

informações para projetistas do sistema HVAC da atualidade

# Boletim Informativo de Engenharia

volume 42-4

## O impacto dos VFD no desempenho da CAG

A eficiência de vários projetos de CAG – Central de Água gelada e estratégias de operação é um assunto atual no setor. Uma recente série em cinco partes no *ASHRAE Journal* apresentou um excelente processo para projetar uma CAG moderna e eficiente.

Além disso, o conceito de CAG de velocidade 100% variável está reverberando no setor. Com a popularidade e os preços em queda dos variadores de frequência (VFD), a adoção de VFD aumentou. Enquanto investir em um VFD em componentes de CAG normalmente resulta em economia de energia, a magnitude das economias e a recuperação de investimento podem variar significativamente.

O propósito deste *Boletim Informativo de Engenharia* é comparar o impacto do acréscimo de VFD a vários componentes da CAG sob algumas condições diferentes de projeto e controle. Esperamos que isso faça com que os projetistas de plantas explorem a variedade de possibilidades de projeto e controle de plantas em projetos futuros.

### A análise

Para oferecer diversidade suficiente a fim de tornar essa uma análise útil, serão analisados os exemplos a seguir.

#### Tipos de prédio:

- Escritório de Chicago com economizador
- Hospital em Memphis sem economizador
- Escritório de Miami sem economizador

#### Configurações da CAG:

|                                                  |                               |
|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| Condições da água resfriada                      | 13,3 C–5,5 °C<br>(1,7gpm/TR)  |
| Condições do fluxo de água de condensação        | 29,4 °C–34,6 °C<br>(3 gpm/TR) |
| Célula de torre de resfriamento por chiller      | (38,2' gpm/hp)                |
| Bomba de água de condensação por chiller         | (19 W/hp)                     |
| Chillers de velocidade constante 1, 2 e 3        | (0,567 kW/TR)                 |
| Controle de setpoint da torre fixa               | 29,4 °C                       |
| Em conformidade com a ASHRAE 90.1-2010 Caminho A |                               |

**Alternativas:** A partir dessas condições-base, a análise considerará:

- sequências de controle otimizadas,
- o acréscimo de VFD a vários componentes e
- condições de projeto de sistema quase ideais.

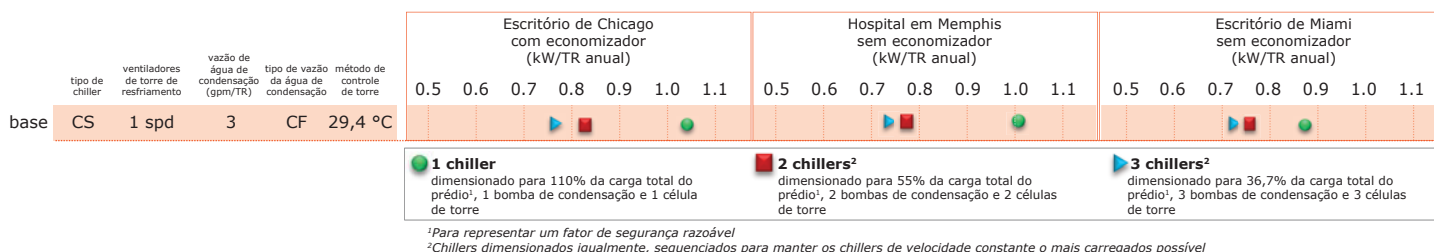
Como várias das estratégias de controle otimizado consideradas são difíceis de analisar em software de modelagem de energia disponível comercialmente, foi criado um programa personalizado para realizar a análise. Ele utiliza algoritmos quadráticos com múltiplas variáveis para modelagem de chiller e o modelo de desempenho de torre de resfriamento ASHRAE, desviando-se dos setpoints do projeto somente onde especificado para avaliar o controle otimizado. O programa de modelagem realiza uma análise de 8.760 horas usando arquivos climáticos TMY3.

O desempenho de energia resultante é informado como *kW/TR anual*. Esse valor é calculado dividindo-se o kWh anual total da CAG por toneladas-horas total anual do sistema. Isso representa uma média de um ano do desempenho da planta de chiller.

Finalmente, é importante observar que, para manter um escopo razoável para essa análise, consideramos o consumo de energia somente do chiller e do equipamento de rejeição de calor (bomba de condensação e ventilador em torre).

[1] De acordo com ASHRAE 90.1 2007 –  
Apêndice G Prédio de referência

Figura 1. Desempenho do sistema de caso de base em kW/TR anual



**O caso de base.** A Figura 1 representa nosso caso de base para esta comparação EN – desempenho de um sistema de velocidade sempre constante operando com um setpoint da torre de resfriamento de 29,4 °C. O lado esquerdo da tabela mostra a configuração da planta e as condições operacionais. As abreviações da tabela representam o seguinte:

|          |                                                                  |
|----------|------------------------------------------------------------------|
| CS       | velocidade constante                                             |
| VS       | velocidade variável                                              |
| 1 spd    | velocidade única                                                 |
| 3 gpm/TR | vazão alta                                                       |
| 2 gpm/TR | vazão quase ideal                                                |
| CF       | fluxo constante                                                  |
| VF       | fluxo variável                                                   |
| 29,4 °C  | setpoint da água que sai constante                               |
| Opt      | controle de temperatura da água da torre otimizado em tempo real |

Os resultados do desempenho de energia para cada local e o tipo de prédio são exibidos à direita em termos do desempenho anual de kW/TR.

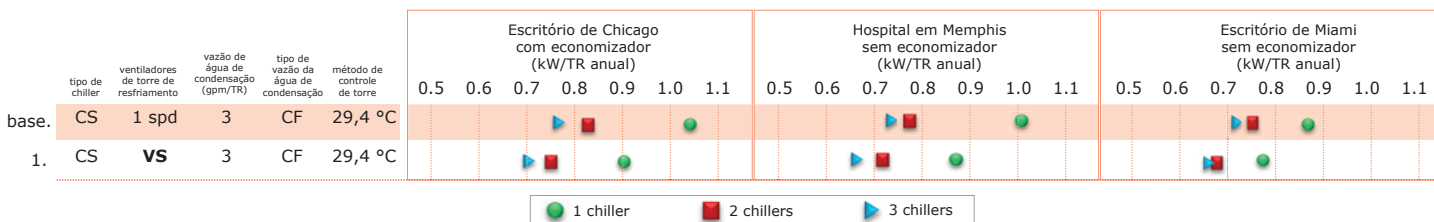
Para os exemplos de dois e três chillers, os chillers seguidores são desligados assim que a carga da planta permitir. Em um sistema de velocidade sempre constante, se os chillers seguidores são deixados ligados em cargas baixas, o desempenho anual da planta será pior, próximo ou equivalente ao uso de energia do sistema de chiller simples.

**Observações.** A partir desta análise de caso de base podemos fazer duas observações.

- Em primeiro lugar, o uso de vários chillers reduz significativamente o uso de energia da planta, com o maior impacto sendo visto passando de um chiller para dois. Isso ocorre porque em muitas horas com carga parcial, metade ou mais da energia da bomba e do ventilador pode ser desligada. Isso resulta em um equilíbrio muito melhor da potência do chiller, da bomba e do ventilador relativa à carga de refrigeração. Em muitas horas com carga parcial, um ou mais chillers também podem ser desligados permitindo que os chillers restantes operem em um ponto de carga mais eficiente.

- Em segundo lugar, a eficiência anual da planta para a localização de Chicago parece pior que as demais. À medida que são acrescentados chillers, a diferença se torna menor. Há dois motivos significativos.
  - Mesmo com a operação do economizador do lado do ar, o escritório de Chicago tem uma porcentagem mais alta de horas de operação com menor carga nos chillers. Com a entrada de água de condensação sendo controlada em 29,4 °C, a baixa eficiência em baixa carga do(s) chiller(s) de velocidade constante e o consumo elétrico relativamente maior da bomba de condensação resultam em eficiência pior do sistema em horas com baixa carga.
  - Em cargas baixas, há menos energia térmica para onde distribuir a elevada vazão/alto nível consumo da bomba de condensação, resultando em um efeito negativo mais pronunciado no desempenho anual do sistema.

Figura 2. Comparação da Alternativa 1 e do caso de base do controle do ventilador da torre de resfriamento com velocidade constante versus velocidade variável



**Alternativa 1.** A primeira alternativa (Figura 2) aplica controle de velocidade variável ao ventilador da torre de resfriamento, novamente com um setpoint de 29,4 °C sobre a água que sai da torre de resfriamento.

**Observações:**

- Adicionar VFD aos ventiladores da torre de resfriamento melhora a eficiência da planta de 8 a 13%. Como se pode esperar, a menor melhoria está na planta de três chillers de Miami e a maior porcentagem de melhoria está na CAG único de Chicago.
- A operação liga-desliga de um único ventilador em uma torre de resfriamento é um método muito ineficiente de controle da capacidade da torre.

- Aproveitar as leis de afinidade em um dispositivo de velocidade variável de descarga livre, mesmo sem um controle de setpoint otimizado, resulta em economias substanciais.
- Embora não fique óbvio a partir dos dados, o controle de temperatura estável ativado pelo controle de capacidade de velocidade variável da torre também aprimora a eficiência do sistema.

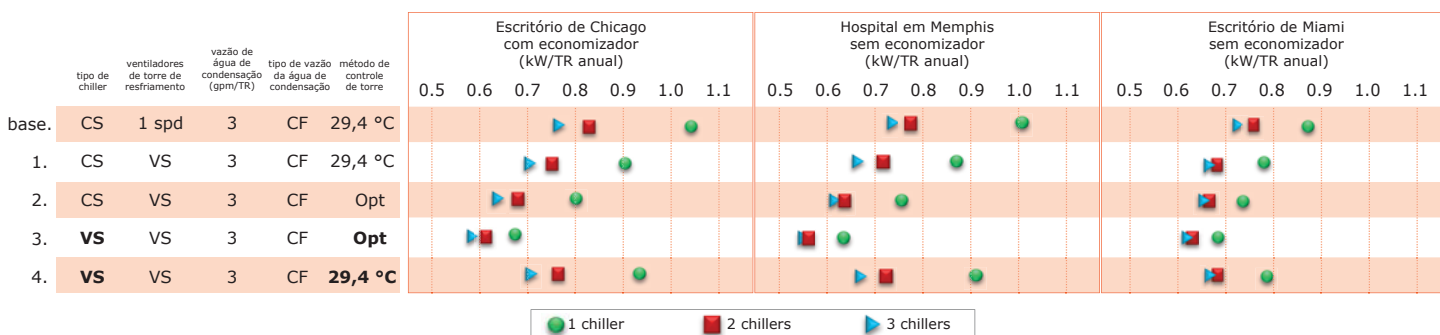
|       |                    |                                    |                                                |                                 |                                   | Escritório de Chicago<br>com economizador<br>(kW/TR anual) |     |     |     |     |     | Hospital em Memphis<br>sem economizador<br>(kW/TR anual) |     |     |     |     |     | Escritório de Miami<br>sem economizador<br>(kW/TR anual) |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|       | tipo de<br>chiller | ventiladores<br>de<br>resfriamento | vazão de<br>água de<br>condensação<br>(gpm/TR) | tipo de vazão<br>de condensação | método de<br>controle de<br>torre | 0.5                                                        | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1                                                      | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0                                                      | 1.1 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.1 |
| base. | CS                 | 1 spd                              | 3                                              | CF                              | 29,4 °C                           |                                                            |     |     |     |     |     |                                                          |     |     |     |     |     |                                                          |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 1.    | CS                 | VS                                 | 3                                              | CF                              | 29,4 °C                           |                                                            |     |     |     |     |     |                                                          |     |     |     |     |     |                                                          |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 2.    | CS                 | VS                                 | 3                                              | CF                              | <b>Opt</b>                        |                                                            |     |     |     |     |     |                                                          |     |     |     |     |     |                                                          |     |     |     |     |     |     |     |     |

1 chiller
  2 chillers
  3 chillers

- Otimizar a operação do ventilador da torre de resfriamento de velocidade variável melhora significativamente a eficiência anual da planta.

- ventilador de torre de resfriamento resulta em maior aumento da eficiência da planta do que qualquer outra aplicação otimizada simples de um VFD em uma CAG. Conforme comparamos mais alternativas, isso se tornará evidente.

**Figura 4. Comparação das Alternativas 3 e 4 com o acréscimo de variadores de frequência nos chillers e controle otimizado da torre**



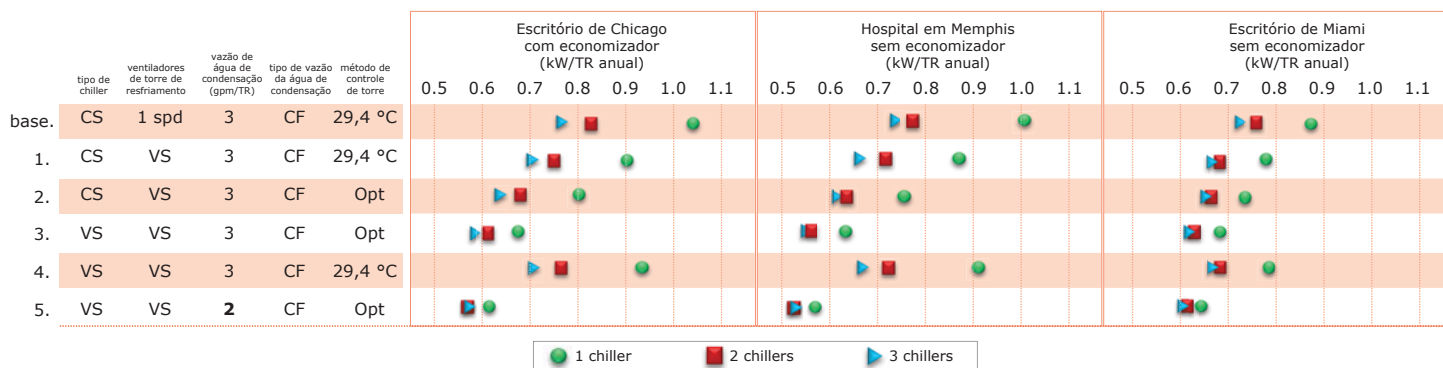
Como declarado anteriormente, a eficiência do chiller de velocidade constante é modelada a 0,567 kW/TR (em conformidade com a ASHRAE 90.1-2010 Caminho A) Esses chillers de velocidade variável alternativos são modelados em 0,585 kW/TR (em conformidade com a ASHRAE 90.1-2010 Caminho B). Esse grau de diferença é comum porque o VFD apresenta uma perda adicional de eficiência elétrica. Além disso, o custo maior do VFD pode ser compensado

**Observações.**

- Na alternativa 3, adicionar velocidade variável aos ventiladores com controle otimizado do ventilador da torre de resfriamento VFD resulta em economias de energia da planta em todos os tipos de prédios e locais.
- Em climas mais quentes e úmidos, a economia é menor; assim, o retorno de investimento provavelmente seria menos atraente.

- A Alternativa 4 revela que o controle incorreto da torre pode negar o benefício dos chillers de velocidade variável e fazer o sistema funcionar com menos eficiência que aquele com chillers de velocidade constante (por exemplo, um operador substituindo o setpoint da torre de 29,4 °C). Enquanto esse tipo de operação possa parecer absurdo, o autor testemunhou uma operação semelhante em mais de uma CAG através de monitoramento remoto, bem como durante visitas pessoais.
- As leis de afinidade da velocidade variável também podem funcionar contra a eficiência do sistema.

**Figura 5. Comparação da Alternativa 5 com a vazão constante de água de condensação quase otimizada (2 gpm/TR)**



**Alternativa 5.** A Figura 5 representa a mesma configuração de sistema e controles que a Alternativa 3, mas com os chillers, as torres de refrigeração e bombas de condensação selecionados para operação de fluxo constante a 2 gpm/TR quase ideal\* (Delta T de 7,5 °C). Essa seleção de fluxo é baseada na recomendação de vários estudos de projeto de CAG do setor, sendo que o mais recente foi publicado no *ASHRAE Journal* (dezembro de 2011).

"Os custos do ciclo de vida útil... da água de condensação foram minimizados no maior dos três delta Ts analisados, em cerca de 7 °C.

Isso foi verdadeiro para prédios de escritórios e centros de dados e para chillers centrífugos de estágio único e de dois estágios."

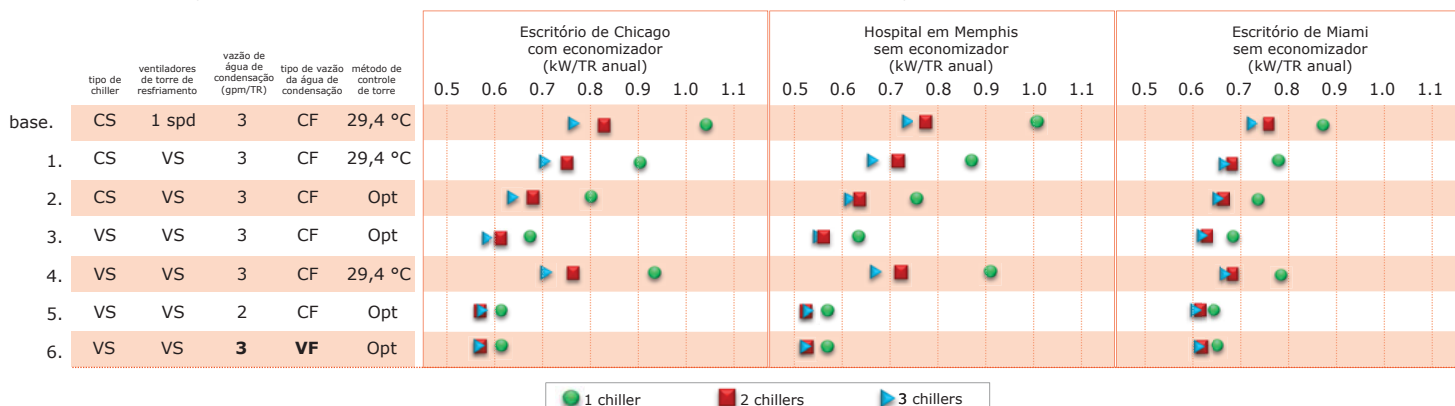
#### Observações.

- Todas as configurações para a Alternativa 5 mostram economias de energia comparadas com um sistema projetado com a taxa de vazão de água de condensação mais comum historicamente de 3 gpm/TR (Delta T de 5 °C).
- Embora a eficiência do projeto do chiller seja reduzida, isso é compensado pela redução do uso de energia da bomba de condensação e do ventilador da torre.

- Plantas com menos chillers mostram maiores economias. Isso se deve ao fato de que as bombas de condensação não são desligadas com carga. Além disso, com menos fluxo de projeto e potência consumida, a energia da bomba de condensação é menor que uma porcentagem do uso de energia anual da planta.

\*Nossos advogados não nos permitirão usar termos absolutos como "ideal" sem um adjetivo de moderação. De fato, é provável que o valor ideal verdadeiro dependeria da carga, do local e dos critérios de otimização do usuário, ou seja, custo do ciclo de vida útil, ROI, menor uso possível anual de energia, primeiro custo etc.

**Figura 6. Comparação da Alternativa 6 com acréscimo de vazão variável alta de água de condensação**



**Alternativa 6** usa uma taxa de vazão da água de condensação de projeto de 3 gpm/TR, mas aplica vazão de água de condensação variável otimizado para modular constantemente o fluxo do sistema de condensação e o consumo da bomba relativos à carga da planta (Figura 6). O objetivo desse controle é oferecer ao(s) chiller(s) um maior vazão em cargas altas quando se beneficia mais do desempenho do chiller, além de reduzir a vazão e o consumo de bombeamento em carga parcial para minimizar o consumo de energia excessivo da bomba.

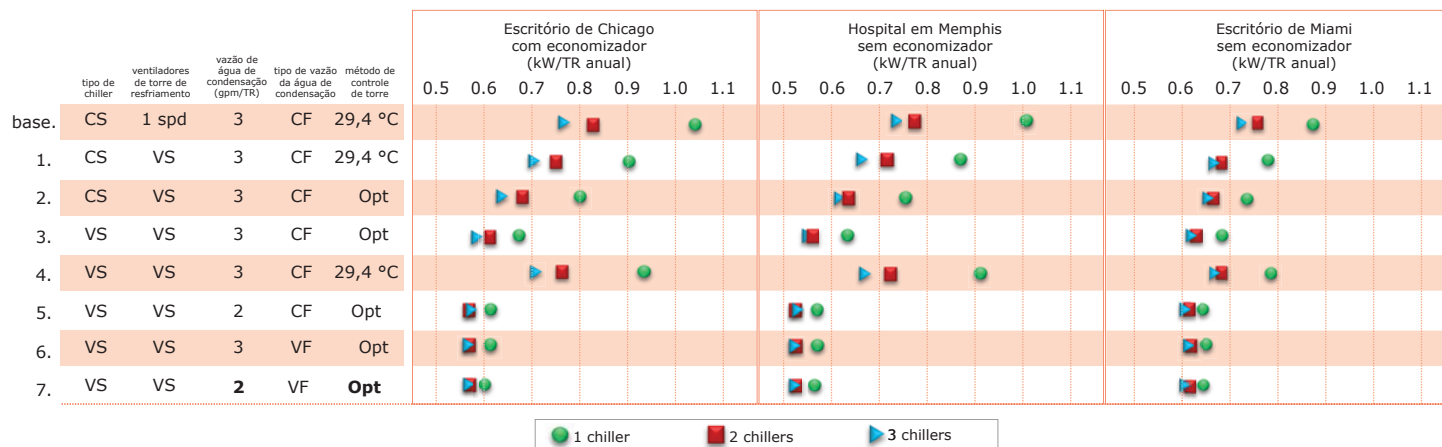
#### Observações.

- As economias de energia diferem por local para esta alternativa. As alternativas do escritório de Chicago e do hospital de Memphis mostram economias mínimas de energia quando comparadas ao fluxo de água constante quase otimizado (alternativa 5). As centrais de chiller único novamente oferecem uma maior porcentagem de economia.

- Equilibrar adequadamente a energia do chiller/bomba para melhor desempenho do ciclo de vida útil (projeto de vazão constante quase ideal) deixa pouca energia de bombeamento em excesso para ser otimizada no sistema em carga parcial.
- O uso de energia da CAG do escritório de Miami é mais alto na alternativa de fluxo variável de projeto maior em comparação com o caso de fluxo de água constante quase otimizado. Isso provavelmente se deve a duas condições: O grande número de horas de operação de bulbo altamente úmido que exige uma vazão alta para evitar que a operação instável do chiller resulte em alimentação elevada de bombeamento do sistema. Em segundo lugar, a temperatura de projeto mais alta na entrada da torre em sistema de baixa vazão aumenta a eficiência da transferência de calor da torre, o que resulta em uma potência proporcionalmente menor do ventilador em altas cargas.

- A eficiência de chillers de velocidade variável é impactada mais negativamente pelo fluxo de água de condensação variável. Portanto, a expectativa é de que um sistema com chillers de velocidade constante mostrariam um benefício ligeiramente maior em uma eficiência anual em comparação com o sistema de chiller VFD.
- Assim como no controle do ventilador de velocidade variável, o controle incorreto negaria o benefício do bombeamento da água de condensação de velocidade variável, faz com que o uso de energia do sistema seja substancialmente o mesmo que o sistema de fluxo constante de 3 gpm/TR (alternativa 5). Isso poderia ocorrer por meio de um operador ajustar o VFD para 60 Hz. Novamente, as leis de afinidade para a velocidade variável podem funcionar contra a eficiência do sistema.

**Figura 7. Comparação da alternativa 7 com acréscimo de vazão variável de água de condensação quase otimizada**



- Um fluxo de água de condensação instável e/ou um controle do ventilador da torre de resfriamento impactariam negativamente a eficiência do sistema e poderiam resultar em operação instável do chiller (surge em chillers de compressor centrífugo). A alternativa de fluxo baixo constante elimina o potencial instabilidade na vazão de água de condensação, reduzindo assim o potencial de instabilidade com cargas variáveis.

**Alternativa 7** A Figura 7 ilustra um sistema com um fluxo de água de condensação de projeto de 2 gpm/TR E um fluxo de água de condensação variável otimizado e controle de velocidade do ventilador da torre de resfriamento. Esta configuração promove menor consumo de bomba e torre já no projeto, e reduz ainda mais quando é benéfico em carga parcial. Isso é equilibrado contra um consumo no do chiller ligeiramente mais alto em condições de projeto de carga total.

## Observações.

- Esta é a configuração mais eficiente examinada, embora a vantagem de eficiência seja pequena em todos os casos quando comparada ao fluxo constante quase otimizado da água de condensação (Alternativa 5) ou ao sistema de variável de maior vazão de água de condensação (Alternativa 6).
- O controle incorreto teria um impacto negativo, embora mínimo nas economias do sistema em comparação com o sistema de fluxo de água constante quase otimizado (Alternativa 5). Novamente, isso poderia ocorrer através de um operador ajustando o VFD para 60 Hz.

## Resumo

Embora haja muitas outras configurações de planta e condições de projeto que poderiam ser examinadas, essas 72 permutações (3 quantidades de chiller x 3 locais/instalações x 8 configurações de planta) oferecem uma direção clara e importante acerca do conceito de projeto e controle..

1. Sistemas com múltiplos chillers oferecem uma melhor eficiência operacional anual da CAG, especialmente para sistemas de fluxo constante com dois chillers versus um chiller nas condições históricas de projeto.
2. Plantas de chiller único se beneficiam mais das condições de projeto otimizado e componentes de velocidade variável. Quando aplicadas adequadamente, essas plantas podem aproximar-se da eficiência de plantas de múltiplos chillers.
3. Ventiladores de torre de resfriamento de velocidade variável controlada de maneira ideal são fundamentais para a eficiência de toda CAG.
4. A tecnologia de chiller de velocidade variável, com um sistema de água de condensação controlado adequadamente, apresenta uma eficiência anual melhorada, especialmente em prédios de clima ameno.
5. Para uma nova CAG, há um potencial significativo de elevar a eficiência anual da planta sem adicionar um sofisticado controle de vazão de água de condensação de velocidade variável, simplesmente usando taxas de vazão de projeto quase ideal em vez das taxas de vazão de ponto de avaliação padrão históricas AHRI.

6. Para plantas existentes vazões de água de condensação relativamente maiores, há um potencial significativo de elevar a eficiência anual adicionando um controle adequado de velocidade variável (fluxo) nos ventiladores da torre e bombas de água de condensação.
7. A aplicação da tecnologia VFD aos componentes novos e existentes da CAG pode oferecer melhoria significativa na eficiência anual da planta e, portanto, redução no consumo de energia. No entanto, o controle otimizado sustentado é essencial para perceber o potencial de economia contínua.

Duas questões críticas permanecem.

A primeira: *Há uma configuração de planta não analisada aqui que poderia oferecer um custo de ciclo de vida útil ou ROI significativamente melhorado em comparação com os extremos de chillers de velocidade sempre constante ou de todos os chillers VFD?* Por exemplo, uma combinação de um ou dois chillers de velocidade variável com outros chillers de velocidade constante em uma CAG. Isso pode ser um tema para um futuro Boletim Informativo de Engenharia.

A segunda questão é, na verdade, fundamental para a primeira: *Qual é o impacto no custo, ROI e ciclo de vida útil de cada alternativa?* Para um tratamento excelente deste tópico, consulte a série em cinco partes no *ASHRAE Journal*, “Optimizing Design & Control of Chilled Water Plants” (edições de julho, setembro e dezembro de 2011, e março e junho de 2012).

Por Lee Cline e Brian Sullivan, engenheiros de sistema da Trane. Você pode encontrar essa e outras edições do Boletim Informativo de Engenharia em [www.trane.com/engineersnewsletter](http://www.trane.com/engineersnewsletter). Para fazer comentários, envie um e-mail para [ENL@trane.com](mailto:ENL@trane.com).

[www.Trane.com/ENL](http://www.Trane.com/ENL)

## Participe da Trane em 2014 para o Boletim Informativo de Engenharia AO VIVO!

Entre em contato com o escritório local da Trane para obter detalhes sobre o evento.

(Aprovado pela GBCI e AIA para crédito educativo contínuo)

### LEED v4.

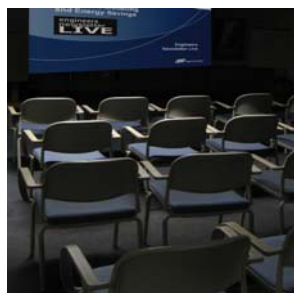
LEED v4 oficialmente lançado no Greenbuild 2013. Os engenheiros de aplicações da Trane discutirão alterações na versão mais recente do LEED e como elas impactam os profissionais de HVAC.

### Como aplicar o fluxo de refrigerante variável.

Todos os sistemas HVAC têm seu próprio conjunto de desafios de aplicação. Este programa discutirá alguns dos desafios ao aplicar um sistema de fluxo de volume de refrigerante variável (VRF), como estar em conformidade com as Normas ASHRAE 15 e 90.1, atender aos requisitos de ventilação da Norma ASHRAE 62.1, zonear para maximizar o benefício da recuperação de calor e o estado atual da modelagem VRF

### Estratégias de economia de energia para sistemas de terminal de água refrigerada.

Este ENL discutirá o projeto do sistema e estratégias de controle para reduzir o uso de energia em sistemas de terminal de água refrigerada incluindo a operação de ventilador de terminal ECM de velocidade variável, impacto do projeto do sistema de ventilação, projeto do sistema de água gelada de baixa vazão, economia da parte interna, recuperação de calor na parte interna e cumprimento dos requisitos ASHRAE 90.1.



#### Boletim Informativo de Engenharia ao Vivo.

Uma série de programas de 90 minutos que oferece informações técnicas e educacionais em aspectos específicos de projeto e controle do HVAC. Veja tudo em [www.trane.com/ENL](http://www.trane.com/ENL).



PROVEDOR  
DE ENSINO



Para obter mais informações, entre em contato com o escritório local da Trane ou envie um e-mail para [comfort@trane.com](mailto:comfort@trane.com)

[www.Trane.com/bookstore](http://www.Trane.com/bookstore)

## Aprenda estratégias de projeto HVAC e ganhe crédito

**Clínicas de ar-condicionado.** Uma série de apresentações instrutivas que ensinam sobre fundamentos, equipamentos e sistemas do HVAC. A série inclui manuais do estudante coloridos, que podem ser adquiridos individualmente. Aprovado pela AIA para unidades de aprendizagem 1.5 (HSW). Entre em contato com seu escritório local da Trane para se inscrever para o treinamento em sua área.

**Crédito de educação continuada mediante solicitação para LEED® e AIA.** Esses programas de 90 minutos estão disponíveis sem nenhum custo. Para ver todos os cursos, incluindo muitos específicos de LEED, acesse [www.trane.com/continuingeducation](http://www.trane.com/continuingeducation).

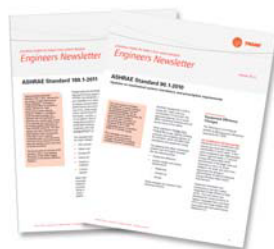
**Boletim Informativo de Engenharia.** Artigos trimestrais que abordam assuntos oportunos relacionados ao projeto, aplicação e/ou operação de sistemas comerciais aplicados de HVAC. Inscreva-se em [www.trane.com/ENL](http://www.trane.com/ENL).

**Manuais de aplicação.** Guias de referência abrangentes que podem aumentar seu conhecimento da aplicação de uma vasta linha de sistemas HVAC comerciais. A seguir são apresentados apenas alguns exemplos. Visite [www.trane.com/bookstore](http://www.trane.com/bookstore) para obter uma lista completa.

**Sistemas geotérmicos centrais.** Discute o projeto e controle adequados de sistemas em cascata geotérmicos bidirecionais centrais, incluindo a tubulação do sistema, considerações do projeto do sistema e considerações da parte externa. (SYS-APM009-EN, fevereiro de 2011)

**Sistemas VAV com água gelada.** Concentra-se em sistemas de água gelada de volume de ar variável (VAV); inclui a discussão das vantagens e dos obstáculos do sistema, análise dos vários componentes do sistema, soluções para desafios comuns do projeto, variações de sistema e controle em nível de sistema. (SYS-APM008-EN, atualizado em maio de 2012)

**Sistemas de bomba-calor resfriado à água e geotérmica.** Examine os componentes, as configurações, opções e estratégias de controle do sistema de água refrigerada. (SYS-APM010-EN, atualizado em novembro de 2013)



A Trane acredita que os fatos e as sugestões apresentados aqui são precisos. No entanto, as decisões finais de projeto e aplicação são de sua responsabilidade. A Trane isenta-se de qualquer responsabilidade por ações tomadas com relação ao material apresentado.