

# 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## TÍTULO DO TRABALHO:

Estudo de sistemas de acionamento de máquinas elétricas e suas aplicações no setor de petróleo e gás

## AUTORES:

Mônica da Costa Monteiro  
Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa

## INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Campina Grande

*Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.*

## **ESTUDO DE SISTEMAS DE ACIONAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS E SUAS APLICAÇÕES NO SETOR DE PETRÓLEO E GÁS.**

### **Abstract**

Electric machines are often applied to various processes at Oil and Gas sector and it can be used as a generator of electricity, in offshore platforms or onshore platforms lacking access to grid. Moreover, as an engine, it can be used as auxiliary machine for circulation of coolant or for lifting and transportation of oil and fuel. Even if imperceptible, electric machines have a decisive role in the operation and efficiency of the processes inherent in the oil and gas sector. The electric motor must meet the load behavior causing minimum disruption to the electrical system to which it's connected, therefore, the suiting design of these machines can guarantee compatibility between the power delivered by the machine and that demanded by the load. This paper propose a way of assessing the design of electric machines by studying the load's and the engine's curves, providing training for people working in the area, which may provide better understanding of the machine specifications aiming to reduce losses and increase the efficiency of the set. Studies of the machine's steady-state models were conducted, determining its internal parameters. As a result the torque and power curves were generated allowing the analysis of the load-machine set behavior, enabling the determination of the machine's operating point to make sure that the set is working at its maximum efficiency.

### **Introdução**

Atualmente a qualidade de energia elétrica é um tema de destaque tanto no meio acadêmico como no setor industrial, constituindo um fator crucial na competitividade de praticamente todos os setores industriais e de serviços.

Como em todos os processos industriais, na cadeia produtiva do petróleo, geralmente dividida em dois blocos (upstream e downstream), é muito comum o uso de máquinas elétricas, essas são responsáveis por boa parte da energia elétrica consumida [1]. Ainda que as máquinas também sejam exploradas para conversão de energia mecânica em elétrica, e.g., em todas as plantas que estão distantes de linhas e subestações, as máquinas são utilizadas em maior proporção para realizar a conversão da energia elétrica em mecânica.

A crescente preocupação com o fornecimento e custo de energia, traz argumentos definitivos para justificar o estudo da eficiência energética quando se analisa a oferta e o consumo de energia. Apesar de o processo de conversão de energia elétrica em energia mecânica ser de grande eficiência, para se obter o rendimento máximo, faz-se necessário, além do projeto adequado das máquinas elétricas, a união adequada das máquinas com a aplicação pretendida.

A importância do conhecimento adequado para o dimensionamento destas máquinas advém do compromisso de compatibilizar a potência da máquina com a demanda da carga [3]. Quando isto não é realizado, verifica-se queda de rendimento (sobre dimensionamento) ou riscos de falhas (sub dimensionamento) [3]. Por estes motivos, o conhecimento sobre o funcionamento das máquinas tem que ser estendido ao conhecimento das cargas, para que esta compatibilidade seja alcançada [4].

Apesar da larga aplicação de motores elétricos no setor, não é muito raro se deparar com especificações inadequadas destas máquinas. Via de regra, uma vez que o uso de uma máquina com potência superior a requerida assegura o acionamento da carga mecânica é muito comum em inspeções de campo, verificar o uso de máquinas (sobretudo motores) com potência superior ao necessário.

Em princípio este problema não é de elevada complexidade, todavia verifica-se que em geral os engenheiros que atuam nesta área necessitam de um treinamento específico para melhor compreender as condições de contorno inerentes ao problema. Por este motivo, visando ampliar o escopo de aplicação dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de graduação em engenharia elétrica, são introduzidos os conceitos básicos pertinentes aos diferentes fenômenos que afetam a qualidade de energia nos sistemas aplicados ao Setor de Petróleo e Gás.

A questão da qualidade, associado ao uso racional de energia, é de grande interesse. O conceito de eficiência energética está ligado à minimização de perdas na conversão de energia primária em energia útil, perdas essas que ocorrem para qualquer tipo de energia, elétrica, mecânica ou térmica. A partir desse estudo são propostas medidas a serem tomadas de forma a minimizar as perdas e, conseqüentemente, aumentar a eficiência energética do sistema. Pretende-se criar uma plataforma que deve considerar, em um único ambiente, os modelos de regime permanente e dinâmico da máquina, bem como o perfil da carga (usualmente bombas e compressores). Para isto, será lançada mão de uma plataforma aberta que disponibiliza modelo de máquinas, bombas e elementos de sistemas de acionamento de alto desempenho.

## Metodologia

O sistema estudado neste trabalho é constituído, a priori, dos seguintes módulos: um motor assíncrono, uma bomba centrífuga. Os outros elementos do sistema, como os compressores e dispositivos de acionamento e controles serão incorporados ao estudo posteriormente.

### 1. Modelo da Máquina Assíncrona

Os motores assíncronos ou de indução, operam segundo o princípio de indução de corrente e torque no rotor decorrente do escorregamento, diferença das velocidades de rotação do rotor e estator. Esses motores são comumente modelados a partir do circuito monofásico equivalente, visto na figura abaixo.

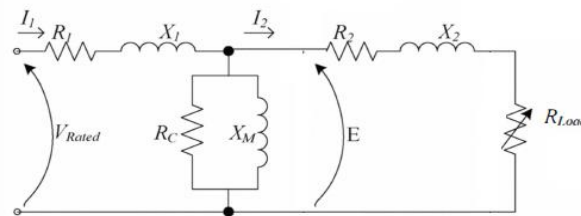


Figura 1: Circuito equivalente monofásico do motor de indução

A fim de simular o comportamento da máquina, é necessário conhecer os parâmetros internos do mesmo, normalmente esses parâmetros são obtidos a partir de testes de rotor bloqueado, rotor vazio e plena carga. Como a proposta é possibilitar a simulação de um motor qualquer, sem que seja necessária a realização de testes físicos, foi considerado o método proposto em [7], no qual os parâmetros internos são calculados a partir dos valores de placa, fornecidos pelos fabricantes.

Tendo em mãos os valores internos do motor e seu circuito monofásico equivalente, é possível determinar as várias características de desempenho, como variações de corrente, velocidade e perdas que ocorrem devido à variações de carga e conjugado. O teorema de Thévenin foi aplicado aos terminais da indutância de magnetização ( $X_m$ ) e foi possível, então, obter as equações de torque e potência no eixo do motor.

$$\hat{V}_{1,th} = \hat{V}_{rated} + \left( \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right)$$

$$Z_{th} = \left( \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right)$$

$$P_{mec} = n_{fases} I_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right)$$

$$T_{mec} = \frac{1}{w_s} \left[ \frac{n_{fases} V_{1,th}^2 \left( \frac{R_2}{s} \right)}{R_{1,th} + \left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{1,th} + X_2)^2} \right]$$

$$T_{mec} = \frac{P_{mec}}{w_{mec}}$$

Onde  $s$  é o escorregamento e pode ser definido como:

$$s = \frac{(ns - n)ns}{ns}$$

sendo  $ns$  a velocidade síncrona de rotação e  $n$  a velocidade do motor, ambas em rpm,  $w_s$  é a velocidade angular síncrona em rpm. As equações supracitadas foram modeladas no MatLab.

## 2. Bombas

As bombas são capazes de transformar energia mecânica em energia hidráulica e vice-versa, o rotor da bomba captura a energia de uma corrente líquida e a transforma em energia mecânica, essa energia é transmitida por um eixo. A escolha do tipo de bomba a ser usada num sistema não é fácil, existem vários modelos, tamanhos e tipos no mercado, no entanto existem princípios básicos que podem ser aplicados a todas as bombas. No trabalho em questão, tratou-se das bombas centrífugas, nessas bombas, o efeito que impulsiona o fluido de dentro do rotor para a parte externa é o efeito centrífugo, a potência solicitada pela bomba pode ser calculada segundo a relação:

$$PWR = \frac{\gamma H Q}{75 \eta}$$

onde,

$PWR$  = Potência em HP ou KW

$H$  = Altura, em metros ou pés

$Q$  = Vazão, gpm ou m<sup>3</sup>/hr

$\eta$  = Rendimento

$\gamma$  = Peso específico do fluido.

Além disso, a velocidade mecânica da bomba em um determinado ponto de operação é

$$N_{mec} = N \frac{Q^{0.5}}{H^{0.75}}$$

onde  $N$  é a velocidade nominal.

Normalmente, os fabricantes de bombas no mercado disponibilizam ao usuário as curvas características das bombas, bem como as curvas de potência necessária no eixo. Geralmente, nos catálogos estão dispostas as curvas para uma determinada velocidade de rotação ou para diferentes diâmetros do rotor, portanto, lançou-se mão das relações de semelhança, ou leis de afinidade, para obtenção de curvas que possibilitassem a análise das características das bombas pra diferentes condições de funcionamento.

As leis de afinidade que relacionam o comportamento das bombas para diferentes velocidades são:

$$PWR_2 = PWR_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^3$$

$$H_2 = H_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

$$Q_2 = Q_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)$$

Os índices 1 e 2 indicam as características do design original e do novo design, respectivamente. A partir dessas relações foi possível, com auxílio do MatLab, obter as curvas características das bombas para diferentes velocidades de rotação.

## Resultados e Discussão

Na seção em questão pode-se observar as curvas obtidas por simulação utilizando o software computacional MatLab.

A máquina estudada é um motor assíncrono 5 HP de potência, trifásico, quatro pólos, frequência e velocidade nominal de 60Hz e 1750 rpm, respectivamente.

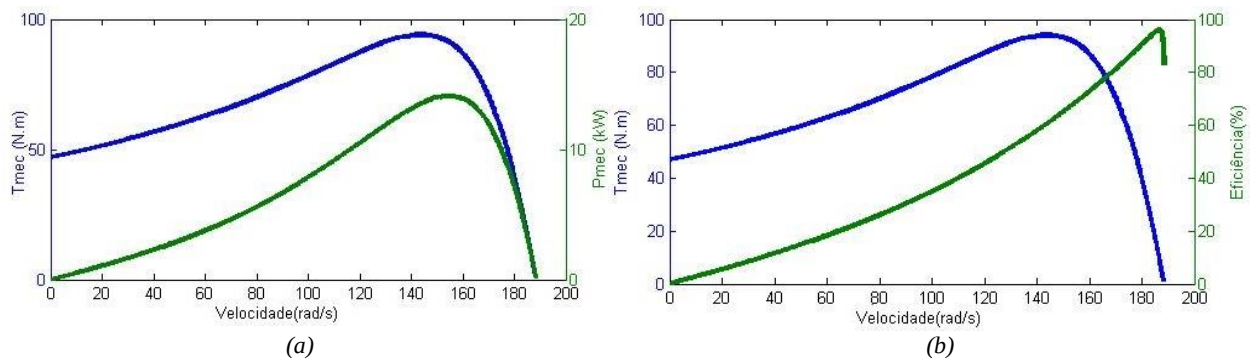


Figura 2: (a) Torque e Potência em regime permanente; (b) Eficiência do Motor;

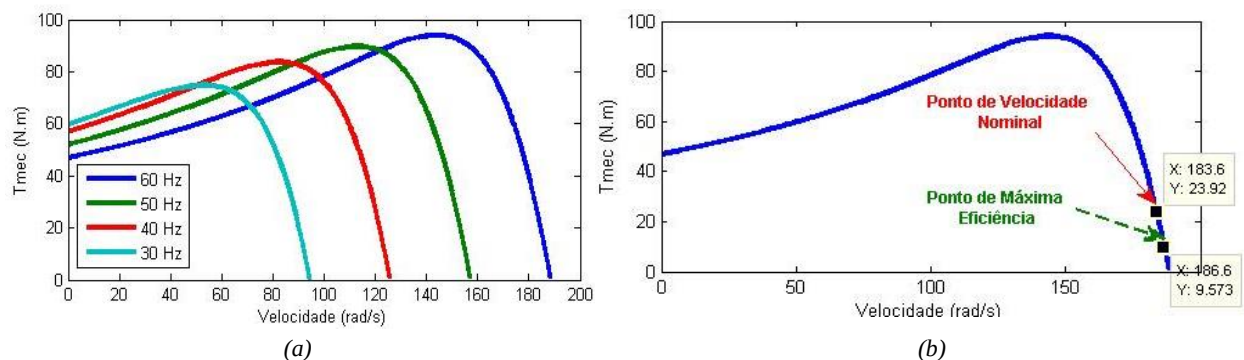


Figura 3: (a) Curva do Torque para diferentes velocidades de operação; (b) Pontos de velocidade nominal e de máxima eficiência para o motor em regime permanente;

Após a obtenção dos parâmetros internos da máquina a partir dos dados de placa, é possível obter as curvas que descrevem o comportamento do motor no que diz respeito ao conjugado e a potência mecânica, tais curvas podem ser vistas na figura 2a. Na figura 2b pode-se observar a curva de eficiência do motor desde o momento da partida. Variou-se a frequência de operação da máquina a fim

de obter as curvas de torque para diferentes frequências de operação, vistas na figura 3a, tais curvas foram obtidas mantendo a relação Volts/Hertz constante.

Já para a simulação das bombas, foram usados como base os dados fornecidos pelos fabricantes. São disponibilizadas as curvas de desempenho, que relacionam a altura manométrica e a vazão da bomba, e as curvas de potência necessária no eixo. A bomba considerada no estudo de caso é a bomba centrífuga da linha MEGANORM/MEGABLOC/MEGACHEN (40-250) do fabricante de bombas e válvulas KSB. Na figura 4 podem ser vistas as curvas de desempenho para várias velocidades de operação e as curvas de potência, ambas resultam da aplicação das leis de afinidade a partir das curvas de velocidade nominal 1750 rpm, a qual foi fornecida no catálogo de bombas do fabricante.

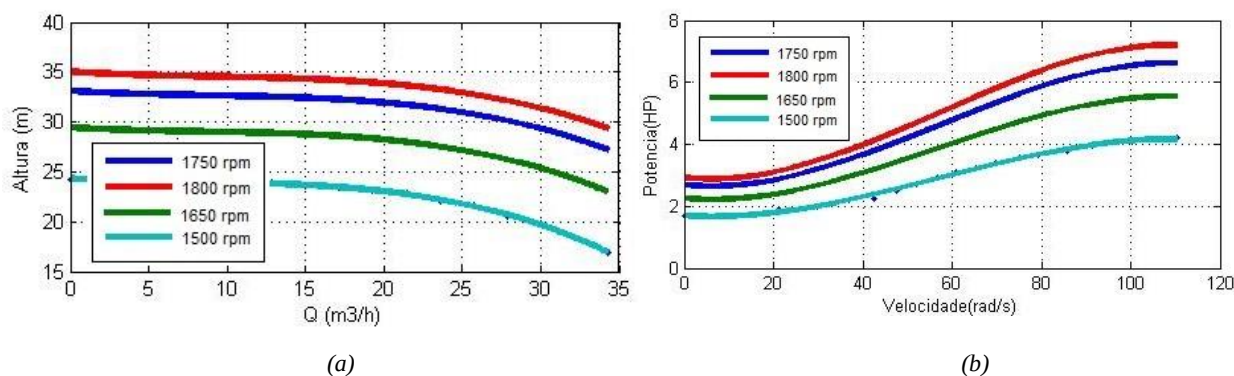


Figura 4: (a) Curvas de desempenho bomba centrífuga; (b) Potência no eixo;

Em um caso mais específico, Considerou-se que a bomba estaria operando no seu ponto de eficiência máxima. Nesse ponto, segundo as curvas de isoeeficiência fornecidas pelo fabricante, a bomba conseguiria elevar o fluido a uma altura de 29 metros com vazão de 30 m³/h e eficiência de 55%. Constatou-se, então, que a potência necessária no eixo da bomba é de 5,76 HP, a velocidade específica nesse ponto é 767 rpm ou 80,32 rad/s.

Pode-se verificar que o motor testado tem como suprir a necessidade de potência da bomba. Como consequência dos estudos já realizados, pode-se avaliar o sistema em termos de eficiência do conjunto, verificando se ambos trabalham na suas regiões ótimas de operação. Além disso, a seleção da bomba centrífuga requer conhecimento acerca das características hidráulicas do sistema no qual ela será instalada. A curva do sistema relaciona a quantidade de energia que deve ser imposta ao fluido para que a bomba atinja a vazão desejada, consideradas as alturas estática e dinâmica, e deve ser considerada nos estudos posteriores.

## Conclusões

Ao se analisar a eficiência dos motores de indução, fica claro que ele está inserido em um sistema no qual o rendimento depende de cada um dos componentes a ele acoplado. Faz-se importante, então, considerar a influência das cargas, em suas diferentes configurações de funcionamento, a fim de analisar adequadamente o uso racional e eficiente de energia.

O trabalho se mostra importante por configurar meios de identificar o mau uso das máquinas elétricas no acionamento de cargas, evitando assim o desperdício de energia. É possível verificar como a velocidade de rotação determina a eficiência e o ponto de operação da bomba, que podem variar mesmo quando as características do sistema não mudam. Esse estudo possibilitará a criação de uma plataforma que disponibilizará ferramentas que possam inovar na metodologia de dimensionamento de máquinas elétricas para o uso na indústria P&G.

## **Agradecimentos**

A ANP e PETROBRAS pelo incentivo financeiro e ao corpo do Programa de Recursos Humanos (PRH 42) e do Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM-UFCG), pelo apoio.

## **Referências Bibliográficas**

1. MORENO, J.; CIPOLLA, M.; PERACAUOLA, J.; DA COSTA BRANCO, P.J., "Fuzzy logic based improvements in efficiency optimization of induction motor drives," Fuzzy Systems, 1997., Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on , vol.1, no., pp.219-224 vol.1, 1-5 Jul 1997.
2. DABBOUSI R.; SAVINOVIC D.; ANUNDSSON Y., " A comparison between induction and synchronous motors for application in the oil and gas industry", Copyright Material IEEE, Paper No. PCIC.
3. GHIRARDI G.;W. MILLS R.," Enclosures for large AC motors for the petroleum and chemical industry",. IEEE transactions on industry applications, vol. IA 14, no. 1,pp.18-22, January/February 1978.
4. GIGANTE M.,"Rewind of Large Electric Motors for the Petroleum Industry", IEEE Transactions on industry and general applications, vol. iga-2, no. 2,pp.125-131, mar/ apr 1966.
5. SEN, P.K.; MALMEDAL K.; MALINOWSKI J.," Energy efficient design: tools, techniques and applications to the petroleum and chemical industry". Copyright Material IEEE, Paper No. PCIC.
6. FITZGERAL, A. E; KINGSLEY, Charles Jr; UMAS, Stephen D. Máquinas Elétrica com Introdução a Eletrônica de potência, 6ª Edição, Editora Bookman.
7. Overview of pump and compressor systems. Publicada por John M. Campbell and Company, 1992. Versão ME44\_040111.
8. LEE, K.; FRANK, S.; PANKAJ K.,S.; POLESE, L.; ALAHMAD, M.; WATERS, C., "Estimation of induction motor equivalent circuit parameters from nameplate data". IEEE Std, 2012.