



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -XIV

GRUPO DE ESTUDO de EFICIÊNCIA ENERGÉTICA e GESTÃO da TECNOLOGIA, da INOVAÇÃO e da EDUCAÇÃO - GET

UM PROGRAMA DE EDUCAÇÃO VOLTADO PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Jair Nascimento Filho (*)
LENHS-UFMG

Manuel Losada y Gonzalez
LENHS-UFMG

Meinhard Sesselmann
LENHS-UFMG

RESUMO

Um programa de educação voltado para a eficiência energética e hidráulica, criado pelo LENHS (Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento) – UFMG, vem sendo aplicado nos cursos de graduação da EE.UFMG. O programa consiste em desenvolver metodologias, calcadas em conceitos de metrologia, criar e ministrar aulas de laboratório para os cursos de graduação em engenharia com o objetivo de desenvolver, difundir e praticar no ensino de graduação, metodologias relacionadas ao uso eficiente de água e energia elétrica.

Uma das ações que visam aumentar a eficiência de sistemas fluidomecânicos é a determinação confiável de variáveis. Embora a aplicação de conceitos de metrologia, em algumas áreas da engenharia, como por exemplo, usinagem, já esteja satisfatoriamente bem estabelecida (1), o mesmo ainda não acontece no caso de medição de grandezas de sistemas fluidomecânicos. Nesse trabalho, descreve-se a aplicação de conceitos metrológicos no estudo e análise de estações de abastecimento de água. Curvas características fundamentadas em conceitos de metrologia são obtidas para os conjuntos motobombas, a partir de ensaios realizados nas bancadas do LENHS. O treinamento também qualifica o indivíduo para diagnosticar instrumentos de medição que são adequados ou que poderiam ser substituídos com o objetivo de se obter cálculo de eficiência confiável e com menor incerteza.

PALAVRAS-CHAVE

Metrologia, Eficiência, Motobomba, Vazão.

1.0 - INTRODUÇÃO

Medições confiáveis são fundamentais para a análise técnica e econômica do desempenho de máquinas existentes nos sistemas de abastecimento de água. Com ajuda das estações de bombeamento do LENHS (3), ensaios em conjuntos moto bombas são realizados em aulas dos cursos de graduação em engenharia, procurando determinar as curvas características do conjunto motobomba, as quais são:

- $(H \times Q)_n$ (altura manométrica H versus vazão Q , a velocidade de rotação n constante);
- $(P_{el} \times Q)_n$ (Potencia elétrica P_{el} versus Q , n constante) e
- $(\eta \times Q)_n$ (eficiência do conjunto motobomba versus Q , n constante).

Alguns dos mais importantes resultados de medição, como altura manométrica H e eficiência η , são determinados através de medição indireta, onde o mensurando final é função de uma série de variáveis individuais e a incerteza do mensurando final deve ser calculado através de uma combinação adequada das incertezas dessas variáveis individuais. Consequentemente, o tratamento de dados que compõem as curvas características assim como a análise dos resultados, é realizado de acordo com uma metodologia, calcada em conceitos de metrologia, desenvolvida e utilizada pela equipe do LENHS.

2.0 - ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO

A estação em funcionamento, aspira e opera o fluido que é devolvido para o reservatório de 10m³ de capacidade. Ela pode atender a uma demanda de até 0,30m³/s e baixas pressões (13m de altura manométrica, por exemplo) ou de até 60m de altura manométrica (e baixas vazões, 0,003m³/s, por exemplo).



FIGURA 1 – Estação de bombeamento

Os principais componentes são:

- Duas turbobombas de 10 cv cada, marca EHF modelo 65-25; rotor de 550mm, motor trifásico, rotação nominal 1750rpm;
- Dois manômetros faixa de 0 a 10 kgf/cm², marca Woler, valor de divisão 0,5kgf/cm², resolução aparente 0,1kgf/cm²;
- Dois manovacuômetros – 1 a 1kgf/cm² marca MTR, resolução de 0,02kgf/cm² (ou 2kPa);
- Medidor de vazão eletromagnético Endress+Hauser, erro máximo $E_{\text{máx}}/Q$ da ordem de 0,6% do valor indicado;
- Cinco válvulas de gaveta manuais de 3”;
- Uma válvula de gaveta motorizada de 4”;
- Dois variadores de frequência marca WEG CFW09.

3.0 ENSAIO

O ensaio foi realizado com coleta de dados em 9 pontos de operação, 10 leituras em cada ponto (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Coleta de dados referente ao ponto de operação n°7, da Bomba B2 e conversão para o SI.

Horário [h:min]	p_e [kgf/cm ²]	P_s [kgf/cm ²]	Q [l/s]	P_{el} [kW]	p_e [Pa]	P_s [Pa]	$Q \times 10^3$ [m ³ /s]
13:05	-0,06	2,5	12,2	7,1	-5884,0	245166,3	12,2
13:07	-0,06	2,5	12,2	7,2	-5884,0	245166,3	12,2
13:09	-0,06	2,5	12,3	6,9	-5884,0	245166,3	12,3
13:11	-0,06	2,5	12,2	6,9	-5884,0	245166,3	12,2
13:13	-0,06	2,5	12,4	7,1	-5884,0	245166,3	12,4
13:15	-0,06	2,5	12,4	7,1	-5884,0	245166,3	12,4
13:17	-0,06	2,4	12,4	6,9	-5884,0	235359,6	12,4
13:29	-0,06	2,4	12,6	7,2	-5884,0	235359,6	12,6
13:21	-0,06	2,4	12,6	7,1	-5884,0	235359,6	12,6
13:23	-0,06	2,4	12,7	6,9	-5884,0	235359,6	12,7

4.0 METODOLOGIA

A determinação de variáveis é realizada com ajuda das equações (1) e (2), em que $u(x)$ é incerteza padrão de x , $k_{95\%}$, é coeficiente de Student, e $U_{95\%}$ incerteza expandida com nível de confiança de aproximadamente 95%.

$$x = \bar{x} \pm U_{95\%}(x) \quad (1)$$

$$U_{95\%}(x) = k_{95\%}u(x) \quad (2)$$

A determinação de η , P , e H , é realizada com ajuda de (3), (4), e (5), em que p_e é pressão do fluido à entrada da bomba, p_s é pressão à saída, m diferença de cota entre os centros dos medidores de pressão e γ , peso específico. De (3), (4), e (5), obtêm-se (6).

$$\eta = \frac{P}{P_{el}} \quad (3)$$

$$P = \gamma QH \quad (4)$$

$$H = \frac{p_s \pm p_e}{\gamma} + m \quad (5)$$

Utilizando-se os dados coletados, e com ajuda das equações (1), até (6), obtêm-se a eficiência para o ponto de operação considerado:

$$\eta = \frac{\bar{Q}}{\bar{P}_{el}} [(p_s \pm p_e) + \bar{m}\bar{\gamma}] \pm k_{95\%} u(\eta) \quad (6a)$$

$$H = \left[\frac{(p_s \pm p_e)_{med}}{\bar{\gamma}} + \bar{m} \right] \pm k_{95\%} u(H) \quad (6b)$$

A incerteza padrão $u(\eta)$, é determinada conforme ISO-GUM (2):

$$\begin{aligned} u^2(\eta) &= (u^*(p_s))^2 + (u^*(p_e))^2 + (u^*(m))^2 + (u^*(\gamma))^2 + (u^*(Q))^2 + (u^*(P_{el}))^2 \\ u^2(\eta) &= \left(\frac{\bar{Q}}{\bar{P}_{el}} u(p_s) \right)^2 + \left(\frac{\bar{Q}}{\bar{P}_{el}} u(p_e) \right)^2 + \left(\frac{\bar{Q}}{\bar{P}_{el}} u(m) \right)^2 + \left(\frac{\bar{m}\bar{Q}}{\bar{P}_{el}} u(\gamma) \right)^2 + \left(\frac{\bar{\eta}}{\bar{Q}} u(Q) \right)^2 + \left(\frac{\bar{\eta}}{\bar{P}_{el}} u(P_{el}) \right)^2 \quad (7a) \\ u^2(H) &= (u^+(p_s))^2 + (u^+(p_e))^2 + (u^+(m))^2 + (u^+(\gamma))^2 \\ u^2(H) &= \left(\frac{1}{\bar{\gamma}} u(p_s) \right)^2 + \left(\frac{1}{\bar{\gamma}} u(p_e) \right)^2 + (u(m))^2 + \left(\frac{(p_s \pm p_e)_{med}}{(\bar{\gamma})^2} u(\gamma) \right)^2 \quad (7b) \end{aligned}$$

Em que $u(p_e)$, $u(p_s)$, $u(Q)$, $u(P_{el})$, $u(\gamma)$, e $u(m)$, são incerteza padrão de p_e , de p_s , Q , P_{el} , γ e m respectivamente. Para a determinação das incertezas padrão de p_s , p_e , P_{el} , γ , m , e Q , é necessário se considerar as características dos instrumentos de medição e a variabilidade do escoamento (n leituras em cada ponto de operação considerado) em equação do tipo equação (8). Como exemplo toma-se o ponto de operação nº7 (ver tabela 2).

$$u(x) = \sqrt{u(x)_{medidor}^2 + u(x)_{processo}^2} \quad (8)$$

A incerteza $u(x)_{medidor}$ vinculada às características físicas do instrumento de medição, e aquela $u(x)_{processo}$ vinculada à variabilidade do fenômeno, são fornecidas com ajuda das equações (9) e (10) respectivamente.

$$u(x)_{medidor} = \frac{E_{máx}(x)}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$u(x)_{processo} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (10)$$

Para p_s , estima-se $E_{máx}$ de 20kPa, e considera-se distribuição retangular (distribuição utilizada nesse trabalho):

$$\begin{aligned} u(p_s)_{medidor} &= \frac{E_{máx}(p_s)}{\sqrt{3}} = \frac{20kPa}{\sqrt{3}} = 11,5kPa \\ u(p_s)_{processo} &= s(p_s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_{si} - \bar{p}_s)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (p_{si} - \bar{p}_s)^2}{9}} = 5kPa \end{aligned}$$

$$u(p_s) = \sqrt{11,5^2 \text{ kPa}^2 + 5^2 \text{ kPa}^2} = 12,5 \text{ kPa}$$

$$u^*(p_s) = \frac{\bar{Q}}{P_{el}} u(p_s) = \frac{12,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}}{7,040 \text{ kW}} 12,5 \text{ kPa} = 0,022$$

Tabela 2 – Tratamento de dados referente ao ponto de operação n°7, da Bomba B2.

p_e [kPa]	p_s [kPa]	$Q \times 10^3$ [m³/s]	P_{el} [kW]	$p_s \pm p_e$ [kPa]			
-5,9	245	12,20	7,1	250,9			
-5,9	245	12,22	7,2	250,9			
-5,9	245	12,33	6,9	250,9			
-5,9	245	12,21	6,9	250,9			
-5,9	245	12,4	7,1	250,9			
-5,9	245	12,44	7,1	250,9			
-5,9	235	12,47	6,9	240,9			
-5,9	235	12,69	7,2	240,9			
-5,9	235	12,62	7,1	240,9			
-5,9	235	12,71	6,9	240,9			
p_e med [kPa]	p_s med [kPa]	Q med [m³/s]	P_{el} [kW]	$(p_s \pm p_e)$ med [kPa]	m_{med} [m]	γ_{med} [N/m³]	
-5,9	241	0,01249	7,04	246,9	0,0	9785,52	
E_{max} [kPa]	E_{max} [kPa]	E_{max} [m³/s]	E_{max} [kW]		E_{max} [m]	E_{max} [N/m³]	
2	20	0,00004	0,20		0,003	14,66	
$u(p_e)_{medidor}$ [kPa]	$u(p_s)_{medidor}$ [kPa]	$u(Q)_{medidor}$ [m³/s]	$u(P_{el})_{medidor}$ [kW]		$u(m)_{medidor}$ [m]	$u(\gamma)_{medidor}$ [N/m³]	
1,1	11,5	0,00004	0,12		0,002	0,0	
$u(p_e)_{process}$ [kPa]	$u(p_s)_{process}$ [kPa]	$u(Q)_{process}$ [m³/s]	$u(P_{el})_{process}$ [kW]		$u(m)_{process}$ [m]	$u(\gamma)_{process}$ [N/m³]	
9×10^{-28}	5	0,00019	0,13		0,0	8,47	
$u(p_e)$ [kPa]	$u(p_s)$ [kPa]	$u(Q)$ [m³/s]	$u(P_{el})$ [kW]		$u(m)$ [m]	$u(\gamma)$ [N/m³]	
1,1	12,5	0,00019	0,17		0,002	8,47	
$u^*(p_e)_{medidor}$ [m]	$u^*(p_s)_{medidor}$ [m]	$u^*(Q)_{medidor}$ [m]	$u^*(P_{el})_{medidor}$ [m]		$u^*(m)_{medidor}$ [m]	$u^*(\gamma)_{medidor}$ [m]	
0,002	0,020	0,00072	0,0038		0,002	0,0	
$u^*(p_e)_{process}$ [m]	$u^*(p_s)_{process}$ [m]	$u^*(Q)_{process}$ [m]	$u^*(P_{el})_{process}$ [m]		$u^*(m)_{process}$ [m]	$u^*(\gamma)_{process}$ [m]	
$1,5 \times 10^{-26}$	0,008	0,00341	0,0041		0,0	0,0	
$u^*(p_e)$ [m]	$u^*(p_s)$ [m]	$u^*(Q)$ [m]	$u^*(P_{el})$ [m]		$u^*(m)$ [m]	$u^*(\gamma)$ [m]	η_{med} 0,224 $u(\eta)$ 0,011
0,002	0,022	0,00698	0,0106		3×10^{-5}	2×10^{-8}	
$u^+(p_e)_{medidor}$ [m]	$u^+(p_s)_{medidor}$ [m]				$u^+(m)_{medidor}$ [m]	$u^+(\gamma)_{medidor}$ [m]	
0,112	1,175				0,002	0,0	
$u^+(p_e)_{process}$ [m]	$u^+(p_s)_{process}$ [m]				$u^+(m)_{process}$ [m]	$u^+(\gamma)_{process}$ [m]	
0,0	0,510				0,0	0,022	
$u^+(p_e)$ [m]	$u^+(p_s)$ [m]				$u^+(m)$ [m]	$u^+(\gamma)$ [m]	H_{med} [m] 30,04 $u(H)$ [m] 1,28
0,115	1,278				0,002	0,026	

De modo análogo, obtêm $u(p_e)$, $u(P_{el})$ e $u(m)$ (ver Tabela 2). Observe-se que a medição de cota entre medidores da pressão não depende de processo, apenas de dados construtivos, portanto $u_{processo}(m)$ é nula. Observe-se que para Q , $E_{máx}/Q = 0,006$ (fornecido pelo fabricante), e que $E_{máx}$ será obtido por $(E_{máx}/Q)Q$ (ver Tabela 2).

Para a determinação de $u(\gamma)_{processo}$ foi considerado variação de temperatura de 15°C a 30°C. O volume específico obtido de tabelas de propriedades termodinâmicas é de $v_{15C} = 0,001000 \text{ m}^3/\text{kg}$ e $v_{30C} = 0,001004 \text{ m}^3/\text{kg}$, o que acarreta peso específico de $\gamma_{15C} = 9800,19 \text{ N/m}^3$ e $\gamma_{30C} = 9770,86 \text{ N/m}^3$. O erro máximo foi considerado como a diferença entre o valor médio e os valores limites da faixa considerada. O peso específico médio é $9785,52 \text{ N/m}^3$, o que acarreta erro máximo de $14,66 \text{ N/m}^3$ (ver Tabela 2). Erros da tabela são insignificantes em relação à grande variação de temperatura adotada (já é pessimista o suficiente), e portanto, $u(\gamma)_{medidor}$, ou seja, $u(\gamma)_{tabela}$ é nula (ver Tabela 2).

A incerteza padrão $u(\eta)$ é obtida com ajuda da equação (7a) (ver Tabela 2):

$$u(\eta) = \sqrt{(0,022)^2 + (0,002)^2 + (0,00003)^2 + (2 \times 10^{-8})^2 + (0,0069)^2 + (0,0106)^2} = 0,025 \quad (11)$$

Determina-se $k_{95\%}$ em função do grau de liberdade v_η , o qual pode ser determinado com ajuda da equação de Welch-Satterthwaite.

$$\frac{u(\eta)^4}{v_\eta} = \frac{u^*(p_s)^4}{v_{p_s}} + \frac{u^*(p_e)^4}{v_{p_e}} + \frac{u^*(m)^4}{v_m} + \frac{u^*(\gamma)^4}{v_\gamma} + \frac{u^*(Q)^4}{v_Q} + \frac{u^*(P_{el})^4}{v_{P_{el}}} \quad (12)$$

Determina-se o grau de liberdade v_x com ajuda de (13), em que $v_{x \text{ medidor}} \approx \infty$, e $v_{x \text{ processo}} = n-1 = 9$, utilizando-se variáveis do tipo $u^*(x)_{medidor}$ e $u^*(x)_{processo}$ (ver Tabela 2). Por exemplo, para p_s :

$$\frac{u^*(x)^4}{v_x} = \frac{(u^*(x)_{medidor})^4}{v_{x \text{ medidor}}} + \frac{(u^*(x)_{processo})^4}{v_{x \text{ processo}}} \quad (13)$$

$$u^*(p_s)_{medidor} = \frac{\bar{Q}}{P_{el}} u(p_s)_{medidor} = \frac{12,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{7040 \text{ W}} 11,5 \text{ kPa} = 0,0203$$

$$u^*(p_s)_{processo} = \frac{\bar{Q}}{P_{el}} u(p_s)_{processo} = \frac{12,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{7040 \text{ W}} 5 \text{ kPa} = 0,0088$$

$$\frac{0,022^4}{v_{p_s}} = \frac{0,0203^4}{\infty} + \frac{0,0088^4}{9}$$

v_{p_s} é calculado como 351,5, adota-se grau de liberdade $v_{p_s} \approx \infty$. De modo análogo, obtêm-se $v_{p_e} \approx \infty$, $v_m \approx \infty$, $v_\gamma \approx \infty$, v_Q igual a 10, e $v_{P_{el}}$ igual a 30. Com ajuda de (12) determina-se $v_\eta = 602,81$, e adotando-se v_η igual a ∞ , tem-se $k_{95\%} = 2,0$. Com ajuda de (1), (2), (6) e (7), obtêm-se a incerteza expandida $U_{95\%}(\eta)$ e a eficiência η (ver Tabela 3).

$$\frac{0,025^4}{v_\eta} = \frac{0,022^4}{\infty} + \frac{0,002^4}{\infty} + \frac{(3 \times 10^{-5})^4}{\infty} + \frac{(2 \times 10^{-8})^4}{\infty} + \frac{0,0069^4}{10} + \frac{0,0106^4}{30}$$

$$\bar{\eta} = \frac{0,0124 \text{ m}^3/\text{s}}{7,040 \text{ kW}} [246,9 \text{ kPa} + 0,0 \text{ m} \times 9785,52 \text{ N/m}^3 \gamma] = 0,4349$$

$$U_{95\%}(\eta) = k_{95\%} u(\eta) = 2,0 \times 0,025 = 0,05$$

$$\eta = \bar{\eta} \pm U_{95\%}(\eta) = 0,43 \pm 0,05$$

Com ajuda de (1), (2), (5), (6) e (7), obtêm-se a altura manométrica e correspondente incerteza padrão (variáveis do tipo $u^*(x)$ na Tabela 2).

$$u(H) = \sqrt{(1,278 \text{ m})^2 + (0,115 \text{ m})^2 + (0,002 \text{ m})^2 + (0,022 \text{ m})^2} = 1,283 \text{ m}$$

De modo análogo àquele utilizado para se determinar v_η e $k_{\eta 95\%}$, obtêm-se v_H e $k_{H 95\%}$. Determina-se as variáveis do tipo $u^+(x)_{\text{medidor}}$ e $u^+(x)_{\text{processo}}$ (ver Tabela 2), e obtêm-se com ajuda da equação (13), $v_{ps} \approx \infty$, $v_{pe} \approx \infty$, $v_m \approx \infty$ e $v_v \approx \infty$, o que acarreta $v_H \approx \infty$ (equação 12), e portanto $k_{95\%}=2,0$. Tem-se então, $U(H)=2,0 \times 1,28m=0,256m$.

Com o mesmo procedimento utilizado para o ponto 7, realiza-se o tratamento de dados para os demais pontos de operação, obtendo-se os resultados do ensaio (ver Tabela 3), e as curvas características (ver Figuras 2, 3, e 4).

5.0 RESULTADOS

Realiza-se uma análise crítica da influência das incertezas de cada variável presente no fenômeno físico de altura manométrica e eficiência, e da instrumentação utilizada.

Tabela 3 – Resultados do ensaio da Bomba B2.

Ponto Op.	Q [m³/s]	$\pm U(Q)$ [m³/s]	H [m]	$\pm U(H)$ [m]	PeI [kW]	$\pm U(PeI)$ [kW]	η	$\pm U(\eta)$
1	0,00297	0,00008	30,00	2,30	3,88	0,24	0,225	0,024
2	0,00451	0,00018	30,04	2,30	4,42	0,30	0,300	0,034
3	0,00622	0,00040	29,22	2,30	4,92	0,30	0,361	0,044
4	0,00753	0,00032	28,40	2,30	5,38	0,30	0,389	0,042
5	0,00909	0,00015	27,38	2,30	5,86	0,30	0,416	0,042
6	0,01051	0,00022	27,48	2,32	6,42	0,30	0,440	0,044
7	0,01243	0,00040	25,23	2,50	7,00	0,34	0,436	0,053
8	0,01371	0,00040	23,79	2,30	7,30	0,38	0,435	0,050
9	0,01546	0,00012	3,28	2,30	9,00	0,37	0,055	0,038

Na determinação de altura manométrica, a pressão medida à saída da bomba constitui a maior fonte de incerteza (ver variáveis tipo u^+ na eq. 7b). Comparada à ela, as demais podem ser consideradas insignificantes. A cota m não tem influência no processo e sua influência na medição é desprezível. A influência da temperatura é desprezível (ver $u^+(\gamma)$, tabela 2) e erros de tabela termodinâmica são desprezíveis na faixa de temperatura do ensaio.

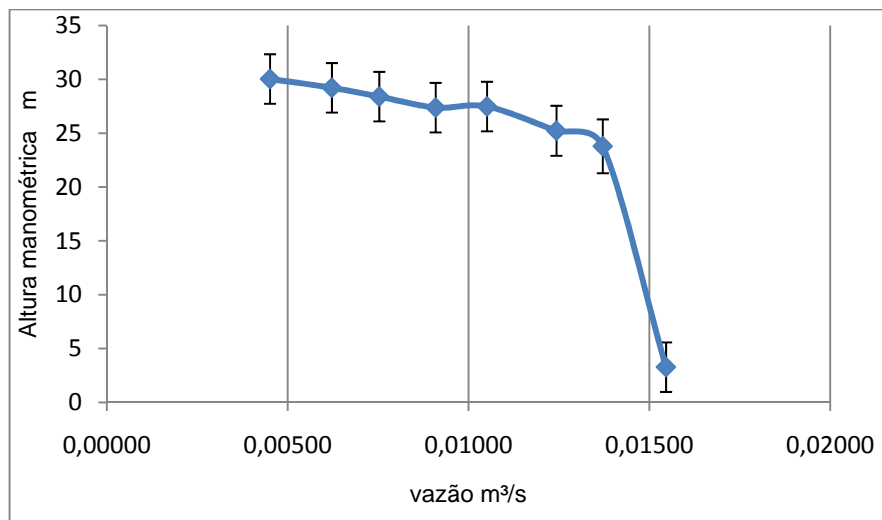


FIGURA 2 – Curva altura manométrica versus vazão

Observe-se também, que a incerteza expandida $U(H)$ (ver Tabela 3) é praticamente constante, uma vez que a variabilidade da pressão medida na saída da bomba contribui com menos da metade daquela incerteza devido às características do medidor (ver Tabela 2). Esse fato demonstra que a seleção do medidor de pressão deixa grande margem para uma possível diminuição da incerteza $U(H)$. O último ponto, uma condição de grande vazão, muito baixa pressão, e grande potência, demonstra que a vazão predomina sobre a altura manométrica em termos de potência consumida (ver Figura 2 e Figura 3).

Resultados obtidos com a eq. 7a apontam variáveis p_s e P_{el} como as maiores fontes de incerteza na determinação de eficiência (ver variáveis do tipo u^+ , Tabela 2). Portanto, nota-se que a incerteza de $U(\eta)$ varia ao longo do ensaio (ver Figura 4 e Tabela 3), uma vez que na composição da incerteza $U(P_{el})$, as duas influências – medidor e processo – são da mesma ordem de grandeza e, nesse ensaio, a incerteza oriunda da variabilidade do processo muda a cada ponto.

Observa-se também que a incerteza devido ao medidor, $u^*(Q)_{\text{medidor}}$, é inferior àquela devido ao processo,

$u^*(Q)_{\text{processo}}$ (ver Tabela 2), ou seja, a influência do processo predomina na determinação da incerteza expandida $U(Q)$. A seleção de outro medidor de menor $Em_{\text{máx}}$ não acarretaria diminuição de incerteza

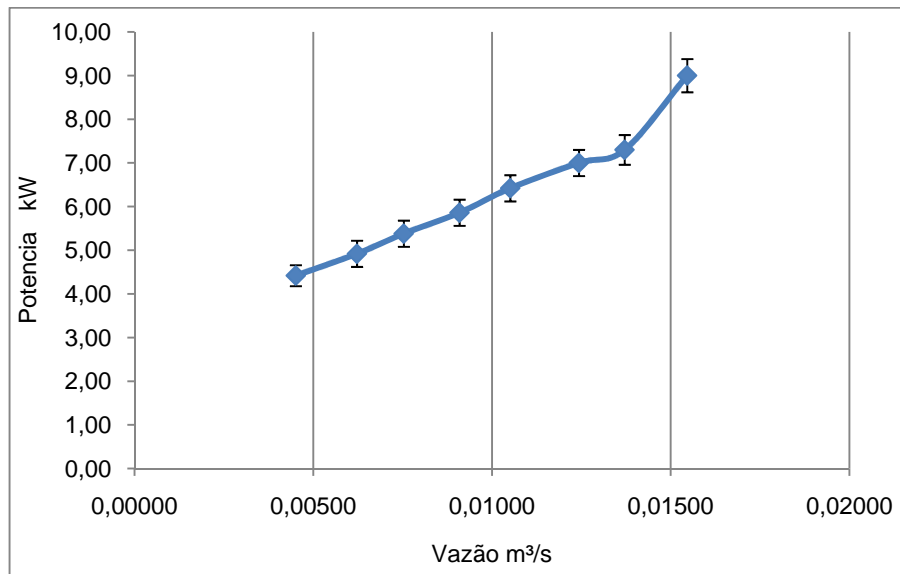


FIGURA 3 – Curva potencia versus vazão

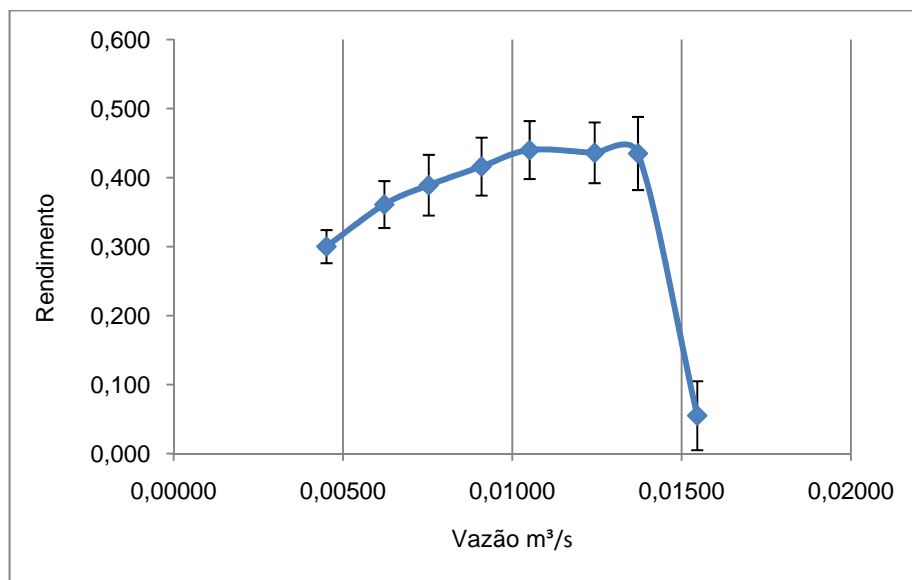


FIGURA 4 – Curva rendimento versus vazão

6.0 – CONCLUSÕES

A metodologia utilizada nesse programa se mostrou adequada para um treinamento em eficiência energética. A metodologia utilizada neste treinamento permite, também, diagnosticar quais dos instrumentos de medição são adequados e quais aqueles que deveriam ser substituídos para alcançar uma determinada meta de incerteza da eficiência energética. No problema em tela, a metodologia aplicada permite concluir que:

- A influência da temperatura e da diferença de cota entre medidores de pressão é desprezível na determinação de altura manométrica e eficiência;
- A maior influência na determinação da incerteza da eficiência é a incerteza da pressão p_s na saída da bomba. A incerteza $u^*(p_s)$ é pelo menos o dobro do valor daquela, $u^*(p_e)$, que é a segunda variável de maior influência na incerteza $u(\eta)$;
- A maior influência na determinação da incerteza da altura manométrica, é incerteza da pressão p_s na saída da bomba. A incerteza $u^*(p_s)$ é cerca de dez vezes maior do que $u^*(p_e)$, que é a segunda variável de

maior influência na a incerteza $u(H)$;

- Há uma grande margem para uma possível diminuição da incerteza de $U(\eta)$ e de $U(H)$, mediante seleção de outro medidor de pressão para p_s . Um manômetro classe 1, por exemplo, acarretaria uma incerteza de eficiência de cerca da metade do valor atual;
- Embora o medidor de potencia elétrica apresente um erro máximo (0,20kW) relativamente alto, as duas influências – medidor e processo - são da mesma ordem de grandeza. Ou seja, seria inútil a substituição desse medidor por outro de incerteza menor;
- A incerteza do medidor de vazão é aproximadamente cinco vezes menor do que a incerteza oriunda da variação do processo. Um medidor mais barato, com incerteza da ordem de cinco vezes menor, atenderia a este ensaio de forma equivalente ao atual medidor.

AGRADECIMENTO: os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro na participação no XXI SNPTTE.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) ALBERTAZZI, A., de SOUSA, A. R., Fundamentos de metrologia científica e industrial; Editora Manole, 2008.

(2) ABNT, INMETRO, SBM, Guia para a expressão da incerteza de medição – Segunda edição brasileira em língua portuguesa; Rio d Janeiro, 1998.

(3) NASCIMENTO FILHO, J., SESSELMANN, M., MARTINEZ, C. B., Caracterização de uma bancada didática de ensaios de turbobombas: um estudo metrológico; Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, XXXVII. Recife, 2009.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Manuel Losada y Gonzalez, nascido em 1953 em Maceda, Esp., é professor associado do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Recebeu os graus de barachel, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela UFMG nos anos de 1978, 1995 e 2000, respectivamente. É coordenador, em engenharia elétrica, do LENHS-UFMG. Suas áreas de pesquisa incluem sistemas elétricos de potência, eficiência energética e qualidade de energia.



Meinhard Sesselmann, nascido 1967 em Jena/Almanha, é atualmente professor associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Recebeu o grau de Dipl.-Ing. Elektrotechnik pela TU-Ilmenau/Alemanha em 1994 e o grau de doutor em Engenharia Mecânica pela UFSC em 2000. É membro do LENHS-UFMG responsável pela parte de Metrologia. Suas áreas de pesquisa incluem sistemas de medição, instrumentação e óptica aplica.



Jair Nascimento Filho, nascido em 1951 em Aimorés, M.G., é professor associado da EE.UFMG. Engenheiro mecânico pelo IPUC-MG, 1975, mestre em Eng. Mecânica pela UFMG, 1990, e doutor em Energética pela Université Toulouse III, 1997. É coordenador do LENHS-UFMG na área de engenharia mecânica. Atua nas áreas de eficiência energética, e de projeto e ensaios de turbomáquinas.