

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Desafios e Oportunidade da Utilização de Bombeio Centrífugo Submerso com Velocidade Variável para Elevação Artificial

AUTORES:

Vágner Fonsêca Nóbrega, Maurício B.R. Corrêa

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. 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 6ºPDPETRO.

Desafios e Oportunidades da Utilização de Bombeio Centrífugo Submerso com Velocidade Variável para Elevação Artificial

Abstract: This paper presents an evaluation of using variable speed drive to perform submersible centrifugal pumping for artificial lift, in deep water. In spite of variable speed motor drive system be a very common technology for several application, still being a challenge for oil industry. Long cables and control issues need to be overcome to ensure a more reliable system. Besides that, it is well known that investing to develop national knowledge to the industry is also a big challenge. This paper is the first one of a series that aims to contribute with the development of such a technology and presents the side effect of using long cables in variable speed motor drives as well as the performance enhancement that can be achieved by using it. Therefore, after a short analysis about centrifugal pumping relevance, it is presented a detailed analysis concerning use of long cables and the energetic benefit, among others, of using variable speed drive to perform submersible centrifugal pumping. Simulation and experimental results are presented to show the state of art.

Introdução

A Petrobras foi a primeira empresa a realizar a extração de petróleo em águas profundas. Através de programas como o PROCAP (Programa da Petrobras de Desenvolvimento Tecnológico de Sistemas de Produção em Águas Profundas) e dos que vieram como consequência deste primeiro (PROCAP 2000 e 3000) [1], ela conseguiu o conhecimento necessário para a extração de petróleo em águas profundas. Em 1994 foi instalado o primeiro sistema BCS (Bombas Centrífugas Submersas) na bacia de Campos, poço RJS-221 [2], localizado abaixo de uma lamina de água de 86m (águas rasas). O mesmo operou sem falhas durante dois anos e dez meses e serviu de motivação e laboratório para a aplicação destes sistemas em águas profundas.

Em geral a extração é realizada por bombas centrífugas submersa (BCS), que são impulsionadas por motores de indução os quais são alimentados por tensão e frequência constantes. Sendo assim o motor opera com velocidade fixa impondo uma vazão constante ao poço.

Para evitar este tipo de problema pode-se utilizar um sistema de acionamento de velocidade variável (VSD – Variable Speed Drive). Com isso, varia-se a velocidade do motor e consequentemente sua vazão, sendo necessário para tal, a utilização de inversores PWM. Todavia, a utilização deste tipo de equipamento implica em harmônicos de alta frequência que devem ser transmitidos por cabos longos (da ordem de dezenas de quilômetros), podendo ocorrer o fenômeno da reflexão de ondas viajantes (ressonância), como descrito em [3].

Problema parecido poderia ocorrer em linhas de transmissão de energia elétrica, porém devido ao baixo conteúdo harmônico e a transmissão ser em baixa frequência (50 ou 60 Hz), este fenômeno não é significativo [4].

As principais consequências deste fenômeno são as sobretensões e sobrecorrentes que podem ocorrer nos terminais do motor, causando a diminuição de sua vida útil, bem como um gasto considerável no dimensionamento do condutor para suportar este surto [5], [6]. Este que por sua vez é um dos principais problemas em sistemas de extração de petróleo em águas profundas, tendo em vista a grande dificuldade de manutenção, exigindo um alto grau de confiabilidade do sistema.

Muitas são as alternativas para eliminação de sobretensões nos terminais do motor, boa parte destas soluções são baseadas no emprego de filtros passivos na saída do inversor ou nos terminais do motor [7], [8], [9]. No caso dos sistemas de extração de petróleo apenas na saída do inversor, sendo

inviável nos terminais do motor. Porém esta alternativa não é considerada boa devido ao aumento no custo, bem como diminuição da potência, além da introdução de outras frequências de ressonância no sistema [5]. Em sistemas de extração são comuns soluções que envolvam métodos de modulação do inversor e controle do mesmo.

O acionamento através de cabos longos é uma alternativa bastante atrativa do ponto de vista econômico e energético, pois com o desenvolvimento deste tipo de tecnologia, será possível através de uma única plataforma acionar diversos poços satélites, mesmo com distâncias da ordem de dezenas de quilômetros, seria possível acionar os sistemas BCS, contudo é necessária uma correta modelagem do sistema, levando em consideração fatores ambientais e de segurança.

Neste artigo, será apresentada a modelagem do cabo, levando em conta seus parâmetros distribuídos, bem como uma perspectiva destes cabos para aplicações no Pré-Sal. Além de uma breve comparação entre o acionamento com velocidade variável e com velocidade constante, sob o ponto de vista energético.

Metodologia

A compreensão dos problemas relacionados com o acionamento com velocidade variável para realização da elevação artificial através do bombeio centrífugo submerso tem sua origem no que consiste a grande vantagem, face ao bombeio com velocidade constante. Para que o motor possa variar sua velocidade, é necessário que o perfil da tensão de alimentação, em termos de amplitude e frequência, sejam ajustáveis. Para tanto, a tensão de alimentação é modulada em frequência. Neste caso, o que é solução passa a ser problema, devido as componentes harmônicas de alta frequência que compõem a tensão de alimentação. Com o intuito de modelar e analisar as consequências inerentes ao uso de cabos longos para a aplicação em tela será apresentada uma análise detalhada do fenômeno de forma a permitir a modelagem do problema, para caracterização dos efeitos, visando futuras soluções. Em complemento será apresentado uma análise comparativa entre o bombeio realizado com velocidade constante e o realizado com velocidade variável.

Efeito do uso de cabos longos

O acionamento de motores através de cabos longos esta sujeito a sobretensões devido à ressonância entre os elementos que compõe o sistema, para uma avaliação correta desses fenômenos é necessário o bom conhecimento do modelo do cabo, bem como, o comportamento de tensão e corrente do mesmo.

As oscilações em cabos podem ser estudadas segundo as teorias clássicas de linhas de transmissão, de acordo com Bewley, [3], entre elas a teoria de ondas viajantes e o diagrama de espaço tempo. Considerando a distribuição dos parâmetros por unidade de comprimento pode-se considerar quatro parâmetros distintos R , L , C e G , resistência, indutância, capacitância e condutância, respectivamente, estes proporcionais ao comprimento da linha.

Considerando o modelo de linha por unidade de comprimento da Figura 1, pode-se levantar as características de tensão e corrente da linha,

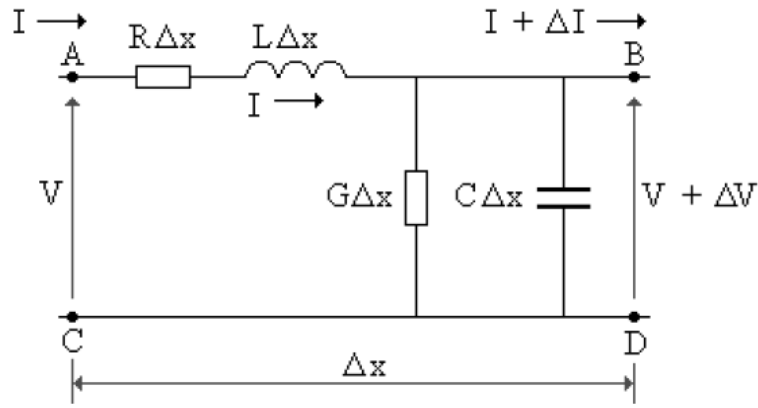


Figura 1. Elemento infinitesimal de linha [3]

Analisando o elemento acima tem-se que a equação diferencial da tensão é dada por:

$$-\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} = RI(x, t) + L \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} \quad (1)$$

Por sua vez a equação diferencial da corrente é dada por:

$$-\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = GV(x, t) + C \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} \quad (2)$$

Considerando a tensão e a corrente na forma fasorial as equações (1), (2) podem ser modificadas através da seguinte relação:

$$\begin{aligned} V(x, t) &= R\{V(x)e^{j\omega t}\} \\ I(x, t) &= R\{I(x)e^{j\omega t}\} \end{aligned} \quad (3)$$

Logo, tem-se que:

$$\frac{\partial V(x)e^{j\omega t}}{\partial t} = j\omega V(x)e^{j\omega t} \therefore \frac{\partial}{\partial t} = j\omega \quad (4)$$

Sendo assim (1), (2) ficam da seguinte maneira:

$$-\frac{\partial V(x)}{\partial x} = (R + j\omega L)I(x) \quad (5)$$

$$-\frac{\partial I(x)}{\partial x} = (G + j\omega C)V(x) \quad (6)$$

Realizando as manipulações necessárias, é possível reescrever as equações acima em função apenas da tensão e da corrente. A solução deste sistema de equações diferenciais é conhecida e dada por:

$$\begin{aligned} V(x) &= V_i e^{-\gamma x} + V_r e^{\gamma x} \\ I(x) &= I_i e^{-\gamma x} + I_r e^{\gamma x} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

Analisando a solução percebe-se que existe uma onda que trafega do gerador para a carga, que esta multiplicada pela exponencial negativa e uma que se desloca da carga para o gerador. É importante notar que não é obrigado que a onda que vai da carga para o gerador exista, mas esta possibilidade existe.

Outra análise interessante é com relação a onda incidente e refletida. Neste caso, a seguinte relação pode ser estabelecida:

$$\frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_G - Z_C}{Z_G + Z_C} \quad (8)$$

no qual Z_G é a impedância do gerador, Z_C é a impedância da carga, V_r é a onda refletida e V_i é a onda incidente. Esta relação é conhecida como coeficiente de reflexão.

É interessante notar em (8) que quando a impedância do gerador for igual a da carga não ocorrerá reflexão, esta situação é conhecida como casamento de impedância, porém na prática não acontece um casamento perfeito, no máximo uma boa atenuação desta onda refletida.

Diagrama de espaço-tempo

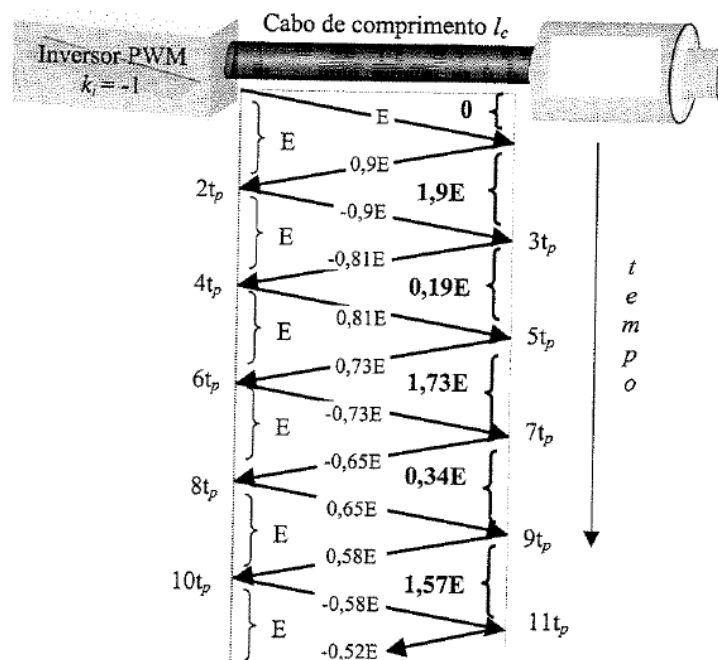


Figura 2. Diagrama de espaço-tempo [4].

O diagrama de espaço tempo proposto por Bewley [3], dá uma real noção do que acontece com um sinal emitido por um determinado gerador através de um cabo longo, o mesmo fica sofrendo sucessivas reflexões, o que influencia diretamente na tensão vista pelo motor, que no caso da Figura 2, tem um pico de 90% a mais do valor nominal, o que certamente diminui a vida útil do motor. Na Figura 2 t_p é o tempo de propagação da onda ao longo do cabo.

Efeito Pelicular

É um efeito que cria a tendência da corrente fluir na superfície do condutor elétrico. Este efeito é proporcional à intensidade de corrente, frequência e das características magnéticas do

condutor. O Efeito pelicular é responsável pelo aumento da resistência interna do condutor, devido a diminuição da área do mesmo [3].

Simulação do Sistema

Para melhor compreensão do efeito descrito acima foi realizado a simulação do acionamento de um motor através de um inversor PWM, neste caso um inversor multinível de 9 níveis, bem como a utilização de um modelo de cabo longo de parâmetros distribuídos, a fim de verificar este fenômeno.

Velocidade variável *versus* Velocidade constante

No acionamento de sistemas BCS existem duas possibilidades para o controle da vazão:

- Uma delas, que é a mais tradicional, utiliza motores operando com frequência constante e faz o uso de válvulas para restringir a passagem do óleo;
- Uma outra controla a vazão variando a velocidade de rotação da bomba, que por sua vez está acoplada a um motor acionado com velocidade variável.

Neste artigo, será realizada uma comparação entre os dois tipos de acionamento acima citados, levando em conta principalmente o gasto de energia e sua eficiência. O objetivo é validar a plataforma de teste e verificar os resultados apresentados em [10], [11].

Para tal comparação foi utilizado um sistema simples composto de uma bomba de baixa vazão e motor de indução de baixa potência. Mesmo este sistema estando longe de um sistema de extração de petróleo as conclusões aqui retiradas podem ser levadas para uma situação de alta potência tendo em vista a analogia dos sistemas.

Resultados e Discussão

Inicialmente serão apresentados resultados referentes ao uso de cabos longos. Neste caso, houve a preocupação em apresentar a forma de onda da tensão na saída do inversor, vide Figura 3 – parte inferior, e nos terminais do motor, vide Figura 3 – parte superior.

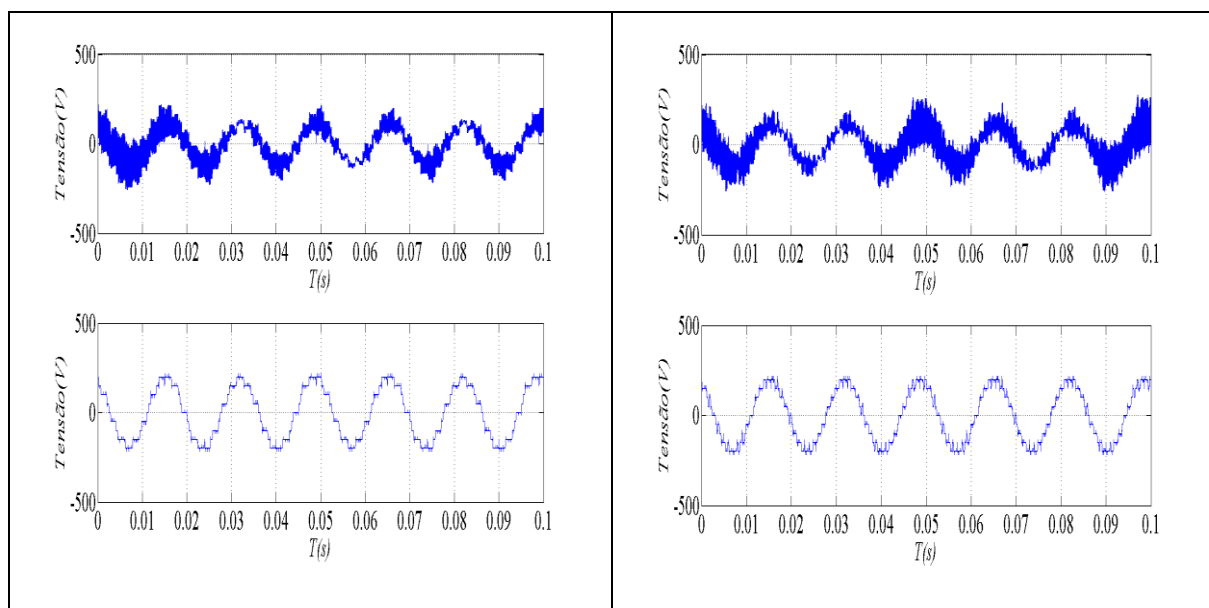


Figura 3 -Tensão para uma distância de 10Km. Frequência de chaveamento de 500Hz (Esquerda) e 1000Hz(Direita)

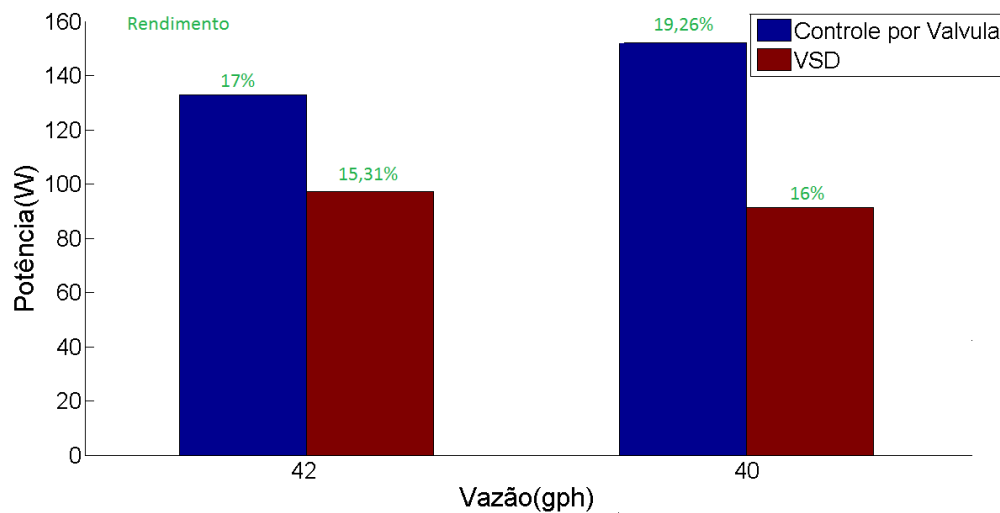


Figura 4 - Comparação entre os tipos de acionamento

A Figura 3 permite observar distorções na forma de onda, decorrente do efeito do cabo longo. Estas distorções podem ser bastante danosas para o motor. Além de uma sobretensão, em alguns momentos, uma variação excessiva desta tensão prejudica a isolação do motor e dos cabos de alimentação.

Com vista a minimizar e resolver problemas desta natureza se faz necessário investigar métodos de modulação capazes de cancelar as frequências de ressonância do sistema, de modo a atenuar as sobretensões no motor. Nesta perspectiva, os Inversores Multiníveis se mostram uma solução interessante, uma vez que possibilita a manipulação de sua frequência de chaveamento, sem perder a qualidade da tensão de saída e com níveis seguros de distorção harmônica.

Em relação a análise do benefício energético, relacionado ao uso do acionamento com velocidade variável, procedemos a uma análise comparativa. Na prática, a variação da vazão é definida pelo reservatório, seja em função da “idade” do poço, seja por condições transitórias.

Os resultados foram obtidos utilizando uma montagem preliminar. O objetivo foi comparar o consumo de energia para um controle de vazão onde o valor de referência foi alterado de 42 gph para 40 gph. Comparando a potência elétrica de entrada, observa-se que a redução é conseguida ao custo do aumento do consumo. Como é muito comum, se compararmos a eficiência do sistema de conversão de energia elétrica para energia hidráulica, na saída da bomba, observa-se um aumento. Na Figura 4 é possível observar este perfil de comportamento comparando as duas barras em azul, face as duas barras em marrom. Um outro aspecto interessante, para o presente caso, é o fato de que mesmo o VSD não sendo mais eficiente com relação a potência o mesmo consome bem menos energia e com o passar do tempo este fato representa uma economia de energia considerável.

Conclusões

Diante do que foi apresentado, é possível obter uma melhor compreensão dos problemas inerentes a realização do bombeio centrifugo submerso com velocidade variável, utilizando cabos longos. Como resultado, fica estabelecida uma plataforma de estudo com o objetivo de modelar os efeitos do uso de cabos longos, visando compensá-los. Sem dúvida, as soluções para diminuir os efeitos colaterais estão relacionadas com o desenvolvimento de métodos de modulação e utilização de inversores multiníveis, visando a diminuição da distorção harmônica cancelando as frequências de ressonâncias. Sem perder de vista os benefícios operacionais, é necessário destacar a redução do consumo de energia que o BCS através de um VSD propicia ao processo. Levando este fato a ordem

de potência que os equipamentos da indústria de petróleo possuem, estamos tratando de energia que pode ser utilizada para outros fins.

Agradecimentos

Agradecemos a ANP e a UFCG, pelo apoio financeiro e de infra-estrutura.

Referências Bibliográficas

1. RIBEIRO, M. P. et al. **Field Applications of Subsea Electrical Submersible Pumps in Brazil.** Technology Conferency Offshore. Houston: [s.n.]. 2005.
2. SILVA, J. E. M. D.; MATTOS, C. H. S.; RITTERSHAUSSEN, J. H. PRIMEIRA INSTALAÇÃO DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA SUBMERSA EM ÁGUAS PROFUNDAS: RJS-477A, BACIA DE CAMPOS, BRASIL. **Boletim Técnico da Petrobras nº 43 (1)**, Rio de Janeiro, Jan/Mar 2000. 69-83.
3. BEWLEY, L. V. **Traveling Waves on Transmission Systems.** 2ª Edição. ed. New York: Dover Publications, 1951.
4. MATIAS, L. **Acionamento de Motor de Indução a Longa Distância usando Inversores:** Modelagem do Sistema e Estudo de Tecnicas de Modulação. Campinas: [s.n.], 2004.
5. VENDRUSCULO, E. A. **Estudo e Implementação de Estartégia para minimização de sobretensões produzidas por inversores PWM em sistemas de Acionamento de Motores Elétricos com Cabos Longos.** Campinas: [s.n.], v. , 2001.
6. JOUANNE, A. V.; ENJET, P.; GRAY, U. THE EFFECT OF LONG MOTOR LEADS ON PWM INVERTER FED AC MOTOR DRIVE SYSTEMS. **Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1995. APEC '95. Conference Proceedings 1995., Tenth Annual, 1995.** 592-597.
7. MOREIRA, A. F. et al. High Frequency Modeling for Cable and Induction Motor Over-voltage Studies in Long Cable Drives. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2002. 1297-1306.
8. OGASAWARA, S.; AKAGI, H. Analysis and Reduction of EMI Conducted by a PWM inverter-fed AC Motor Drive System Having Long Power Cables. **IEEE**, 2000.
9. HUSSEIN, A.; JOSS, G. Modeling and simulation of traveling waves in induction motor drives. **Applied Power Eletronics Conference and Exposition - APEC**, Atlanta, Fevereiro 1997. 128-134.
10. BANDARA, K. S. et al. Energy saving by controlling the inlet air flow of a oil fired boiler using a VSD driven blower fan – Case Study. **TENCON 2008**, Hyderabad, Novembro 2008. 1-5.
11. PAUWELS, K. M. Energy savings with variable speed drives. **16th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution Part I: Contributions and Summaries**, 18 Junho 2001.