T_{redutor} = (T - TL_{correias} - TL_{redutor}) \frac{\omega}{\omega_{redutor}}$$

Onde as perdas nas correias ($TL_{correias}$) e no redutor ($TL_{redutor}$) podem ser medidas ou estimadas de acordo com o informado pelo fabricante.

III. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema embarcado para monitoramento do torque proposto nesse trabalho, denominado TMSEM, fica localizado junto ao motor das unidades de bombeio. Os fios de alimentação são conectados no instrumento para que os sensores possam realizar as medidas de tensão e corrente. Também são colocados sensores de posição no motor e no eixo do redutor para determinar a relação entre as velocidades de ambos. A relação entre as velocidades pode ser medida utilizando um sistema auxiliar de calibração e o valor obtido é utilizado para atualizar o firmware. Outros valores relevantes para determinação da perda na transferência do torque do motor para o redutor, como a perda devido à correia, por exemplo, também são estimados de acordo com a especificação dos equipamentos utilizados na unidade de bombeio ou através de caracterização por estudos experimentais.

O sistema é formado pelos sensores de tensão e corrente, uma placa de conversão analógica para digital e processamento de dados (PCADPD) e uma fonte reguladora de tensão. Os fios de alimentação do motor passam por dentro do sistema e são conectados nos sensores de corrente e tensão. Na PCADPD existem vários canais de entrada e saída que podem ser utilizados para acoplamento de sensores auxiliares. Os canais também podem ser utilizados para realizar controle, através de atuadores ligados ao sistema, e conectar dispositivos de interface com o usuário. A PCADPD possui gravação in-circuit, no qual o firmware pode ser atualizado em campo.

Na figura 1 é ilustrado o esboço do TMSEM em seu interior. O TMSEM é formado por uma caixa metálica resistente a choque e a intempéries, onde os cabos de alimentação do motor atravessam o seu interior.

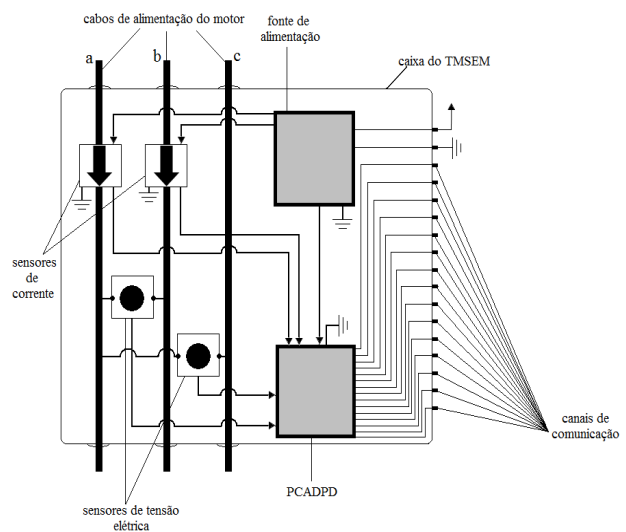


Figura 1. Esboço do TMSEM no seu interior (vista superior).

O firmware, que executa em um controlador de sinais digitais do modelo dsPIC30F4011[12], deve obedecer a requisitos de baixa complexidade de tempo e baixo uso de memória, devido à característica do hardware utilizado, que possui baixa capacidade relativa de processamento e memória.

O conversor analógico para digital foi configurado para operar em uma frequência de aquisição de 2580Hz, o que resulta em 43 valores para cada ciclo de corrente e tensão, visto que a frequência desses sinais é de 60Hz. Apesar de ser possível utilizar frequências de aquisição maiores, essa frequência foi escolhida devido ao espaço de memória disponível, porém esse valor é suficiente para se obter um baixo erro de amostragem. Utilizando uma frequência de aquisição maior que 2000 Hz, um simples método de integração trapezoidal pode ser utilizado [13], portanto, a frequência de aquisição utilizada é suficiente para a implementação do algoritmo, que utiliza esse tipo de integração numérica. Após realizar a configuração de todos os componentes, o software começa a execução do algoritmo para determinação do torque. Primeiro, os dados de tensão e corrente são adquiridos a partir do conversor analógico para digital e então é feito um ajuste nos sinais adquiridos para recuperação de valores originais de amplitude e offset. Após obter os valores reais relativos às medidas dos sensores, é possível calcular o torque no motor. Depois de calculado o torque no motor, é levada em consideração a relação entre as velocidades do motor e redutor, além das perdas que são subtraídas do valor de torque calculado.

O sistema foi idealizado para que pudesse realizar envio contínuo de dados, porém devido à latência no envio decidiu-se por armazenar os dados em memória por um determinado período de tempo e só após esse período realizar o envio. O período deve ser grande o suficiente para que se possa realizar a aquisição de dados relativos a um ciclo completo da unidade de bombeio, e deve ser pequeno o suficiente para que possa ser armazenado em memória.

IV. RESULTADOS

Para a realização de testes de validação do instrumento, foi construída uma bancada para simular uma unidade de bombeio mecânico, e um protótipo do sistema embarcado, que é mostrado na figura 2.

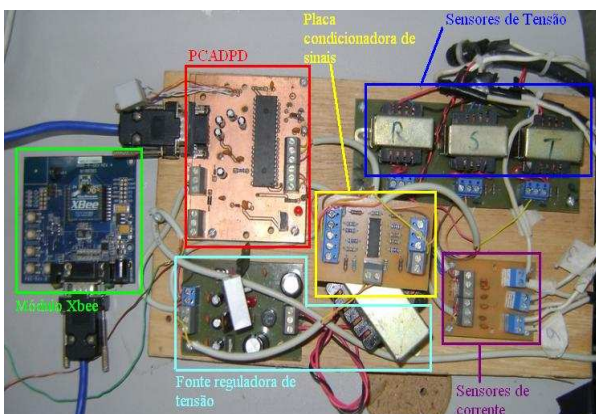


Figura 2. Protótipo do sistema embarcado.

A bancada consiste em um motor de 550 W, com velocidade de rotação de 1680 rpm acoplado a um redutor que fornece uma rotação de saída em torno de 15 rpm (igual a uma UBM tamanho 912). Na extremidade do eixo de saída do redutor foi encaixado um disco de aço projetado para se acoplar a uma pá metálica. Esta pá pode ser ajustada junto ao disco variando a distância entre o centro do eixo de saída do redutor e a sua extremidade. Em uma das extremidades deste braço é possível inserir diferentes massas, dependendo do valor de torque de pico ao qual se deseja obter. Quando o motor é acionado, o conjunto gira e o peso posto na extremidade da pá metálica simula o contrapeso de uma UBM. A figura 3 mostra uma imagem da bancada de testes.



Figura 3. Bancada de simulação de uma UBM em vazio.

Para validação do valor do torque obtido através do instrumento, foi instalado na bancada o torquímetro dinâmico telemétrico (TDTAL). Esse torquímetro possui um erro muito baixo, menor do que 1%, e já foi validado em testes realizados em unidades de bombeio de petróleo reais [4] [5]. Portanto, optou-se por realizar a comparação entre os dois resultados para aumentar a credibilidade dos testes realizados na bancada.

Esta bancada simula uma UBM sem carga, na qual todo o torque se deve à massa de referência posta na extremidade da pá metálica, visto que a pá é simétrica.

Conforme pode ser visto na figura 4, θ é o ângulo da pá metálica e P é o peso da massa inserida na extremidade da pá. O sinal resultante é uma senóide, cuja magnitude é proporcional a essas massas de referência.

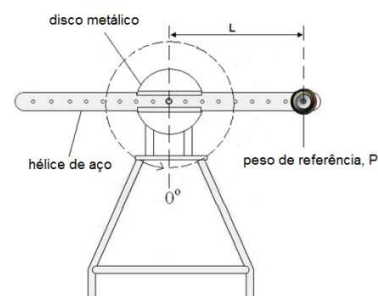


Figura 4. Ilustração dos componentes usados para o cálculo do torque de referência

Desta forma, pode-se obter a calibração do sistema comparando os valores lidos pelo torquímetro e os valores obtidos a partir da seguinte equação:

$$T_{ref} = LP\text{sen}(-\theta) + \alpha I$$

Onde L é a distância entre o centro de massa das massas de referência e o centro do disco de aço (em m), P é o peso de referência em (N), α é a aceleração angular do eixo de saída do redutor (em rad/s^2) e I é o momento de inércia da massa (em kg m^2)

Na figura 5 é mostrado o torque relativo ao TDTAL, ao TMSEM e o torque teórico devido à massa com o peso de referência (T_{ref}).

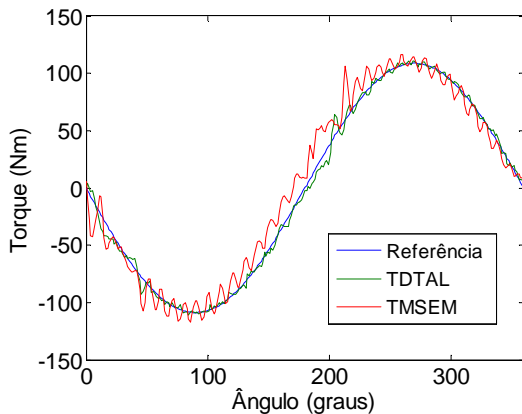


Figura 5. Curvas dos torques medidos pelo TDTAL, do TMSEM e do torque de referência (T_{ref})

Através das curvas mostradas na figura 5 é possível observar que o instrumento para medição do torque através dos parâmetros elétricos do motor obteve uma curva com um maior erro do que a curva do torquímetro dinâmico telemétrico, porém apresentou um resultado satisfatório, com uma correlação de 99,1% entre as curvas. Dessa forma, o instrumento pode ser considerado uma solução para implantação em unidades de bombeio que não comportem o torquímetro dinâmico telemétrico.

V. CONCLUSÕES

Foi apresentado um torquímetro baseado nos parâmetros elétricos do motor para determinação do torque no eixo do redutor de unidades de bombeio de petróleo. Tendo em vista que o atual método proposto pela API fornece o torque com um erro em torno de 10%, para o melhor caso, esse instrumento tem potencial para oferecer uma medida com maior precisão. O torquímetro dinâmico telemétrico apresenta um erro menor que 1%, porém não pode ser aplicado a todas as unidades de bombeio, devido à falta de espaço no redutor das mesmas. O sistema proposto possui baixo custo e robustez e é uma alternativa de uso nas unidades de bombeio que não comportam o torquímetro dinâmico telemétrico. Seu uso tende a otimizar a produção, tendo em vista que o redutor equivale à aproximadamente metade do custo de uma unidade de bombeio.

Utilizando o instrumento, as pessoas envolvidas com o processo de manutenção das unidades de bombeio terão à disposição um sistema completo que permite a obtenção de valores de torque no eixo do redutor em tempo real, possibilitando a tomada de decisões sobre o processo de manutenção, o que levaria à prevenção da quebra dos redutores das unidades de bombeio, provocando uma grande

economia, devido ao alto custo dos redutores, além de evitar paradas na extração do petróleo.

Além disso, devido à sua interface de comunicação por rádio frequência, o sistema permite que os dados sejam adquiridos do sistema sem que seja necessária a utilização de fios, o que facilita a instalação e evita problemas relativos à danificação do meio físico de comunicação, como rompimento de cabos, por exemplo.

Como evolução desse trabalho, pretende-se realizar uma caracterização minuciosa de todas as fontes de perdas, durante a transferência do torque do motor até o redutor. Uma vez que essas perdas forem mais bem caracterizadas, essas informações serão incorporadas no algoritmo, permitindo uma obtenção precisa dos valores de torque nos redutores das unidades de bombeio. O TMSEM também poderia ser utilizado para fornecer o consumo de energia da UBM, a eficiência e o fator de potência do motor, bastando para isso modificar o firmware do sistema embarcado, fazendo com que ele passe a calcular e disponibilizar também essas informações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES pelo fornecimento das bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Thomas, J. E., 2004, Fundamentos da Engenharia de Petróleo. 2 ed. Rio de Janeiro, Editora Interciência – PETROBRAS
- [2] GIBBS, S.G., 1975. "Computing Gearbox Torque and Motor Loading For Beam Pumping Units With Consideration of Inertia Effects", *Journal of petroleum technology*, September, pp. 1153-1159.
- [3] American Petroleum Institute (API), Specification for Pumping Unit, API Specification 11E, 17th edition, 1994.
- [4] Lima Filho, A. C. ; Belo, F. A., Gomes, R. D. "Tests prove out self-powered, wireless, pump torque meter", *Oil and Gas Journal*, v. 106, p. 43-49, 2008.
- [5] Lima Filho, A. C., Estudo e desenvolvimento de soluções para determinação do torque em unidades de bombeio mecânico utilizadas na extração de petróleo. Tese de Doutorado, PPGEM/UFPB, João Pessoa. 2009.
- [6] Clarke, F. J. J., Stockton, J. R., 1982, "Principles and theory of wattmeters operating on the basis of regularly spaced sample pairs," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 15, pp. 645-652.
- [7] Stenbakken, G. N., 1984, "A wideband sampling wattmeter," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PAS-103, no. 10, pp. 2919-2924, Oct.
- [8] Corney, A. C., Pullman, R. T., 1987, "Digital sampling laboratory wattmeter," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 1M-36, no. 1, pp. 54-59, Mar.
- [9] Mukherjee, S., James, R. G. H., McCormick, A., 1990, "Digital Measurement of the Efficiency of Inverter - Induction Machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, No. 5, September/October.
- [10] Hsu (HTSUI), J. S., Scoggins, B. P., 1995, "Field Test of Motor Efficiency and Load Changes through Air-Gap Torque." *IEEE Transactions on Energy Conversion*. September, Vol. 10, No. 3, pp. 471-77
- [11] Hsu (HTSUI), J.S., Woodson, H.H., Weldon, W.F., 1992, "Possible Errors in Measurement of Air-gap Torque Pulsations of Induction Motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7, No.1, March.
- [12] LU, B., HABELTLER, T. G., HARLEY, R. G., 2008, "A Nonintrusive and In-Service Motor-Efficiency Estimation Method Using Air-Gap Torque With Considerations of Condition Monitoring" *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 6, pp. 1666-74, November/December
- [13] Microchip Technology Inc., 2007, dsPIC30F4011/4012 Data Sheet