



**SNPTEE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCE 17
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO XIV

CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (GCE)

ESTRATÉGIAS PARA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESCOAMENTO DE FLUIDOS INDUSTRIAIS EM CIRCUITOS FECHADOS

**Guilherme E. Filippo F. Filho
UNESP – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá**

RESUMO

Este trabalho chama atenção para a possibilidade de exploração de um potencial de economia de energia em sistemas fluidomecânicos industriais. Em muitas indústrias de processos são comuns os sistemas de circulação fechada de fluidos (*loops*) com o propósito de transferência térmica, tais como: água gelada, água de resfriamento, água quente e óleo térmico. Em regra, a circulação de fluido entre a “fonte” e a “unidade consumidora” é feita por turbobombas radiais acionadas por motores elétricos de indução trifásicos. O volume de circulação costuma ser muito grande. Em que pese os sistemas de controle das “fontes” e da “unidades consumidoras”, não é comum o controle da circulação do fluido de trabalho. O controle dessa vazão de circulação, mediante utilização de inversores de frequência para os motores de acionamento das bombas, pode oferecer notável economia de energia, especialmente quando a demanda de carga térmica é variável. Este trabalho define um índice de eficiência de transferência térmica que pode ser muito útil para diagnóstico de instalações. É apresentada uma breve abordagem teórica dos princípios de transferência térmica pela circulação de fluidos. São sugeridos parâmetros para serem utilizados como sinais de controle para os inversores.

PALAVRAS-CHAVE:

Conservação de Energia, Sistemas Fluidomecânicos, Transferência de Energia

1.0 - INTRODUÇÃO

Cerca de 60% da energia elétrica consumida pelo setor industrial norte-americano e europeu se deve aos motores elétricos. No Brasil se estima que o consumo para fins motrizes seja de pouco mais de 50%, em razão da maior densidade de indústrias eletrointensivas, (1). Outras formas de consumo significativo ocorrem nos processos eletroquímicos e eletrotérmicos, tais como na produção de cloro, alumínio e ferro ligas.

As aplicações motrizes podem ser agrupadas em acionamentos para processamento de materiais metálicos, processamento de materiais não metálicos, transporte de materiais e sistemas fluidomecânicos. Essa última aplicação responde por cerca de 60% da energia elétrica consumida para fins motrizes pelo setor industrial como um todo. Para determinados segmentos industriais, notadamente indústrias de processos, o consumo de energia elétrica para acionamentos fluidomecânicos pode alcançar elevados níveis de participação no consumo total, chegando até a 90% em alguns casos.

Bombas, ventiladores, sopradores e compressores são máquinas geradoras de sistemas fluidomecânicos acionadas por motores elétricos. O acionamento de bombas responde por cerca de 25% do consumo de energia elétrica para fins motrizes na indústria. Em alguns segmentos esse montante pode superar a 85% do consumo total. Ao lado da participação ser bastante significativa, o potencial existente para conservação de energia elétrica é muito grande. Este trabalho trata exclusivamente com sistemas fluidomecânicos, especialmente aqueles acionados por turbobombas.

As bombas podem estar tanto num circuito hidráulico aberto, como em circuito fechado. No primeiro caso tem-se como objetivo o deslocamento do fluido de um ponto A para um ponto B, ainda que possa haver sangrias intermediárias. São situações típicas: transporte, carga, descarga e distribuição de fluido, bruto ou acabado. Os

exemplos mais característicos são as estações de bombeamento de água e efluentes e as estações de bombeamento de petróleo e seus derivados. Ainda dentro dos circuitos abertos encontram-se os casos de bombeamento de fluidos através de equipamentos ao longo de processos industriais de transformação.

Nos circuitos fechados o fluido é bombeado de um ponto A para um ponto B e, em seguida, retorna ao ponto A. Nesses casos o fluido serve como meio para o transporte de energia, mecânica ou térmica, entre os pontos A (fonte) e B (consumidor). Na transferência de energia mecânica geralmente a própria bomba é a “fonte” e o elemento de transporte. Os circuitos óleo-hidráulicos são casos típicos dessa situação. Já na transferência de energia térmica geralmente existe um equipamento específico para a “fonte”, cabendo à bomba unicamente o papel de elemento de transporte, (2-4).

As instalações de transferência térmica mais comuns, em ordem crescente de temperatura de trabalho, e com suas respectivas fontes, são: água gelada (*chiller*), água de resfriamento (torre de resfriamento), água quente (aquecedor de água quente), vapor (caldeira) e óleo térmico (aquecedor de óleo). A Figura 1 ilustra o conceito de transferência térmica através da circulação de fluidos.

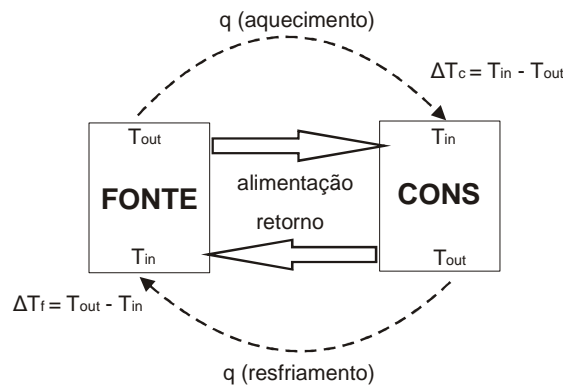


FIGURA 1 - transferência térmica mediante circulação de fluidos

O vapor se constitui na forma mais eficiente de transferência térmica através de fluidos. A título de exemplo, o vapor saturado a 10 bar tem uma entalpia específica de vaporização da ordem de 480 kcal/kg. Por outro lado, se um dado processo consome água quente com um salto de temperatura de 5 C, o conteúdo entálpico seria de apenas 5 kcal/kg. Dessa forma, para atender uma mesma carga térmica seria necessário movimentar uma massa de água cerca de 100 vezes maior que a de vapor. Em geral, o consumo de energia elétrica nos sistemas de geração e distribuição de vapor não é significativo. São raros os casos em que esse consumo supera 3% do consumo total de uma dada indústria, considerando a energia elétrica para o bombeamento de água, tiragem forçada e induzida e para o sistema de combustão das caldeiras. Portanto, este trabalho deixará de lado considerações sobre a transferência térmica por vapor.

A potência térmica transferida por fluidos incompressíveis é dada pela 1ª Lei da Termodinâmica:

$$P_t = \dot{m} c_p \Delta T \quad (1),$$

onde a vazão mássica é dada pelo produto entre a densidade do fluido e a vazão volumétrica:

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (2).$$

Por sua vez, a potência elétrica exigida pela bomba que promove a circulação do fluido é dada por:

$$P_{el} \cong \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{\eta_{bm}} \quad (3),$$

onde: γ é o peso específico do fluido, Q a vazão volumétrica, H_{man} a altura manométrica da instalação e η_{bm} o rendimento do conjunto motor e bomba.

Este trabalho define um índice de eficiência de transferência térmica (I_{et}) como a relação entre a potência térmica transferida e a potência elétrica exigida pelo sistema de bombeamento, ou seja, a relação entre as equações 1 e 3. Esse índice pode ser positivo no caso de aquecimento ($\Delta T > 0$) ou negativo no caso de resfriamento ($\Delta T < 0$). As diferenças de temperatura podem ser tanto na “fonte” como no “consumidor”.

$$I_{et} = \frac{P_t}{P_{el}} = \frac{\eta_{bm} c_p \Delta T}{g H_{man}} \quad (4).$$

Quanto maior módulo do índice I_{et} maior será a eficiência do sistema. Assim, os sistemas mais eficientes são aqueles que apresentam bombas de alto rendimento, elevado ΔT e baixo H_{man} .

Não é muito comum o controle de vazão nesses sistemas de transferência térmica. As variações de potência térmica são respondidas naturalmente pela variação da temperatura diferencial e do ponto de operação do sistema de bombeamento (bombas, tubulações e equipamentos). Evidentemente que existe o controle de potência da "fonte" em resposta à variação da carga térmica solicitada pelas unidades consumidoras.

Como será visto adiante, o controle da variação da vazão permitirá economia substancial de energia elétrica utilizada na circulação de fluidos, sobretudo pelo fato desses sistemas operarem por um elevado número de horas durante o mês.

2.0 - INSTALAÇÕES

Os sistemas de transferência térmica por circulação de fluidos podem ser dos seguintes tipos: simplex, duplex e triplex. No sistema simplex existe apenas uma bomba, ou conjunto de bombas em paralelo, para a circulação do fluido. No sistema duplex existem as bombas primária e secundária. Basicamente as bombas primárias promovem a circulação pela "fonte" e as secundárias pelas unidades consumidoras. A razão dessa separação em circuito primário e secundário é obter a redução da altura de elevação exigida de cada conjunto de bombas. Em alguns casos também serve para evitar a contaminação dos fluidos de trabalho. No sistema triplex, além das bombas primárias e secundárias, existem bombas terciárias, usualmente nas próprias unidades consumidoras (*boosters*). A Figura 2 mostra um esquema desses sistemas.

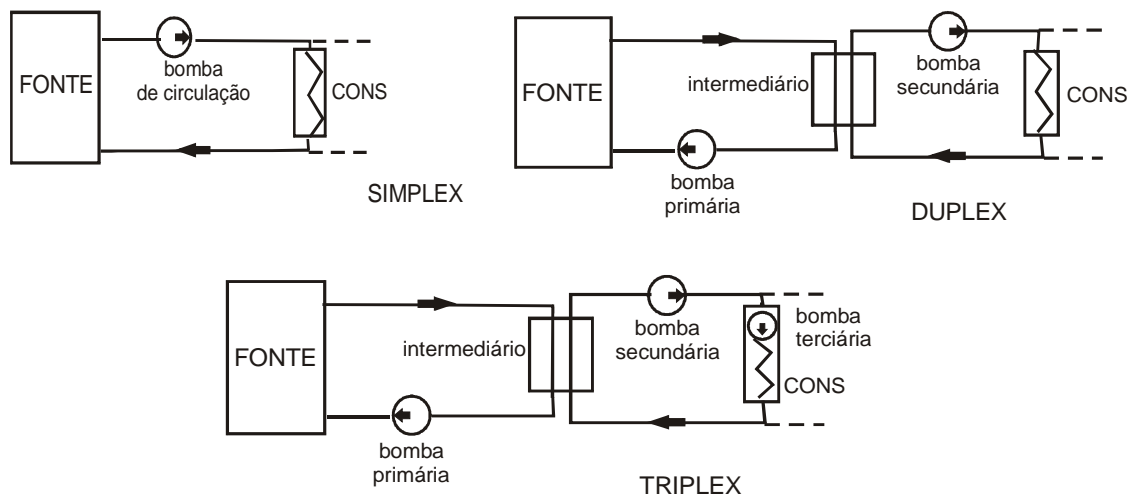


FIGURA 2 - esquema ilustrativo dos sistemas simplex, duplex e triplex

Para melhorar a visão desses sistemas, a Figura 3 mostra uma instalação de resfriamento nos modos simplex e duplex, o qual pode ter o primário do tipo aberto ou fechado.

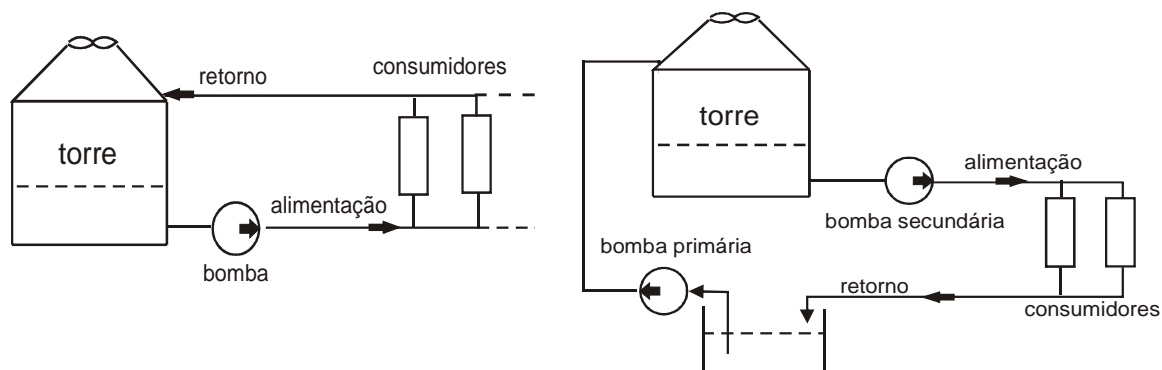


FIGURA 3 - instalação de resfriamento – simplex e duplex (aberto)

Da dinâmica dos fluidos tem-se a equação característica desses sistemas, (5,6):

$$H_{man} = h_{est} + z_i \cdot Q_i^2 \quad (5)$$

Para o circuito primário da instalação duplex representada na Figura 3, o coeficiente z_i pode ser variado pela ação de uma válvula de estrangulamento da descarga da bomba, por exemplo. Para o circuito secundário, as unidades consumidoras se apresentam de forma análoga a resistências elétricas não lineares em paralelo. Quanto maior o número de unidades em paralelo, menor a resistência equivalente e, portanto, menor o z_i . Por oposto, menor o número delas, maior a resistência equivalente e maior o coeficiente z_i . A altura estática da instalação (h_{est}) pode estar presente por razões topográficas, por exigência operacional de equipamentos, por necessidade de partida ou pode, até mesmo, ser nula, conforme ilustra a Figura 4.

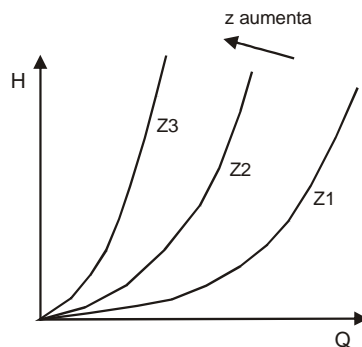


FIGURA 4 - curvas características das instalações ($H_{man} \times Q$)

Geralmente esses sistemas são projetados para atendimento, ou da máxima solicitação de vazão, ou de uma dada pressão de operação. Em regra, nos circuitos primários não existe controle de vazão. Quando muito a vazão é ajustada pela ação de válvulas controladoras. Nos circuitos secundários, a vazão do sistema se ajusta naturalmente em função do número de unidades consumidoras em operação. Unidades consumidoras podem ser trocadores de calor, serpentinas, tubos e vasos encamisados, etc. Nos processos por batelada geralmente existem ciclos térmicos bem definidos. Por outro lado, em inúmeros processos industriais contínuos a demanda térmica pode ser variável no tempo. Nesses casos, a variação da vazão é ainda mais rara, ou seja, a variação térmica é obtida pela temperatura diferencial, conforme equação 1.

3.0 - BOMBAS

A maioria absoluta das instalações de circulação de fluidos para fins de transferência térmica utiliza turbobombas radiais (bombas centrífugas) acionadas por motores trifásicos de indução. A Figura 5 mostra a forma de uma curva característica altura x vazão ($H_b \times Q$) desse tipo de máquina, juntamente com a curva do rendimento ($\eta \times Q$) para uma rotação constante. As bombas devem ser especificadas de modo que nas condições de máxima descarga exigida elas venham operar o mais próximo possível do ponto de melhor eficiência. Qualquer variação na descarga implica num desvio para fora do ponto de maior rendimento. A mesma Figura 5 mostra os fenômenos decorrentes dessas situações.

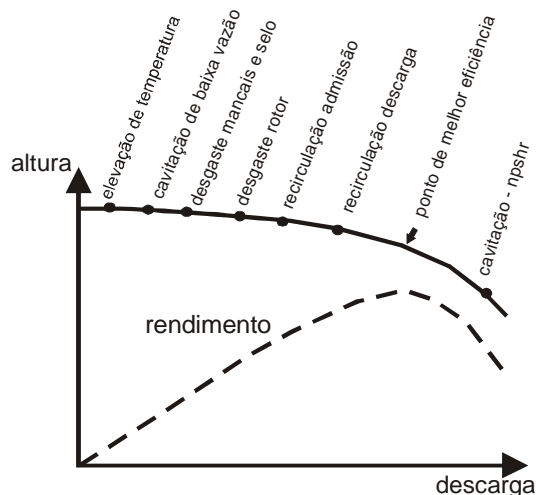


FIGURA 5 - curva característica de uma bomba centrífuga

Em verdade, o ponto de operação do sistema (bomba e instalação) ocorrerá no cruzamento de ambas curvas H x Q, conforme ilustrado na Figura 6. Nessa figura são mostradas duas curvas da instalação, onde a curva 2 apresenta uma maior resistência hidráulica. Basta aplicar a equação 3 para perceber que mesmo para uma descarga menor a potência elétrica exigida pelo motor é praticamente a mesma para os dois pontos de operação.

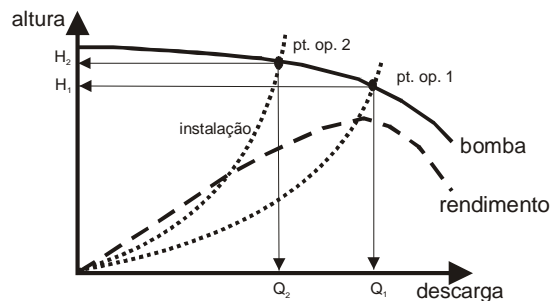


Figura 6 - pontos de operação do sistema com resistências hidráulicas diferentes ($R_{h2} > R_{h1}$)

Como mencionado no item anterior, a variação da resistência hidráulica pode ser obtida pela ação de válvulas controladoras de vazão ou pelo desligamento de unidades consumidoras. Nesses casos o ajuste do ponto de funcionamento ocorre de maneira natural.

Por outro lado, a inserção de *drives* para a variação de velocidade de motores de indução permite que a curva característica da bomba seja deslocada de forma congruente com a variação da rotação, tal como ilustrado na Figura 7, (7,8), onde $N_1 > N_2 > N_3$ e assim por diante.

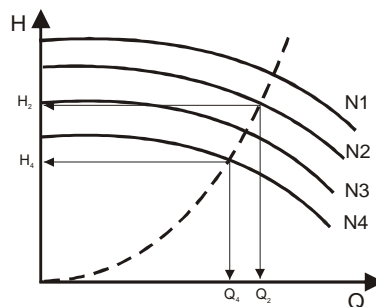


FIGURA 7 - curvas características para uma mesma bomba sujeita a diversas rotações

Em primeira aproximação, as curvas de rendimento acompanham a congruência, desde que a velocidade não seja alterada de forma relevante. Conforme mostrado na Figura 7, a descarga Q_4 é menor que Q_2 para uma mesma resistência hidráulica. A altura de elevação H_4 também é menor que H_2 . O rendimento η_2 é aproximadamente igual a η_4 . Sendo assim, com base na equação 3, pode-se observar que a potência motriz exigida na condição 4 é menor que na condição 2.

4.0 - ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DO CONSUMO

4.1 Sistemas intermitentes

São considerados como sistemas intermitentes aqueles nos quais as unidades consumidoras entram e saem de operação com certa frequência. Geralmente os processos de produção são por batelada e cumprem um protocolo pré-estabelecido de aquecimento e/ou resfriamento.

A título de exemplo, se a carga térmica exigida pelas unidades consumidoras fosse reduzida pelo desligamento de equipamentos, o ponto de operação passaria de 1 para 2, conforme ilustrado na Figura 6. Nesse caso, o índice de eficiência de transferência térmica seria reduzido, de acordo com equação 4. O rendimento da bomba diminui e a altura manométrica aumenta. Em primeira aproximação foi considerado que a temperatura diferencial não se altera em razão da redução da vazão responder pela redução da carga térmica, conforme equação 1. Ainda com base nesse exemplo, se a redução da carga térmica fosse acompanhada pela redução da vazão associada à redução da rotação da bomba, o índice de eficiência de transferência térmica poderia ficar praticamente inalterado, propiciando economia de energia. Isso ocorreria em razão da manutenção do rendimento da bomba e

a altura manométrica, conforme mostra a Figura 8a. A temperatura diferencial seria mantida praticamente inalterada.

Nesses casos deveria ser considerada a estratégia de controle da rotação da bomba por patamares. Cada patamar de rotação corresponderia à demanda do número de unidades consumidoras em operação. Nos sistemas simplex o controle seria exercido sobre a bomba de circulação. Nos sistemas duplex o controle seria tanto sobre as bombas primárias, como sobre as secundárias, na mesma proporção. Não se deve cometer o equívoco de pressupor que a economia de energia venha ser proporcional ao cubo da variação da vazão. Em verdade está se tratando com um sistema constituído por bombas e instalações, (7).

4.2 Sistemas contínuos

Em muitos casos, o aquecimento e/ou resfriamento de unidades consumidoras que operam continuamente não apresentam variação relevante de carga térmica. Nessa situação deve-se cuidar unicamente para que o sistema opere no ponto de melhor eficiência possível. Entretanto, quando houver variação de carga térmica, deve-se considerar a possibilidade de variação de vazão mediante controle da rotação da bomba. Nos casos de redução da carga térmica, se a vazão for mantida constante, o sistema responde mediante a redução da temperatura diferencial, conforme equação 2, reduzindo o índice de eficiência. Se a vazão fosse reduzida mediante redução da rotação de tal modo que a temperatura diferencial ficasse praticamente constante, haveria economia substancial de energia. Nesse caso, a vazão deveria ser controlada de forma proporcional à temperatura diferencial. Porém, torna-se necessário verificar se a redução da altura manométrica não comprometeria o desempenho das unidades consumidoras. A Figura 8b ilustra dois sistemas distintos com diferentes resistências hidráulicas. No sistema com a curva mais plana, a variação da altura manométrica é menos problemática para efeitos operacionais, e os resultados de economia de energia costumam ser mais acentuados, (7).

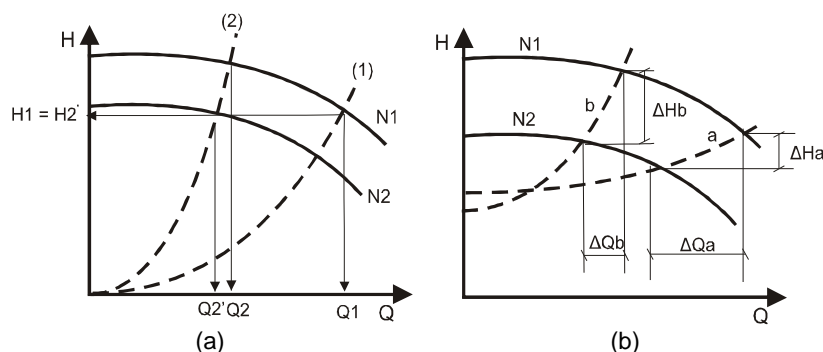


FIGURA 8 - efeitos da variação da rotação das bombas sobre a altura e vazão dos sistemas de circulação

4.3 Temperatura diferencial

A diferença de temperatura entre entrada e saída das fontes (*range*) tem papel importante na eficiência da transferência térmica, conforme equação 4. Em tese, quanto maior o ΔT , melhor. Sendo maior o *range*, menor será a vazão para uma mesma carga térmica. Contudo, deve-se ter sempre presente que todas as fontes têm uma temperatura máxima de operação quando se trata de aquecimento; e uma temperatura mínima quando se trata de refrigeração. Na prática, quase sempre existe a possibilidade de se manter um *range* mais elevado. Descuidos nesse aspecto são corriqueiros.

Fontes de refrigeração (*chillers*) e torres de resfriamento têm a eletricidade como vetor energético. Sob certas circunstâncias, a busca pelo aumento do *range* pode implicar numa menor eficiência da fonte, especialmente em *chillers*. Nesses casos deve-se fazer uma análise criteriosa das vantagens e desvantagens entre a elevação do *range* e a redução da vazão de circulação, (9,10).

4.4 Precauções

Alguns cuidados devem ser observados na variação da vazão de circulação de fluidos em sistemas fechados de transferência térmica mediante variação da rotação da bomba. Certos parâmetros não podem ser violados, entre outros:

- temperaturas máxima e mínima de operação de fontes e unidades consumidoras com vistas à integridade de materiais e propriedades do fluido de trabalho,
- limite de velocidade mínima de escoamento nas tubulações e no interior dos equipamentos,
- limite de pressão mínima de operação do sistema,
- pleno conhecimento do papel das válvulas de controle existentes.

Atenção também deve ser dada para os inconvenientes da má qualidade da energia sobre a operação dos inversores de frequência, (11).

5.0 CONCLUSÃO

Este trabalho trouxe um alerta para as possibilidades de exploração de um grande potencial de economia de energia elétrica em instalações de transferência térmica mediante circulação fechada de fluidos. Geralmente nas indústrias de processos a potência instalada de motores elétricos para o acionamento de bombas para esse propósito é muito grande. Por vezes existe grande preocupação com o ganho de eficiência das fontes térmicas (*chillers*, torres de resfriamento e aquecedores de água e óleo térmico) e das unidades consumidoras, enquanto a eficiência de transferência térmica é negligenciada. A título de ilustração, uma grande planta industrial de processos tem uma potência instalada em ventiladores de torres de resfriamento de 1600 cv (8 x 200 cv), ao tempo que o sistema de circulação de água de resfriamento soma 4500 cv (3 x 1500 cv). Pela experiência do autor, ventiladores de torres têm potência específica entre 0,04 a 0,08 cv/ton. de arrefecimento, enquanto a potência específica para circulação quase nunca é inferior a 0,1 cv/ton. de arrefecimento. Considerando apenas equipamentos de porte significativo, estima-se que no Brasil existam cerca de 5000 torres de resfriamento, 2000 unidades de *chillers* e pouco menos de 1000 aquecedores de fluido térmico. Daí o enorme potencial de economia a ser pesquisado.

Para avaliar a eficiência de transferência térmica, este trabalho propôs um índice de eficiência térmica que pode ser muito útil para aqueles que trabalham com sistemas de circulação fechada. Também foram apresentadas algumas diretrizes para as estratégias de controle da vazão de circulação mediante a aplicação de inversores de frequência em motores de indução. Economia de energia da ordem de 20% tem sido freqüentemente diagnosticada pelo autor em diversas plantas industriais de processo.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Guilherme Filippo, "Conservação de energia elétrica em sistemas fluidomecânicos". Revista Eletricidade Moderna, nº387, Junho 2006, pg 68 - 84.
- (2) Thore Bernstsson et alii, "Process heating in low and medium temperatures ranges". CADDET – Centre for Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies, IEA/OCDE. Analyses Series nº22, Aug. 1997.
- (3) Energy Star Buildings Manual. HEATING AND COOLING SYSTEM UPGRADES. www.energystar.gov/ia/business/Heating.pdf.
- (4) Mario Doninelli. DESIGN PRINCIPLES OF HYDRONIC HEATING SYSTEMS. Handbooks Caleffi, 1999, www.caleffi.com.it.
- (5) Hydraulic Institute. IMPROVING PUMPING SYSTEM PERFORMANCE – A Source Book for Industry, US DOE, Motor Challenge Program, 1999.
- (6) Ross Mackay, "Variable speed". Pumps & Systems, Aug 2004, pg 10 - 11, www.pump-zone.com.
- (7) Ron Carlson, "The correct method of calculating energy savings to justify adjustable-frequency drives on pump". IEEE Trans. on Industry Applications, v. 36, nº6, Nov/ Dec 2000, pg 1725 – 1733.
- (8) Paul S. Hamer et alii, "Energy-efficient induction motors performance characteristics and life-cycle cost comparisons for centrifugal loads". IEEE Trans. on Industry Applications, v. 33, nº5, Sep/Oct. 1997, pg 1 312 – 1320.
- (9) Malcom R. Stout & James W. Leach, "Cooling tower fan control for energy efficiency". Energy Engineering, v. 99, nº1, Jan. 1999, pg 7 - 31.
- (10) Richard H. Stamm, "Energy conservation for industrial refrigeration". Heating, Piping and Air Conditioning Engineering, v. 74, nº2, Feb. 2002, pg 44 - 49.
- (11) Marcel Didden et alii, "Ganhos de eficiência energética versus perda de qualidade de energia". Revista Eletricidade Moderna, nº393, dezembro 2006, pg 102 - 113.

7.0 DADOS BIOGRÁFICOS

Nascido em Guaratinguetá – SP, em 15 de junho de 1957
Engenheiro Mecânico (1980), Mestre em Engenharia (1982), Doutor em Engenharia (1988), Livre-docente (2000)
Chefe do Depto. de Engenharia Elétrica (1989 – 1992) da UNESP – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
Vice-diretor (1996 – 2000) e Diretor geral (2000 – 2004) da UNESP – Campus de Guaratinguetá
Autor do livro "Motor de Indução", Ed. Érica, 2000, com patrocínio cultural WEG
Professor de Sistemas Fluidomecânicos, Depto. de Energia, UNESP/Feg