

Eficiência de bombeamento, vazão e método termodinâmico

Nome do autor principal⁽¹⁾

Marcos Tadeu Pereira⁽¹⁾

Professor Doutor em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Professor de Mecânica dos Fluidos da Escola Politécnica. Área de concentração: mecânica dos fluidos, medição de vazão e escoamento de fluidos.

Marcio Nunes⁽²⁾

Engenheiro Mecânico pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Mestre em Processos Industriais pelo IPT em 2014.

Danylo de Lima Guedes⁽³⁾

Engenheiro naval pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Olavo Alberto Prates Sachs

Engenheiro Sanitarista – PUCC; Engenheiro de Segurança do Trabalho – FAAP; MBA em Administração para Engenheiros – MAUA; Mestrado em Tecnologia Ambiental – IPT

Endereço⁽¹⁾: Marcos Tadeu Pereira. Escola Politécnica da USP, Av Prof Mello Moraes 2231, São Paulo. Cep 05508-030.(11) 97675-9011. e-mail: marcospereira@usp.br

RESUMO

A determinação da eficiência de bombeamento e seu monitoramento ao longo do tempo é um indicador potente das possibilidades de economia de energia elétrica, desde que associada a um programa que identifique possibilidades de melhorar a eficiência energética de instalações. Na determinação da eficiência de bombas podem ser utilizados dois métodos normalizados: convencional e termodinâmico. O artigo parte de considerações abrangentes e chega a uma comparação entre os métodos, mostrando que, ainda com poucos dados disponíveis, os métodos parecem fornecer respostas compatíveis e vão se diferenciar no futuro com relação a aspectos operacionais: diferenças de custo de operação, facilidades de manutenção e confiabilidade de medições a médio e longo prazo.

PALAVRAS-CHAVE: Bomba, termodinâmico, eficiência.

OBJETIVO

Este trabalho realiza um estudo teórico comparando dois métodos utilizados para o ensaio de desempenho de bombas hidráulicas: o convencional e o termodinâmico.

INTRODUÇÃO

O consumo de energia em bombeamento de fluidos em empresas de saneamento muitas vezes é a maior conta destas empresas, só perdendo para a conta de pessoal em determinadas empresas.

No artigo “The impact of the “Energy Policy Act””, Tom Stone afirma **que o desperdício de energia em sistemas de bombeamento é tão sério nos EUA que pode ser muito maior que qualquer outra economia de energia que aquele país venha a fazer**. Afirma que “ainda que o custo da energia seja monitorado de perto e gerenciado ao nível da planta, o uso real de energia pode não ser o foco de gerentes de instalações, sempre mais preocupados com a confiabilidade da produção que com o custo da ineficiência energética. Existe também ausência de conexão entre os orçamentos para a compra de equipamentos e a operação, o que significa que as compras daqueles equipamentos frequentemente resultam em práticas de aumento da ineficiência”.

Outras fontes corroboram esta visão: de acordo com a publicação “US industrial motor systems market opportunities assessment”, do “Department of Energy” americano, **“sistemas de bombeamento oferecem a maior oportunidade para melhoras de eficiência do consumo de energia na indústria. De fato, casos de estudo mostraram que projetos melhores de sistemas e uma aplicação mais eficiente de bombas podem economizar 20% ou mais em custos de energia. Em adição à economia de dinheiro e de energia, estas ações podem também reduzir custos de manutenção, ao mesmo tempo em que aumentam a produtividade”**.

A publicação “Água e Energia”, da *Alliance to Save Energy*, afirma que o consumo de energia, na maioria dos sistemas de água em todo o mundo, **poderia ser reduzido em até 25%** por meio de ações de eficiência com melhor desempenho. Dentre as chamadas ações de eficiência, Stone cita como importantes a adequação da demanda à carga da bomba (com faixa de economia de 10 a 30%), reduzir ou controlar a velocidade da bomba (5 a 50%).

A tabela a seguir mostra a evolução do consumo de energia pela Sabesp nos últimos 3 anos.

	2018	2019	2020
Sabesp	2.497	2.534	2.691
Estado de São Paulo	131.978	133.293	128.523
% SP	1,89%	1,90%	2,09%

Tabela 1- Consumo de energia em GWh da Sabesp e do Estado de São Paulo nos três últimos anos. A observar o aumento constante do valor absoluto do consumo da Sabesp, mesmo com decréscimo no estado de São Paulo, e o aumento da porcentagem de seu consumo no estado. Os números da Sabesp são superlativos e justificam investigar o grande potencial de economia existente.

Claramente, o que se pode inferir a partir das publicações mencionadas (e que, curiosamente, não chegaram a esta conclusão) é que **é necessária uma mudança de paradigmas de projeto e de operação em sistemas de bombeamento.**

De acordo com algumas fontes, os custos de energia e de manutenção respondem por 50 a 95% dos custos de propriedade da bomba, com os custos iniciais representando geralmente menos de 15% dos custos de ciclo de vida da bomba, conforme a publicação “Energy efficiency-best practice guide. Pumping systems”.

Aparentemente a questão a ser resolvida **não é apenas medir a eficiência de bombas**: no site do BPMA – “*British Pump Manufacturers Association*”, é descrito que, enquanto se poderia melhorar a eficiência de bombas em até 4%, o maior potencial de ganhos de eficiência, de até 37%, está nas mudanças realizadas nos sistemas de bombeamento (nesse entorno incluindo mudanças de operação).

Adicionalmente às questões relativas à operação dos sistemas de bombeamento poder ser melhorada em grande parte dos casos, a impressão que se tem é que, no mundo real, bombas frequentemente **operam afastadas de seu ponto ótimo de operação** (BEP- Best Efficiency Point), daí a necessidade de medir a eficiência do bombeamento. Ensaiar bombas hidráulicas é, portanto, uma necessidade, principalmente quando são envolvidas grandes quantidades de energia.

De qualquer forma, uma estratégia de gerenciamento importante seria monitorar a eficiência de bombas e de sistemas de bombeamento, buscando ajustar o ponto de operação de bombas em regiões próximas ao BEP nos inúmeros sistemas existentes, e com isso garantir o menor consumo de energia possível na realização das tarefas envolvendo bombeamento. O assunto é complexo, as ações a serem adotadas são de natureza ampla e irão consumir recursos financeiros importantes, e o convencimento de setores de gerenciamento e direção sobre esses investimentos passa pela necessidade de apresentar números sólidos e convincentes.

Um problema frequente é que muitas vezes os sistemas de bombeamento têm uma certa idade e vêm de uma época em que nem sempre havia medidores de vazão instalados para efetuar os cálculos de eficiência, ou com muita frequência possuem múltiplas bombas sem possibilidades de medição individualizada. Esse quadro nos

conduz à necessidade de desenvolver conhecimento e tecnologias para estimar a eficiência energética de operação dentro de condições muito restritivas.

Instalações hidráulicas nem sempre são projetadas visando primordialmente a maior eficiência de operação e, além disso, devido ao constante crescimento do consumo de água, muitas estações são projetadas para atenderem a uma capacidade futura e assim operam inicialmente com capacidade inferior à sua capacidade ótima de operação, e o envelhecimento e desgaste de tubulações e das bombas provocam crescente diminuição da eficiência energética da operação. Esses fatores exigem das empresas a necessidade de monitoramento para procurar reduzir o consumo de energia.

Ensaiar bombas para a determinação de eficiência sempre representou um problema, pois fatores como geometria das instalações, incrustações e singularidades (válvulas, curvas, etc.) localizadas de forma não recomendada pelas normas, instabilidades de operação e medições errôneas da potência consumida pelas bombas influenciam significativamente nos resultados dos ensaios. E isso sem comentar as dificuldades com a queda de eficiência decorrente da necessidade de operação fora da região de melhor eficiência da bomba.

Dois métodos para determinação da eficiência de bombas serão analisados: o método convencional, com medição de vazão, e o método termodinâmico, com medição de temperaturas.

O MÉTODO CONVENCIONAL PARA A DETERMINAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O método mais utilizado para ensaiar bombas hidráulicas é aquele normalizado pela norma ISO 9906. Essa norma estabelece requisitos para o ensaio de desempenho de bombas em campo com diferentes graus de precisão, servindo para ensaios de aceitação. Trata-se de um método bastante conhecido e suas principais características residem na medição da vazão de água, da altura manométrica total da bomba e da potência mecânica consumida, normalmente estimada na grande maioria das vezes pela medição da potência elétrica fornecida ao motor de acionamento e pelo rendimento do motor.

A figura 1 ilustra o esquema de montagem dos instrumentos para o ensaio.

Devem ser instalados medidores de pressão a montante e a jusante da bomba para a medição das pressões de sucção e de recalque, e cálculo da altura manométrica da bomba.

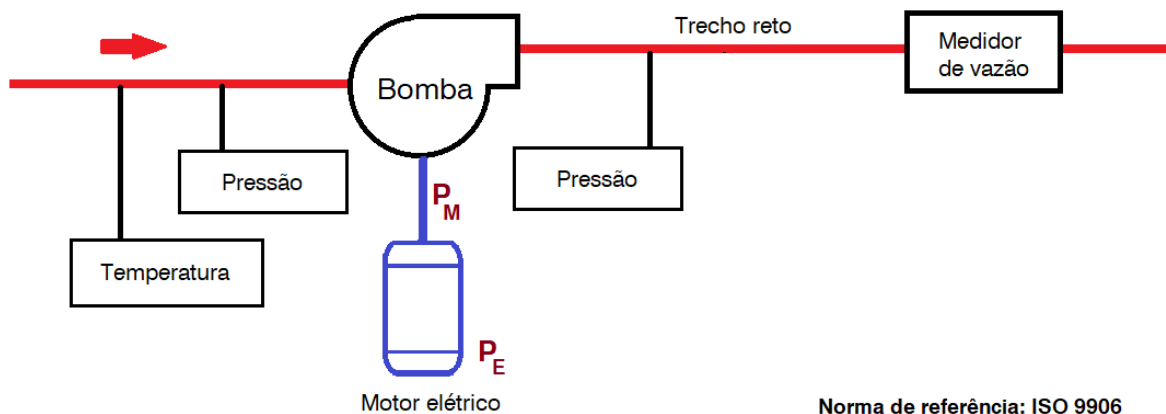


Figura 1: Esquema básico de operação do método convencional.

A medição da temperatura da água destina-se ao cálculo preciso da sua massa específica.

A eficiência da bomba é calculada pela seguinte expressão:

$$\eta_B = \frac{\gamma QH}{P_E \cdot \eta_M} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

- η_B é a eficiência hidráulica (expressa como uma fração)
- Q é a vazão do fluido, em m^3/s
- γ é o peso específico do fluido, em N/m^3
- H é a altura manométrica total da bomba, em mca.
- P_E é a potência elétrica que entra no motor (em watts)
- η_M é a eficiência do motor elétrico (expressa como uma fração)

O produto $P_E \cdot \eta_M$ é a potência mecânica consumida P_M , ou seja, a potência disponível no eixo de acionamento da bomba.

Nesta fórmula, do ponto de vista da incerteza dos resultados, pode se afirmar que há dois pontos fracos:

- a) A medição da vazão nem sempre está presente nas estações de bombeamento mais antigas, e mesmo quando presente, geralmente existe apenas um medidor mesmo em cenários com múltiplas bombas. A medição de vazão pode eventualmente carregar erros grandes, pois depende de muitas condições do escoamento no campo, como se discutirá mais adiante. Estações de bombeamento normalmente não possuem espaço suficiente com os trechos retos exigidos para medição de vazão de qualidade, o que exige o desenvolvimento de técnicas especiais, como também se verá mais adiante.
- b) A medição da potência consumida P_M é sempre obtida indiretamente, pois a presença de um torquímetro representaria um custo excessivo ou uma impossibilidade técnica. Sendo assim essa potência deve ser obtida por meio de medição da potência elétrica indicada por um wattímetro de painel (nem sempre da melhor classe de precisão) e sua multiplicação pela eficiência do motor elétrico no ponto de operação. Esta eficiência do motor pode carregar um erro razoável também: o motor pode ser velho, ter passado por manutenção, a curva pode ter mudado pelo envelhecimento de componentes, etc.

O MÉTODO TERMODINÂMICO PARA A DETERMINAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Outro método, que começa a ser utilizado no Brasil, é o termodinâmico, como uma alternativa ao método convencional. A aplicação desse método foi demonstrada pela primeira vez por *Poirson* e *Babbil Lion* em 1920 [6], quando teorizaram que a eficiência hidráulica poderia ser determinada com baixa incerteza. Mais de 30 anos se passaram até que um progresso essencial na teoria e nos experimentos foi realizado pelos engenheiros *Willm* e *Campmas* em 1954 [7].

O método termodinâmico foi também estudado e desenvolvido na década de 1960 no Reino Unido, mais precisamente nas Universidades de *Glasgow* e de *Strathclyde*, passando depois pelo NEL – *National Engineering Laboratory*, também na Escócia [1].

O trabalho desenvolvido por essas entidades foi reconhecido pela comunidade científica e resultou na normalização do método pelas entidades BS, ISO e IEC.

Deve ser ressaltado que a norma ISO mais recente sobre o assunto, a ISO 5198 Centrifugal, Mixed Flow and Axial Pumps – Code for Hydraulic Performance Tests - é de **1987**, e a norma IEC 41 Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines é de **1991**, o que pode refletir algum problema a ser resolvido que ainda não encontrou acordo entre a comunidade da área.

Estas normas descrevem em mais detalhes para o método termodinâmico o método de desviar escoamento para vasos ao invés de medir diretamente a temperatura no escoamento. Isso é reflexo da idade das normas, pois na época de suas publicações não havia o desenvolvimento de sensores de temperatura capazes de medir $0,2mK$ ($0,0002^\circ C$) com instrumentação de leitura possível de trabalhar em campo. A situação evoluiu, mas as normas precisam ser atualizadas.

O esquema básico do método termodinâmico desenvolvido para o ensaio de bombas hidráulicas é mostrado na figura 2. As tubulações de sucção e de recalque da bomba são instrumentadas com dois sensores de pressão e

de temperatura. Muitas vezes é utilizada uma sonda dupla, que possui capacidade para medir essas duas variáveis. Além dessas medições indicadas, há a necessidade também de medir a potência mecânica de acionamento da bomba, P_M .

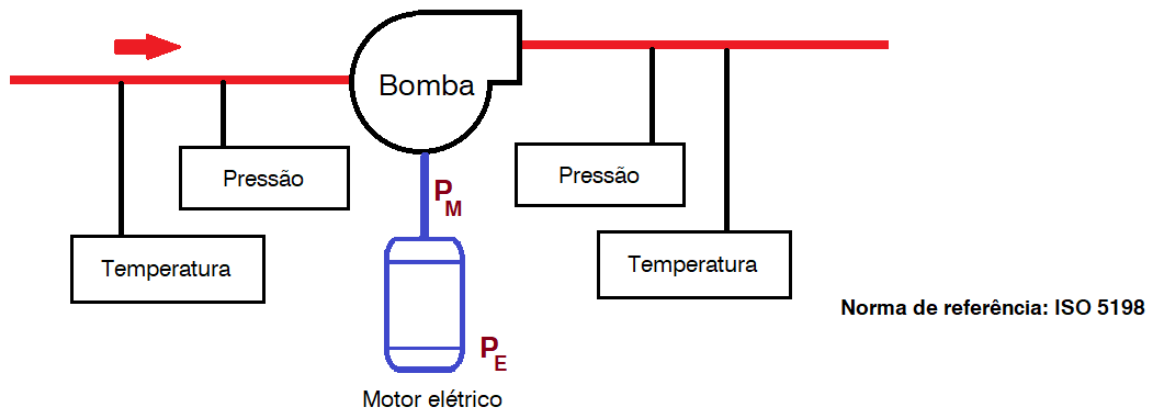


Figura 2: Esquema básico de operação do método termodinâmico.

O método termodinâmico utiliza a primeira lei da termodinâmica (o princípio da conservação de energia), que permite o cálculo da energia perdida na passagem da água pela bomba por meio do balanço de energias envolvidas: diferença entre as energias hidráulicas de entrada e de saída, menos a energia mecânica transmitida pelo eixo, sendo que o que sobra é considerado como energia perdida por calor, que é estimada pelas diferenças de temperatura entre entrada e saída.

Parte-se da equação 1, que é a definição da eficiência tanto para um método quanto para o outro:

$$\eta_B = \frac{\gamma Q H}{P_E \cdot \eta_M}$$

e as normas indicam como se pode calcular a vazão pelo método termodinâmico, aplicando a primeira Lei da Termodinâmica à bomba e desprezando a troca de calor entre a carcaça da bomba e o ambiente:

$$P_M = \rho \cdot Q \cdot (h_S - h_R) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde

- h_S e h_R são as entalpias da água na sucção e no recalque, respectivamente, em kJ/kg.
- ρ é a massa específica do fluido, em kg/m^3

Nesse método a vazão Q pode então ser determinada a partir da equação (2) reorganizada:

$$Q = \frac{P_M}{\rho(h_S - h_R)} \quad \text{Equação (3)}$$

Substituindo a equação (3) na equação (1), tem-se então:

$$\eta_B = \frac{gH}{(h_S - h_R)} \quad \text{Equação (4)}$$

Para a determinação do rendimento com baixa incerteza é necessário que as medições de temperatura e de potência consumida sejam também feitas com baixa incerteza. Antes do aparecimento no mercado de medidores de temperatura de alta precisão para uso em campo, o método termodinâmico era recomendado apenas para estações de bombeamento que possuísem alturas manométricas de 100 mca ou mais. Porém, ensaios realizados no NEL – *National Engineering Laboratory*, na Escócia [9], levaram à elaboração de um código de práticas de ensaio em que especificam as incertezas sistemáticas máximas admissíveis, permitindo que o método seja aplicado a bombas com alturas manométricas de no mínimo 20 mca para incertezas comuns e de 35 mca para incertezas menores de grau mais elevado. O código especifica as posições das tomadas e o *layout* das sondas combinadas de pressão e temperatura, que são a opção mais prática para o ensaio em campo. Os pesquisadores do NEL utilizaram como referência a norma inglesa BS 5316: Partes 1 e 2 [4 e 5].

Os arranjos de ensaio ideais especificados no código do NEL são para tubos de mesmo diâmetro nas seções de medição. O consórcio de engenheiros e pesquisadores reconheceu como uma deficiência a falta de um procedimento comprovado para corrigir as leituras de temperatura contra os efeitos de diferentes velocidades nas seções de medição, o que pode indicar a necessidade de mais pesquisas.

COMENTÁRIOS SOBRE OS MÉTODOS CONVENCIONAL E TERMODINÂMICO

Ainda há dúvidas a serem respondidas e experimentos a serem feitos na comparação entre os dois métodos.

No caso do método **convencional**, a equação da eficiência:

$$\eta_B = \frac{\gamma QH}{P_E \cdot \eta_M}$$

mostra a necessidade de medir vazão, altura manométrica **H** (simplicadamente o ΔP entre a entrada e a saída), a potência elétrica **P_E** e o conhecimento da curva com o rendimento η_M do motor.

No caso do método termodinâmico, a equação da eficiência:

$$\eta_B = \frac{gH}{(h_S - h_R)}$$

mostra a necessidade de calcular a altura manométrica **H** e estimar as entalpias por meio de temperaturas de entrada e de saída. Mas, para determinar o ponto de operação na curva com o método termodinâmico, deve-se estimar a vazão por meio da equação:

$$Q = \frac{P_M}{\rho(h_S - h_R)}$$

o que mostra que também é necessário medir a potência elétrica consumida (pois $P_M = P_E \cdot \eta_M$) e conhecer a curva de rendimento do motor.

Em última análise a diferença entre os dois métodos é que no convencional mede-se a vazão, e no termodinâmico a diferença de temperatura, tendo que nos dois métodos deve-se trabalhar com **H**; **P_E** e η_M , com as mesmas fontes de incerteza destas variáveis (exceto para **H**).

Para determinar a altura manométrica **H**, simplicadamente, deve-se medir a diferença de pressão entre as seções de entrada e de saída da bomba. Supondo que isso se faça com transdutores de pressão de boa qualidade, a incerteza absoluta devida à pressão poderia ser igual para os dois casos, desde que o método de tomada de pressão não introduza incertezas adicionais na medição. Mas há problemas no método termodinâmico, com se verá à frente.

No caso da medição da potência elétrica consumida pelo motor, **P_E**, o valor absoluto da medição também será o mesmo nos dois processos, devendo-se chamar a atenção para a geralmente pouca qualidade do indicador de

potência em painéis de controle das bombas, o que pode impactar de forma importante os resultados (a depender da análise de incerteza).

E, no caso da curva de rendimento do motor, η_M , ambos os métodos sofrem com a habitual falta de dados confiáveis desta variável e, novamente, seu impacto tem que ser avaliado por meio de sua contribuição no balanço de incertezas derivado do modelo estatístico empregado.

A questão sobre qual método é o mais indicado para cada aplicação passa pela análise de incerteza dos resultados obtidos (o que inclui a confiabilidade das medições) e pela comparação de custos para a realização destas medições (o que inclui custos da instrumentação e facilidade de instalação e operação dos métodos).

Sobram, portanto, como diferença técnica entre os métodos a determinação das variáveis vazão Q , no método convencional, e entalpia $h(T)$ e H no termodinâmico.

A medição de vazão

Qualquer medição efetuada, de qualquer grandeza física, possui uma incerteza associada, o que também é válido para a medição de vazão. O que diferencia a medição de vazão de outras grandezas é sua complexidade e dificuldades associadas: é uma grandeza dinâmica (depende do tempo na sua definição: m^3/s); não possui padrão primário; há medidores muito grandes e que não podem ser retirados do campo para calibração periódica; fatores como turbulência, perfis de velocidade distorcidos por singularidades e mesmo rugosidade podem afetar de maneira muito importante a medição. Adicionalmente, mesmo que se calibre um medidor em laboratório, os efeitos do escoamento diferente no campo (em relação às condições em laboratório) frequentemente introduzem erros importantes a ponto de invalidar resultados mais finos.

Para complicar, medidores de grande porte que dependem de calibração no campo, são normalmente calibrados com tubos de Pitot, que geram incertezas da ordem de 2 a 2,5% no cálculo da vazão, enquanto um medidor como o eletromagnético ou ultrassônico de vários feixes podem teoricamente fornecer incertezas de 0,5%. Ao se realizar a calibração em campo, está se calibrando um medidor que pode atingir incertezas de 0,5% com um “padrão” (tubo de Pitot) que consegue quando muito 2,0% de incerteza, o que é muito estranho do ponto de vista matemático e das boas práticas da metrologia, mas talvez a única opção do ponto de vista das possibilidades reais, da engenharia. Deve ser lembrado que normas recomendam padrões com no mínimo incertezas 2,5 vezes melhores que o instrumento sendo calibrado.

Deve-se ter em mente que parte dos sistemas de bombeamento não possuem diâmetros grandes o suficiente (acima de 30 cm) para o uso de tubos de Pitot, e devem ser instrumentados com medidores conhecidos como de carretel (eletromagnéticos, Venturis, eletromagnéticos, ultrassônicos de múltiplos feixes, etc).

Os medidores de vazão sofrem perda de qualidade quando o escoamento não possui escoamento plenamente desenvolvido, ou seja, estejam próximos a singularidades que geram perfis de velocidades distorcidos e/ou com rotacionais. Em estações de bombeamento, quando há medidores, é comum não haver trechos retos suficientes para desenvolver o perfil de velocidades e os erros podem ser grandes.

No programa de pesquisa em desenvolvimento sobre medição na Sabesp, estão sendo investigadas formas para a diminuição de incertezas em medição de vazão, conforme mostrado em outros artigos desse congresso (Perfis de velocidades distorcidos na medição com tubo de Pitot; Tubo de Pitot e estimativa de vazão: crítica da norma ISO 3966). Dentre os assuntos investigados estão o desenvolvimento de novos métodos de análise de incerteza, a investigação de novos métodos experimentais de calibração de grandes medidores de vazão em campo (como, por exemplo, o uso de medidores de vazão do tipo ultrassônico “clamp on” em rotação na seção de testes), a pesquisa de medição de vazão redundante e seu efeito na diminuição da incerteza expandida e o uso de simulações de escoamento com dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para verificar as possibilidades de correção de incertezas em função do perfil de velocidades no interior de tubulações.

Com estas pesquisas pretende-se diminuir a incerteza na medição de vazão e aproveitar situações com escoamento bastante deformado, como é o caso em estações de bombeamento, e tornar suas medições úteis.

O método termodinâmico

Com relação ao método termodinâmico, podem ser citados alguns problemas ainda por resolver:

- a) Não há muitas publicações comparando os dois métodos para bombas, o que precisa sem dúvida ser melhorado. Em artigo apresentado neste mesmo congresso em 2018, por Balbino, foram ensaiadas três bombas na Sabesp, com características nominais idênticas: $Q=1390\text{m}^3/\text{h}$, $H=92\text{mca}$. Os resultados aproximados são apresentados na tabela abaixo, para o BEP:

Bomba	BEP curva orig.	BEP Convenc.	BEP Termod.
B1	~74%	~50%	~53%
B2	~75%	~56%	~57%
B3	~73%	~70%	~72%

Tabela 2- Eficiência no ponto de melhor eficiência (BEP) para três bombas e comparação entre métodos convencional e termodinâmico.

Para estes resultados, efetivamente não há diferença significativa entre os métodos convencional e termodinâmico, ainda que não se tenha ideia da incerteza das medições. O problema claramente identificado é a **grande diferença de eficiência** entre as curvas originais de eficiência e as curvas reais levantadas em ensaio para as bombas 1 e 2. Este resultado é uma confirmação das indicações de Stone e outros citados na introdução, de que as eficiências reais de operação podem ser muito baixas. O artigo prossegue corretamente indicando formas de recuperar a eficiência perdida das duas bombas.

O que se deve buscar é o levantamento das eficiências reais de operação, para com isso tomar ações corretivas. O método a ser empregado, convencional ou termodinâmico, vai depender de custos, disponibilidade e programação, aparentemente mais do que da incerteza de cada método empregado.

- b) Quanto mais eficiente for a bomba, maior será a incerteza da medição, pois terão que ser medidas diferenças de pressão menores, pois menos calor foi gerado no processo. Em tese de doutorado recente, mostrou-se que em uma turbina com altura de 50m e eficiência de 95%, a elevação de temperatura seria de apenas $0,0059^\circ\text{C}$.
- c) Ainda não há estudos considerando as incertezas introduzidas pela variação de perfis de velocidades e distribuição de temperaturas nas seções de medição de temperatura. Essas seções estão sempre muito próximas da bomba, certamente com escoamentos bem perturbados. Há propostas de estudo dividindo as seções de medição em subáreas e ponderando com a velocidade a energia em cada subárea. O processo lembraria a medição com tubo de Pitot. A IEC 60041 aponta que, na ausência de exploração da distribuição de energia, deve-se levar em conta uma incerteza sistemática de $\pm 0,6\%$ no recalque e $\pm 0,4\%$ na sucção, da energia. Mas artigos mostram que ainda não há informações suficientes para entender como perfis de velocidade perturbados, na saída das bombas, contribuem com variações na temperatura (medida em um único ponto) e aumentam a incerteza dos resultados. Segundo tese, trabalhos foram realizados em turbinas investigando os efeitos de variações de energia/temperatura e de velocidades, que foram consideradas consideráveis. Mas a mesma investigação precisa ser feita para bombas, inclusive verificando por meio de traverses de temperatura.
- d) O equacionamento mostra que baixas alturas manométricas aumentam a incerteza do método, pois a variação de temperatura pode ser muito pequena entre os sensores.
- e) Em algumas aplicações de campo o método termodinâmico costuma aproveitar a tomada de pressão para introduzir o sensor de temperatura e medir a pressão, em um arranjo físico que não dá garantias de que a pressão no transdutor seja igual à pressão no ponto da tomada, introduzindo uma incerteza não computada. A forma da tomada de pressão estática é normalizada em todas as normas de vazão, para evitar que o transdutor de pressão meça componentes dinâmicas de velocidade do escoamento, por exemplo se ela for inclinada ou possuir acabamento superficial que não esteja perfeitamente em ângulo reto com a parede interna da tubulação (a simples existência de rebarbas já introduz erros consideráveis na medição). Ou seja, devem ser evitadas contribuições de pressão resultantes de componentes de velocidade na direção da tomada de pressão.

A AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS NOS MÉTODOS CONVENCIONAL E TERMODINÂMICO

Conforme será ressaltado nas conclusões, a estimativa de incertezas é fundamental para situar corretamente as ações corretivas a serem tomadas. Ao expressar a eficiência de bombeamento pode fazer muita diferença se a incerteza for 3% ou 10%, em termos de priorização de ações corretivas. Os métodos de avaliação propostos nas normas apresentam apenas linhas balizadoras e precisam ser desenvolvidos e corrigidos.

Como ressaltado no texto, parte da análise de incerteza é comum para os dois métodos, enquanto variáveis como altura manométrica e entalpia (associada à temperatura) aparecem apenas no método termodinâmico. Como o método termodinâmico apresenta características um pouco diferentes das habituais na engenharia do setor de saneamento, serão feitos alguns comentários a seguir.

Incerteza do método termodinâmico

Para o método termodinâmico, a norma ISO 5198 apresenta a seguinte formulação para estimar a incerteza relativa de medição de eficiência de uma bomba:

$$\frac{\delta\eta}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\delta e_h}{e_h}\right)^2 + \left(\frac{\delta e_m}{e_m}\right)^2}$$

E assim:

$$\frac{\delta\eta}{\eta} = \left(\frac{\delta\bar{v}}{\bar{v}}\right)^2 + \left\{1 + \frac{1}{[1 + \bar{c}_p\Delta t/(\bar{a}\Delta p)]^2}\right\} \left[\frac{\delta(\Delta p)}{\Delta p}\right]^2 + \frac{1}{[1 + \bar{c}_p\Delta t/(\bar{a}\Delta p)]^2} \left(\frac{\delta\bar{a}}{\bar{a}}\right)^2 + \frac{1}{[1 + \bar{a}\Delta p/(\bar{c}_p\Delta t)]^2} \times \left\{\left[\frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t}\right]^2 + \left[\frac{\delta\bar{c}_p}{\bar{c}_p}\right]^2 + \left[\frac{\delta(\Delta e_m)}{e_m}\right]^2\right\}^{1/2}$$

Onde:

$\frac{\delta\eta}{\eta}$: incerteza relativa da eficiência da bomba

$\frac{\delta e_h}{e_h}$: incerteza relativa da energia hidráulica específica (J/kg)

$\frac{\delta e_m}{e_m}$: incerteza relativa da energia mecânica específica (J/kg)

$\frac{\delta(\Delta e_m)}{e_m}$: incerteza relativa do termo de correção de energia devido à fenômenos secundários (J/kg)

$\frac{\delta\bar{a}}{\bar{a}}$: incerteza relativa do coeficiente isotérmico (m³/kg)

$\frac{\delta\bar{v}}{\bar{v}}$: incerteza do volume específico (m³/kg)

$\frac{\delta\bar{c}_p}{\bar{c}_p}$: incerteza relativa do calor específico (J.kg⁻¹.K⁻¹)

Δt : Diferença de temperatura entre a seção de recalque e a seção de sucção (K)

Δp : Diferença de pressão entre a seção de recalque e a seção de sucção (Pa)

Diversos trabalhos técnicos foram conduzidos a fim de avaliar e melhorar esta metodologia de incerteza para diferentes condições de ensaio. Nestes trabalhos, são propostas formulações mais detalhadas da incerteza, são avaliadas simplificações que são assumidas na norma ISO 5198, e são discutidos termos de incerteza que podem ser negligenciados em função da condição de ensaio, entre outros pontos.

O modelo matemático da eficiência de bomba utilizado na formulação da incerteza ignora os termos associados à variação de energia cinética e energia potencial. Isto implica em assumir que as velocidades nas seções de sucção e recalque são iguais. E por sua vez, indica indiretamente que os diâmetros na seção de recalque e sucção são iguais, mas tal situação não ocorre na prática. Desta forma, a incerteza causada por esta simplificação precisa ser avaliada.

A formulação da incerteza utilizada na ISO 5198 é baseada na lei de propagação para variáveis independentes. Mas certos parâmetros são dependentes, possuem correlação. Por exemplo, a energia específica hidráulica e mecânica são ambas dependentes da diferença entre as pressões na seção de recalque e sucção, $\Delta p = p_2 - p_1$. Da mesma forma acontece com os parâmetros termodinâmicos \bar{a} , \bar{v} e \bar{c}_p que são dependentes da temperatura na seção de secção t_1 e da pressão na seção de recalque p_2 . Desta forma, para uma melhor estimativa é necessário considerar formulações mais elaboradas que englobem estas correlações entre os parâmetros. E tais simplificação nos cálculos adotadas na ISO 5198 podem levar a resultados inconsistentes de incerteza.

Obter as temperaturas absolutas corretamente é importante para usar os valores adequados das propriedades termodinâmicas \bar{a} , \bar{v} e \bar{c}_p dentro da equação de eficiência. Mas a influência destes parâmetros na incerteza da eficiência não é tão significativa em condições em que ocorrem variações baixas de temperatura. Também, em condições de ensaio com temperaturas não muito altas, os termos de incertezas relativas das propriedades termodinâmicas que são associados à temperatura e pressão podem ser negligenciados.

CONCLUSÕES

O artigo mostrou uma comparação teórica entre dois métodos para a determinação da eficiência energética de bombas.

Do ponto de vista teórico, os dois métodos têm o potencial de fornecer resultados que ajudam a atacar o principal problema: levantam a eficiência de bombas em um universo de instalações com grandes problemas de projeto, operação e envelhecimento de instalações, em qualquer lugar do mundo. Na introdução do artigo foram mostrados exemplos de ganhos muito importantes em eficiência.

No exemplo mostrado de ensaio comparativo em uma instalação da Sabesp, fica clara a importância da determinação de eficiência, pois duas das bombas estavam operando muito fora da eficiência da bomba original, e os resultados obtidos com os dois métodos produziram valores muito próximos entre si. Com isso a questão centra rapidamente em seu foco: **o importante é determinar a eficiência do bombeamento.**

Ainda nesse exemplo, se tomarmos a bomba operando a 53%, originalmente a 75%, a economia de energia deve fornecer suficiente motivação para propor mudanças com prazos de retorno bastante curtos face a vida do equipamento. Nesse ponto o método fornecido pela Análise de Ciclo de Vida da bomba torna-se vital. O guia para cálculo do Ciclo de Vida do Europump mostra que no custo de propriedade de bombas, a parcela mais importante é o custo de energia em, digamos, 20 anos, e pode chegar até a 95% do custo de propriedade em diversos casos. Melhorar a eficiência energética de bombeamentos é imperativo.

Voltando à comparação entre os dois métodos, um aspecto fundamental é a **incerteza de medição** em cada um deles. Só se pode expressar uma medição, e comparar duas medições, se se souber qual a incerteza envolvida.

Três questões devem ser abordadas quanto ao futuro desta área de determinação de eficiência de bombeamentos

- a) A determinação da incerteza de medição em cada método. No método convencional devem ser compostas de maneira clara a incerteza da medição de vazão, a incerteza da determinação da altura manométrica, da medição de potência elétrica e do uso de curvas de rendimento de motores levantadas para motores novos e que, no campo, podem ter sofrido manutenções severas e que alterem significativamente seus resultados. Essa questão das curvas de motores é de abordagem difícil, podendo ser até que só possa resolvida por um método comparativo. Mas a análise de incerteza de todas as fontes de erros precisa ser sistematizada, e realizada. Nos dois métodos se encontram problemas na medição da potência elétrica e no uso de curvas ultrapassadas de rendimento de motores. Precisa ser estudada de forma experimental a incerteza que a forma nova de tomada de pressão acaba introduzindo no método termodinâmico. Também estudos sobre a medição de temperatura precisam ser realizados: não se sabe com certeza como perfis de velocidades distorcidos misturam a carga térmica gerada pela ineficiência e atuam sobre a medição de temperatura nos níveis presentes (variações tão baixas quanto $0,0005^{\circ}\text{C}$) e precisam ser conhecidos em mais detalhes como funciona a estabilidade dos sensores de temperatura nessas faixas de variações tão baixas. A questão da calibração desses sensores de temperatura também é importante: quantos laboratórios conseguem calibrar sensores neste nível de resolução? Finalmente, deve-se avaliar a incerteza na determinação da entropia e compor todas essas fontes de erro.
- b) A confiabilidade precisa ainda ser estabelecida. Mesmo no método convencional, alguns parâmetros podem ser bem complicados de conseguir (como vazão bem feita e curva de eficiência do motor), e o método termodinâmico ainda precisa acumular história para estabelecer a confiabilidade de uso. Por exemplo, quanto tempo um sensor de temperatura consegue reter a calibração? Qual a diferença de

- incerteza que se pode esperar numa situação em dutos com 100 mm de diâmetro e com 500 mm de diâmetro? Em que situações a distorção do perfil de velocidades afeta a distribuição de temperatura?
- c) Os métodos têm que ser comparados quanto ao custo de implantação, custo operacional e capacitação necessária para utilização. Há indicações que o método termodinâmico pode apresentar vantagens no médio prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ROBERTSON, M. *Measurement of Pump Efficiency and Flow by the Thermodynamic Method. 5th Annual Conference of the Australian Water Association*, 9 p., mai. 2005.
- BS EN ISO 5198:1999 - *Centrifugal, mixed flow, and axial pumps- Code for Hydraulic performance tests – Precision class*.
- IEC 60041 - *Field Acceptance Tests to Determine the Hydraulic Performance of Hydraulic Turbines, Storage Pumps and Pump Turbines, Third edition 1991-11*.
- BS 5316:Part 1:1976 *Acceptance Tests for Centrifugal, Mixed Flow and Axial Pumps. Part 1. Class C Tests (British Standards Institution, London)* [ISO 2548:1973 (*International Organization for Standardization, Geneva*)].
- BS 5316:Part 2:1977 *Acceptance Tests for Centrifugal, Mixed Flow and Axial Pumps. Part 2. Class B Tests (British Standards Institution, London)* [ISO 3555:1977 (*International Organization for Standardization, Geneva*)].
- The Pump Centre, UK, Code of Practice for Pump Efficiency Testing by the Direct Thermodynamic Method, Report 695/27, 1995.*
- PIA – *Pump Industry Australia*, <https://www.pumpindustry.com.au/thermodynamic-performance-testing-and-monitoring>, acessada em maio de 2021.
- BARBILLON, L.- POIRSON, A., *Sur une Méthode Thermométrique de Mesure du Rendement des Turbines Hydrauliques, La Houille Blanche* (1920), p. 217–221.
- WILLM, G. – CAMPMAS, P., *Mesure du Rendement des Turbines Hydrauliques par la Méthode Thermométrique Poirson, La Houille Blanche* (1954), p. 449–460.
- LANZERSDORFER, J. – GOTSCH, L., *A General Approach using the Thermodynamic Efficiency Method for Absolute Flow Measurements, ANDRITZ Hydro GmbH, Lunzerstrasse 78, 4031 Linz, Austria*.
- THORNE, E. W. – NEAL, A. N., *Pump Efficiency Testing by the Thermodynamic Method—an Independent View, Proc. IMechE – Institution of Mechanical Engineers, UK, Vol 214 Part A, p. 255-268. 2000.*
- STONE, TOM., *The impact of the Energy Policy Act. World Pumps*, pg 30-33, April 2009.
- OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY – US Department of energy. *United States Industrial Electric Motor Systems Market Opportunities Assessment Executive Summary – January 2008.*
- ALLIANCE TO SAVE ENERGY– Institute of International Education – USAID.
- EUROPUM AND HYDRAULIC INSTITUTE. *Pump life cycle costs: a guide to LCC analysis for pumping systems. 2001*
- SUSTAINABILITY VICTORIA - *Energy efficiency best practice guide pumping systems – 2009 British Water Annual Review.* <http://content.yudu.com/Library/A1o7ie/BritishWaterAnnualRe/resources/19.htm>
- BIEHL, W.H., INMAN, J.A. *Energy optimization for water systems. Journal AWWA 102:6 pg 50-55, june, 2010.*
- MACHADO, A.B., GERALDES, A.J.G., OLIVEIRA, VIZIOLI, A., HALE, R. – *Comparativo de métodos de medição de rendimento de bombas termodinâmico e convencional- case Interlagos. FENASAN, 2018.*