



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
MAQUINAS DE FLUXO I – ENG03332  
Prof. Sérgio Luiz Frey



## DETERMINAÇÃO DO PONTO DE FUNCIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE FLUXO GERADORA

GAUTHIER NOISSETTE  
GUILHERME CAMARGO  
HENRIQUE SOARES ZIMMER

Porto Alegre, janeiro de 2018.

## RESUMO

Dispondo de um sistema composto por tubulações, bomba e reservatório, juntamente com instrumentos de medição apropriados, foram realizadas medições de diversos pontos de funcionamento de uma bomba centrífuga. Com esses pontos e baseando-se na fundamentação teórica foram geradas as curvas características de operação, de rendimento e de potência, em função da vazão do equipamento.

Os dados coletados foram inseridos no software Microsoft Excel em forma de tabelas para realização dos cálculos das características das curvas referentes ao sistema. Com posse dessa informação foi possível a implementação dos ajustes de curvas necessários com o auxílio de softwares matemáticos.

*Palavras-chave: Bomba centrífuga, sistema hidráulico, curvas características, ponto de funcionamento, potência, rendimento.*

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....                             | 4  |
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 5  |
| 2. OBJETIVOS .....   | 5  |
| 3. METODOLOGIA .....                                       | 5  |
| 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....                              | 7  |
| <b>4.1 Curvas de desempenho de bomba centrífugas</b> ..... | 7  |
| <b>4.2 Curva Característica da Bomba</b> .....             | 8  |
| <b>4.3 Curva Característica do Sistema</b> .....           | 8  |
| <b>4.4 Determinação dos pontos de funcionamento</b> .....  | 9  |
| <b>4.5 Potência Fornecida ao Eixo da Bomba</b> .....       | 9  |
| <b>4.6 Rendimento Total</b> .....                          | 9  |
| 5. RESULTADOS.....   | 9  |
| 6. CONCLUSÃO .....   | 13 |
| 7. REFERÊNCIAS .....                                       | 14 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $w_i$  - Energia específica requerida pelo sistema ( $J/kg$ );  
 $\rho$  - Massa específica do fluido de trabalho ( $kg/m^3$ );  
 $z_d$  - Cota de referência do ponto de descarga ( $m$ );  
 $z_s$  - Cota de referência do ponto de sucção ( $m$ );  
 $v_d$  - Velocidade do fluido no ponto de descarga ( $m/s$ );  
 $v_s$  - Velocidade do fluido no ponto de sucção ( $m/s$ );  
 $g$  - Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  
 $Q$  - Vazão na canalização ( $m^3/h$ );  
 $Q_i$  - Vazão na canalização na  $i$ -ésima medição ( $m^3/h$ );  
 $D_d$  - Diâmetro da canalização de descarga ( $m$ );  
 $D_s$  - Diâmetro da canalização de sucção ( $m$ );  
 $p_d$  - Pressão de descarga ( $N/m^2$ );  
 $p_s$  - Pressão na superfície do reservatório de sucção ( $N/m^2$ );  
 $H_i$  - Altura manométrica da  $i$ -ésima medição ( $m$ );  
 $H_G$  - Altura geométrica ( $m$ );  
 $K'$  - Características do sistema ( $m^{-5}s^2$ );  
 $P_e$  - Potência fornecida ao eixo da bomba ( $W$ );  
 $I$  - Corrente elétrica ( $A$ );  
 $V$  - Tensão elétrica ( $V$ );  
 $\eta_{motor}$  - Rendimento do motor;  
 $\eta_{total}$  - Rendimento total do sistema;

## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das curvas características das máquinas de fluxo e das peculiaridades inerentes a cada tipo de máquina fornece uma base confiável para o projetista de uma nova instalação e uma orientação segura para o usuário, quando esse se depara com um problema de funcionamento.

Neste trabalho temos como objetivo calcular as curvas características do sistema em que temos em operação uma máquina de fluxo geradora, componente muito comum em instalações industriais. Com isto, obtemos o ponto de funcionamento da máquina, que se dará na intersecção da curva característica do sistema com a curva característica da bomba.

Através dos conceitos adquiridos em aula e das medições realizadas na bancada do LAMAC (Laboratório de Mecânica de Fluidos Aplicada Computacional) foram construídos os gráficos destas curvas.

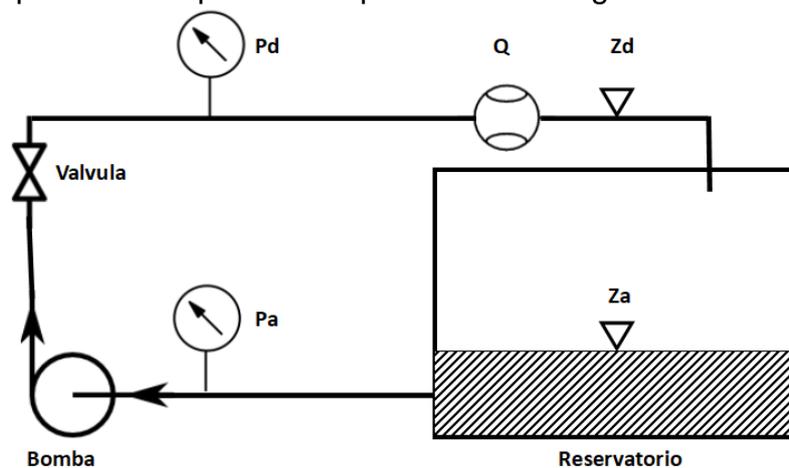
## 2. OBJETIVOS

Através de diversas medições realizadas num sistema hidráulico em funcionamento visou-se determinar:

- Curvas características da bomba utilizada;
- Curvas de potência da bomba;
- Curvas de rendimento total.

## 3. METODOLOGIA

Partindo do sistema formado pela tubulação, bomba e reservatório, em circuito fechado, a vazão da bomba foi variada através da abertura ou fechamento de uma válvula, que conforme é fechada ocorre o estrangulamento do fluxo do fluido de trabalho e cinco medições foram realizadas para cada vazão. O esquema do dispositivo é apresentado na figura 1.



Figuras 1: Esquema do ensaio em estudo

Para cada ponto coletado foram realizadas medições de pressão de admissão e descarga, dados de potência e de vazão da bomba.

As pressões foram obtidas através das indicações dos manômetros ligados a entrada e saída da bomba, e a potência foi obtida através da corrente

elétrica consumida pelo motor da bomba. A vazão, por sua vez, foi indicada por um medidor de vazão ligado à tubulação d'água.

As Figuras 2 e 3 mostram o sistema referente ao experimento utilizado para obtenção da curva característica da bomba.



Figuras 2 e 3 – O sistema referente ao experimento.

A Figura 4 mostra o medidor de vazão utilizado no experimento. Isso é um medidor de volume usado para o faturamento de água pelos distribuidores. A vazão é obtida pela diferença de valor do volume acumulado entre dois pontos de medição num tempo determinado.



Figura 4 – Medidor de vazão do sistema

### 3.1. Dados fornecidos pelo fabricante

O modelo da bomba analisada é TBHLI (Figura 5) com potência nominal de  $\frac{1}{2}$  cv. Os dados fornecidos pelo fabricante (Texus) são:

- Intermediário, voluta, rotor e eixo: Aço Inox AISI 316; Temperatura da água: 5°C a 80°C; Proteção: IP 55; Tensão: 220 V; Frequência: 60 Hz; Temperatura ambiente (local instalação): 0°C a 40°C; Pressão máx. na sucção: 40 mca; Conexões: Suc. 1.1/4" e Rec. 1" BSP; Peso: 8,5 kg; Baixo nível de ruído; Motor com protetor térmico e capacitor permanente.

A Figura 5 apresenta a bomba utilizada para o experimento.



Figura 5 – Bomba centrífuga Texus TBHLI

A figura 6 apresenta as curvas de desempenho da bomba para potências de  $\frac{1}{2}$  CV e 1 CV. O modelo usado no experimento é o menor.

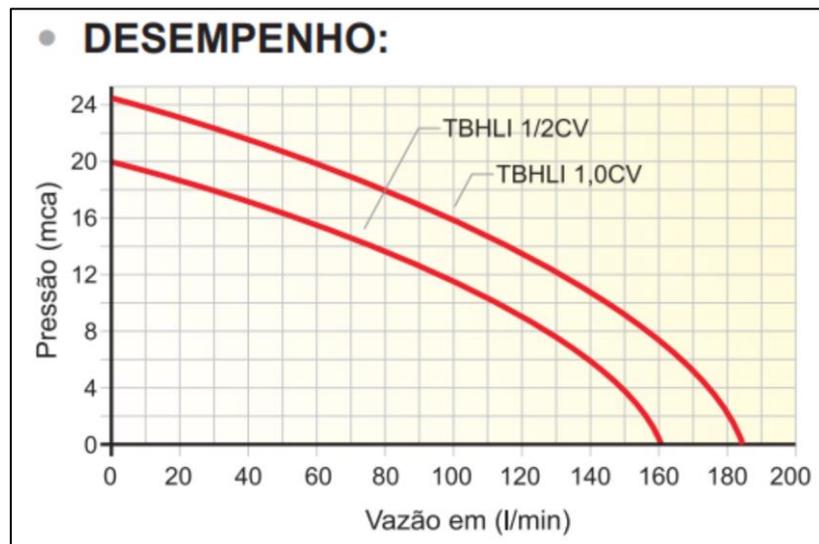


Figura 6 - Curva de desempenho para as bombas TBHLI  $\frac{1}{2}$  CV.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 Curvas de desempenho de bomba centrífugas

Quando se busca obter a capacidade e a pressão necessária para o funcionamento de um sistema, se utiliza a ajuda de um gráfico chamado Curva do Sistema. De forma similar o gráfico de variação da capacidade versus a pressão, para uma bomba particular, define a curva característica de desempenho da bomba.

Os fabricantes de bombas tentam adequar à curva do sistema fornecida pelo usuário, com a curva de uma bomba que satisfaça estas necessidades, tão próximo quanto possível. O ponto de interseção da curva da bomba com a curva de resistência do sistema é o ponto de operação desse sistema de bombeamento. O ponto operacional de ambos, bomba e processo são obtidos na interseção das duas curvas. Infelizmente, não é possível que um ponto operacional atenda todas as condições operacionais desejadas. Um exemplo comum para tal efeito ocorre quando a válvula de descarga é estrangulada, isso resulta no deslocamento para a esquerda da curva de resistência do sistema, sendo acompanhada pelo deslocamento do ponto operacional.

#### 4.2 Curva Característica da Bomba

Para a determinação da curva da bomba, é estabelecido um balanço de energia entre os reservatórios de sucção e de descarga. Como as medições foram realizadas na saída da bomba, os termos de perda de carga nos trechos de canalização de sucção e recalque são nulos. Portanto a equação para a energia específica requerida pelo sistema se torna:

$$w_i = \left( \frac{p_d - p_s}{\rho} + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2} + g(z_d - z_s) \right)_i \quad (1)$$

Onde:

$$v_d = \frac{4Q}{\pi D_d^2} \text{ e } v_s = \frac{4Q}{\pi D_s^2} \quad (2)$$

Podemos relacionar a energia específica requerida pelo sistema calculada pela equação (1) com a altura manométrica através da equação:

$$H_i = \frac{w_i}{g} \quad (3)$$

Os valores obtidos para  $H_i$  podem ser relacionados com as respectivas vazões  $Q_i$ , dessa forma, gerando pontos da curva característica da bomba.

#### 4.3 Curva Característica do Sistema

Para a construção da curva característica do sistema tendo os pontos de funcionamento conhecidos, é necessário o conhecimento da característica do sistema ou da canalização. Partindo da equação da curva do sistema:

$$H = H_G + K' \frac{Q^2}{3600} \quad (4)$$

onde a vazão está em  $\frac{m^3}{h}$ , podemos determinar as características do sistema, para cada um dos pontos de funcionamento pela equação:

$$K'_i = \frac{H_i - H_G}{\left(\frac{Q_i}{3600}\right)^2} \quad (5)$$

Onde:

$$H_G = z_d - z_s \quad (6)$$

Conhecendo-se  $K'_i$ , podemos traçar a curva do sistema, fazemos isso atribuindo valores para  $Q_i$  e calculando o H correspondente pela eq.(7):

$$H(K'_i) = H_G + K'_i Q_i^2 / 3600 \quad (7)$$

Por praticidade utilizamos as próprias vazões medidas no experimento e então interpolamos os resultados.

#### 4.4 Determinação dos pontos de funcionamento

O ponto de funcionamento é a intersecção entre a curva do sistema e a curva da bomba e, geralmente, é diferente do ponto nominal (de projeto) da bomba.

#### 4.5 Potência Fornecida ao Eixo da Bomba

Para a determinação da potência fornecida ao eixo da bomba, tendo como parâmetros principais a tensão da rede elétrica e a corrente elétrica, a equação é:

$$P_e = VI \cos \phi \eta_{motor} \quad (8)$$

Onde  $\cos \phi = 0,72$  e  $\eta_{motor} = 0,664$  conforme catálogo weg. A tensão elétrica da rede é 220 V.

#### 4.6 Rendimento Total

Para a obtenção do rendimento total da bomba centrífuga, temos que relacionar a potência fornecida ao eixo com a potência de recalque. A equação que relaciona essas potências e fornece o valor do rendimento total é:

$$\eta_{total} = \frac{\rho Q W}{P_e} \quad (9)$$

## 5. RESULTADOS

As propriedades do sistema analisado no experimento, incluindo a bomba, a canalização e o fluido, encontram-se na Tabela 1. Optou-se por utilizar o valor real da densidade da água, valor este retirado de [3].

Tabela 1 - Propriedades do sistema analisado

| Propriedade                    | Valor                  |
|--------------------------------|------------------------|
| $\rho$                         | 1000 kg/m <sup>3</sup> |
| g                              | 9,81 m/s <sup>2</sup>  |
| <b>Dd</b>                      | 25,4 mm                |
| <b>Ds</b>                      | 33,5 mm                |
| <b>Hg</b>                      | 410 mm                 |
| <b>Zd-Zs</b>                   | 0,15 mm                |
| <b><math>\eta</math> motor</b> | 0,664                  |
| <b>Voltagem</b>                | 220 V                  |
| <b>cos<math>\Phi</math></b>    | 0,72                   |

Após a medição de cinco pontos foi possível gerar a Tabela 2 contendo os dados referentes a pressão, vazão e corrente elétrica para cada ponto do sistema.

Tabela 2 - Dados medidos do experimento

| Ponto    | Pd<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pd (SI)<br>(N/m <sup>2</sup> =Pa) | Ps<br>(mmHg) | Ps (SI)<br>(N/m <sup>2</sup> =Pa) | Q<br>(m <sup>3</sup> /h) | Q (SI)<br>(m <sup>3</sup> /s) | I (SI)<br>(A) |
|----------|------------------------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------|
| <b>1</b> | 1.65                         | 161810.55                         | 0            | 0                                 | 0                        | 0.000000                      | 1.80          |
| <b>2</b> | 1.55                         | 152003.85                         | -10          | -1333.22                          | 1.200                    | 0.000333                      | 1.97          |
| <b>3</b> | 1.45                         | 142197.15                         | -30          | -3999.66                          | 1.680                    | 0.000467                      | 2.03          |
| <b>4</b> | 1.40                         | 137293.80                         | -40          | -5332.88                          | 2.268                    | 0.000630                      | 2.10          |
| <b>5</b> | 1.30                         | 127487.10                         | -50          | -6666.10                          | 2.628                    | 0.000730                      | 2.20          |

Com esses dados e as equações (1) e (3), construiu-se a Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Pontos da curva característica da bomba

| Ponto    | H (m.c.a.)  | W (J/kg)    |
|----------|-------------|-------------|
| <b>1</b> | 16.64444954 | 163.28205   |
| <b>2</b> | 15.79546107 | 154.953473  |
| <b>3</b> | 15.08179007 | 147.9523605 |
| <b>4</b> | 14.74167056 | 144.6157882 |
| <b>5</b> | 13.89599078 | 136.3196695 |

Uma vez calculadas as características da bomba apresentadas na Tabela 3, foram obtidas as informações a respeito da curva característica do sistema com o auxílio das equações (5) e (7). Estes valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Pontos da curva característica do sistema

| Ponto | K'          | H(K'1) | H(K'2)   | H(K'3)   | H(K'4)   | H(K'5)   |
|-------|-------------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 1     |             | 0.41   | 0.41000  | 0.41000  | 0.41000  | 0.41000  |
| 2     | 138469149.6 | 0.41   | 15.79546 | 7.89454  | 4.42211  | 3.22187  |
| 3     | 67360841.27 | 0.41   | 30.56981 | 15.08179 | 8.27487  | 5.92204  |
| 4     | 36109021.31 | 0.41   | 55.36841 | 27.14552 | 14.74167 | 10.45427 |
| 5     | 25306794.47 | 0.41   | 74.20021 | 36.30659 | 19.65250 | 13.89599 |

Tendo obtido os valores da curva característica da bomba e da curva característica do sistema, estes dados puderam ser plotados. Foram plotadas uma curva característica da bomba e cinco curvas características possíveis do sistema, uma para cada ponto medido. Estas curvas podem ser observadas no gráfico da Figura 7.

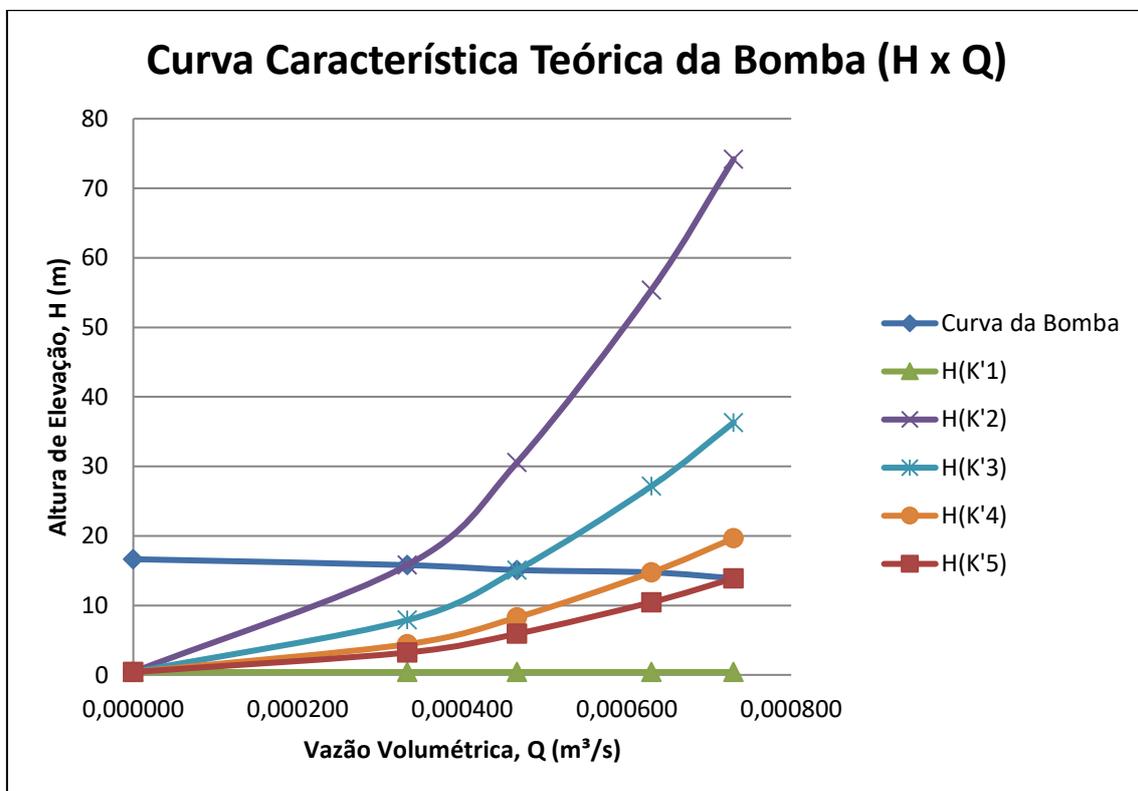


Figura 7 – Curva característica da bomba

A potência no eixo, por sua vez, foi calculada com o auxílio da equação (8). Estes dados são apresentados na Tabela 5, onde é mostrado o valor da potência no eixo referente a cada ponto medido. O gráfico da Figura 8 mostra a relação entre a potência no eixo e as vazões medidas no experimento.

Tabela 5 – Potência no eixo

| Ponto | Pe (W)   |
|-------|----------|
| 1     | 189.3197 |
| 2     | 207.1999 |
| 3     | 213.5105 |
| 4     | 220.8730 |
| 5     | 231.3907 |

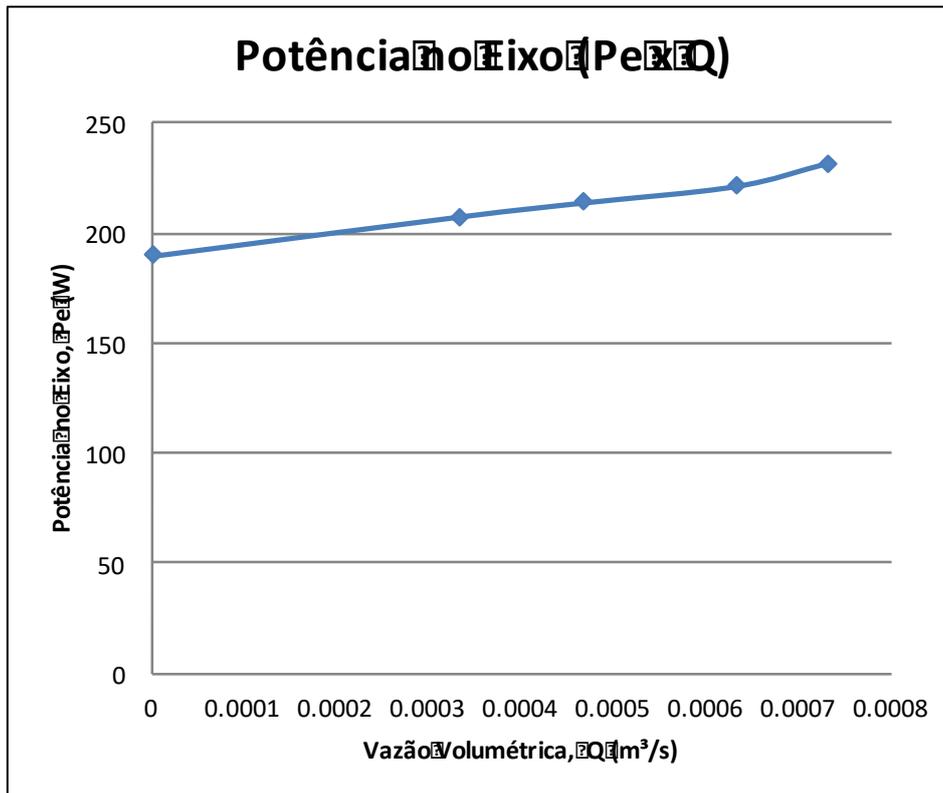


Figura 8 - Potência no eixo versus vazão

Obtidos os dados referentes à potência no eixo, estes foram utilizados para calcular, através da equação (9), o rendimento total para cada ponto. Os valores obtidos após a realização destes cálculos podem ser observados na Tabela 6. Com base nos valores mostrados na Tabela 6, foi possível construir o gráfico do rendimento total versus vazão, apresentado na Figura 9.

Tabela 6 - Rendimento total

| Ponto | $\eta_t$ |
|-------|----------|
| 1     | 0.00000  |
| 2     | 0.24841  |
| 3     | 0.32227  |
| 4     | 0.41105  |
| 5     | 0.42857  |

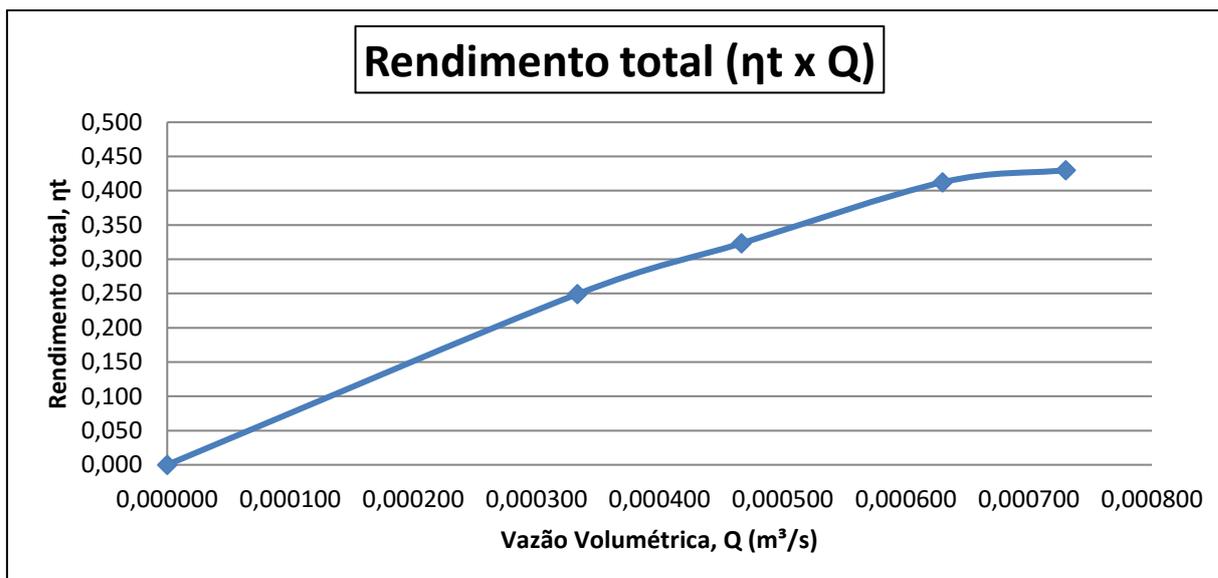


Figura 9 - Rendimento Total versus vazão

Os valores dos rendimentos obtidos na tabela 6 e na figura 9 são rendimentos baixos que são característicos de uma bomba de pequeno porte.

## 6. CONCLUSÃO

Com a utilização do embasamento teórico associado a um *software* matemático, foi possível a construção das curvas características de funcionamento da bomba analisada em processo experimental no LAMAC. Os resultados assumiram um comportamento esperado ao de funcionamento de uma bomba de pequeno porte, que foi, de fato, o tipo de bomba da qual os dados foram coletados.

As curvas, obtidas através de um apresentaram um comportamento parecido com as curvas especificadas com o fabricante, o que é condizente. Mas a curva não é extremamente fiável. A precisão dos dados coletados não é muita elevada devido a precisão baixa dos instrumentos de medições, e a baixa qualidade de leitura dos resultados. Isso é válido para o medidor de volume e os manômetros. A curva experimental pode ser melhorada pela coleta de um maior número de pontos, o que é difícil em razão dos problemas de precisão descritos precedentemente e da pouca sensibilidade da válvula de estrangulamento.

Contudo os resultados obtidos foram importantes didaticamente, pois ajudaram a enfatizar os conteúdos apresentados em sala de aula, e se mostraram pertinentes com o que se esperava do experimento realizado.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] HENN, E.L. Máquinas de Fluido. Santa Maria: UFSM, 2001.
- [2] Catálogo Geral WEG online, acesso em 18/11/2009.
- [3] Fox, R.W., McDonald, A.T. e Pritchard, P.J.; “ Introdução à Mecânica dos Fluidos”, LTC, 6ª ed. (2004).