



CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA NORMALIZADO (CEN) UTILIZANDO DIFERENTES ALTURAS MANOMÉTRICAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO COM USO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Giovani, CAMPONOGARA¹; Joice, KURITZA²; Guilherme, CASTIGLIO³; Rute, FERLA⁴;
Marcelo Giulian, MARQUES⁵, Eder Daniel, TEIXEIRA⁶, Priscila, PRIEBE⁷; João, DE BORJA⁸.

¹ Eng. Mecânica, Estudante - IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil, giovani.camponogara@ufrgs.br;

² Eng. Ambiental, Doutoranda - IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil, joicekuritza@gmail.com;

³ Eng. Energia, Estudante - IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil, guilhermecastiglio@gmail.com;

⁴ Eng. Civil, Mestranda - IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil, ruteferla@hotmail.com;

⁵ Professor Titular, Ph D. – IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil, mmarques@iph.ufrgs.br;

⁶ Professor Titular, Ph D. – IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil, eder.teixeira@ufrgs.br;

⁷ Eng. Hídrica, Doutoranda – IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil, priscilaspriebe@gmail.com;

⁸ Eng. Civil, Doutorado - IPH/UFRGS, Porto Alegre – RS, Brasil, joao_gerdaudeborja@hotmail.com;

Resumo

Para contornar a dificuldade na comparação de diferentes Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), a International Water Association (IWA) propôs o uso do indicador Consumo de Energia Normalizado (CEN). O indicador representa o inverso do rendimento do conjunto motobomba e sua estimativa é feita dividindo-se a energia consumida por metro cúbico bombeado pelo fator de uniformização. Porém, no cálculo do CEN para SAA que utilizam inversor de frequência os parâmetros não são constantes. Dessa forma, foram realizados estudos visando analisar as diferenças nos valores desse indicador através de distintas possibilidades de alturas manométricas no denominador, a saber: altura manométrica média, altura manométrica referente à rotação nominal e altura manométrica mínima. Concluiu-se que as diferentes metodologias de estimativa da altura manométrica refletem diretamente no valor do indicador. Assim, tal estimativa pode fornecer valores incompatíveis com a realidade e, conseqüentemente, influenciar de forma equivocada a tomada de decisão por parte dos gestores do sistema. Para SAA's com pequeno ou nenhum desnível geométrico, a altura manométrica média é a recomendada para o cálculo do CEN.

Palavras-chave: Consumo de Energia Normalizado, Indicadores de Desempenho.

Tema: Governança e participação pública para a gestão da água.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade dos serviços de abastecimento de água no Brasil pode ser acompanhada pelo Serviço Nacional de Informação do Saneamento (SNIS), que apresenta anualmente indicadores dos serviços prestados pelas entidades. Porém, o único indicador operacional do SNIS relacionado diretamente à eficiência energética de SAA's é o Índice de consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água (IN058), expresso em kWh/m³, além de indicadores econômicos de participação da energia elétrica nas despesas operacionais (VILANOVA, 2012). Esse indicador, entretanto, é difícil de ser utilizado para comparação de diferentes sistemas de abastecimento de água (GOMES, 2009).

Desse modo, a IWA propôs a adoção do Consumo de Energia Normalizado (CEN), Ph5, como indicador para contornar a limitação de comparação do consumo específico (CE) em relação às alturas manométricas (GOMES, 2009).

Porém, a literatura não particulariza o cálculo do CEN em casos de bombeamento com inversor de frequência. Dessa forma, este artigo visa apresentar uma metodologia para o cálculo do CEN para sistemas com sistema de bombeamento com rotação variável e refletir sobre a importância para estimativas de eficiência hidroenergética em SAA's.

2. BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Em geral, bombas são utilizadas para realizar o deslocamento de água de uma cota específica para uma cota superior, ou diretamente para o sistema de distribuição de água. Além de realizar esse deslocamento, as bombas são utilizadas para aumentar a pressão da água nas redes da tubulação. A seleção de bombas é feita considerando-se a vazão e a altura manométrica requeridas no sistema, de modo que a vazão de bombeamento deve atender a demanda, ao passo que e a altura manométrica deve ser capaz de vencer os desníveis geométricos e garantir a pressão mínima requerida em determinados pontos da rede. A altura manométrica pode ser calculada com a equação 1, indicada na Tabela 1 (LENHS, 2016; GOMES, 2009; TSUTYIA, 2006).

O ponto de funcionamento da bomba é o ponto de intersecção entre a curva do sistema e a curva da bomba, conforme pode ser visualizado na Figura 1. Esse ponto deve estar à direita e o mais próximo possível do ponto máximo de rendimento (PMR), pois a operação fora desse ponto de funcionamento pode levar a problemas de recirculação, choques, vibrações e cavitação, além de diminuir o rendimento (GOMES, 2009).

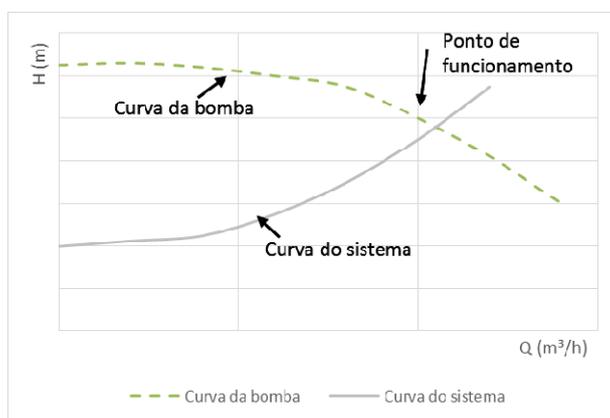


Figura 1 - Ponto de funcionamento de bombas

As bombas são acionadas, geralmente, por motores elétricos. Em virtude do grande número de horas diárias de funcionamento de um sistema de bombeamento, a energia utilizada por um conjunto motobomba é expressiva. Segundo Gomes (2009), a potência elétrica requerida da rede elétrica por um conjunto motobomba pode ser expressa por uma equação prática, indicada na Tabela 1 pela equação 2, e a energia elétrica utilizada é a potência elétrica integralizada no tempo, conforme indica a Equação 3. Se os parâmetros da potência elétrica forem constantes no tempo, tem-se, por sua vez, a relação expressa na equação 3a. Nos casos do uso de inversor de frequência, os parâmetros da equação 3 não são mais constantes e, adicionalmente, deve ser considerado o rendimento do inversor de frequência no instante de tempo t , conforme indicado na equação 3b.

Tabela 1 - Equações para o cálculo da energia utilizada em um SAA.

Nº	Equação	Parâmetros
1	$H = H_g + H_l + H_s + \frac{V_e^2}{2g}$	H = altura manométrica (mca); H_g = altura geométrica (mca); H_l = perda de carva linear (mca); H_s = perda de carga singular; V_e = velocidade média de escoamento na seção de interesse da tubulação (m/s); g = aceleração da gravidade (m/s^2).
2	$P = \frac{1}{1000} \frac{\gamma QH}{nb nm}$	P = Potência elétrica (kW); γ = peso específico (xx); Q = vazão bombeada (m^3/s); H = altura manométrica (mca); nb = rendimento da bomba; nm = rendimento do motor.
3	$E = \int Pdt$	E = Energia (kWh); t = tempo (h).
3a	$E = \frac{1}{1000} \frac{\gamma QH}{nb nm} t$	E = energia utilizada (kWh); γ = peso específico (N/m^3); Q = vazão bombeada (m^3/s); H = altura manométrica (mca); nb = rendimento da bomba; nm = rendimento do motor; t = tempo (h).
3b	$E = \frac{1}{1000} \int \frac{\gamma QH}{nb nm ni} dt$	E = energia utilizada (kWh); γ = peso específico (xx); Q = vazão bombeada (m^3/s); H = altura manométrica (mca); nb = rendimento da bomba; nm = rendimento do motor; ni = rendimento do inversor de frequência; t = tempo (h).

3. USO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA EM BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Segundo Vilanova (2012), a utilização de sistemas de bombeamento com rotação variável é uma alternativa viável na busca de otimização operativa de estações de bombeamento, geralmente obtida com o uso de inversores de frequência.

Carvalho (2003) apud Lima et al. (2015) afirma que ao variar a velocidade de rotação “n” da bomba, a curva característica da bomba se altera. Cada ponto ($H_1 \times Q_1$) com rotação “ n_1 ”, por semelhança mecânica, corresponde a outro ponto ($H_2 \times Q_2$) com rotação “ n_2 ”. Os pontos (H x Q) com mesmo rendimento são denominados homólogos. As equações de Rateaux (equações 4, 5 e 6) se aplicam a esses pontos, ou seja, pontos de mesmo rendimento. É possível utilizar as equações 4, 5 e 6 para transpor a curva original de uma bomba para outras rotações (GOMES, 2009).

$$Q_2/Q_1 = N_2/N_1 \quad (4)$$

$$H_2/H_1 = (N_2/N_1)^2 \quad (5)$$

$$P_2/P_1 = (N_2/N_1)^3 \quad (6)$$

Gomes (2009) alerta que se deve ter cautela ao considerar estas leis como diretamente aplicáveis em SAA, uma vez que a parcela da altura manométrica correspondente ao desnível geométrico não é reduzida pela redução da velocidade de rotação. Ademais, afirma que quanto maior o desnível geométrico, maior será a variação em relação aos valores calculados pelas leis de afinidade, conforme indicado na Figura 2.

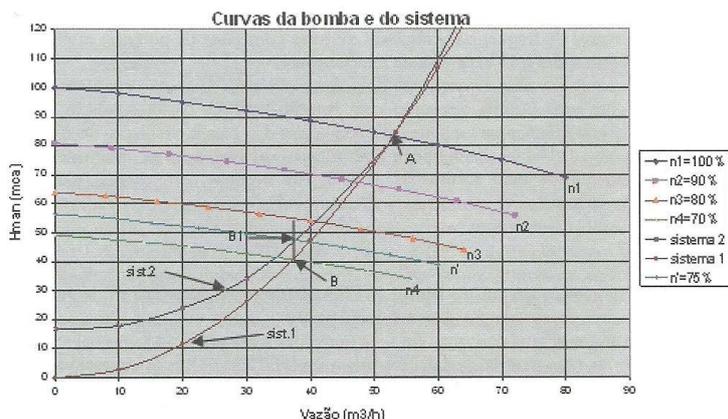


Figura 2 - As leis de afinidade aplicadas a sistemas com e sem desnível geométrico (GOMES, 2009)

4. INDICADORES DE DESEMPENHO HIDROENERGÉTICO

Segundo Alegre et al. (2006), um indicador de desempenho é uma medida quantitativa de um aspecto particular do desempenho da entidade gestora ou do seu nível de serviço. É um instrumento de apoio à monitorização da eficiência e da eficácia da entidade gestora, simplifica uma avaliação que, de outro modo, seria mais complexa e subjetiva.

Vilanova (2012) aponta que os indicadores de desempenho em SAA presentes na literatura contemplam de forma superficial o uso da energia elétrica, geralmente através do cálculo de consumos específicos, ou intensidades energéticas, globais. Nessa abordagem tradicional, a unidade de análise hidráulica/energética é o próprio sistema, e seus indicadores constituem, na verdade, índices resultantes de inúmeros processos intermediários, e fornecem, desse modo, poucos subsídios para o gerenciamento, uma vez que as variáveis associadas ao uso da energia elétrica e da água não são discretizadas.

O consumo de energia normalizado (Ph5) corresponde ao inverso do rendimento do conjunto motobomba (ALEGRE et al., 2006). O Ph5 é expresso de acordo com a equação 7.

$$Ph5 = D1/D3 \tag{7}$$

Onde:

D1 – consumo de energia para bombeamento (kWh); D3 – Fator de uniformização, calculado pela equação 8.

$$D3 = V \times \left(\frac{H}{100}\right) \tag{8}$$

Onde:

V é o volume bombeado no período analisado (m³); H é a altura manométrica do sistema (m).

O valor mínimo teórico do CEN corresponde ao valor de 0,27 para rendimentos do conjunto motobomba de 100% (Alegre et al., 2006). Indica-se que a eficiência energética é considerada boa para o consumo de energia normalizado quando o indicador assume valores entre 0,27 e 0,40, mediano para 0,40 a 0,54 e insatisfatória para consumos maiores que 0,54 (SABESP apud SOARES, 2014).

Embora, fisicamente, o CEN represente o inverso do rendimento do conjunto motobomba, ações de eficiência hidráulica da rede não são por ele representadas. Assim, um sistema de bombeamento pode ter suas perdas de carga diminuídas e essa melhoria não ser representada no CEN, conforme exposto por Bezerra (2009) apud Gomes (2009).

5. METODOLOGIA

Inicialmente, a partir da revisão das equações de energia, potência e altura manométrica, realizaram-se considerações a respeito do cálculo do indicador CEN com o uso de inversor de frequência. Em seguida, apresenta-se um estudo de caso fictício para demonstrar as possibilidades de cálculo do CEN nesse tipo de abordagem.

Cálculo do CEN

Para conjunto motobomba individual, sem uso de inversor de frequência

Explicitando a parcela de energia da equação 3a na equação 1, tem-se a equação 9.

$$CEN = \left(\frac{1}{1000} \frac{\gamma QH}{n_b n_m} t \right) / \left(V \frac{H}{100} \right) = \frac{1}{36000} \frac{\gamma}{n_b n_m} \quad (9)$$

Corroborando com a interpretação do IWA, o indicador é função apenas do peso específico da água e dos rendimentos do conjunto motobomba, apresenta valor mínimo teórico de 0,27 para rendimento da bomba e do motor de 100%.

Para sistemas operando com inversor de frequência

Explicitando a parcela de energia da equação 3b na equação 1, tem-se a equação 10.

$$CEN = \frac{\frac{1}{1000} \int \frac{\gamma QH}{n_b n_m n_i} dt}{V \left(\frac{H'}{100} \right)} \quad (10)$$

Onde H' é se refere a altura manométrica do sistema (mca), mas esta varia em função da rotação.

Para avaliar os variações dos valores do CEN em função da altura manométrica H', foram utilizadas as equações 4 e 5 para transpor as curvas da bomba e verificar o ponto de operação no estudo de caso. A variação dos valores de H' foi analisada estatisticamente e, a partir dessa análise, o CEN foi calculado.

6. ESTUDO DE CASO

Um sistema de bombeamento possui a curva de consumo adimensional em relação ao consumo máximo de acordo com a **Figura 3**. O bombeamento é realizado com inversor de frequência. Não foram considerados limites mínimos de variação de frequência e de rotação.

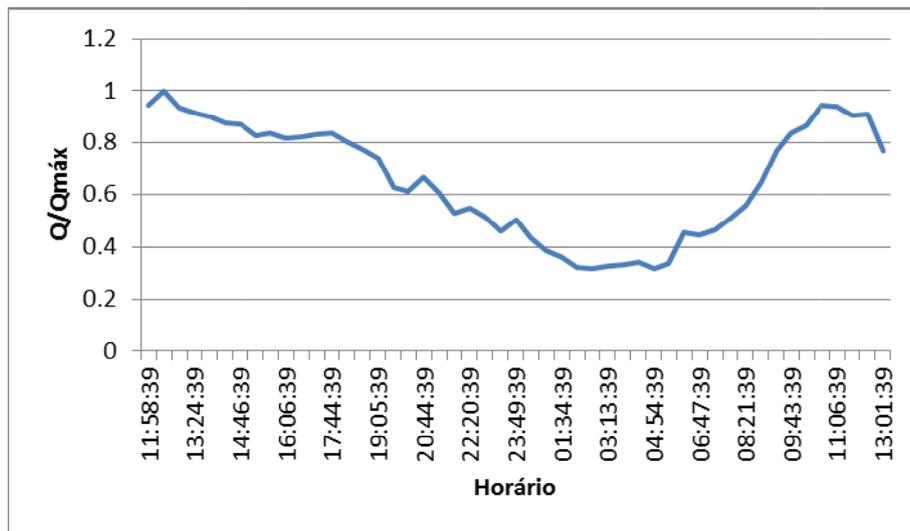


Figura 4 - Curva de demanda diária adimensional

Consideraram-se dois sistemas de bombeamento sem desníveis geométricos ($H_g=0$) com alturas manométricas de 100 mca, 60 mca e 40 mca e vazão máxima de 300 m³/h e 150 m³/h. Os dois sistemas operam no ponto de melhor rendimento com valor de rendimento do conjunto motobomba de 0,56. Utilizaram-se as leis de afinidade para definir a variação da altura manométrica em função do tempo conforme Figura 4.



Figura 3 - Variação da altura manométrica em relação à variação da vazão adimensional horária

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Definidas as alturas de bombeamento, minuto a minuto, foram identificadas as alturas máximas e mínimas e calculadas as alturas manométricas média¹ (de todos os valores), média² (entre a altura manométrica máxima e mínima), média ponderada e média harmônica, conforme **Tabela 2**.

Tabela 2 - Análise dos valores das alturas manométricas diária do SAA

Diferentes alturas manométricas (mca)	Hm para rotação original		
	40	60	100
Hm máx	40	60	100
Hm mín	4,08	6,12	10,21
Hm média ¹	20,05	27,97	46,62
Hm média ²	22,04	33,06	55,10
Hm média ponderada	19,36	26,75	63,58
Hm média harmônica	15,83	16,58	27,64

Para cada intervalo de tempo, foi calculada a energia por meio da equação 3b. Dessa forma, utilizou-se a equação 10 para o cálculo do CEN, com H' correspondendo às alturas manométricas máxima, mínima, média (geral), média (entre máx. e mín.), média harmônica e média ponderada, conforme apresentado na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Cálculo do CEN utilizando diferentes H'

H'	Hm máx. 40	Hm máx. 60	Hm máx. 100	CEN	Classificação SABESP apud SOARES, 2014
Média ¹	18,65	27,97	46,62	0,57	Insatisfatória
Máxima	40,00	60,00	100,00	0,26	Irreal
Mínima	4,08	6,12	10,21	2,58	Insatisfatória
Média Harmônica	11,06	16,59	27,64	0,95	Insatisfatória
Média ponderada	17,83	26,75	63,58	0,59	Insatisfatória
Média ²	22,04	33,06	55,10	0,479	Satisfatória

Para as combinações das alturas manométricas máximas de 40 mca, 60 mca, 100 mca e cada vazão de 300 m³/h e 150 m³/h, o CEN calculado variou apenas em função dos parâmetros de H'. Isso se deve aos rendimentos serem constantes, isto é, a curva do sistema é a mesma da curva de isorrendimento (com desnível geométrico igual a 0) e a vazão e a altura manométrica influenciarem proporcionalmente o valor da energia.

Ao utilizar a altura máxima, o resultado não correspondeu à realidade, visto que o valor mínimo teórico do CEN é de 0,27. Com a altura mínima, chegou-se a um valor alto,

indicando que o rendimento do conjunto motobomba é muito baixo. O valor do CEN utilizando a H' como média harmônica das alturas manométricas diária apresentou valores maiores que os valores calculados a partir de H' como média¹, média² e média ponderada das alturas manométricas diária.

Se o sistema fosse operado sem inversor de frequência, poderia ser utilizada a equação 9 para o cálculo do CEN e seu valor corresponderia a 0,4867. Comparando os valores utilizando a equação 9 e 10, a mais adequada é usar H' como altura manométrica média¹.

8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O uso de indicadores hidroenergéticos pode auxiliar na gestão de sistemas de abastecimento de água. O CEN representa o inverso do rendimento do conjunto motobomba, pois é independente da altura manométrica do sistema, nos casos de bombeamento sem uso do inversor de frequência.

Porém, em SAA com o uso de inversor de frequência, o cálculo do indicador não deve ser feito com a altura manométrica da rotação nominal em seu denominador, pois podem ocorrer distorções na interpretação de seus valores, como a classificação da qualidade do rendimento do conjunto motobomba como satisfatória ou insatisfatória, dependendo de qual altura manométrica utilizada no denominador do cálculo do CEN. Nos casos de uso de inversor de frequência com pequeno desnível geométrico, apresentados neste estudo, é recomendado utilizar a altura manométrica média entre a altura manométrica máxima e mínima.

Os autores recomendam, em estudo futuros, realizar estudo do cálculo do CEN fora da linha de isorrendimento, ou seja, com variação do rendimento da bomba e do motor, além de considerar desníveis geométricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às instituições e empresas que contribuíram com apoio financeiro parcial para realização da pesquisa relacionada ao presente artigo, sendo elas a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/Brasil), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/Brasil), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP/Brasil), a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS/Brasil), Furnas Centrais Elétricas S.A., a Fundação de Apoio Universitário (FAU/UFPel) e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEGRE, H., BAPTISTA, J. M., CABRERA JR., E., CUBILLO, F., DUARTE, P., HIRNER, W., MERKEL, W., PARENA, R.. Performance indicators for water supply services. Manual of Best Practice Series, 2nd Edition, IWA Publishing, London, ISBN 1843390515 (289 pág.). 2006.

GOMES, H. P. Sistemas de abastecimento de água: Dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias. 3. ed. João Pessoa: Editora Universitária UFPB, 2009.



LENHS. Procedimentos Básicos para redução de consumo de energia elétrica e sistemas de bombeamento de água, 2016. Disponível em: <<http://www.capacidades.gov.br/blog/detalhar/id/95/post/773/param/ativos>>. Acesso em: 25 fev. 2017.

LIMA, A. S., ZOCOLER, J. L., JADOSKI, S. O., MAGGI, M. F., AMARANTE, R. R.. Desempenho Operacional no Bombeamento em Pivô Central utilizando Inversor de frequência. Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science, Guarapuava-PR, v.8, n.2, p.51-61, 2015

SOARES, F. R.. Estudo Comparativo dos Indicadores de Eficiência Hidro Energética em Sistemas de Distribuição de Água – Análise de Municípios do Sul de Minas Gerais. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2014.

VILANOVA, M. Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água como ferramenta de suporte à tomada de decisões. Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de Água. São Paulo, Escola Politécnica da USP. 3ª Edição, 2006.