

METODOLOGIA PARA LEVANTAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA INSTALAÇÃO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

*Doriana Marinho Novaes Oliveira¹; Bruno Henrique Barbosa²; Carlos Barreira Martinez³ &
Manuel Losada y Gonzalez⁴*

RESUMO --- Este trabalho apresenta uma metodologia para o levantamento da eficiência energética em uma instalação de bombeamento de água. A modelagem do sistema se baseou na bibliografia existente do Macyn tyre (1997) e no trabalho de Barbosa (2006). A análise se deu em dois momentos distintos. No primeiro momento, motores elétricos são acoplados à rede elétrica com partida por meio de chaves compensadoras e com controle de vazão por meio do acionamento de válvulas. Em um segundo momento, a operação da instalação é efetuada por meio de inversores de frequência sendo que o controle de vazão é realizado a partir da variação da velocidade angular das bombas.

ABSTRACT --- This paper presents a methodology a for the rising of the energy efficiency in an water pumping system installation. The modelling of the system was based on the work of Macyn tyre (1997) and Barbosa (2006).The methology was implemented in two different moments. In a first moment, the electrical motors of the pumping system were directly connected to the electric distribution network using starter compensation. In this case, the flow control was implemented using valves. In a second moment, frequency inverters were used to control the pumps speed and, furthermore, to control the process flow.

Palavras-chave: eficiência energética, bombeamento de água.

1) Doutoranda em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos 6627, 31.270-901 Belo Horizonte.E-mail doriana@cpdee.ufmg.br

2) Doutorando em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos 6627, 31.270-901 Belo Horizonte.E-mail brunohb@cpdee.ufmg.br

3)Professor Adjunto da Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos 6627, 31.270-901 Belo Horizonte.E-mail martinez@cce.ufmg.br

4)Professor Adjunto da Universidade Federal de Minas Gerais.Av. Antônio Carlos 6627, 31.270-901Belo Horizonte.E-mail manuel@cpdee.ufmg.br

1 - INTRODUÇÃO

O processo de globalização econômica que caracterizou o final do século XX impôs um compromisso com a redução dos desperdícios, como parte dos incessantes esforços das organizações em direção à competitividade. Os benefícios resultantes do combate ao desperdício de energia elétrica são diversos e atingem tanto os usuários, reduzindo os custos associados ao consumo, como as empresas concessionárias, diminuindo a demanda em um momento de preocupação com sua capacidade de atendimento.

Este trabalho apresenta uma metodologia para o levantamento da eficiência energética em uma instalação de bombeamento de água. Para se alcançar este objetivo, perseguiu-se os seguintes objetivos específicos: Proposta de adaptação de uma metodologia para caracterização dos principais componentes da instalação de bombeamento de água; Estudo da inserção de novos equipamentos para medição de grandezas hidráulicas, mecânicas e elétricas; Contabilização da eficiência energética de cada componente e da instalação como um todo.

O uso de inversores de frequência já é comum entre as empresas de saneamento, devido à experiência bem sucedida no que tange a eficiência energética, pois pode conseguir uma redução de até 25 % no custo de energia de elevatórias, onde foram substituídos sistemas convencionais (acionamentos eletromecânicos e variadores hidrocinéticos) por inversores. A diferença na concepção do novo sistema é a utilização combinada de inversores de frequência e válvulas controladoras de nível.

A vantagem de se levantar a eficiência individualizada é que, à medida que se vai avançando com levantamento pode-se obter um mapa dos pontos críticos no que diz respeito a eficiência da instalação. A partir daí, pode-se sugerir ações com o intuito de se elevar o rendimento global do sistema.

2 – METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia para o levantamento do consumo de energia de cada componente individualizado de uma instalação de bombeamento de água baseia-se na determinação do consumo individualizado dos diversos equipamentos e acessórios da instalação. Sendo realizada uma análise do consumo da instalação como um todo, tem-se como meta, a determinação da eficiência geral do sistema a ser implementado.

A aplicação dessa metodologia poderá ser realizada em um sistema de bombeamento de água. O sistema foi modelado baseando em trabalhos existentes nas bibliografias de Macyntre (1997) e Barbosa (2006).

A modelagem do sistema será analisada em dois momentos diferentes de operação: No primeiro momento, quando a partida dos motores se dá por meio de chaves compensadoras e com controle de vazão por meio do acionamento de válvulas. No segundo momento a operação da instalação é feita por meio de inversores de frequência e onde o controle de vazão se dá por meio da associação das bombas e do controle individual da velocidade rotacional das mesmas.

Os inversores permitem o controle de velocidade dos motores por malha fechada através de um sinal de corrente proporcional à pressão no recalque, o qual virá de um transmissor de pressão. O controle é feito para torque variável. O inversor aceita a opção de controle manual ou automático, selecionado por chave na porta do painel, sendo que em manual o sistema simplesmente “pula” as configurações e as parametrizações relativas à opção automático, tal como as da malha fechada com controle PID “Controle Proporcional, Integral e Derivativa” (Ogata, 1993). Na opção “automático”, a liberação do funcionamento é dependente da pressão na sucção da bomba, medida através de um transmissor de pressão, do mesmo tipo do recalque, inserido na tubulação e o controle de velocidade é executado através de malha fechada, sendo a referência (setpoint) estabelecida internamente ao inversor e a realimentação (feedback) dada pelo transmissor de pressão. Os reservatórios superiores devem ser equipados com válvulas controladoras de nível, assim suas entradas serão fechadas quando os mesmos encherem.

Quando o sistema se encontrar nesta situação, ou seja, com os reservatórios cheios, a pressão medida no recalque será nominal e conseqüentemente o inversor irá alterar a razão de tensão pela frequência, diminuindo. A velocidade do motobomba terá um mínimo equivalente a frequência de 20 Hz, essa variação pode ocorrer tanto para frequências menores e maiores do que 60 Hz, decrescente a potência necessária para manter o sistema pressurizado e o consumo de energia se comparado com um sistema acionado por chave eletromecânica ou soft-start (Matheus, 2007).

3 – ASSOCIAÇÃO DAS BOMBAS

Em elevatórios de água e em inúmeras aplicações industriais, as variações da carga e da altura manométrica podem ser excessivamente amplas, para ser abrangido pelas possibilidades de uma única bomba, mesmo variando a velocidade. Então recorre-se às associações ou ligações de duas ou mais bombas em série ou em paralelo.

3.1 – Associação de bombas em série

Apesar de não ser trivial, pode-se utilizar a associação de bombas em série para se suprir demandas específicas. As bombas são percorridas sucessivamente pela mesma descarga, e cada uma fornecerá uma parcela de altura total H . Na figura 1, a curva característica $H = f_n(Q)$, do conjunto de

bombas, será obtida teoricamente somando-se, para cada valor da vazão Q , as ordenadas de H de cada bomba. As bombas poderão ter potências iguais ou não. A associação de bombas em série é um procedimento utilizado em sistemas que requerem alturas manométricas elevadas. Neste caso, com duas bombas com características semelhantes, na construção da curva $H \times Q$ do conjunto, basta somar, para cada valor de vazão, as cargas correspondentes às respectivas bombas (Macynre,1997).

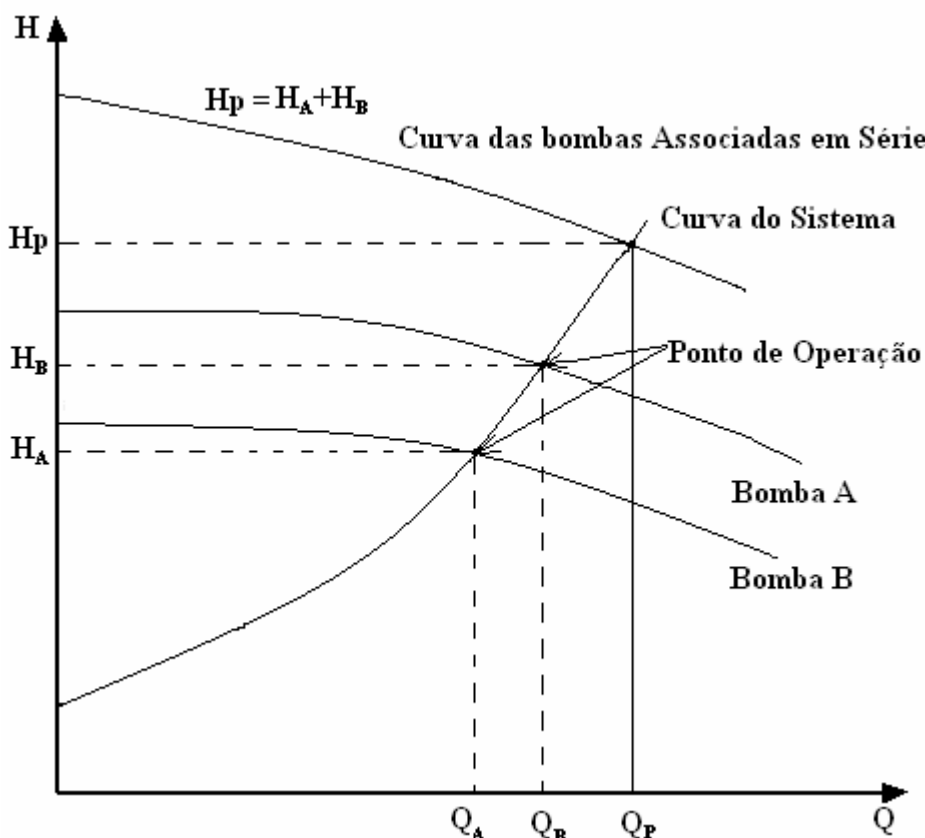


Figura 1 – Curva característica de uma associação de duas bombas em série

3.2 – Associação de bombas em paralelo

A associação de bombas em paralelo, diferentemente da associação em série, é utilizada em sistemas que requerem grandes vazões, como pode ser visto na figura 2. Neste caso, com duas bombas iguais basta somar teoricamente, para cada valor de altura manométrica, as vazões correspondentes às respectivas bombas, na construção da curva $H \times Q$ do conjunto (Martinez, 1996). Essa associação consiste fisicamente em ligações em paralelo na disposição das tubulações de recalque de tal modo que, por uma mesma tubulação, afluam as descargas das duas bombas funcionando simultaneamente.

As bombas deverão ser iguais, com a finalidade de evitarem correntes secundárias, no sentido das bombas de maior potência para as de menor.

A curva característica de cada bomba, para a velocidade n , é indicada por $H = f_n(Q_1)$ e corresponde ao funcionamento da instalação com uma só bomba.

Em geral, pode-se concluir que a descarga obtida com várias bombas em paralelo é menor do que a somatória da vazão das bombas funcionando isoladamente e em análogas condições.

Se a curva $H = f_n(Q_1)$ for pouco inclinada e se a tubulação indicar acentuada perda de carga, a associação em paralelo não apresentará vantagem apreciável no aumento da descarga. E ainda, cada bomba irá trabalhar com descarga muito abaixo de seu valor normal, o que causará cavitação e aquecimento excessivo (perdas nos terminais e rendimentos mais baixos do motobomba).

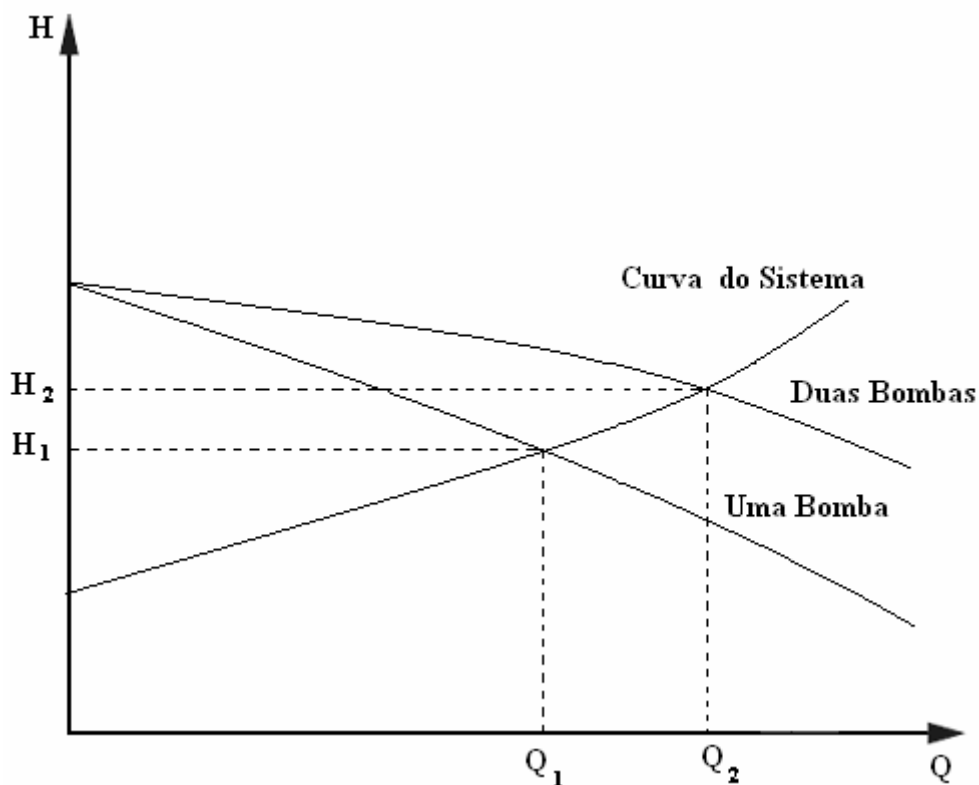


Figura 2 - Curva característica de uma associação de bombas em paralelo

As tubulações deverão ter diâmetros grandes para que a curva do sistema não apresente com curvatura acentuada. Devemos ter o cuidado de estudar com atenção as associações em paralelo de bombas ligadas as instalações existentes, com tubulações parcialmente obstruídos pela oxidação (ferrugem) ou excessivamente longas que causam curvatura acentuada da curva característica do encanamento.

A variação da altura manométrica será tanto quanto menores forem as perdas de carga na tubulação. Como a altura manométrica resultante de um sistema de bombeamento em paralelo poderá ser igual do que uma bomba, apenas deve-se atender a essa circunstância ao projetar a tubulação de recalque e calcular os flanges de ligação à bomba.

A figura 3 mostra as curvas características de carga do motor de indução para variação dos diversos parâmetros (corrente “ I_1 ”, fator de potência “ $\cos\phi$ ”, escorregamento “ s ” e rendimento “ η ”) com a potência (Lobosco, 1988).

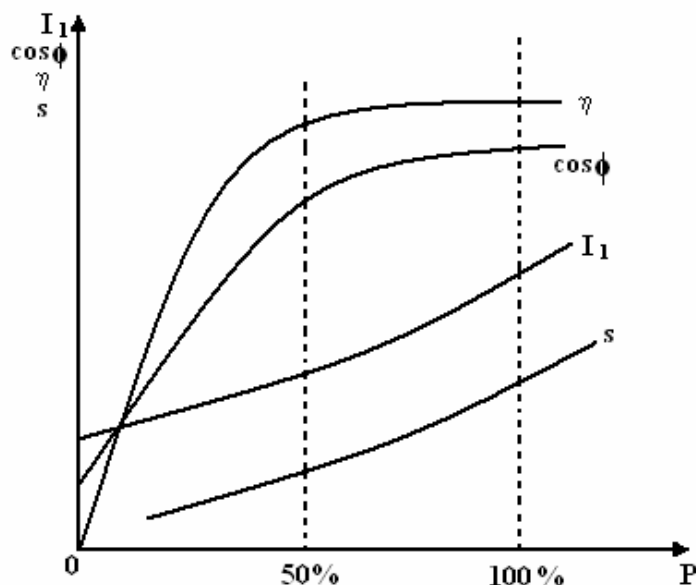


Figura 3 – Características de carga do motor de indução (Lobosco, 1988)

A potência hidráulica “WHP” é expressa pela equação 1 abaixo. Em que : Q é a vazão em $m^3/hora$; H é a altura manométrica em metros e γ é o peso específico do fluido incompressível bombeado em kg/m^3 . A potência consumida pela bomba “BHP” é mostrada pela equação 2. Em que: η_B = rendimento da bomba (Lobosco, 1974).

$$WHP = (Q \cdot H) / 75 \text{ (cv)} \quad \text{ou} \quad WHP = (Q \times H \times \gamma) / 102 \text{ (kW)} \quad (1)$$

$$BHP = WHP / \eta_B \text{ (cv ou kW)} \quad (2)$$

4 – VARIAÇÃO DA ROTAÇÃO DAS BOMBAS POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Os inversores de frequência são equipamentos eletrônicos acoplados aos conjuntos motores bombas, cuja função é o controle da velocidade de rotação dos motores elétricos em corrente alternada (CA). Com a alteração da rotação, observada as leis da similaridade das máquinas hidráulicas rotativas nas equações 3, 4, 5 e 6, as curvas de funcionamento da bomba (altura manométrica x vazão) são alteradas, mudando assim o ponto de operação do sistema, conforme mostra a figura 4.

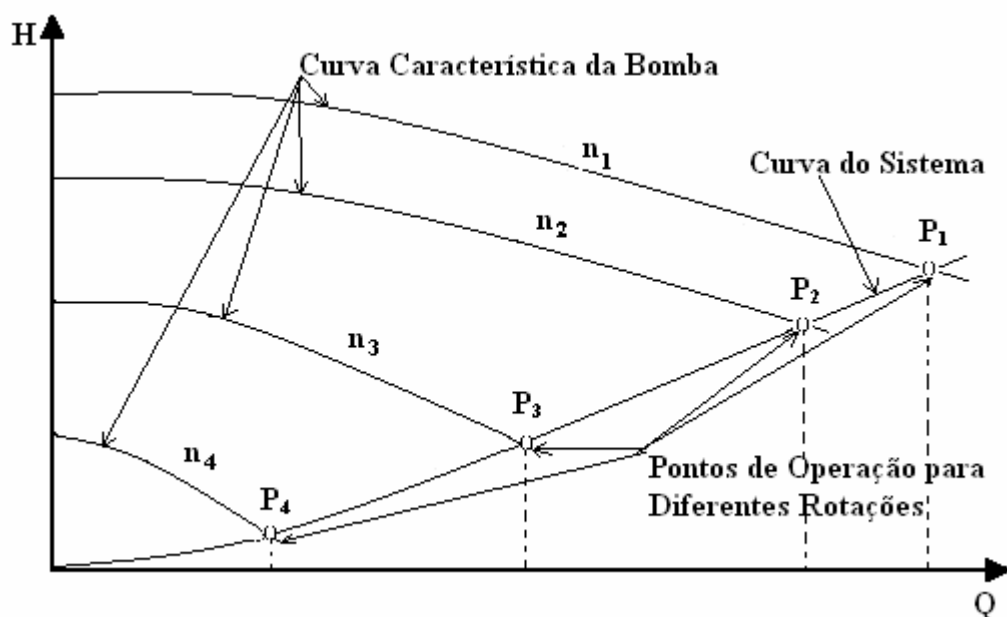


Figura 4 - Curva de funcionamento da bomba para diferentes rotações (Macyntrre,1997)

$$Q_1 = \left(\frac{n_1}{n}\right) \times Q \quad (3)$$

$$H_1 = \left(\frac{n_1}{n}\right)^2 \times H \quad (4)$$

$$P_1 = \left(\frac{n_1}{n}\right)^3 \times P \quad (5)$$

$$T_1 = \left(\frac{n_1}{n}\right)^2 \times T \quad (6)$$

Em que: Q = Vazão (m³/h); H = Altura manométrica (m); n = Rotação (rpm); P = Potência (cv); T = Torque (N.m).

Existem dois tipos de inversores de frequência disponíveis no mercado: o escalar e o vetorial. A diferença entre inversor escalar e vetorial está basicamente na curva torque x rotação. No inversor escalar, por ser uma função de V/F (tensão/frequência), este não oferece altos torques em baixas rotações, pois o torque é função direta da corrente de alimentação. A curva V/F pode ser parametrizada no inversor escalar.

O inversor vetorial não possui uma curva parametrizada, na verdade essa curva varia de acordo com a solicitação de torque, portanto este possui circuitos que variam a tensão e a frequência do motor, através do controle da corrente. O inversor vetorial é indicado para torque elevado com baixa rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável (Siemens, 2007).

O inversor de frequência não tem somente a função de controlar a velocidade de um motor CA. Ele também precisa manter o torque constante para que não haja alteração na rotação. Segundo Capelli (2002), como é mostrado na figura 5 o inversor de frequências podem ser classificados nos seguintes

blocos: 1º bloco- CPU “Unidade central de processamento”; 2º Bloco- IHM “Interface Homem Máquina”; 3ºBloco – Interfaces “Serial, Analógica e Digital” e o 4º Bloco – Etapa de potência.

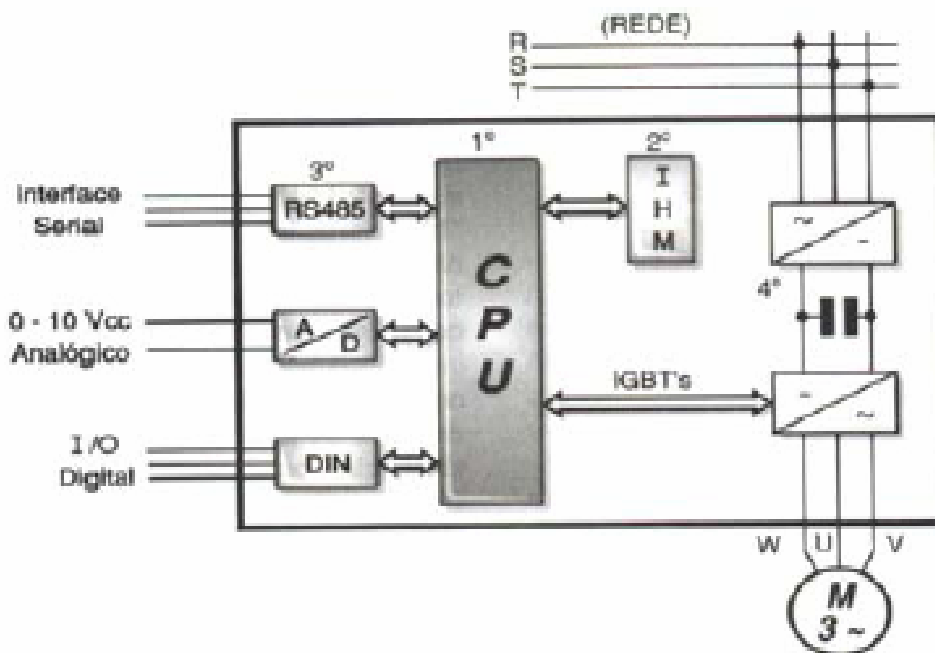


Figura 5 – Diagrama de blocos de um inversor de frequência (Capelli, 2002)

O inversor de frequência não tem somente a função de controlar a velocidade de um motor CA. Ele também precisa manter o torque constante para que não haja alteração na rotação.

1º bloco - CPU

CPU - A CPU (unidade central de processamento) de um inversor de frequência pode ser formada por um microprocessador ou por um microcontrolador (CLP). Isso depende apenas do fabricante. De qualquer forma, é nesse bloco que todas as informações (parâmetros e dados do sistema) estão armazenadas, visto que também uma memória está integrada a CPU. A CPU não apenas armazena os dados e parâmetros relativos ao equipamento, como também executa a função mais vital para o funcionamento do inversor.

2º Bloco - IHM

O segundo bloco é o IHM (Interface Homem Máquina). É através desse dispositivo que se pode visualizar o que está ocorrendo no inversor (display), e configurá-lo de acordo com a aplicação através de teclas.

3ºBloco - Interfaces

A maioria dos inversores pode ser comandada através de dois tipos de sinais: Analógicos ou digitais. Normalmente, quando se quer controlar a velocidade de rotação de um motor CA com inversor,

utiliza-se uma tensão analógica de comando. Essa tensão situa-se entre 0 e 10 Vcc. A velocidade de rotação n (rpm) será proporcional ao seu valor.

4º Bloco – Etapa de potência

A etapa de potência é constituída por um circuito CA-CC e um circuito CC-CA, que alimenta (através de um circuito intermediário chamado “barramento DC”), o circuito de saída inversor.

5 – ESTUDO DE CASO

O caso analisado refere se a uma bancada de teste instalada no Laboratório de Eficiência Energética em Hidráulica e Saneamento LENHS / Centro de Pesquisa Hidráulica e de Recursos Hídricos da UFMG, constituída de dois conjuntos motobomba de características semelhantes de potência de 10 cv, que podem ser operadas em associação série ou paralelo, ou independentes, com a operação de apenas uma bomba. Esses conjuntos são acionados por inversores de frequências da WEG (modelo série CFW-09, versão de *software* 1.9X.). Cada inversor apresenta as seguintes características: alimentação trifásica de 220 V; corrente nominal de 28 A; frequência de alimentação de 60 Hz; potência de 7,5 kW; controle escalar (V/F) ou vetorial. O projeto elétrico e de instrumentação foi desenvolvido e implementado por BARBOSA (2006).

A bancada de teste é mostrada na figura 6. Sendo, o sistema de bombeamento composto por: um reservatório de 1 m^3 ; tubulação em PVC e ferro galvanizado; oito válvulas-gaveta e duas válvulas-globo; dois conjuntos motobomba; dois inversores de frequência; três motores de corrente alternada de 1 kW (acionamento das válvulas gaveta); cinco manômetros; dois manovacuômetros; três transmissores de pressão; dois transmissores de vazão. O conjunto motobomba instalado na planta tem as seguintes características: bombas do tipo centrífugas; carcaça de ferro fundido; eixo horizontal; capacidade de bombeamento de $60\text{ m}^3/\text{h}$ e 28 mca; velocidade máxima da bomba de 1750 rpm; tipo monobloco; motor de indução trifásico; velocidade nominal do motor igual a 1760 rpm; marca EH Bombas Hidráulicas Ltda; modelo EHF 65-25 S (Barbosa, 2006).

No recalque e na sucção de cada bomba estão instalados, respectivamente, um manômetro e um manovacuômetro. Duas saídas possuem transmissor indicador de vazão e uma, transmissor de pressão. Porém, há manômetros analógicos para indicação local nas três saídas. Na sucção de cada bomba foi instalado um transmissor de pressão. Por meio de válvulas-gaveta manuais inseridas no sistema, determina se o tipo de associação de bombas a ser utilizado, proporcionando grande flexibilidade ao sistema.

O monitoramento e controle da planta piloto são realizados por um supervisório desenvolvido pelo autor Barbosa (2006) no software Labview, que faz aquisição dos dados por computador.

Os ensaios realizados para obtenção das curvas do sistema de bombeamento configuram em associações série e paralelo das bombas 1 e 2.



Figura 6 - Bancada de Sistema de Bombeamento (Barbosa, 2006).

Em primeiro momento, foi feito o levantamento dos parâmetros das bombas 1 e 2, realizado com as seguintes variações de rotações 1250, 1550 e 1750 rpm controladas pelos os inversores de frequências.

Na figura 7 temos as curvas H x Q das bombas 1 e 2 para diferentes rotações de 1250, 1550 e 1750 rpm, sendo que os pontos de medição dos ensaios são destacados nas curvas apresentadas. Estes ensaios foram realizados, levando em consideração as perdas na tubulação de sucção e de recalque. Caso essas perdas fossem descontadas das curvas obtidas, poderia obter curvas com resultados mais próximos entre as duas bombas.

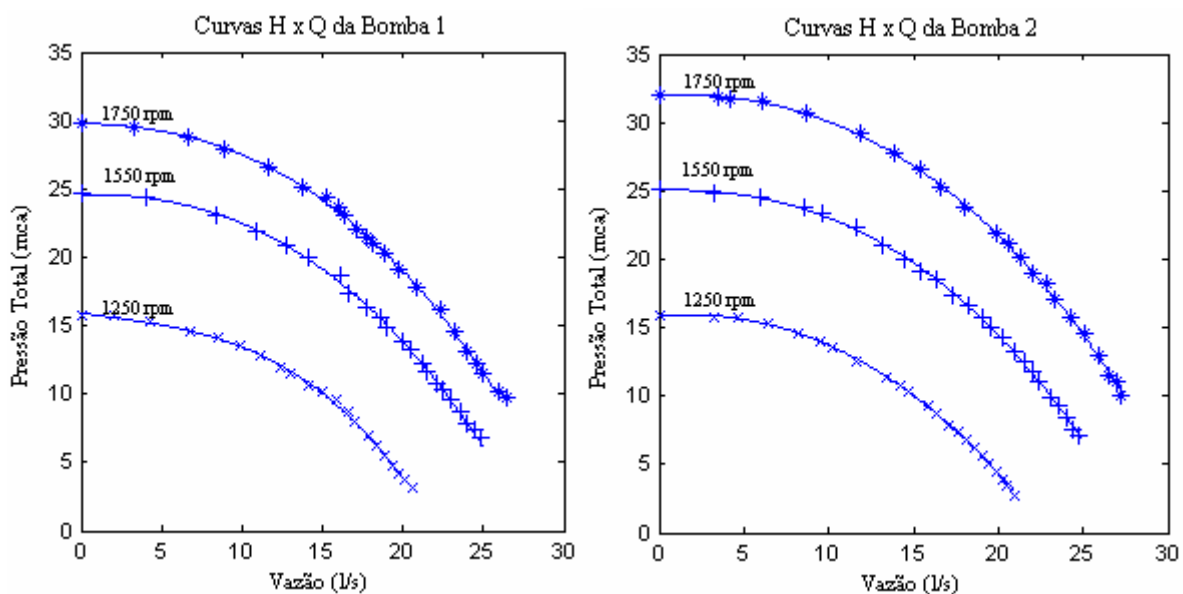


Figura 7 - Curvas H x Q, da bomba 1 e da Bomba 2 para diferentes velocidades

As diferenças encontradas entre as curvas H x Q das bombas 1 e 2 mostradas na figura 7, ocorre devido ao fato do percurso da água bombeada pela bomba 1 ser maior com relação ao da bomba 2 e também a uma bifurcação a mais na tubulação de recalque da bomba 1 do ponto de tomada de pressão.

Na figura 8, temos as curvas associadas das bombas em paralelo e série para diferentes velocidades.

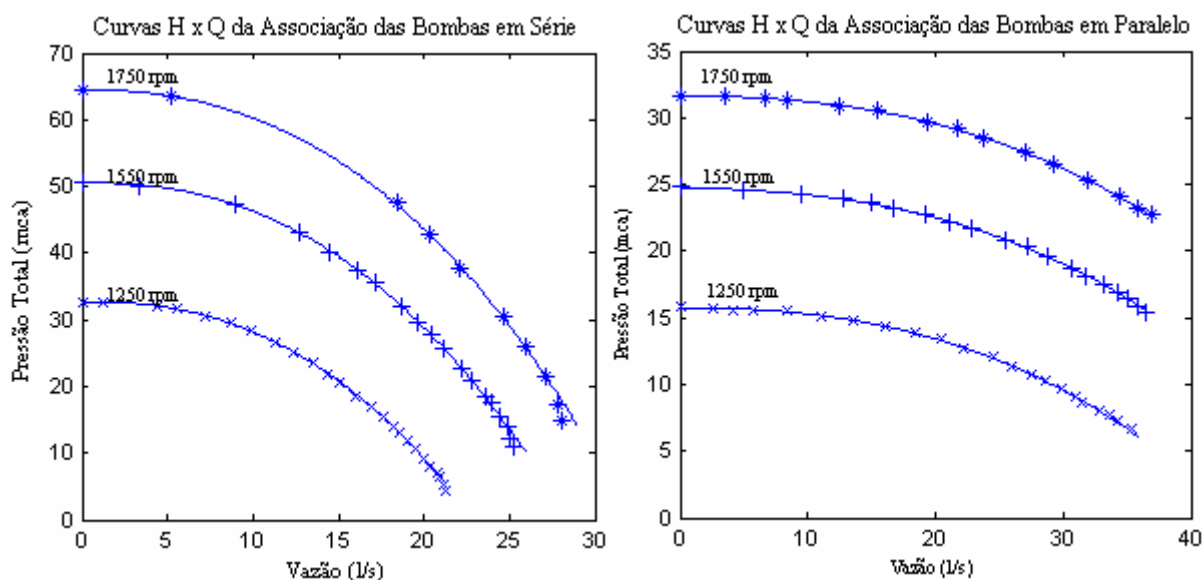


Figura 8 - Curva H x Q para diferentes velocidades do conjunto.

A figura 9 mostra as curvas de potência de alimentação das bombas e as potências hidráulicas fornecida pelas bombas ao sistema. Estas curvas foram obtidas mantendo-se constante as velocidades angulares das bombas em 1250, 1550 e 1750 rpm, em associação paralelo.

Na figura 10, a potência hidráulica fornecida pela bomba 1 foi inferior à fornecida pela bomba 2. Essa diferença se deve ao fato de um vazamento maior ter ocorrido na carcaça da bomba 1 ao terminar os ensaios, e também ao maior percurso da água na instalação de sucção pela bomba 1 em relação da bomba 2.

A figura 11 apresenta curvas de rendimentos das bombas 1 e 2 a uma velocidade de 1550 rpm, sendo que a bomba 2 apresenta um melhor rendimento de 76% e a bomba 1 mostra um rendimento de aproximadamente de 71%.

Na figura 12, temos as curvas de rendimento da associação das bombas 1 e 2 em paralelo, analisando os rendimentos, pode-se dizer que o melhor rendimento da associação paralelo foi 70% para a velocidade angular de 1550 rpm.

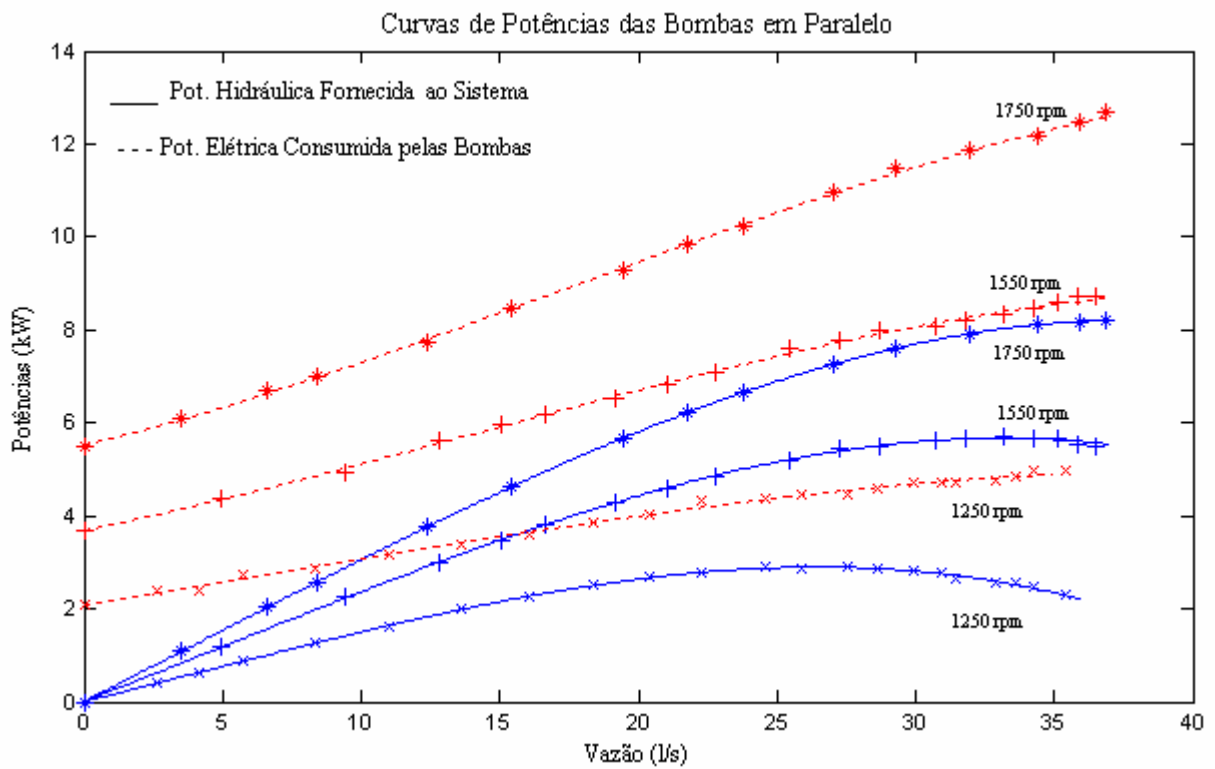


Figura 9 - Curvas de potência em função da vazão das bombas 1 e 2 em paralelo, para velocidade igual a 1250 rpm, 1550 rpm e 1750 rpm.

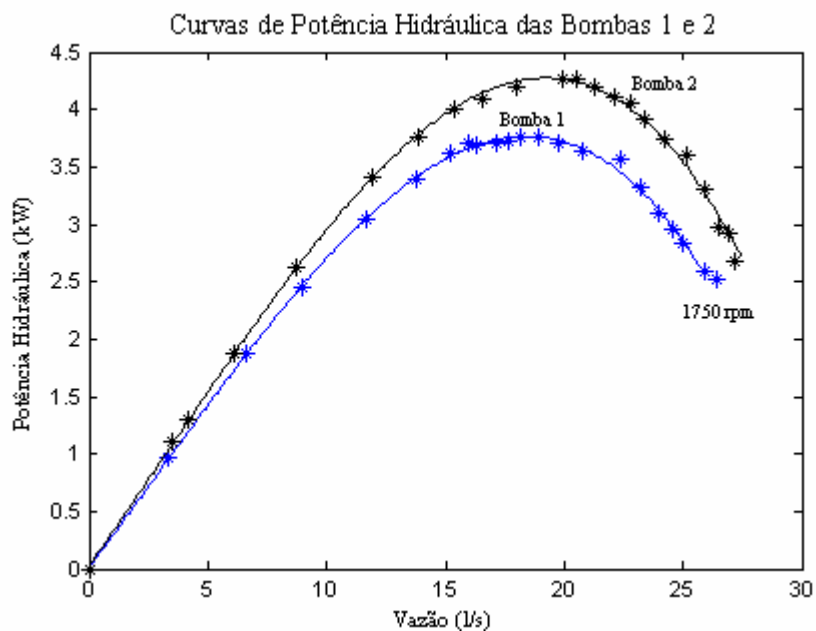


Figura 10 - Curvas de potência Hidráulica em função da vazão das bombas 1 e 2 para velocidade igual a 1750 rpm.

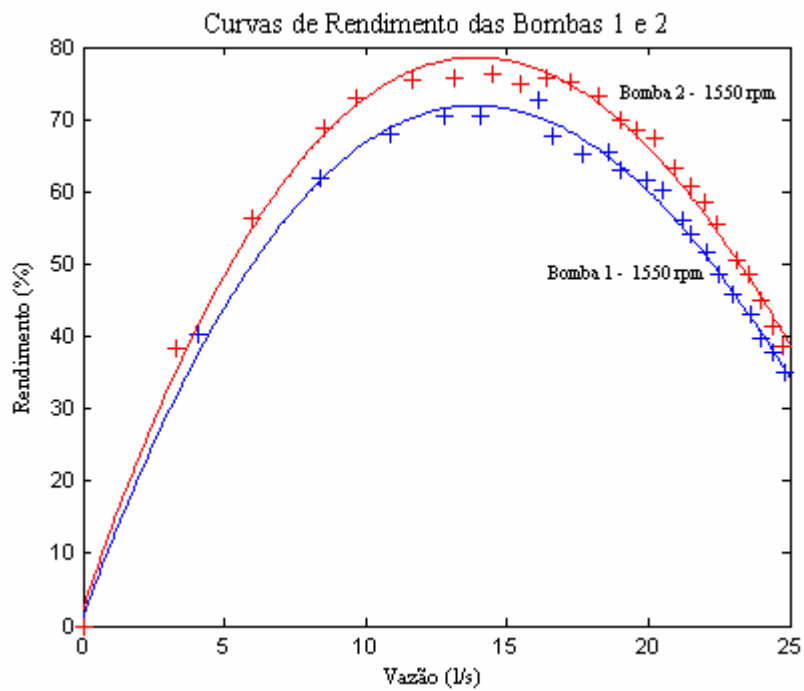


Figura 11 - Curvas de rendimento em função da vazão das bombas 1 e 2 para velocidade igual a 1550 rpm.

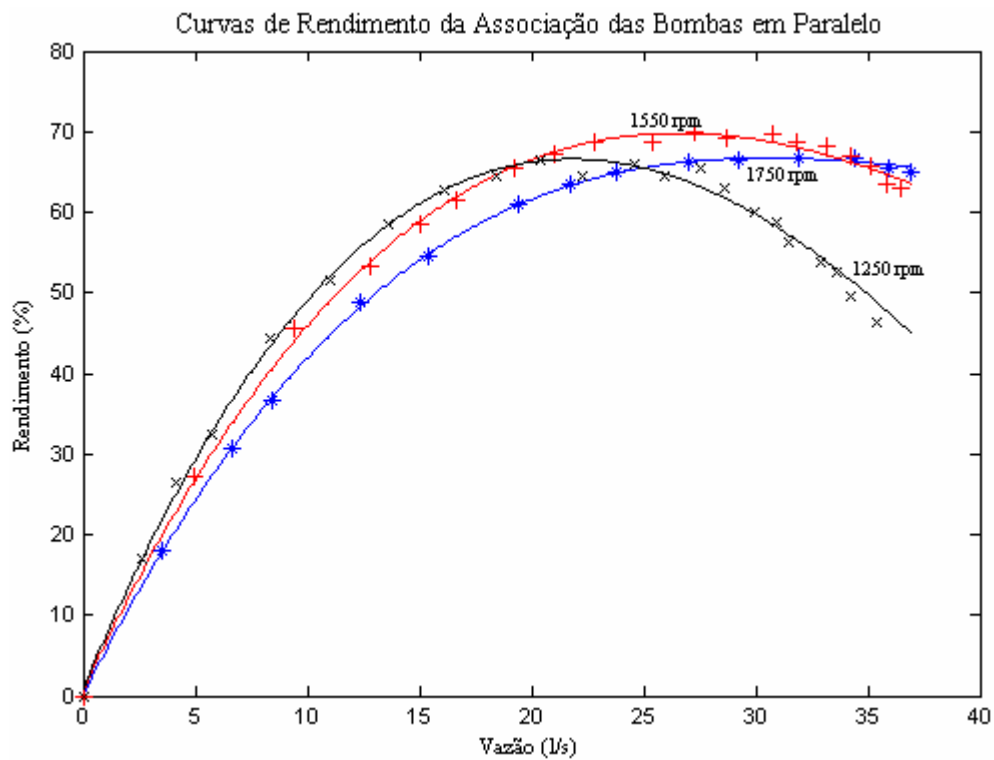


Figura 12 - Curvas de rendimento em função da vazão das bombas em paralelo, para velocidade igual a 1250, 1550 e 1750 rpm.

6 – CONCLUSÕES

Os estudos obtidos a partir da metodologia proposta mostram que a instalação pode ter um ganho de eficiência bastante significativo. No entanto, a utilização de inversores de frequência não significa que a instalação terá um ganho eficiente bastante significativo, pois será necessário que, paralelamente a tecnologia de variação de velocidade, se utilize um conjunto de sensores que permita o monitoramento e a operação da instalação em tempo real. Nos ensaios realizados no Centro de Pesquisa Hidráulica e de Recursos Hídricos da UFMG, observou-se que a bomba 2 obteve um melhor rendimento do que a bomba 1 para uma velocidade de 1550 rpm, isso ocorreu devido a bomba 1 ter um percurso da água bombeada maior do que da bomba 2. Para a associação das bombas em paralelo obteve-se um melhor rendimento de 70% para uma velocidade angular de 1550 rpm.

BIBLIOGRAFIA

- BARBOSA, B.H. (2006). *“Instrumentação, Modelagem, Controle e Supervisão de um Sistema de Bombeamento de Água e Módulo Turbina–Gerador”*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- CAPELLI, A. (2002). *“Inversores de Frequência”*. Revista Mecatrônica Atual nº 2, Fevereiro de 2002.
- OGATA, K. (2003). *“Engenharia de controle moderno”*. São Paulo: Prentice Hall do Brasil, fourth edition.
- LOBOSCO, O. S., DIAS, J. L. P.C (1988). *“Seleção e aplicação de motores elétricos”*. Volume 1, Editora McGraw-Hill, São Paulo.
- LOBOSCO, O. S., DIAS, J. L. P.C (1974). *“Seleção e aplicação de motores elétricos”*. Volume 2, Editora McGraw-Hill, São Paulo.
- MACYNTYRE, A.J. (1997) *“Bombas e Instalações de Bombeamento”*. Editora LTC, Rio de Janeiro.
- MARTINEZ, C. B. (1996). *“Tópicos de Hidráulica Aplicada”*. Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos – UFMG.
- MATHEUS, H. (2007). *“Conversores de Frequência e Soft-starters”*. EJM Construção e comércio Ltda. < www.ejm.com.br >. 9 de maio de 2007.
- SIEMENS. (2007) . Catálogo da Siemens. <<http://www.siemens.com.br/acionamentos>>. 9 de maio de 2007.