

# Estratégias de Eficiência Energética aplicadas a Permutadores de Calor

**Marc Thuillard, PhD**

**Forest Reider, M.Sc.**

**Gregor P Henze, PhD, PE**  
Member ASHRAE

## Sumário

A degradação da diferença de temperatura da água entre a ida e o retorno, também conhecida por “Síndrome do delta-T”, relativamente aos valores de projecto é uma ocorrência habitual em várias centrais de distribuição de água refrigerada ou aquecida, origina um desperdício significativo de energia tanto nas redes de distribuição como nos circuitos primários. Neste texto iremos abordar várias estratégias conducentes à prevenção da degradação desse delta-T e compará-las recorrendo a simulações e ensaios reais. Uma das causas de degradação do delta-T é o caudal de água excessivo no permutador de calor (serpentina de aquecimento ou de arrefecimento). A limitação quer do delta-T quer do caudal de água através do permutador de calor constituem duas abordagens conhecidas conducentes à redução da degradação do delta-T no circuito primário. Iremos apresentar uma nova estratégia, denominada de limitação de caudal/delta-T e compará-la-emos com as duas técnicas atrás referidas. Constatou-se que a solução de limitar o caudal de água permite obter melhores resultados nos casos em que a temperatura do ar ou a temperatura da água são as variáveis predominantes quanto à sua flutuação. Por outro lado a limitação do delta-T é a melhor solução sempre que a humidade relativa do ar de entrada ou o caudal de ar constituam, por sua vez, as variáveis predominantes quanto à sua flutuação.

Uma vez que as diversas variáveis que afectam a performance do permutador de calor se alteram tipicamente em simultâneo, surge a dúvida sobre qual a melhor estratégia a adoptar.

Dos estudos de simulação, aqui analisados, chegámos à conclusão que a nova estratégia, limitação do caudal delta-T, conduz a resultados intermédios quando comparados com os obtidos quando se aplicam as duas estratégias tradicionais, limitação de caudal e limitação de delta-T, mantendo uma aceitável performance de transferência de energia no permutador. As diferentes abordagens foram aplicadas a conjuntos de dados obtidos em duas faculdades universitárias, servindo os testes de campo como suporte dos resultados da simulação.

© ASHRAE Winter Conference 2014, New York

### **Autores:**

Marc Thuillard, Phd  
BELIMO Automation AG  
Hinwil, Switzerland  
Email: [marc.thuillard@belimo.ch](mailto:marc.thuillard@belimo.ch)

Forest Reider, M.Sc  
BELIMO Automation AG  
Hinwil, Switzerland  
Email: [forest.reider@belimo.ch](mailto:forest.reider@belimo.ch)

Gregor P. Henze, PhD, PE  
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering  
University of Colorado Boulder  
Boulder, Colorado  
Email: [gregor.henze@colorado.edu](mailto:gregor.henze@colorado.edu)

<b>Capítulo</b>	<b>Pág.</b>
1 Introdução.....	4
2 Estratégias para gerir o desempenho pretendido da serpentina .....	5
3 Caso 1: Variações da Temperatura da água de entrada .....	6
4 Caso 2: Variações do caudal e Humidade do ar de entrada .....	7
5 Aplicação às medições de campo .....	9
6 Conclusões .....	11
7 Referências .....	13

## 1 - Introdução

A degradação da diferença de temperatura entre o caudal de água de ida e do retorno, conhecida como degradação de delta-T, em sistemas de água refrigerada foi amplamente observada e documentada ao longo dos últimos 25 anos (Fiorino 1996, Harrell 2009, Hyman 2004, Ma 2010, Reed 2007, Taylor 2002, 2006). As causas incluem, mas não se limitam, a existência de circuitos de by-pass, loops de controlo oscilantes e circuladores de água de velocidade constante com válvulas de controlo de três vias terminais. Particularmente, sob condições de carga parcial, quando o caudal de água é excessiva face à carga de refrigeração necessária, poderá dar-se o arranque de um chiller e uma torre de arrefecimento adicionais, por requisito de caudal de água, mesmo que o limite da capacidade de refrigeração dos grupos em funcionamento não tenha sido atingida. Apesar dos efeitos da redução da temperatura da água de retorno serem sobejamente conhecidos, o verdadeiro problema é o caudal de água refrigerada excessivo (Henze, Henry e Thuillard 2013). Apesar de existirem numerosos factores que contribuem para uma degradação de delta-T, este artigo explora várias possibilidades de mitigação da degradação de delta-T, aplicando estratégias de controlo a cada permutador de calor.

A transferência de energia num permutador de calor, sem mudança de estado, é descrita pela função,

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

onde  $\dot{m}$  é o caudal mássico do fluido [kg/s],  $c_p$  o calor específico do fluido [J/kgK] e  $\Delta T$  [K] a alteração da temperatura do fluido ao passar pelo permutador. Uma aplicação típica de um permutador de calor no domínio AVAC consiste em arrefecer o ar fornecido a uma zona ambiente até se atingir a temperatura de conforto com temperaturas exteriores elevadas. A transferência de energia da água refrigerada para o fluxo de ar depende não só das dimensões do permutador de calor como também dos estados físicos dos fluidos (temperatura, entalpia). Com um fluxo de ar e condições de entrada constantes, a transferência de energia para o ar aumenta com um aumento do caudal de água refrigerada conforme apresentado na Figura 1a. A caudais elevados, a transferência de energia (linha contínua) aproxima-se de um limite, enquanto que o delta-T (linha intermitente) se degrada assintoticamente em direcção a zero. Ao aproximar-se deste limite, qualquer aumento no caudal de água refrigerada apenas irá resultar num aumento marginal da transferência de energia para o fluxo de ar. A zona de retorno diminuído poderá ser considerada como uma zona de desperdício ou saturação na qual a degradação de delta-T é causada por um caudal de água desnecessariamente alto, provocando uma baixa temperatura da água de retorno. Para reduzir a contribuição de um permutador de calor para a degradação de delta-T em sistemas hidráulico centralizados, é recomendado que se evite operar na zona de saturação. Ainda assim, mesmo que se opere na zona de saturação, mas não exageradamente, verifica-se que a diminuição da capacidade de transferência resultante, na serpentina, é largamente compensada pela poupança energética nos circuladores e no aumento da eficiência energética dos produtores da central térmica. Neste artigo iremos apresentar e analisar três estratégias de limitação do caudal mássico, para evitar a saturação na serpentina, como uma contribuição à exploração e abordagem geral desta temática.

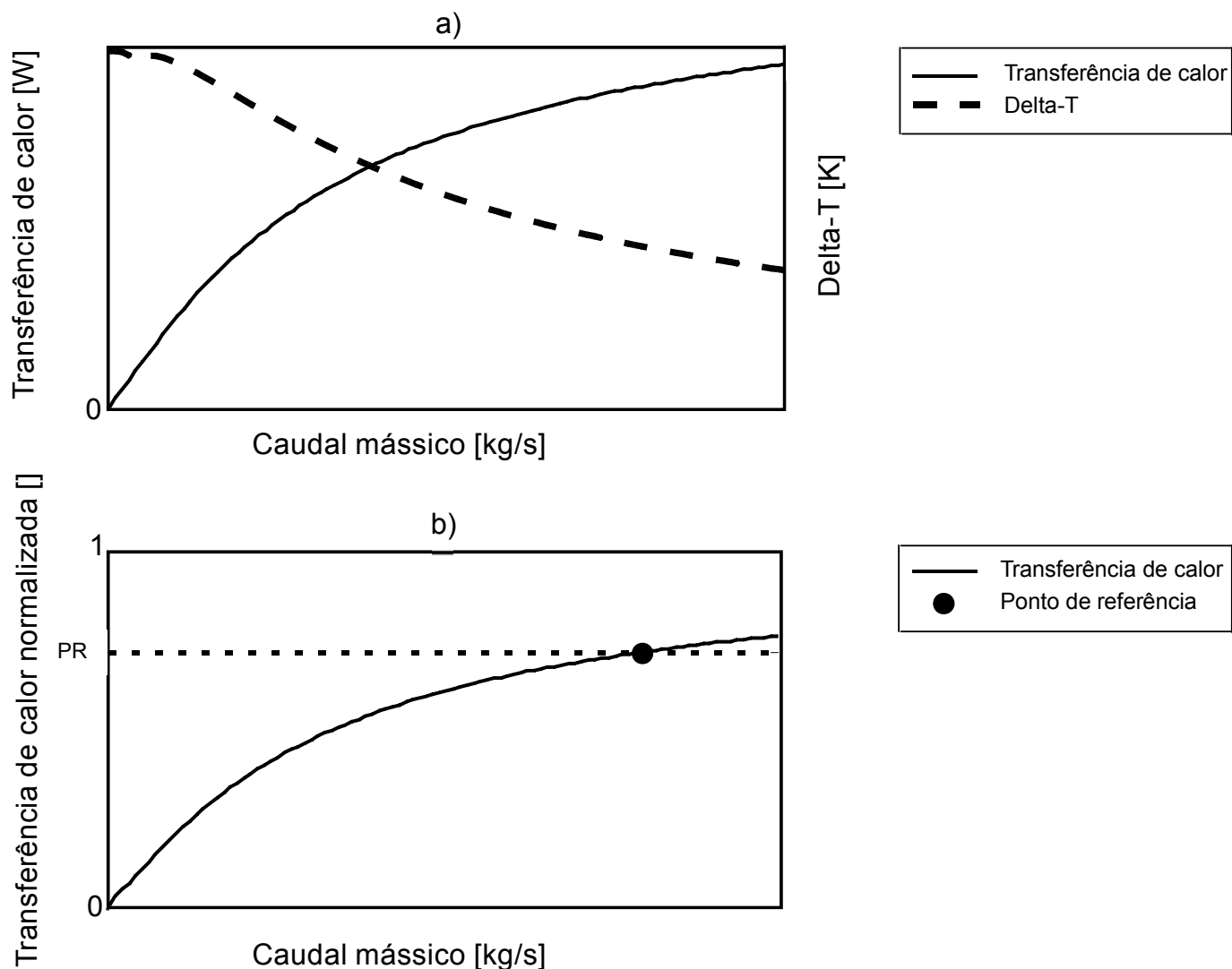


Figura 1: Capacidade de transferência de calor, absoluta (a) e normalizada (b), às condições de projecto. (A descida no canto superior esquerdo de (a) deve-se à transição do regime de caudal)

## 2 - Estratégias para gerir o desempenho pretendido da serpentina

Foi levado a cabo um estudo de campo sobre a estratégia de limitação de delta-T na biblioteca do Massachusetts Institute of Technology (MIT) (Henze, Henry e Thuillard 2013). Este estudo envolveu a utilização de dispositivos de controlo independentes de pressão que incorporavam medidores de caudal electromagnéticos, sensores de temperatura nas tubagens de água ida e retorno, e microprocessadores para implementar e monitorizar cada uma das estratégias de limitação de delta-T. Fez-se uso de um software apropriado, não sendo aqui relevante a sua descrição, para determinar os valores limiares do delta-T para cada serpentina. O resultado obtido no MIT foi a duplicação do delta-T face ao que era antes da renovação da instalação, que sustenta a afirmação que as estratégias de limitação têm um impacto positivo no síndrome do delta-T. Igualmente bons foram os resultados obtidos neste estudo na implementação da limitação de caudal. Mesmo nos dias mais quentes do ano estes ensaios, de limitação do delta-T e caudal, não tiveram impacto nas condições de conforto ambiente. A equação 1 contém duas variáveis: caudal e delta-T. Limitar uma das variáveis terá impacto sobre a outra levando-nos a concluir que as duas estratégias são merecedoras de análise na degradação do delta-T. Este artigo propõe uma nova estratégia de redução da degradação de delta-T ao combinar o caudal e o delta-T numa única variável, a razão entre caudal e delta-T. Esta estratégia de limitação será referida no resto deste artigo como a estratégia de limitação de caudal/delta-T. São necessários três sensores para implementar a estratégia de caudal/delta-T. Dois sensores de temperatura medem a alteração da

temperatura entre a entrada e a saída do permutador e um caudalímetro para a medição do caudal da água refrigerada.

Foi desenvolvida uma ferramenta de simulação, baseada no código do kit de ferramentas AVAC de Brandemuehl, Gabel e Andersen (Brandemuehl 1993) para gerar mapas de desempenho de permutadores de calor de fluxos cruzados baseados nos comportamentos sobejamente conhecidos das serpentinas de refrigeração, secas e húmidas, de modo a estabelecer um comportamento esperado da serpentina para uma determinada gama de condições operacionais. Esta ferramenta foi desenvolvida porque o comportamento complexo dos permutadores de calor depende de diversos factores: pressão do ar, temperaturas de entrada da água e do ar, humidade, caudais, propriedades de ambos os fluidos e a geometria e propriedades físicas do permutador de calor. Em particular o modelo tem em consideração a massa de água de condensação originada em serpentinas totalmente e parcialmente molhadas no processo de desumidificação. Para efeitos do presente estudo as únicas variáveis consideradas foram as temperaturas de entrada da água e do ar, humidade do ar de entrada e o caudal mássico do ar; os restantes parâmetros consideraram-se inalterados.

As três estratégias de limitação são abordadas e comparadas utilizando uma capacidade normalizada, uma variável desenvolvida para estudar o comportamento do permutador de calor. A normalização é conseguida pelo quociente da curva absoluta de transferência de calor pela transferência máxima de calor da serpentina para determinados estados de entrada dos fluidos a caudais de água muito elevadas, como se mostra na Figura 1b. O domínio dos valores de transferência de calor normalizados encontra-se, portanto, entre zero e um. Um ponto de referência (PR) é seleccionado na curva de transferência de calor normalizada às condições de projecto da serpentina de refrigeração. O ponto de referência serve de base de comparação. À medida que as condições de operação mudam durante o ano, o ponto de operação máximo normalizado da serpentina imposto pelas estratégias de limitação varia, consoante pode ser visto nas Figuras 2 a 4. Neste estudo, os parâmetros físicos foram alterados um de cada vez, sendo o seu efeito analisado. Relativamente às simulações numéricas, as condições de projecto referem-se à transferência de calor observada na biblioteca da faculdade do MIT, no pico do verão. O PR neste artigo foi escolhido com fins ilustrativos e representa um ponto na curva de transferência de calor normalizada para o qual a serpentina se encontra 85% saturada. Nestas condições de projecto, o ponto de referência não só define um limite de capacidade normalizado da transferência de calor como também define o início do controlo de caudal, delta-T ou caudal/delta-T. A estratégia cujo resultado permite atingir, o mais aproximadamente possível, o limite de capacidade normalizado excedendo, sempre, a performance mínima aceitável da serpentina será considerada superior.

### **3 - Caso 1: Variações da Temperatura da água de entrada**

Assumindo constantes a temperatura, humidade e caudal do ar, as simulações mostram que, as curvas de capacidade normalizada da serpentina são quase independentes da temperatura de entrada da água numa gama bastante alargada que, ao invés, provocam uma variação da potência de arrefecimento absoluta. A figura 2 a) mostra um exemplo de um permutador de calor com duas temperaturas de água de entrada. As curvas de transferência de calor normalizadas (figura 2b) encontram-se quase sobrepostas assim como o caudal limite e o PR. Por outras palavras a forma de curva de transferência de calor normalizada é independente da temperatura da água de entrada

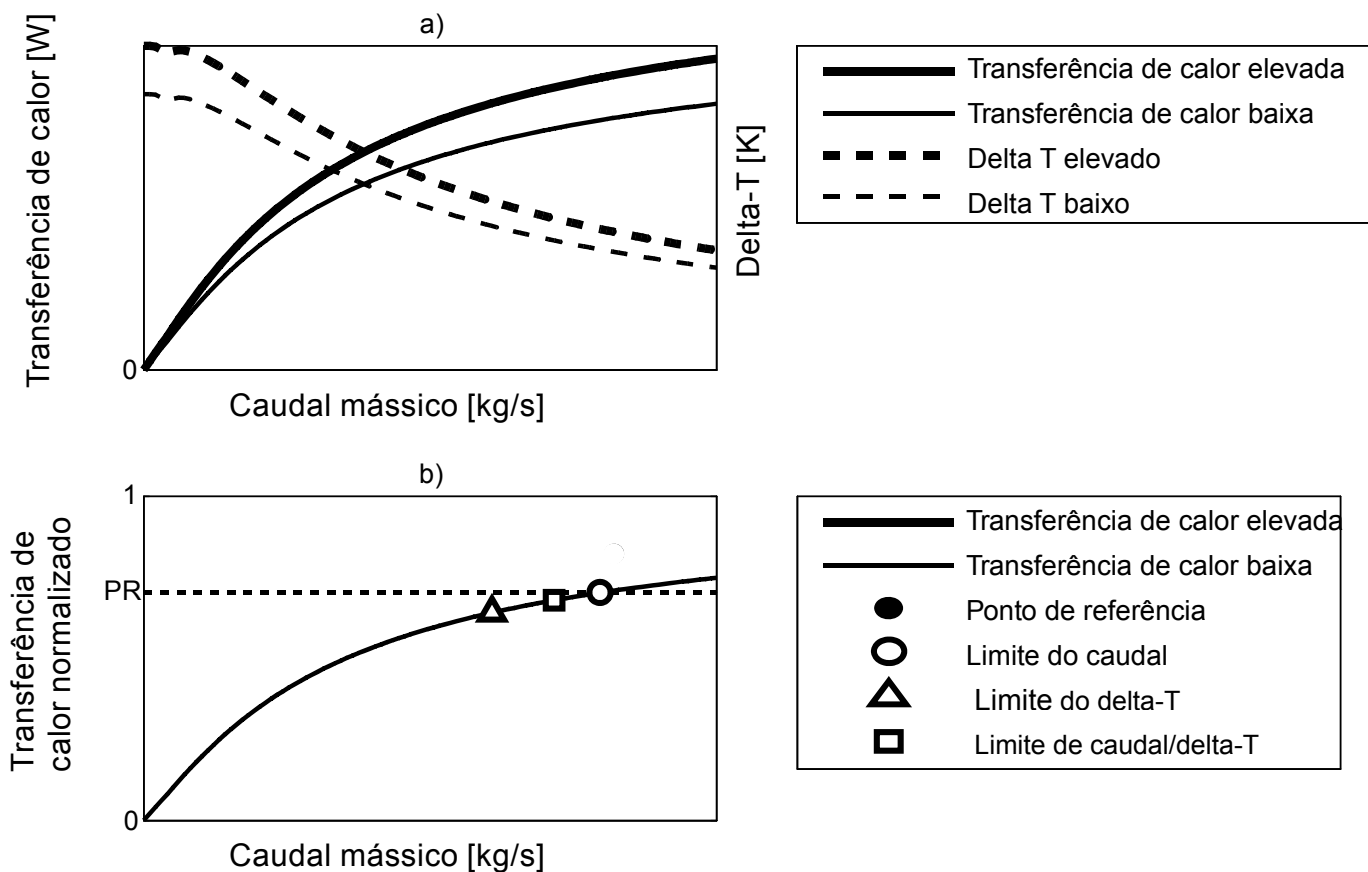


Figura 2: Capacidade de transferência de calor, absoluta (a) e normalizada (b), com resultados na limitação do caudal mássico de água provocados pelas três estratégias em análise, limitação de caudal, limitação do delta-T e limitação do caudal/delta-T, assumindo um aumento de 2K na temperatura de entrada da água refrigerada, de 6 para 8°C.

Considerando apenas variações da temperatura da água, a limitação do caudal da água é a melhor estratégia para prevenir que o mesmo entre excessivamente na zona de saturação. Em contraste, a limitação de delta-T conduz a um desvio bastante acentuado do ponto de referência PR. O resultado obtido com a limitação de caudal/delta-T encontra-se entre os resultados obtidos com as estratégias de limitação de caudal e de delta-T. O mesmo comportamento pode ser observado com temperaturas de entrada do ar distintas; a transferência de energia normalizada pelo limite máximo de transferência é independente da temperatura de entrada do ar com resultados de controlo similares.

#### 4 - Caso 2: Variações do Caudal e Humidade do ar de entrada

Assumindo constantes a temperatura da água, a temperatura e humidade do ar de entrada as curvas de capacidade normalizada de arrefecimento tomam aspectos muito distintos para os casos de transferência alta e baixa de calor, tal como se mostra na Figura 3. As simulações mostram que a capacidade da serpentina tem um comportamento quase perfeito em função do delta-T considerando a estratégia de limite do delta-T a ponto de se aproximar bastante do PR. Ao invés o limite de caudal não evita a entrada em plena saturação da serpentina. A limitação caudal/delta-T conduz a um resultado intermédio em relação às duas estratégias anteriores.

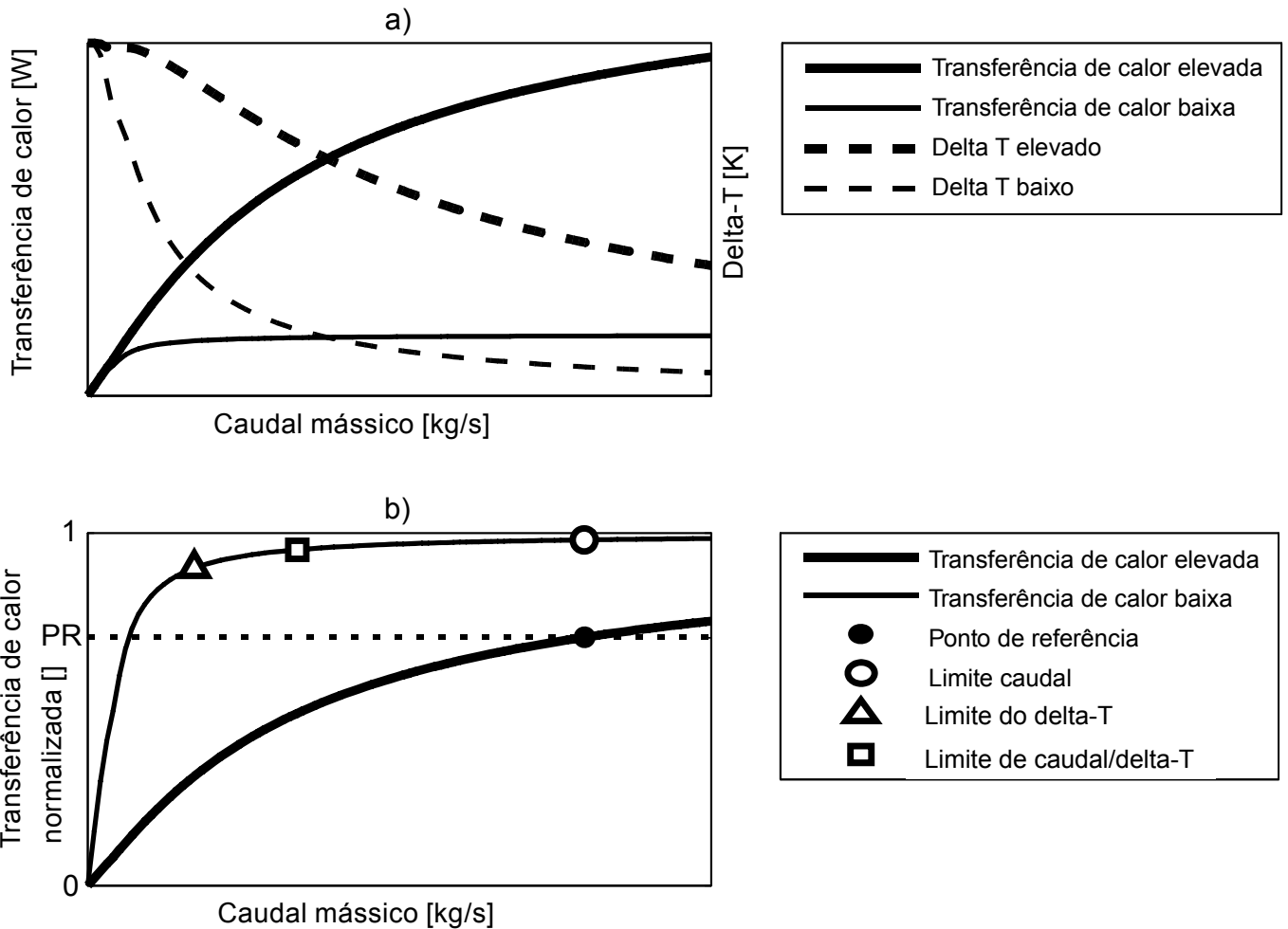


Figura 3: Capacidade de transferência de calor absoluta (a) e normalizada (b) com resultados na limitação do caudal mássico de água “provocados” pelas três estratégias de limitação em análise, limitação de caudal, limitação do delta-T e limitação do caudal/delta-T, assumindo um factor de redução 6 no caudal mássico do ar.

As escalas das curvas normalizadas no caso de fazermos variar a humidade do ar dependem fortemente da existência ou não da condensação na serpentina, ou seja, se há ou não mudança de estado da água contida no ar. Quando se dá o fenómeno da condensação (desumidificação), o que tipicamente ocorre numa serpentina de arrefecimento, os resultados obtidos são muito semelhantes aos anteriores, para o caso de variação do caudal de ar. Conclui-se assim que a estratégia de limite do delta-T é também a melhor solução para os casos em que se verifique variações da humidade do ar.

É vulgar observar-se nas instalações de caudal de ar variável que a água refrigerada e o caudal de ar de entrada na serpentina variem simultaneamente. Neste caso, qual a melhor estratégia de limitação?

Os resultados obtidos nos sistemas de caudal de ar constante reflectem os encontrados para sistemas de caudal de ar variável nos quais a limitação de caudal/delta-T é a melhor estratégia conforme se pode comprovar no capítulo seguinte. É necessário, contudo, tomar as devidas precauções quanto à escolha do valor limite do delta-T: pode ocorrer uma forte limitação da transferência de calor no caso, habitual, de variação simultânea das várias variáveis. Por seu lado o limite de caudal pode originar o efeito inverso, ou seja, limitar tarde de mais, conduzindo a uma saturação excessiva da serpentina. Chegou-se à conclusão que o limite do quociente caudal/delta-T é a estratégia que previne uma temperatura de água de retorno demasiado baixa e, simultaneamente mantém, ou mesmo excede, a performance normalizada da serpentina nas situações de carga elevada.



## 5 - Aplicação às medições de campo

Foi levado a cabo um estudo de campo nas faculdades do Massachusetts Institute of Technology (MIT) e da University of Colorado Boulder (UCB) durante a estação fria de 2011. No decurso deste estudo de campo, foram recolhidos dados de elevada precisão nos permutadores de calor. As variáveis, registadas em intervalos de 30 segundos, incluíram o delta-T através do permutador de calor e o caudal mássico de água através da serpentina. Utilizando estes conjuntos de dados, as três estratégias de gestão das serpentinas foram aplicadas e comparadas, conforme ilustrado nas Figuras 4 (MIT) e 5 (UCB). Para os dados apresentados nestas figuras, o caudal de água não foi restringido, intencionalmente, durante a operação real, e as estratégias de gestão foram aplicadas numa subsequente análise da simulação para evidenciar as restrições que teriam ocorrido caso essas estratégias tivessem sido implementadas.

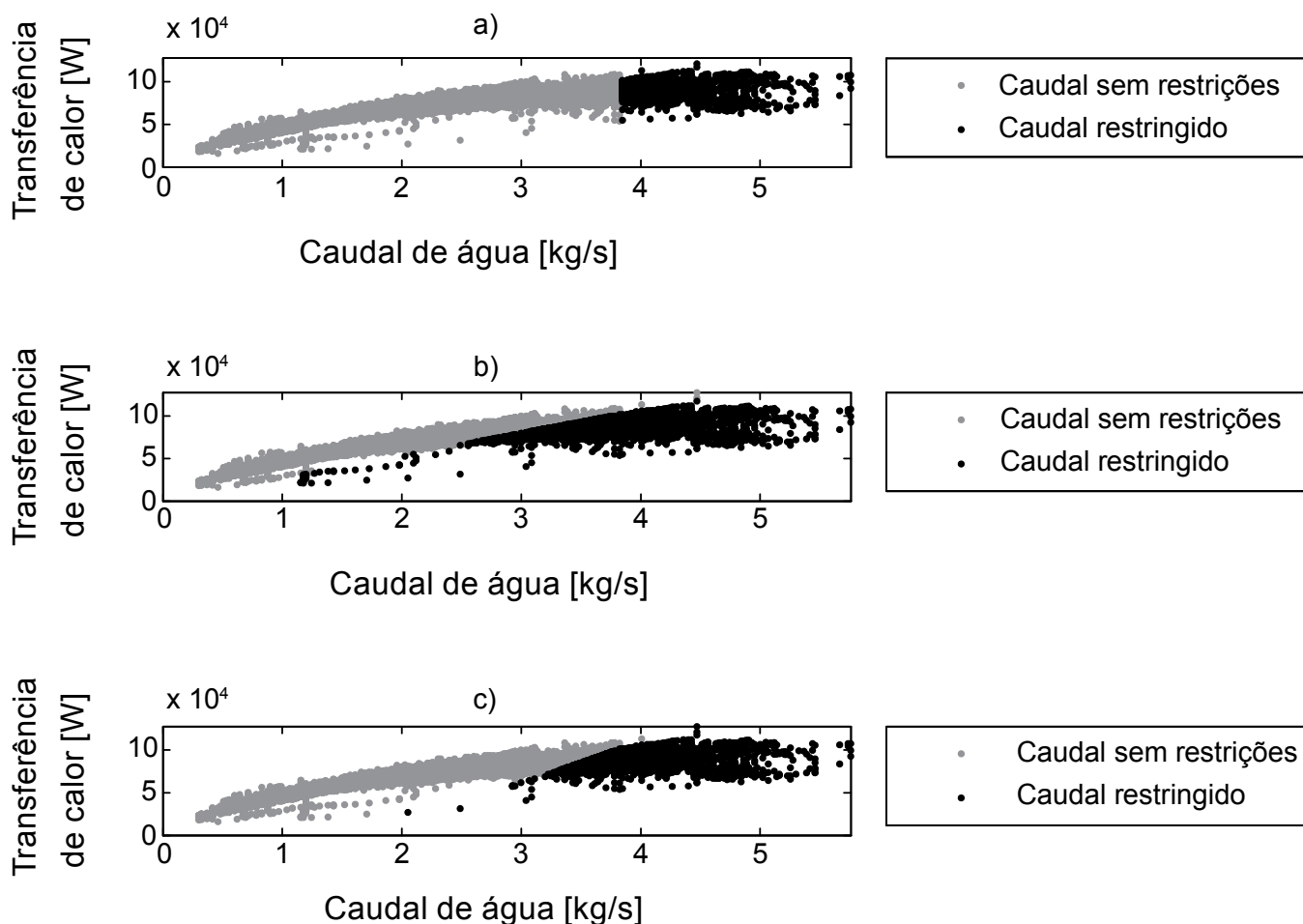


Figura 4: Estratégias de gestão das serpentinas com limitação de caudal (a), limitação de delta-T (b) e limitação de caudal/delta-T (c) aplicadas às medições obtidas na unidade de tratamento de ar do MIT.

Podemos observar na Figura 4 a capacidade da serpentina a aumentar com o caudal mássico de água refrigerada de modo exponencial, revelando saturação a caudais elevados. A aplicação das estratégias de gestão das serpentinas torna-se evidente pela separação das zonas claras e escuras. Analisando a Figura 4a, pode notar-se que o ponto de saturação é diferente para as curvas envolventes superior e inferior. Apesar de terem sido observados resultados favoráveis no MIT ao aplicar tanto estratégias de

limitação de caudal como de delta-T, os resultados da simulação apresentados na Figura 4 evidenciam que a limitação de caudal/delta-T iria conduzir a resultados favoráveis compreendidos entre as estratégias de caudal e de delta-T.

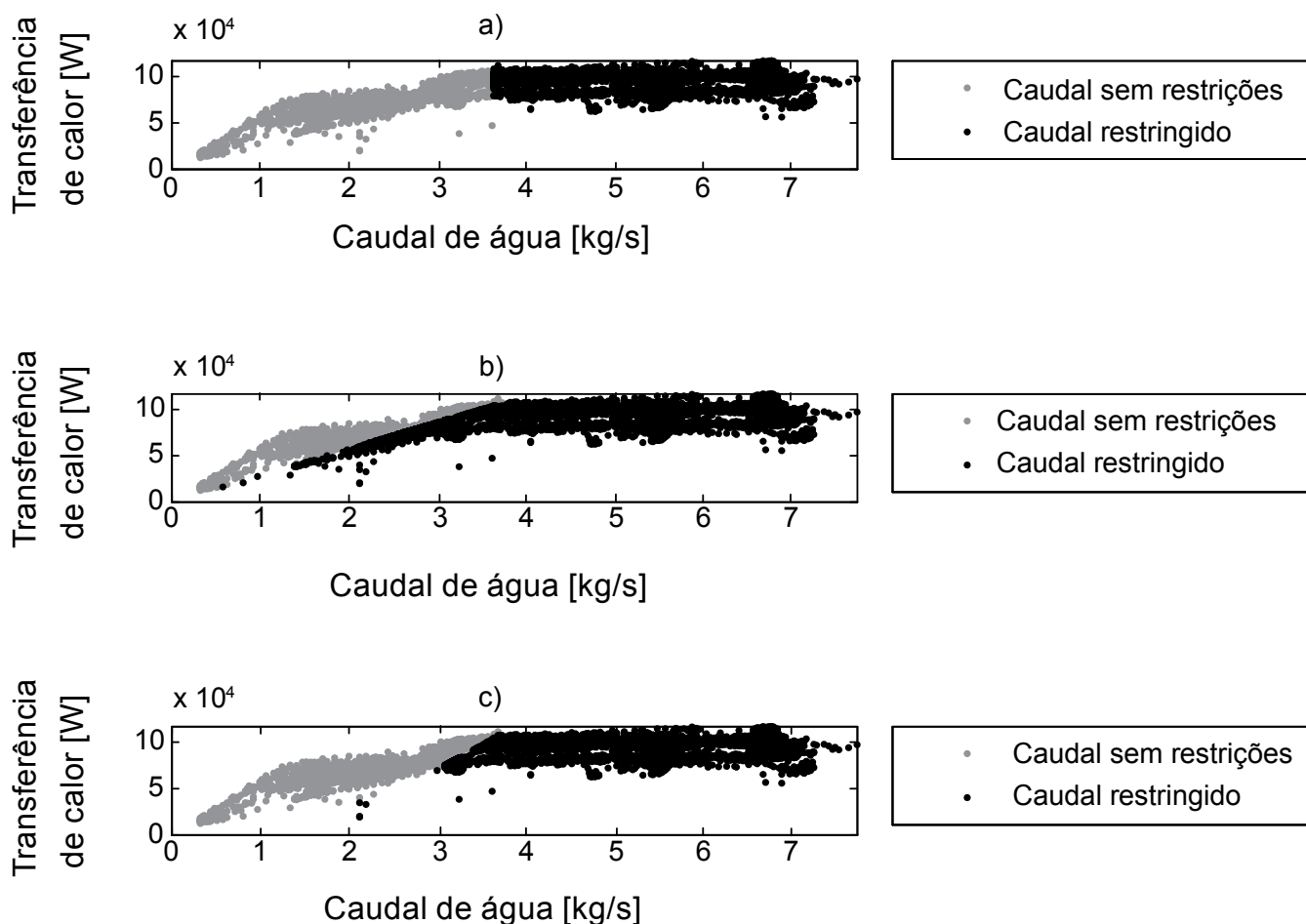


Figura 5: Estratégias de gestão de serpentinas com limitação de caudal (a), limitação de delta-T (b) e limitação de caudal/delta-T (c) aplicadas aos dados obtidos numa unidade de tratamento de ar da UCB.

Na Figura 5, pode-se constatar tendências similares na UCB às observadas na fig.4 referentes ao MIT. Em particular, a estratégia de gestão de delta-T parece limitar o caudal prematuramente tendo em consideração o ponto de referência seleccionado. Os dados sugerem que a limitação de caudal/delta-T é ligeiramente superior à estratégia de gestão de limitação de caudal. No decurso das experiências levadas a cabo, a selecção do ponto de referência foi particularmente importante. Uma vez que a finalidade das estratégias de gestão de limitação é conseguir o equilíbrio apropriado entre o desempenho da serpentina e a optimização da transferência de energia, a selecção deve ser realizada com muito cuidado. Uma selecção incorrecta do limite, não permitindo que a serpentina chegue à zona de saturação deverá ser evitada.

## 6 - Conclusões

Os permutadores de calor recorrentemente são forçados a funcionar num regime que provoca um abaixamento excessivo da temperatura da água de retorno; acima de um determinado valor, aumentar o caudal de água resulta num aumento marginal da transferência de energia. Implementar uma estratégia para evitar esse abaixamento excessivo é bastante positivo do ponto de vista da racionalização energética. A eficiência da instalação central - grupos geradores de água quente e fria e respectivos circuladores - aumenta com a diminuição do caudal de água e com a elevação da temperatura da água de retorno. A energia eléctrica despendida nos circuladores baixa significativamente em consequência directa da diminuição de caudal.

Neste estudo analisámos três estratégias de limitação de caudal de água refrigerada através da serpentina do permutador de calor de modo a evitar a zona de saturação. A performance das serpentinas de aquecimento e arrefecimento é complexa e depende fortemente das temperaturas de entrada e caudais, tanto da água como do ar, bem como da humidade do ar. Dependendo de qual destas variáveis é dominante, quanto às suas flutuações, os melhores resultados, no que diz respeito á transferência de energia, poder-se-á escolher a melhor estratégia de limitação de caudal.

**Tabela 1. Classificação das Estratégias de Gestão da Serpentina (Permutador de calor)**

<b>Variável predominante (1)</b>	<b>Limitação de caudal</b>	<b>Limitação de delta-T</b>	<b>Limitação de caudal/delta-T</b>
Temp.de entrada de água	1	3	2
Temp. de entrada de ar	1	3	2
Humidade de entrada de ar	3	1	2
Caudal de ar	3	1	2

(1) Quanto à sua própria flutuação (variação)

A tabela 1 sintetiza a classificação de cada uma das estratégias de limitação de caudal em função da variável predominante quanto á sua própria flutuação.

Ficou demonstrado que a limitação de caudal é a estratégia preferencial quando apenas varia a temperatura da água ou do ar. Quando mudanças da humidade ou do caudal de ar dominam a transferência de calor, a limitação de delta-T é a solução preferencial para controlar o desempenho da serpentina. Quando todas as condições de entrada mudam em simultâneo, conforme exemplificado nas Figuras 4 e 5, a limitação de caudal/delta-T apresenta-se como a solução mais eficaz para manter um bom desempenho da serpentina e evitar a saturação.

## Nomenclatura

$E$  = taxa de energia transferida do permutador de calor

$\dot{m}$  = caudal mássico do fluido, sob controlo, que atravessa o permutador de calor

$\Delta T$  = diferença da temperatura do fluido, sob controlo, ao atravessar o permutador de calor

$c_p$  = calor específico do fluido, sob controlo, que atravessa o permutador de calor

## Referências

- Brandemuehl, M.J., Gabel, S., and I. Andersen. 1993. A toolkit for secondary HVAC system energy calculations (629-RP). ASHRAE
- Fiorino, D.P. 1996. Twenty-five ways to raise your chilled-water temperature differential. AHSRAE Transaction. 102(1): 567-572.
- Harrel, J.M. and J.A. Mathias. 2009. Improving efficiency in a campus chilled water system using energy analysis. ASHRAE Transactions. 115(1): 507-522.
- Henze, G.P., Henry, W., and M. Thuillard. 2013. Improving campus chilled water systems with intelligent control valves: A Field Study, pp. 103-112. Proceedings of the 2013 ASCE Architectural Engineering Conference, April 2-5, 2013, State College, PA.
- Hyman, L.B. and D. Little. 2004. Overcoming low delta-T, negative delta-P, at large university campus. ASHRAE Journal. February. 28-34.
- Ma, Z. and S. Wang. 2010. Enhancing the performance of large primary-secondary chilled water systems by using bypass check valve. Energy. doi:10.1016/j.energy.2010.10.042.
- Reed, M.A., and C.Davis. 2007. Chilled water plant savings at no cost. Energy Engineering. 105(2):59-76.
- Taylor, S.T. 2002. Degrading chilled water plant delta-T: causes and mitigation. ASHRAE Transactions. 108(1): 641-653.
- Taylor, S.T. 2006. Chilled water plant retrofit – a case study. ASHRAE Transactions. 112(2): 187-197.