

O Uso de Bombas Funcionando como Turbinas Acionando Geradores de Indução.

Rafael Emilio Lopes¹, Robson Percy Holder², Antônio Elísio Oliveira³, Carlos Barreira Martinez²

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre Bomba funcionando como Turbina (BFT) acionando geradores de indução como uma solução que preencha a necessidade de baixo custo e eficiência. A partir do estudo de BFT's, se obteve um equacionamento que permite definir a rotação, altura de queda e vazão para que uma bomba possa operar como turbina. Em seguida estudou-se o funcionamento da BFT operando acoplada a um Gerador de Indução (GI). Esta alternativa foi desenvolvida visando a utilização em aproveitamento de pequenos potenciais residuais, onde o grupo gerador BFT-GI pode ser colocado em paralelo com o sistema elétrico local, ou então ser operado isoladamente. Os resultados são apresentados em tabelas e ábacos onde, se observam os resultados preliminares obtidos com a pesquisa.

PALAVRAS-CHAVE

Bomba Funcionando como Turbina, Gerador de indução, Potenciais Residuais.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, o aproveitamento dos potenciais hidráulicos residuais no Brasil, através da implantação de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), se constitui em uma importante oportunidade de expansão da base de geração alternativa. Sabe-se que as PCHs possuem características singulares que as distinguem das usinas hidrelétricas de médio e grande portes. Face ao montante envolvido em sua construção, as PCHs são alternativas factíveis para a autogeração e à produção independente por parte dos grupos empresariais de pequeno e médio porte.

A partir do lançamento do PROINFA, programa da ELETROBRAS destinado ao incentivo de geração a partir de fontes alternativas, vislumbra-se um nicho de mercado que pode ser ocupado, em parte por micro e mini centrais hidrelétricas.

Entretanto, apesar deste esforço, o efeito de escala penaliza pesadamente este tipo de empreendimento. Desta forma, iniciou-se um estudo visando a redução do investimento inicial na implantação das micro e mini usinas. A alternativa contemplada (BFT) privilegia a utilização de

equipamentos de série, que possuem um baixo custo e que podem ser adquiridos no mercado nacional.

Como toda alternativa tecnológica possui vantagens e desvantagens quando comparadas com turbinas na mesma faixa de potência. Estas serão descritas a seguir:

Vantagens:

- As bombas são fabricadas em série - isso diminui o custo tanto de fabricação quanto manutenção;
- Não demandam mão de obra especializada para sua manutenção;
- Esquema de instalação simples - facilidade de implantação no caso de pequenas potências;
- É um equipamento robusto e suas peças podem ser encontradas com facilidade.

Desvantagens:

- Possui rendimento um pouco inferior se comparado às turbinas convencionais;
- Não possui um dispositivo de controle hidráulico incorporado (distribuidor);
- Não permite variações de carga como uma turbina convencional.

Estas desvantagens podem ser minimizadas se a bomba for corretamente selecionada em função das características do sistema e ponderada a sua utilização em termos de eficiência.

Assim baseado na literatura nacional [1] e internacional [2], [3],[4] e [5] se buscou uma solução que preencha esta necessidade de baixo custo e eficiência. A partir do estudo de BFT's, se obteve um equacionamento que permite definir a rotação, altura de queda e vazão para que uma bomba possa operar como turbina acoplada a um Gerador de Indução operando em paralelo com o sistema elétrico local, ou então para que isoladamente.

II. DESENVOLVIMENTO

Este trabalho apresenta um estudo de um grupo gerador BFT/GI ambos selecionados a partir das características do aproveitamento. Considera-se que as Bombas funcionando como turbina podem ser utilizadas para arranjos individuais com potências entre 1 kVA à 150 kVA. Desta forma as instalações utilizando este equipamento serão classificadas como micro e mini centrais hidrelétricas. Assim faz-se, a seguir, uma série de comentários sobre procedimentos para a instalação deste tipo de central.

Este trabalho foi apoiado pela Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina.

¹ Universidade de Itauna. Rod. MG 431 Km 45, Itauna, MG. CEP 35 680-000, cx 99-100, toffanetto@uol.com.br.

² Centro de Pesquisa Hidráulica e de Recursos Hídricos. Av. Antônio Carlos 6227, Belo Horizonte MG. CEP 31 270-901, martinez@cce.ufmg.br.

³ Financiado pela, Companhia Força e Luz Cataguazes Leopoldina / Companhia de Eletricidade de Nova Friburgo, Pça Rui Barbosa 80, centro, Cataguazes MG. CEP 36 700-000; cataguazes@cataguazes.com.br

A. Bancada de ensaio

Para verificar o funcionamento das bombas funcionando como turbina e aferir as equações disponíveis na literatura foi construída uma bancada de testes que tem como característica principal a capacidade de variar tanto a altura manométrica na BFT quanto a vazão, além de ter a capacidade e ensaiar várias bombas figura 1.

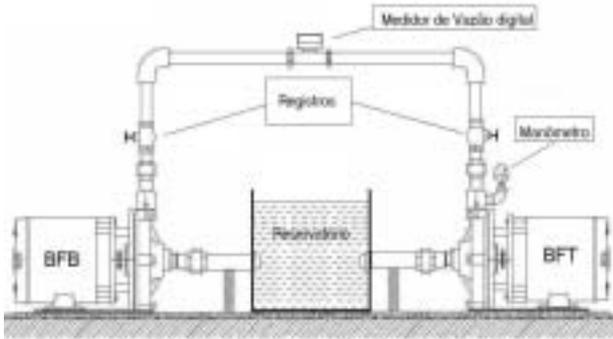


FIGURA 1 - Bancada de ensaio de BFT.

Esta bancada tem como fonte de alimentação da Bomba Funcionando como Bomba (BFB) um inversor de frequência de 10k VA, como apresentado na figura 2. Isso permite o controle da rotação da BFB e com isso a variação da vazão e da pressão sobre a BFT com a sensibilidade necessária para se obter vários pontos durante a medição. Para medir a potência gerada pela BFT foi utilizado um Gerador CC, (previamente ensaiado). A bomba ensaiada neste trabalho é a EH 32-16 s 1750 rpm.

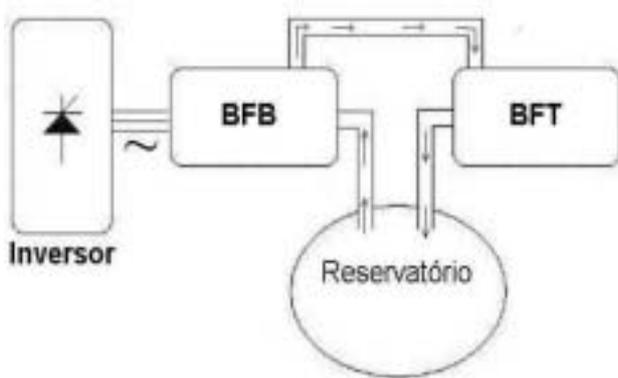


FIGURA 2 - Esquema de ligação da bancada de ensaio de BFT

B. Resultados dos ensaios com BFT

Foram realizados ensaios para verificar o comportamento de BFT para velocidades acima e abaixo da nominal como bomba e verificar o rendimento nas diferentes rotações. Procurou-se então investigar também as influências sobre a queda e vazão no ponto de rendimento máximo para as diversas rotações. Com isso foram obtidos os resultados mostrados na figura 3.

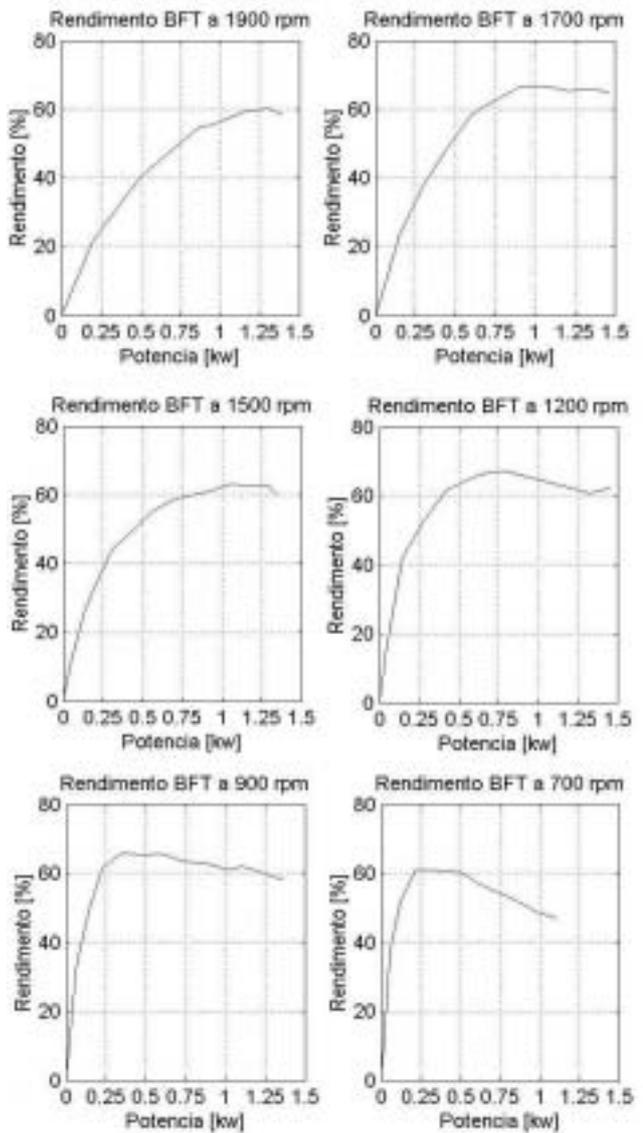


FIGURA 3 - Gráficos de rendimento da BFT 32-16s (EH-bombas), para diferentes rotações.

C. Gerador

A BFT apresentou um rendimento satisfatório para rotações acima da rotação nominal como bomba o que viabiliza a utilização de um gerador de indução.

O Gerador de indução foi escolhido devido alguns critérios descritos a seguir.

Investimento:

- É considerado vantagem. Para pequenas potências, menores que 100 kVA.

Disponibilidade de máquinas e peças :

- Alta disponibilidade em larga faixa de potência, pois é muito utilizado na indústria e agricultura.

Aspectos construtivos:

- Robusto e simples, além de manutenção baixa e barata.

Acoplamento à rede:

- Não necessita de sincronização, o circuito principal é simples e o acoplamento ocorre próximo a velocidade síncrona.

Controlador de velocidade para operação isolada:

- Neste caso utiliza-se apenas um banco de capacitores ou outro dispositivo regulador de tensão.

Capacidade de sobre velocidade

- As máquinas de 4 pólos ou mais, possuem uma capacidade de até o dobro da velocidade nominal, o que não ocorre com as de 2 pólos que suportam no máximo 30% de sobrevelocidade.

Assim o gerador de indução, não necessitará de dispositivos de sincronismo e/ou controladores para funcionar em paralelo, já que a própria rede irá suprir o reativo necessário ao motor de indução para funcionar como gerador. Da mesma forma a rede irá impor a rotação de trabalho.

Entretanto no caso de operação isolada deve-se inicialmente determinar a forma com que o mesmo deve alimentar a carga. Sugere-se, para a maioria dos casos, que a forma de conexão seja trifásica. Porém em pequenos aproveitamentos onde a carga é essencialmente monofásica é sugerido a utilização de uma ligação trifásica operando com monofásica. Sugere-se ainda por motivos de rendimento, custo e proteção que para potências maiores que 15 kVA o gerador trabalhe fornecendo potência na forma trifásica.

Para fornecer energia na configuração isolada, o gerador terá que possuir um sistema de excitação próprio que na maioria dos casos é um banco de capacitores.

Para trabalhar na forma trifásica é necessário o cálculo da capacitância por fase, figura 4.

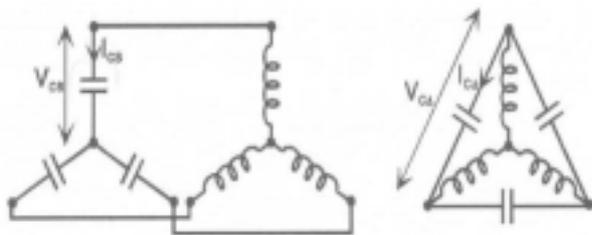


FIGURA 4 - Conexão dos capacitores necessários a excitação do gerador de indução na forma isolada [6].

Para esse tipo de acoplamento (trifásico) temos duas possibilidades, Estrela e delta.

$$C = \frac{1}{\omega X_C} \quad , \quad C_{\Delta} = C_s / 3 \quad (1)$$

onde:

"s" → Estrela

"Δ" → Delta

Para dimensionar o banco de capacitores para o funcionamento da máquina de indução como gerador auto excitado o ideal é se conhecer a curva de magnetização do motor e então determinar a reatância capacitiva necessária à auto-excitação do gerador.

Isso pode ser fornecido pelo fabricante, ou por meio de ensaio de laboratório. Porém na falta da curva de magnetização o banco de capacitores para o funcionamento do motor de indução como gerador pode ser determinado pela potência aparente, sem carga, da máquina funcionando como motor. O banco calculado desta segunda maneira tem valor próximo do calculado pela curva de magnetização e viabiliza o uso de máquinas onde a curva de magnetização não é conhecida.

Logo:

$$\sum S_{no-load} = \sqrt{3} * V_{linha} * I_{linha} \quad (2)$$

$$\sum Q = \sum S_{no-load} \quad (3)$$

$$Q_{fase} = Q / 3 \quad (4)$$

$$V_{fase} = V_{linha} / \sqrt{3} \quad (5)$$

$$I_{fase} = Q_{fase} / V_{fase} \quad (6)$$

$$X_{C_{fase}} = V_{fase} / I_{fase} = 1 / 2\pi f C \quad (7)$$

Assim o valor da capacitância por fase será de:

$$C = I_{fase} / 2\pi f V_{fase} \quad (8)$$

O equacionamento apresentado tem o intuito de facilitar o dimensionamento do sistema de excitação e não substituir o baseado na curva de magnetização.

O motor de indução monofásico pode ser usado como gerador, porém existem alguns problemas que inviabilizam sua execução.

Os motores monofásicos existem em faixa de potência menor que o trifásico, são mais caros e possuem uma dificuldade maior no tocante ao dimensionamento do sistema de excitação para que funcione com uma qualidade aceitável. Porém a possibilidade de se gerar energia em um sistema monofásico não deve ser descartada. Para isso pode-se utilizar um motor trifásico operando como gerador monofásico.

Assim sugere-se o uso de um sistema com conexão do tipo "C - 2C" que consiste em:

Usar uma máquina trifásica ligada em delta.

- Calcular a capacitância por fase como se fosse um sistema trifásico operando em ligação delta.
- Conectar a capacitância em uma fase, deixar uma fase sem capacitância e conectar o dobro da capacitância na fase restante.

A carga deve ser conectada à fase que contém uma capacitância somente, como mostrado no circuito da figura 5.

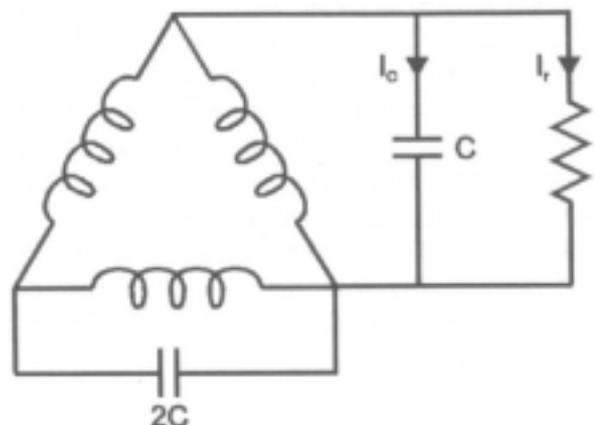


FIGURA 5 - Ligação C-2C,[6]

O arranjo desbalanceado dos capacitores irá compensar o desbalanceamento da carga visto pelo gerador, esse método é utilizado para compensar cargas desbalanceadas em geradores.

Para esse tipo de conexão a direção de rotação influi pesadamente. Desta forma sempre deve ser respeitado o sentido C, 2C e 0, isso porque a fase 2C tem que produzir o pico de tensão logo após a fase C, para que o desbalanceamento seja compensado, caso contrário a máquina apresentará mal funcionamento.

Para determinar a carga máxima para a operação nominal temos:

$$P_{carga} = \frac{\sum Q}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

Onde:

- P_{carga} Potência dissipada na carga;
- $\sum Q$ Potência reativa total dos capacitores.

$$I_r = \sqrt{3} * I_c \quad (10)$$

Para cargas acima e abaixo dessa condição a máquina irá operar desbalanceada. Porém dentro da faixa de potência corrigida pelos capacitores a máquina terá um rendimento de 80% do funcionamento como motor e isso é geralmente suficiente para compensar o desbalanceamento.

Se a carga for em sua maioria resistiva, a possibilidade de trabalhar fora da faixa aumenta, isso porque sobra mais potência reativa para compensar o fator de potência baixo.

Análise dos resultados apresentados e comentários

De acordo com as curvas geradas através da medição em laboratório podemos fazer inúmeras considerações.

Para uma bomba centrífuga trabalhar como turbina centrífuga tanto a queda necessária quanto a vazão aumentam e em proporções diferentes. Isso pode ser visto, por exemplo, para uma análise feita na bomba EH 32-16 s 1750 rpm cuja curva característica é mostrada na figura 6 e os resultados do ensaio a 1800 rpm no gráfico e tabela da figura 7 :

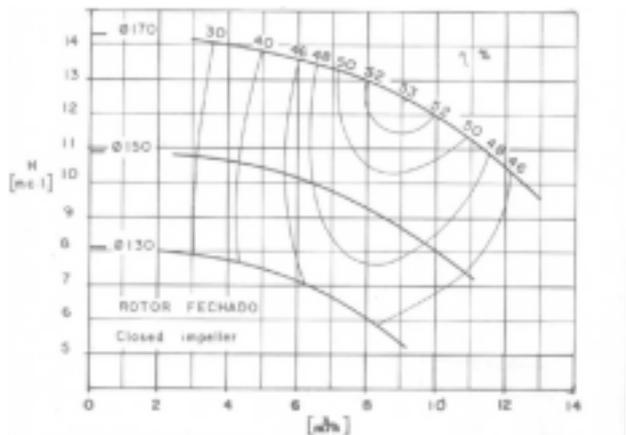


FIGURA 6 - Curva característica de bomba EHF32-16s, com rotor de $\phi 170$, fabricante EH bombas

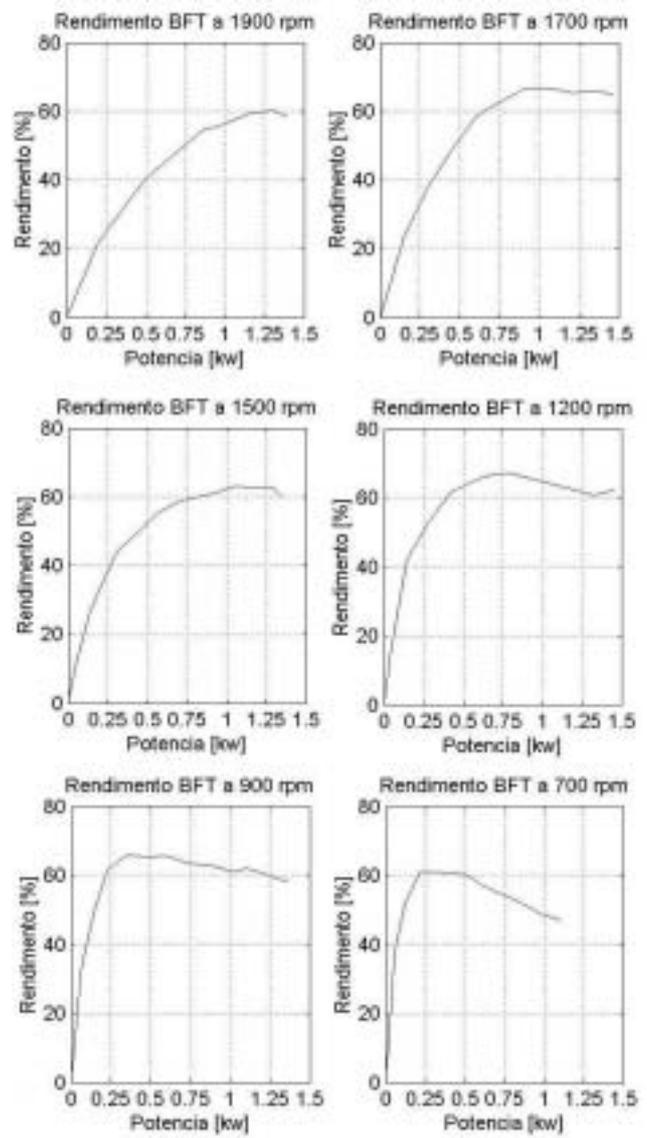


FIGURA 7 - ensaio da bomba EHF32-16s, com rotor de $\phi 170$, fabricante EH bombas, como turbina a 1800 rpm.

No ponto de maior eficiência a bomba funcionando como bomba tem altura $H_B = 12.5$ m e vazão $Q_B = 2,4 * 10^{-3} m^3/s$. Trabalhando como turbina tem-se aumentos consideráveis para H e Q, que são $H_{BFT} = 32,6$ m e $Q_{BFT} = 5,45 m^3/s$. Para o ponto de maior eficiência tem-se:

$$H_{BFT} = 2,1 * H_B \quad (11)$$

$$Q_{BFT} = 2.27 * Q_B \quad (12)$$

De acordo com Sharma e Willians isso era previsto, visto que ambas, altura e vazão, tem seus valores absolutos aumentados quando da conversão de Bomba para Turbina como mostrado nas equações abaixo referentes ao trabalho de Sharma:

$$H_{bft} = \frac{H_{bep}}{(\eta_{max})^{1.2}} \quad (13)$$

$$Q_{bft} = \frac{Q_{bep}}{(\eta_{max})^{0.8}} \quad (14)$$

Onde:

- H_{BFT} = Queda requerida pela BFT;
- Q_{BFT} = Vazão requerida pela BFT;

- H_{BEP} = Altura manométrica da bomba funcionando como bomba no ponto de máxima eficiência;
- Q_{BEP} = Vazão da bomba funcionando como bomba no ponto de máxima eficiência;
- η_{MAX} = Rendimento máximo da bomba como bomba.

Uma outra característica que ficou evidenciada é que à medida que diminuimos a velocidade de trabalho, o ponto ótimo se desloca para o início da curva como podemos ver na figura 3. O que nos leva a concluir que para trabalhar com H_{BFT} e Q_{BFT} reduzidos temos que diminuir a velocidade para manter o rendimento acima de 60%.

Isso permite avaliar um funcionamento com disponibilidade de energia variável, ou seja, onde o fornecimento Hidráulico varia em função do tempo. Para isso indica-se a geração com velocidade variável usando um gerador de indução acoplado a um inversor de frequência como nos aproveitamentos eólicos, o que torna o aproveitamento possível quando existe uma grande oscilação no volume de água disponível. Porém mantida a mesma vazão e altura da bomba funcionando como bomba, para funcionamento como turbina, ou seja, $H_B = H_{BFT}$ e $Q_B = Q_{BFT}$, vemos, que tanto a velocidade quanto o rendimento diminuem., Isso é um fato explicado pelas equações de Sarma/Willians [2].

A BFT ensaiada apresentou um rendimento maior que a própria bomba funcionando como bomba, visto que foi atingido um rendimento de 70% como turbina e segundo o fabricante o rendimento como bomba não ultrapassa 53%.

O rendimento da BFT para valores acima de 1750 rpm até 1900 rpm são animadores, visto a possibilidade de se usar um motor de indução funcionando como gerador. Para o caso de 1850 rpm, velocidade de funcionamento de um gerador de indução de 4 polos, o rendimento ultrapassou 65 % como mostra a figura 8.

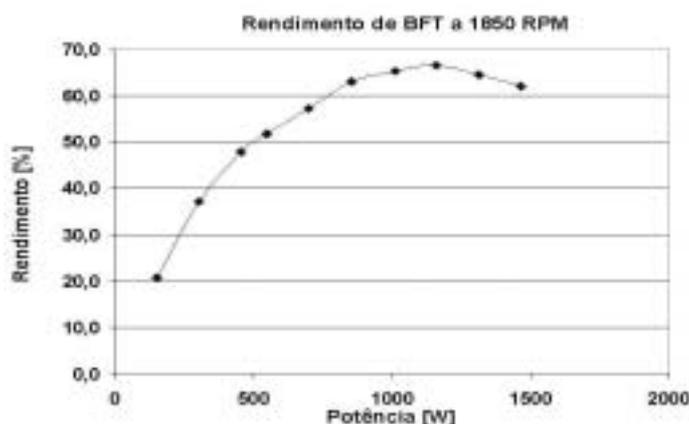


FIGURA 8 - ensaio da bomba EHF32-16s, com rotor de $\phi 170$, fabricante EH bombas, como turbina a 1850 rpm.

A BFT se mostrou uma turbina de eficiência relativamente aceitável para a faixa de potência em que se pretende trabalhar e mostrou ser, juntamente com o gerador de indução, uma alternativa robusta, de baixo custo e de fácil disponibilidade e acesso a pequenos e médios empreendedores.

III. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Viana, Augusto N. C. Comportamento de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas. Dissertação de Mestrado, Itajubá - MG, 1987.
- [2] Sharma, K. R. 'Small hydroelectric projects - Use of centrifugal pumps as turbines', Kirloskar Electric Co., Bangalore, India, 1985.
- [3] Williams, A A, 'Pumps as turbines: a user's guide', IT Publications, London, ISBN 1-85339-285-5, 1995.
- [4] Williams, A A, 'The turbine performance of centrifugal pumps: a comparison of prediction methods', Proc. ImechE, Vol. 208, Pt A, pp 59-66, 1994.
- [5] Williams, A A, 'The Selection and Application of centrifugal pumps as water turbines', 10th Conference on fluid Machinery' Hungarian Academy of Sciences, Budapest, September, 1995.
- [6] Kittredge, C P, 'Centrifugal pumps used as hydraulic turbines', Trans. ASME, J. Eng. Power, Ser. A, pp 74-77, Jan 1961.
- [7] Smith, Nigel, Motors as Generator for Micro-Hydro Power, London Uk, 2001.
- [8] Oliveira, Dorian M.N; Martinez, Carlos B; Silva, Selênio R; Alvim Filho, Aymoré de C. Sistemas de fornecimento de energia elétrica híbrido solar hidráulico. 3º Encontro de energia no meio rural-2000, UNICAMP -Campinas - SP.