

## Agricultura Indoor: Considerações de projeto do sistema HVAC

A agricultura Indoor é um mercado em crescimento, tanto no sentido literal quanto no figurado. No mundo todo, as safras são cultivadas em ambientes internos por inúmeras razões. Neste Boletim dos Engenheiros, veremos várias considerações de HVAC ao lidar com espaços de cultivo interior.

### Como entender a biologia da planta

As plantas são máquinas naturais complexas que precisam de uma variedade de nutrientes, vitaminas, água e gases como oxigênio e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para crescer. Elas também necessitam de luz para fornecer energia para fotossíntese.

Para estimular o crescimento da planta, é preciso reunir esses nutrientes. A planta é composta de:

- Broto – a estrutura acima do solo que estimula o crescimento vertical da planta, folhas e frutos. O broto capta luz e dióxido de carbono, que é usado para realizar fotossíntese e produzir alimento em troca de água e minerais. O broto é negativamente gravitrópico e positivamente fototrópico, o que significa que cresce longe da gravidade e em direção à luz.
- Raiz – a estrutura abaixo do solo que extrai água e minerais do solo próximo em troca de alimento. A raiz é positivamente gravitrópica e negativamente fototrópica, o que significa que cresce em direção à gravidade e longe da luz.

A folha contém várias camadas de vários tipos de células, cada uma com sua própria função exclusiva, para reunir luz e dióxido de carbono. As folhas são cobertas com células epidérmicas na parte superior e inferior, que secretam

uma cutícula cerosa que serve para proteger a folha e impedir a perda de água. Dentro da folha, o mesófilo paliádico contém cloroplastos, que são responsáveis em grande parte pela reação química da fotossíntese. Os feixes vasculares, comumente vistos como veias em uma folha, contêm o xilema e o floema, que permitem o fluxo de água e nutriente em toda a planta. Por fim, as células-guarda controlam e protegem aberturas na folha, chamadas estômatos, que permitem a troca gasosa. Na maioria das plantas, os estômatos estão no lado de baixo da folha.

Quando a planta é aguada e exposta à luz de maneira adequada, as células-guarda incham, o que abre os estômatos permitindo a troca gasosa entre a planta e seu ambiente. Isso permite que o ar entre livremente na folha e interaja com as células. A planta consome o dióxido de carbono e libera o oxigênio através dos estômatos abertos com a água. Ela substitui água evaporada retirando água líquida da raiz do broto, através do xilema.

Ela equilibra o consumo de dióxido de carbono e a perda de água evaporada através dos estômatos, o que é controlado pela operação da célula-guarda.

Além disso, quando os níveis de água da planta estão baixos ou há níveis baixos de luz, as células-guarda se tornam flácidas, e os estômatos são fechados.

A fotossíntese consiste em dois conjuntos de reações: reações dependentes de luz para produzir moléculas (ATP e NADPH) usadas posteriormente e reações independentes de luz para produzir glicose. As reações independentes de luz produzem energia química na forma de glicose do dióxido de carbono consumido anteriormente pela planta. As plantas usam glicose para uma variedade de propósitos, inclusive: respiração celular, produção de frutose e sacarose para frutos, troncos, raízes e sementes; e armazenam na forma de amido.

## Evapotranspiração

Uma planta usa água para crescer por vários motivos. Primeiro, a água é usada para circular nutrientes e vitaminas da raiz para o broto. Segundo, a planta usa água como um componente dentro da fotossíntese, fornecendo átomos de hidrogênio que são usados para produzir glicose. Muito, mas não tudo, da água tirada pela planta é liberado por meio da evapotranspiração, que é uma combinação de evaporação e transpiração.

A água líquida encontrada na superfície da planta e do solo evapora para o ar ao redor.

A transpiração é o movimento da água dentro da planta, a conversão resultante para o vapor da água e liberação dos estômatos nas folhas. A planta evapora a água dentro das folhas para aumentar a concentração de soluto nas células mesófilas. A pressão reduzida dentro das áreas superiores do xilema puxa mais água através do xilema das raízes para o broto (osmose).

Como resultado da fotossíntese, as plantas adicionam carga latente ao espaço evaporando água das superfícies do solo e da planta, enquanto exalam vapor de água para o espaço. Além disso, conforme a planta evapora água, há um efeito de resfriamento sensível (carga sensível negativa). A quantidade de resfriamento pode se tornar considerável com um grande número de plantas em um único espaço.

## Como cultivar plantas em ambiente indoor

O produtor pode fornecer os componentes necessários para o crescimento da planta fora de um ambiente natural tradicional. Um exemplo disso é substituir a luz solar por luz artificial, o que pode geralmente adicionar quantidade significativa de calor ao espaço.

Alguns produtores optarão por mover as plantas para acomodar seu ciclo de crescimento. Os produtores começarão com plantas em um recinto com um conjunto exclusivo de condições de iluminação, temperatura e umidade e, em seguida, moverão as plantas para o próximo espaço com condições diferentes à medida que a planta amadurecer. Por outro lado, outros produtores manterão as plantas em um único espaço e ajustarão as condições por todo o ciclo de vida da planta para otimizar seu crescimento.

Muitos produtores também desenvolveram métodos próprios para a disposição das plantas. Por exemplo, algumas fazendas verticais usam fileiras de bandejas de plantas. Isso permite que as plantas cresçam de maneira tradicional, do “solo” para cima, embora o meio de crescimento não seja o solo de fato. Esse estilo permite que muitas fileiras, ou camadas, de plantas sejam alinhadas lado a lado (consulte a Figura 2), em vez de uma única camada como encontrado na agricultura tradicional em ambientes externos. Como alternativa, algumas empresas desenvolveram sistemas próprios em que as plantas são dispostas em colunas verticais. Nessa disposição, as colunas geralmente vão do piso ao teto, com as plantas crescendo além da coluna vertical em direção à fonte de luz.

Figura 1. Evapotranspiração de plantas

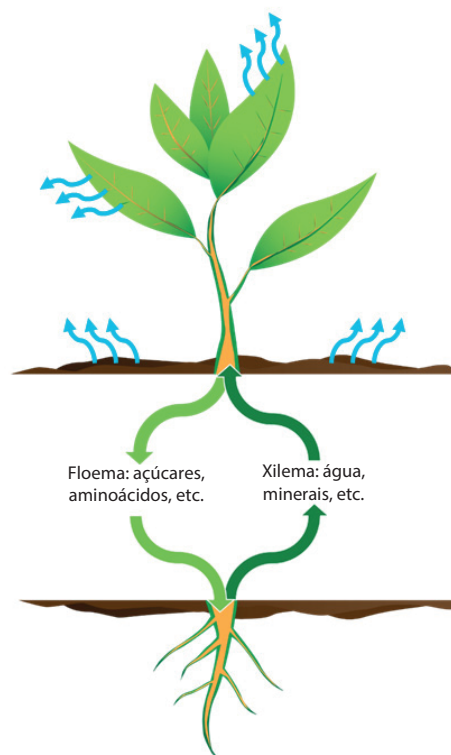


Figura 2. Tipos de cultivo



horizontal



vertical

Os produtores substituíram a precipitação natural por uma variedade de técnicas mais inteligentes de irrigação. Em muitos casos, a água de irrigação é enriquecida com nutrientes.

## Como entender as necessidades do produtor

As necessidades do produtor geralmente são ditadas pela produção de uma safra consistente e saudável o mais rápido possível e a um custo razoável.

Os produtores podem especificar determinada condição de temperatura e umidade para o ar interno ao redor da planta durante a fase de crescimento dela.

Eles podem usar a frase “déficit de pressão de vapor” ou “variação de pressão de vapor” (VPD) para descrever uma condição de crescimento específica. O VPD pode ser expresso em diferentes unidades, com quilopascal sendo muito comum. O VPD é a diferença na pressão de vapor da camada limite ao redor das superfícies da folha da planta menos a pressão do vapor do ar circundante. Portanto, quando um produtor indica um VPD desejado, ele está dizendo que há uma diferença nas pressões de vapor entre a folha e o ar. As condições atmosféricas

na superfície da planta são presumidas como saturadas devido à transpiração da planta e à liberação do vapor da água. Os produtores podem fazer referência a um gráfico ou tabela que indica valores de VPD apropriados para uma determinada planta durante um estágio específico de crescimento. O projetista pode determinar uma condição de umidade adequada do recinto quando as preferências de VPD e de temperatura de bulbo seco no ambiente interno desejados pelo produtor são conhecidas. Consulte a barra lateral Variação de pressão do vapor para ver um exemplo.

## Isso não é resfriamento para conforto

Na natureza, as plantas passam por períodos de luz e escuridão durante toda a temporada de crescimento. As plantas crescidas em ambientes internos são submetidas a períodos “diurnos” em que as luzes que substituem o sol são acesas para potencializar a fotossíntese. As luzes são desligadas posteriormente para simular períodos “noturnos”. A quantidade, a intensidade e a temperatura da cor da luz fornecidas às plantas podem variar por espécie e fase de crescimento. Algumas plantas são sensíveis a fotoperíodos e são

submetidas a períodos de tempo variáveis de luz por dia durante o crescimento versus maturação, frutificação ou semeadura. Ao controlar a quantidade de tempo que uma planta é submetida à luz, os produtores podem acionar diferentes respostas em plantas sensíveis a fotoperíodo, como a floração.

Devido à iluminação necessária, as densidades de energia de iluminação e o calor sensível resultante em geral são significativamente mais altos quando comparados com aplicações de resfriamento de conforto. É comum ver densidades de potência de iluminação a 30 watts por pé quadrado e mais altas — muito mais altas — do que aplicações de resfriamento de conforto tradicionais.

As temperaturas do espaço podem variar com base nas espécies de plantas e fase de crescimento. Algumas variedades de plantas crescem bem em espaços frios, como a 18 °C, enquanto outras podem crescer em espaços quentes, a 26 °C e acima. Da mesma forma, as plantas geralmente são mais tolerantes a níveis de umidade relativa mais altos, portanto, os intervalos geralmente variam de 40 a 75% de umidade relativa.

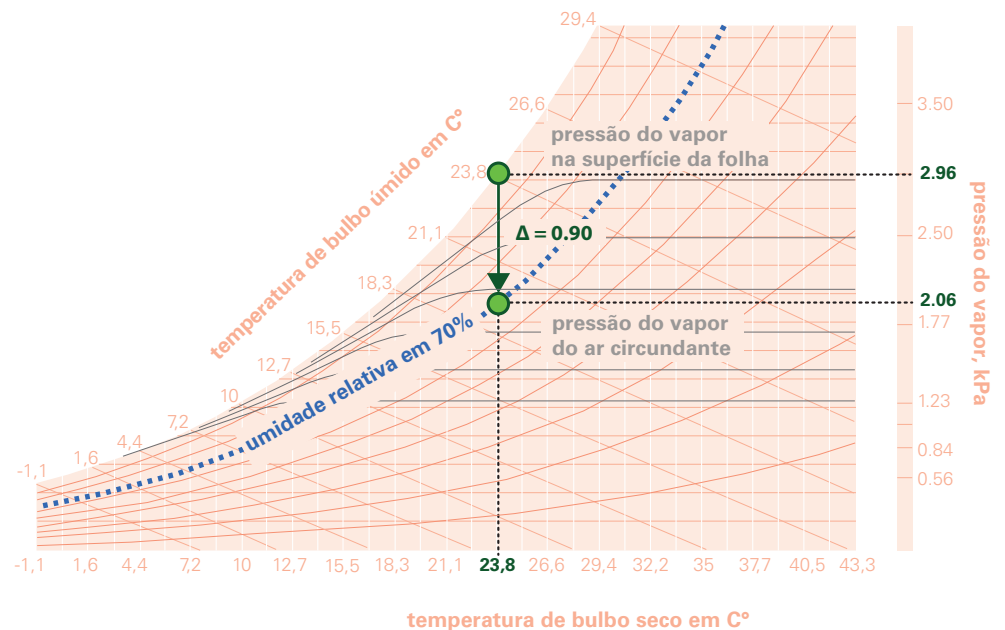
### Variação de pressão de vapor

Aqui está um exemplo simples que presume que as temperaturas de bulbo seco da folha e do ar sejam iguais.

Um produtor manifestou a preferência por uma temperatura de bulbo seco do ambiente interno de 23 °C. Usando um gráfico psicrométrico ou ferramenta de cálculo psicrométrico, presume-se que a pressão do vapor na superfície da folha esteja em saturação (23 °C/100% de umidade relativa), o que equivale a 2,96 kPa.

O produtor também afirmou que gostaria de um VPD de 0,90. O valor de VPD desejado pode ser subtraído das condições da folha, resultando em uma pressão de vapor desejada de 2,06 kPa para o ar circundante.

Então, para manter a preferência do produtor de uma temperatura de bulbo seco no espaço de 23 °C e um valor de VPD de 0,90, o espaço pode ser controlado a 23 °C de bulbo seco e 70% de umidade relativa.



Muitos produtores optarão por recircular todo o ar de alimentação e não introduzir nenhum ar de ventilação. De fato, como as plantas consomem dióxido de carbono, muitos produtores usarão um meio de adicionar dióxido de carbono ao espaço para aumentar a concentração além dos níveis do ambiente.

Trazer ar externo, que tem uma concentração relativamente baixa de dióxido de carbono, pode fluidificar o espaço rico em dióxido de carbono.

Geralmente, há cargas significativas das luzes e plantas durante a fase "diurna".

As cargas adicionais podem estar presentes em equipamentos variados, como bombas de água, ventiladores de transferência de ar, entre outros.

A carga de evapotranspiração (latente) das plantas geralmente é muito grande e, quando combinada com as várias cargas sensíveis, fornece um índice de calor sensível do espaço (SHR) acentuado (baixo), que é a carga sensível do espaço dividida pela soma das cargas sensíveis e latentes do espaço. É comum ver SHRs a 50% ou menos, o que indica tanto cargas grandes sensíveis quanto latentes. O equipamento de HVAC projetado para manter a temperatura e a umidade do espaço deve proporcionar o resfriamento e a desumidificação sensíveis.

Durante a fase "noturna", muitas das cargas sensíveis desaparecem (ou seja, as luzes são desligadas), mas as plantas continuam a transpirar. Em muitas plantas, a taxa de transpiração diminui lentamente, mas não para completamente — a planta continua a adicionar umidade ao espaço mesmo quando as luzes estão desligadas. Como resultado, os SHRs de espaço são muito acentuados, necessitando de desumidificação sem resfriamento sensível.

### Considerações sobre projeto de HVAC

Os sistemas HVAC para agricultura Indoor devem ser projetados para cargas e operação que são muito diferentes quando comparados com o resfriamento de conforto para humanos.

Por exemplo, durante o modo "diurno", há uma carga sensível alta da iluminação, carga latente alta da evapotranspiração e um efeito de resfriamento sensível da transpiração da planta. Isso resulta em uma necessidade tanto de resfriamento quanto de desumidificação sensíveis.

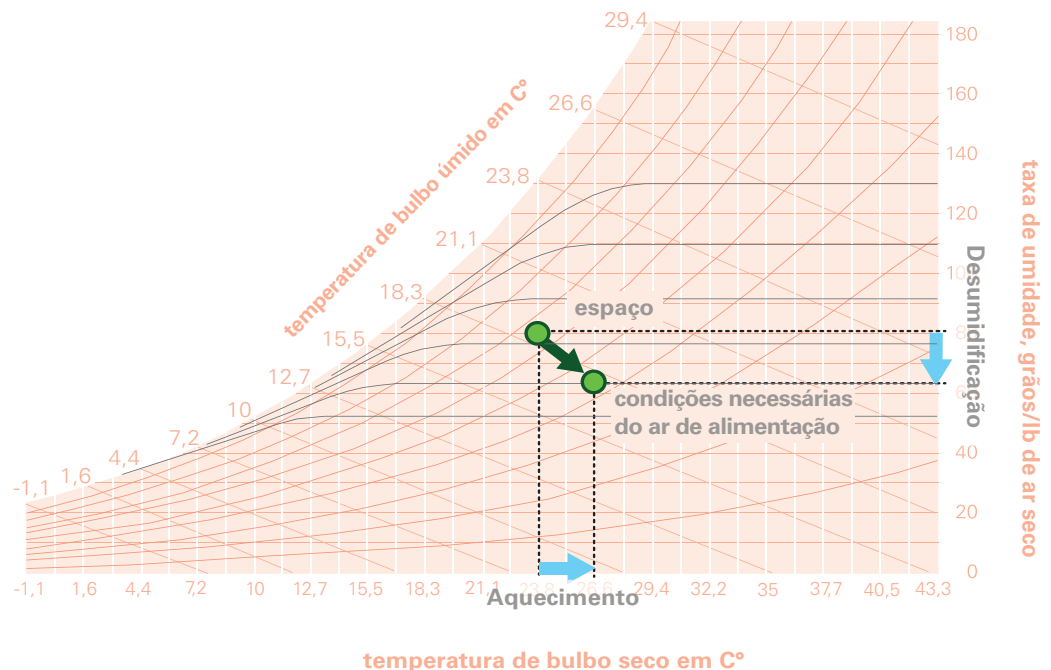
Durante o modo "noturno", há muito pouca carga sensível, há alguma carga latente da evapotranspiração e algum

resfriamento sensível da transpiração. Isso resulta em uma necessidade de desumidificação, mas pouco ou nenhum resfriamento sensível.

Como mencionado antes, algumas condições específicas de crescimento e tipos de planta criarão a situação geralmente descrita como sendo um "SHR negativo" em que não há cargas sensíveis (luzes desligadas), mas as plantas continuam a transpirar e resfriar sensivelmente o espaço. A Figura 3 mostra uma operação "noturna", em que as plantas adicionam carga latente ao espaço, gerando uma necessidade de desumidificação. As plantas também resfriam o espaço. Esses dois processos criam a necessidade tanto de aquecimento quanto de desumidificação para neutralizar o resfriamento e a umidificação da planta.

Devido a esses conjuntos distintos de condições, o sistema HVAC deve ser projetado para lidar com os diferentes modos de operação: resfriamento e desumidificação quando as luzes são acesas e desumidificação primária (com a possibilidade de aquecimento) quando as luzes são desligadas. O aquecimento também deve ser considerado se as plantas tiverem que adicionar uma carga de resfriamento significativa e/ou perda de calor pela envoltura do edifício.

Figura 3. Índice de calor sensível do espaço (SHR) "negativo"



Como o ambiente de crescimento é controlado, os sistemas de HVAC de agricultura Indoor são projetados e selecionados para facilitar a operação durante o ano. Nessas regiões, onde o inverno é frio, os produtores esperam que o equipamento de HVAC mantenha as condições de espaço desejadas, o que provavelmente exigirá desumidificação. Além disso, como muitos produtores optam por evitar trazer ar externo para ajudar a manter a concentração interna de dióxido de carbono alta, os projetistas de sistemas devem selecionar equipamentos que possam operar em condições ambientais frias sem ciclos economizadores de ar.

Em uma aplicação tradicional de resfriamento de conforto, a temperatura do ar de alimentação de resfriamento desejada é determinada usando análises psicrométricas, geralmente sem muita consideração sobre o nível de umidade. Em um sistema no qual a desumidificação é essencial, pode ser necessária uma análise adicional para calcular a condição necessária de temperatura e de umidade do ar de alimentação. Consulte a barra lateral "Como determinar condições necessárias de ar de alimentação" para ver um exemplo.

### Como determinar condições necessárias do ar de alimentação

O fluxo do ar de alimentação para o espaço de crescimento e as condições de ar de alimentação correspondentes são determinadas pelas cargas de resfriamento sensíveis e latentes dentro dos limites do espaço condicionado. Isso incluiria ganhos de calor sensíveis das luzes, equipamentos e envoltura do edifício. Os ganhos de calor latentes geralmente incluem evapotranspiração, evaporação dos sistemas abertos de água, pessoas, infiltração e quaisquer processos adicionais de geração de umidade. Cargas sensíveis e latentes devido a coisas fora dos limites de espaço, como ventilação e ganhos de calor de ventilador, não estão incluídas nas cargas de "espaço" usadas para determinar condições do ar de alimentação.

Continuando do exemplo anterior da barra lateral, um produtor manifestou o desejo de uma temperatura de bulbo seco do ambiente interno de 23 °C e um VPD de 0,9, o que resultou em um ponto de ajuste do espaço de 23 °C/70% de umidade relativa. Essas condições correspondem a uma taxa de umidade de 91,1 grãos de umidade por libra de ar seco (gr/lb).

O projetista calculou as cargas de resfriamento sensíveis e latentes do espaço "diurno" como 68 e 80 MBh, respectivamente. Ele selecionou uma unidade com capacidade de fornecimento de 3.700 cfm. Usando a equação de resfriamento sensível de espaço, o projetista pode calcular a temperatura de bulbo seco necessária do ar de alimentação:

$$Q_{\text{sensível, espaço}} = 1,085 \times \text{cfm} \times (\text{DBT}_{\text{espaço}} - \text{DBT}_{\text{alimentação}})$$

$$68.000 \text{ Btu/h} = 1,085 \times 3.700 \text{ cfm} \times (23 \text{ °C} - \text{DBT}_{\text{alimentação}})$$

$$\text{DBT}_{\text{alimentação}} = 14,5 \text{ °C}$$

Usando a equação de resfriamento latente de espaço, o projetista pode calcular a condição necessária de umidade do ar de alimentação:

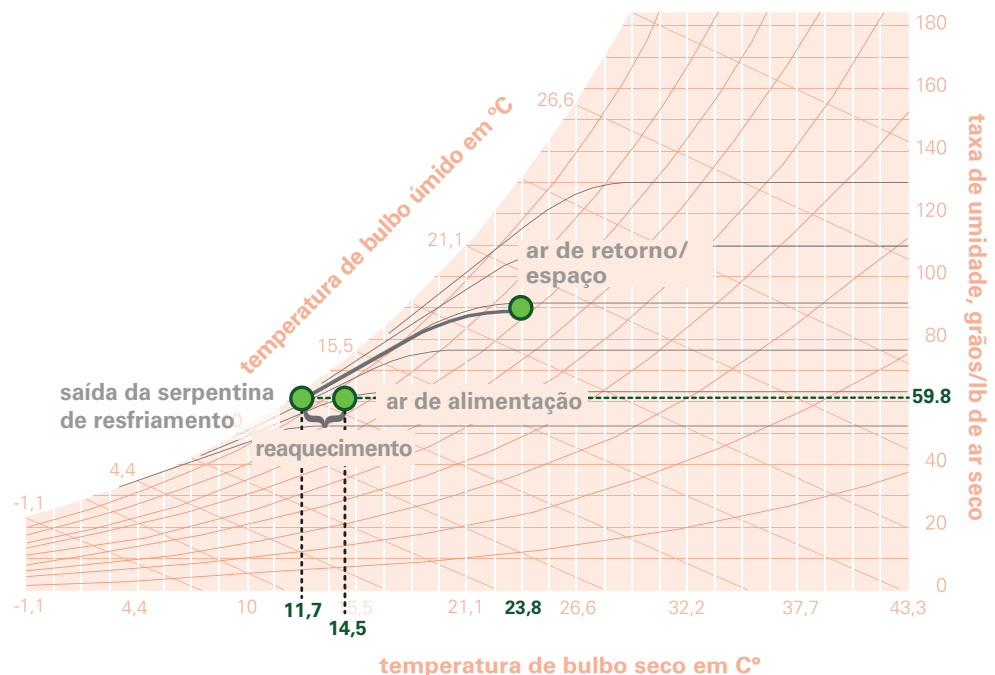
$$Q_{\text{latente, espaço}} = 0,69 \times \text{cfm} \times (W_{\text{espaço}} - W_{\text{alimentação}})$$

$$80.000 \text{ Btu/h} = 0,69 \times 3.700 \text{ cfm} \times (91,1 \text{ gr/lb} - W_{\text{alimentação}})$$

$$W_{\text{alimentação}} = 59,8 \text{ gr/lb}$$

Supondo que o ar saia da serpentina próximo à saturação, a temperatura de bulbo seco do ar que sai da serpentina será de 11 °C (equivalente a 59,8 gr/lb e 98% UR), que é mais fria do que a temperatura de bulbo seco do ar de alimentação necessária calculada anteriormente (DBT<sub>alimentação</sub>). O ar desumidificado deve ser reaquecido de 11 °C para 14,5 °C para impedir o super-resfriamento do espaço.

*Observação: O 1,085 e o 0,69 nas equações acima não são constantes; são uma função da densidade e outras propriedades do ar. Em condições de "ar padrão" no nível do mar, essas propriedades resultam nos valores 1,085 e 0,69. O ar, em outras condições e elevações, fará com que esse fator mude.*



---

## Conclusão

A agricultura Indoor é um mercado exclusivo para HVAC. Os produtores operam os prédios 24 horas por dia, 7 dias por semana, 365 dias ao ano e esperam controlar a temperatura e a umidade o tempo todo. Devido à ampla variação das cargas, muitos dos arquétipos de resfriamento de conforto não se aplicam a esses prédios. Os projetistas devem considerar equipamentos que possam resfriar, aquecer e desumidificar o espaço a fim de manter a temperatura e a umidade desejadas.

Por Eric Sturm, Trane. Para assinar ou ver edições anteriores do Boletim dos Engenheiros, acesse [trane.com/EN](http://trane.com/EN). Envie seus comentários para [ENL@trane.com](mailto:ENL@trane.com).

---

## Referências

- [1] ASHRAE. *ASHRAE Handbook—HVAC Applications*, Chapter 25. 2019.

Saiba mais sobre

## Sistemas da Trane!

### Zoned Rooftop Systems (ZRS)

Os Zoned Rooftop Systems (ZRS) da Trane proporcionam aos clientes de iluminação comercial opções econômicas para aumentar o conforto e a eficiência energética, ao mesmo tempo em que simplificam a operação e a manutenção. Esses conjuntos de soluções do sistema tornam a funcionalidade avançada acessível e fácil para que usuários que não sejam técnicos possam operar.

[www.trane.com/ZRS](http://www.trane.com/ZRS)



### CoolSense™ Integrated Outdoor Air System

O CoolSense™ Integrated Outdoor Air System da Trane combina um sistema dedicado de ar externo (DOAS) com unidades de terminal de resfriamento sensível resfriadas a água para oferecer uma solução de eficiência energética flexível, a fim de promover espaços confortáveis e simplificar a manutenção.

[www.trane.com/COOLSENSE](http://www.trane.com/COOLSENSE)



### Sistema de central de água gelada resfriada a ar e otimizada por gelo

A central de água gelada otimizada por gelo da Trane é um sistema de armazenamento de energia térmica de destaque que pode tornar o projeto e a instalação de centrais de água gelada resfriadas a ar mais simples e replicáveis, ajudando a economizar horas cobradas por tempo de projeto.

[www.trane.com/ICE](http://www.trane.com/ICE)



Entre em contato com o representante local da Trane para ver o Boletim dos Engenheiros 2019 AO VIVO!

## Marque no seu calendário!

**Ciclo economizador de ar e água** Analisa e compara as vantagens, desvantagens e considerações da economia de ar e água. Os requisitos e exceções da norma ASHRAE 90.1 também serão discutidos.

**Criando agilidade para um mercado energético dinâmico.** Este ENL analisará a importância dos encargos de demanda e taxas de tempo de uso no retorno financeiro de várias estratégias para economia de energia. Ele também mostrará como a eficiência da carga total pode ser tão importante quanto a eficiência da carga parcial (iPLV/nPLV) no custo de propriedade em relação ao tempo de vida útil de um equipamento.

**Entre em contato com o escritório local da Trane para obter informações detalhadas e para saber as datas.**

## Em breve, nesta primavera: TRACE® 3D Plus Versão 2!

O TRACE 3D Plus Versão 2 com recursos de computação em nuvem e vastas melhorias nos recursos de desenhos arquitetônicos e desempenho geral será lançado no final do segundo semestre de 2019! Para obter mais informações, visite [www.trane.com/TRACE3DPLUS](http://www.trane.com/TRACE3DPLUS)

Visite-nos na *Conferência de análise de desempenho predial ASHRAE* em Denver, Colorado, de 25 a 27 de setembro de 2019 para saber mais sobre a V2!

Obtenha crédito de PDH, sem cobranças e sob demanda!

## NOVOS cursos on-line disponíveis!

Veja todos os cursos em [www.trane.com/ContinuingEducation](http://www.trane.com/ContinuingEducation)

**Tendências de projetos de sistema de água gelada** analisa avanços recentes nas tecnologias e tendências devido a esses desenvolvimentos, estratégias de sistema que podem tirar proveito da tecnologia mais recente e quando várias estratégias de sistema devem ser usadas.



Trane,  
uma empresa da Ingersoll Rand

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)

Trane, o logotipo do círculo e TRACE são marcas comerciais da Trane nos Estados Unidos e em outros países. ASHRAE é uma marca registrada da American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Inc. Trane é uma marca da Ingersoll Rand, líder mundial na criação de ambientes confortáveis, sustentáveis e eficientes. A família de marcas da Ingersoll Rand inclui Club Car®, Ingersoll Rand®, Thermo King® e Trane®.

Este boletim tem fins meramente informativos e não constitui aconselhamento jurídico. 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 se isenta de qualquer responsabilidade por ações tomadas com relação ao material apresentado.