



Informações para os projetistas do sistema HVAC da atualidade

BOLETIM DOS ENGENHEIROS

Volume 52-1 // Março de 2023



Compreendendo a seleção de serpentinas de expansão direta (DX) para resfriamento e aquecimento

A necessidade de aquecer sem o uso de combustíveis fósseis no local (ou seja, eletrificação do calor) tornou-se uma iniciativa urgente, pois o ambiente construído se concentra na descarbonização. O uso mais amplo de bombas de calor é fundamental para esses objetivos. Mas, para maximizar o uso do aquecimento mecânico, devemos entender como selecionar serpentinas de expansão direta (DX) para operação de resfriamento e aquecimento.

Este Boletim dos Engenheiros apresentará um approach simplista para o processo de seleção de equipamentos para atender às necessidades de um sistema que deve aquecer e também resfriar. Começaremos com algumas teorias básicas de refrigeração e bomba de calor e, em seguida, desenvolveremos esses tópicos para fornecer orientações sobre a seleção da serpentina DX. E como a maioria dos sistemas de fluxo variável de refrigerante (VRF) são capazes de operação tanto de resfriamento quanto de aquecimento, vamos estender a discussão para abordar as serpentinas DX que serão utilizadas em um sistema VRF.

O ciclo de refrigeração

Em sua forma mais simples, um ciclo de refrigeração requer quatro componentes: um evaporador para absorver o calor, um compressor para aumentar a pressão do refrigerante, um condensador para repelir o calor e um dispositivo de expansão para diminuir a pressão para que o ciclo possa reiniciar (Figura 1).

Existem várias opções de controle de compressor e ventilador disponíveis para modificar a capacidade de um sistema, mas este boletim se concentrará na serpentina interna. A serpentina interna funcionará como evaporador em um sistema dividido de ar condicionado ou como evaporador (no modo de resfriamento) e condensador (no modo de aquecimento) em um sistema dividido com bomba de calor.

Ao falarmos sobre a seleção da serpentina interna, abordaremos vários parâmetros importantes que descrevem o estado do refrigerante durante o ciclo de refrigeração. Podemos ilustrar esses parâmetros (e o ciclo de refrigeração como um todo) de várias maneiras, mas a mais comum é usando um gráfico pressão-entalpia ou p-h. Um gráfico p-h mostra claramente o aumento e a queda de pressão necessários para o processo de expansão, bem como o energia térmica (entalpia) em cada ponto do ciclo (Figura 2).

Os termos “serpentina de refrigerante” e “serpentina DX” tendem a ser usados de forma intercambiável. O qualificador de “refrigerante” pode ser óbvio, mas a *expansão direta* requer alguma explicação adicional.

“Direto” significa simplesmente que estamos transferindo calor de e para o refrigerante diretamente. Um sistema de refrigeração “indireto” usaria um fluido intermediário como água ou glicol. “Expansão” indica o fenômeno-chave do ciclo de refrigeração: um refrigerante volátil (aquele que pode evaporar facilmente em temperaturas

Figura 1. Componentes de um ciclo de refrigeração

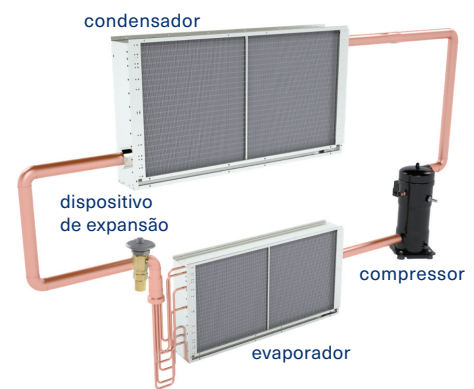
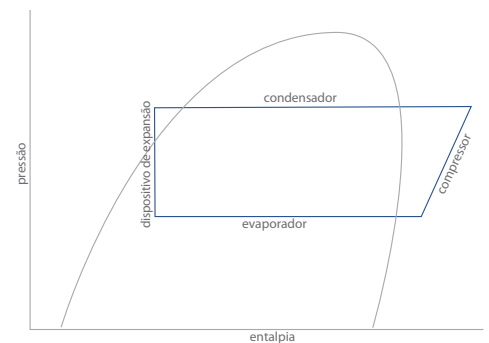


Figura 2. Ciclo de refrigeração típico em um diagrama p-h



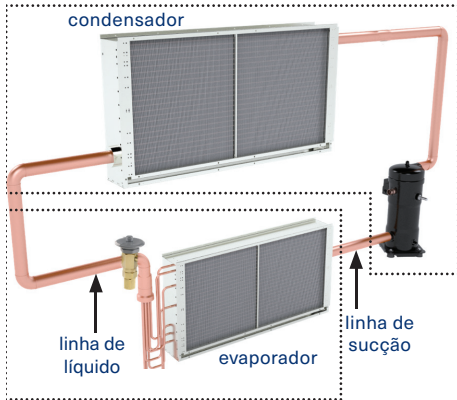
normais) evaporará e se expandirá para produzir um efeito de resfriamento.

Embora geralmente representemos o ciclo de refrigeração em um gráfico de pressão-entalpia, um gráfico de pressão-volume parece semelhante no sentido de que o volume — como a entalpia — aumentará constantemente na região de saturação dentro do evaporador. Uma diferença notável é que o refrigerante também se expandirá através do dispositivo de expansão e será comprimido através do compressor.

Visão geral do sistema dividido

Os componentes de refrigeração que compõem um aparelho de ar-condicionado ou uma bomba de calor podem vir em uma única unidade ou podem ser "divididos" com equipamentos localizados em dois ou mais pontos (ver Figura 3). Este último é geralmente referido como um "sistema dividido". Quando uma serpentina interna é separada dos outros componentes, é necessário um esforço adicional para selecionar adequadamente os componentes para combinar uma serpentina interna com uma unidade externa (ODU).

Figura 3. Limites do sistema dividido de ar-condicionado (mostrado modo de resfriamento)



Um sistema dividido consiste em três componentes principais:

- Unidade interna: a serpentina do evaporador e o dispositivo de expansão em um sistema de ar-condicionado ou a serpentina do condensador durante a operação de aquecimento
- ODU: o compressor e a serpentina do condensador em um sistema de ar-condicionado, ou a serpentina do evaporador e o dispositivo de expansão durante a operação de aquecimento
- Conjunto de linhas: as linhas de líquido e sucção e quaisquer componentes adicionais que transportam refrigeração entre a unidade interna e a externa

Todos os três componentes têm um impacto no desempenho do sistema dividido. Além das unidades internas e externas (onde estão localizados os quatro componentes necessários para qualquer ciclo de refrigeração), o conjunto de linhas afeta o ponto de equilíbrio, pois introduzirá o que é conhecido como "perda de linha". A perda de linha pode variar de acordo com fatores como comprimento e altura do riser. A perda de linha é, em última análise, perda de pressão e resultará em pequenos desvios nos pontos ilustrados em um gráfico p-h idealizado.

Observe que o termo "sistema dividido" é usado genericamente para vários approaches, desde um sistema dividido 1 para 1 tradicional até um sistema dividido VRF muitos para muitos. De qualquer forma, podemos simplificar o conceito afirmando que o calor é absorvido em qualquer serpentina atuando como evaporador e o calor é rejeitado em qualquer serpentina atuando como condensador.

Visão geral da bomba de calor

Uma bomba de calor é um sistema que pode aquecer por meios mecânicos (um compressor) com eletricidade como entrada de energia. Ele consegue isso essencialmente invertendo o ciclo de refrigeração. Parte do calor produzido em uma bomba de calor é gerado (via calor de compressão), mas a maior parte do calor é "bombeada" de um estado de energia mais baixo para um estado de energia mais alto. O ar em qualquer temperatura ambiente contém calor, e um ciclo de refrigeração de expansão direta é utilizado para mover ou "bombear" esse calor. Isso pode ser feito diminuindo a pressão do refrigerante o suficiente para absorver o calor do ar externo e, em seguida, aumentando-a o suficiente para repelir esse calor de maneira útil para o ar interno.

Uma bomba de calor requer uma fonte de calor e um dissipador de calor. Com um sistema dividido equilibrado, essas necessidades podem ser facilmente atendidas.

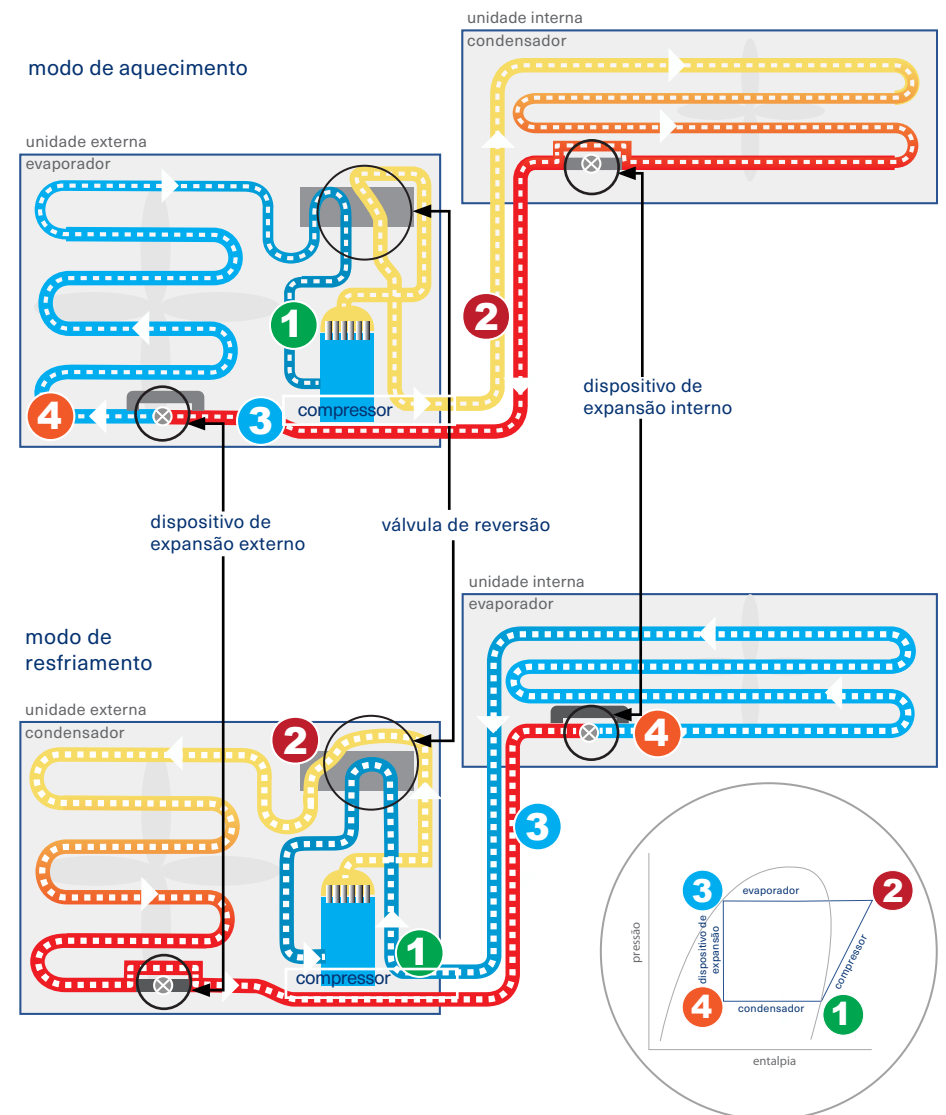
Mas, para atender às necessidades de uma variedade de tipos de edifícios, geralmente devemos emparelhar uma variedade de dispositivos do lado do ar — e, por extensão, serpentinas — com uma variedade de ODUs.

Uma ODU projetada para operar como uma bomba de calor será semelhante a uma configuração de ODU para operar como um aparelho de ar-condicionado. A principal diferença é que a ODU incluirá dois componentes adicionais (Figura 4):

- uma válvula de reversão e
- um dispositivo adicional de expansão externa

A válvula de reversão é usada para inverter o ciclo de refrigeração para que o calor possa ser "bombeado" do ar externo para o ar interno. O dispositivo de expansão adicional é necessário para proteger o compressor e manter um nível estável de superaquecimento dentro da serpentina externa.

Figura 4. Ciclo de refrigeração reversível (bomba de calor) nos modos de aquecimento e resfriamento



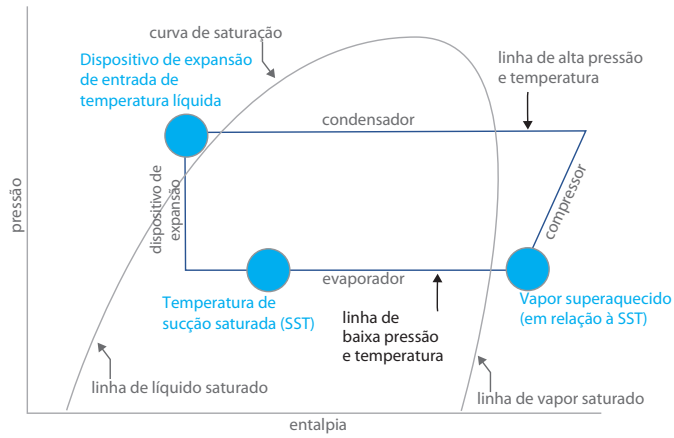
Parâmetros de desempenho do modo de resfriamento

Os seguintes parâmetros precisam ser considerados para prever com precisão o desempenho de uma serpentina DX usada como uma serpentina de evaporador:

- Temperatura do líquido que entra no dispositivo de expansão
- Temperatura de sucção saturada (SST)
 - Também conhecida como *pressão do lado baixo* ou *pressão de sucção*
- Superaquecimento alvo

Esses parâmetros podem ser ilustrados em um gráfico p-h, conforme mostrado na Figura 6. Observe que a temperatura do líquido que entra no dispositivo de expansão será muito maior que a temperatura no início do processo de evaporação (a SST).

Figura 6. Parâmetros de desempenho do modo de resfriamento



Plotagem cruzada para resfriamento

Para selecionar os componentes de um sistema dividido tradicional para resfriamento, tanto a ODU quanto o evaporador precisam ser avaliados em um ponto de equilíbrio para o sistema. Este ponto de equilíbrio ocorre onde as capacidades das duas porções do sistema coincidem, na mesma temperatura de sucção saturada (evaporador).

Para avaliar o ponto de equilíbrio manualmente, sem o auxílio de uma ferramenta de software, utilizamos um processo conhecido como "gráfico cruzado". Isso envolve inicialmente localizar um gráfico da capacidade da ODU em função da temperatura de sucção saturada, geralmente em uma variedade de temperaturas ambientes. A maioria dos fabricantes de ODU fornecerá tal gráfico em catálogos ou programas de seleção.

O projetista do sistema sobrepõe, então, uma curva do evaporador no gráfico da ODU. Para obter os valores necessários para plotar uma curva do evaporador, é necessário o desempenho da serpentina para pelo menos duas condições (presumindo uma curva linear do evaporador). Supondo que todas as outras variáveis permaneçam as mesmas (condições do ar, propriedades físicas da serpentina, etc.), o resultado final será duas linhas que se cruzam com inclinações opostas, conforme mostrado na Figura 7.

Mas também devemos levar em conta algo conhecido como "perda de linha". A perda de linha é uma estimativa do aumento da SST como resultado da queda de pressão na linha de sucção.

O termo "perda" é usado aqui porque o aumento da SST reduz a quantidade de calor que pode ser absorvida do evaporador. Portanto, a SST usada para a seleção da serpentina é, na verdade, a temperatura de sucção saturada do gráfico ODU MAIS a perda de linha (Figura 8).

Mas há maneiras melhores de avaliar o desempenho. Usando modelos de software para a ODU e para o evaporador, o ponto de equilíbrio pode ser encontrado sem a necessidade das etapas extras descritas acima.

Figura 7. Gráfico cruzado da serpentina do evaporador e curvas da ODU no modo de resfriamento

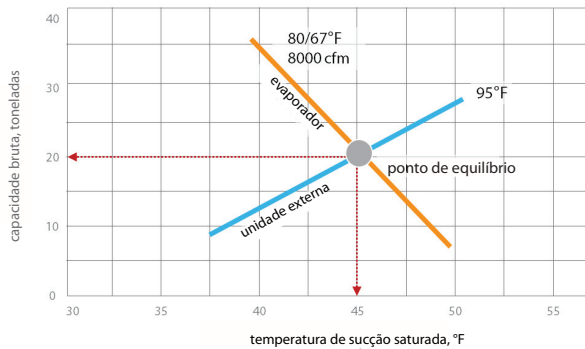
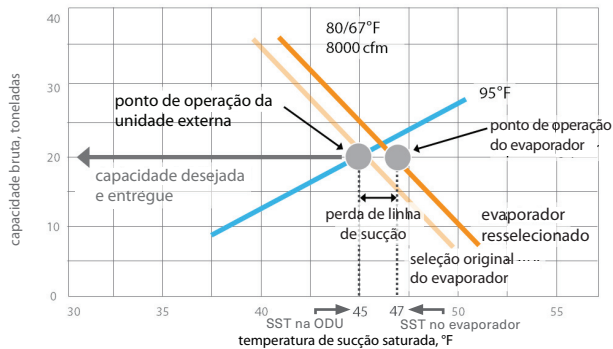


Figura 8. Serpentina do evaporador e pontos de operação da ODU, incluindo perda de linha



Para saber mais sobre a plotagem cruzada e como visualizar a resposta do sistema com base em várias situações variáveis, consulte o Boletim dos Engenheiros da Trane, volume 48-4 (ADM-APN072-EN). Os efeitos abordados incluem:

- Tamanho da serpentina
- Alterações no fluxo de ar
- Mudanças na temperatura do ar de entrada
- Métodos de redução da capacidade de refrigeração

Plotagem cruzada para um sistema VRF

A seleção de um sistema VRF é consideravelmente diferente e a plotagem cruzada normalmente não é necessária. Um sistema VRF possui muitos componentes adicionais que fornecem maior flexibilidade a esses sistemas. Isso inclui compressores de velocidade variável, ventiladores do condensador de velocidade variável e os controles do sistema necessários para manter a variação fixa ou previsível na SST. Sendo assim, não é necessário determinar um ponto de operação equilibrado para um sistema VRF.

Essa flexibilidade também torna muito mais fácil projetar sistemas que consistem em uma ODU e muitas unidades internas (um-para-muitos) ou mesmo uma rede de ODUs conectadas a muitas unidades internas (muitos-para-muitos).

Parâmetros de desempenho do modo de aquecimento

Semelhante a uma serpentina operando no modo de resfriamento, há vários parâmetros que devem ser avaliados em uma serpentina DX quando usada como uma serpentina de aquecimento (condensador):

- Temperatura do gás quente
- Temperatura de descarga saturada (SDT)
- Também conhecida como *temperatura de condensação*
- Também conhecida como *pressão de admissão ou pressão do lado alto*
- Sub-resfriamento alvo
- Calor disponível

Esses parâmetros (exceto o calor disponível) podem novamente ser ilustrados em um gráfico p-h, conforme mostrado na Figura 9. Observe que a temperatura do gás quente será muito maior do que a temperatura no início do processo de condensação (a SDT). Além disso, o sub-resfriamento alvo é um valor relativo que representa a diferença entre a temperatura que entra no dispositivo de expansão e a SDT. Como a maior parte da rejeição de calor ocorre ao longo de uma linha de temperatura e pressão constantes, a mais importante delas — no contexto da seleção da serpentina — é a SDT.

Esses parâmetros são semelhantes aos usados no modo de resfriamento, mas observe a adição de um novo parâmetro: calor disponível. Ao contrário do modo de resfriamento, onde a serpentina está absorvendo calor do ar, no modo de aquecimento é necessário rejeitar uma certa quantidade de calor no condensador para completar o ciclo de refrigeração. Assim, o calor disponível da ODU é necessário para determinar a quantidade de calor a ser repellido (ou disponível para aquecimento útil) na unidade interna.

Plotagem cruzada para aquecimento

A plotagem cruzada para aquecimento funciona da mesma forma que a plotagem cruzada para resfriamento, sendo a diferença um ponto de equilíbrio baseado na SDT com capacidade de aquecimento em vez da SST com capacidade de resfriamento.

No entanto, este exercício geralmente não é realizado por vários motivos, sendo um deles a disponibilidade limitada de um SDT de plotagem de curva com capacidade de aquecimento. Em vez disso, é recomendável usar uma ferramenta de software para prever adequadamente a capacidade de aquecimento de um sistema dividido.

Desempenho da unidade externa

As ODUs geralmente são dimensionadas com base em seu desempenho de resfriamento em um ponto de projeto relativamente alto (ambiente de 95 °F). O desempenho de aquecimento pode ser muito menor e a capacidade nominal de aquecimento geralmente é baseada em um ponto de projeto muito leve ou um pouco leve: 47 °F ambiente ou 17 °F ambiente, respectivamente.

Como mostrado na Figura 10. Uma bomba de calor produzirá capacidades muito mais baixas em temperaturas externas (ambientes) mais baixas. Isso ocorre por dois motivos principais:

1. o ar terá menor energia térmica em temperaturas ambientes mais baixas
2. a taxa de vazão mássica do compressor diminui devido ao aumento do volume específico do refrigerante em temperaturas mais baixas

Como resultado, as regiões sujeitas ao congelamento da serpentina verão uma redução nas capacidades de aquecimento integradas durante os ciclos de degelo.

Outra consideração é que todas as bombas de calor terão uma temperatura operacional mínima. Muitas unidades externas tradicionais desligam o aquecimento mecânico perto ou logo abaixo de 0 °F. Outras, particularmente unidades externas VRF, podem operar em temperaturas ainda mais baixas.

Figura 9. Parâmetros de desempenho do modo de aquecimento

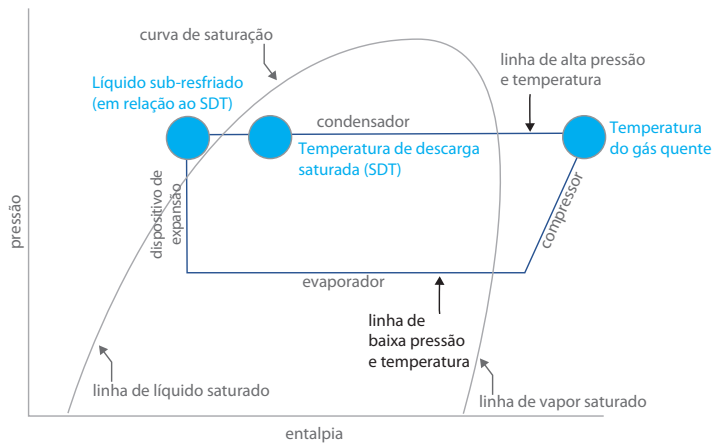
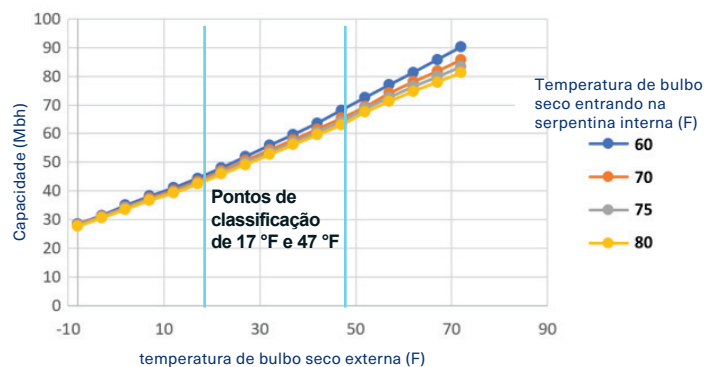


Figura 10. Desempenho de aquecimento da ODU (exemplo 6T)



Método de seleção recomendado

Selecionar uma serpentina DX para resfriamento e aquecimento pode parecer complicado, mas podemos simplificar o processo em apenas algumas etapas:

1. Selecione a serpentina e a ODU com base nos requisitos de resfriamento do dia projetado
 - Use um gráfico cruzado ou, de preferência, uma ferramenta de seleção eletrônica.
2. Compare a saída de desempenho de aquecimento de uma ferramenta de seleção eletrônica com os requisitos de aquecimento do dia projetado.
3. Se o desempenho de aquecimento de saída for insuficiente, retorne à Etapa 1 e selecione uma ODU maior

Este processo presume que o objetivo é maximizar o uso de aquecimento mecânico. Para aumentar a quantidade de aquecimento mecânico que uma unidade pode fornecer, é recomendável usar uma ODU maior. Tenha cuidado: uma unidade superdimensionada pode ter um controle de umidade ruim durante o resfriamento ou resultar em ciclos excessivos do compressor. Para minimizar esses problemas, considere uma unidade com controle de desumidificação (por exemplo, reaquecimento de gás quente) e/ou um sistema de refrigeração de capacidade variável.

Em vez de selecionar uma ODU maior, uma alternativa seria determinar a temperatura ambiente onde o aquecimento auxiliar deve ser ativado. O aquecimento auxiliar pode, então, ser dimensionado para lidar com a deficiência.

Seleção de serpentinas para aplicações VRF

Frequentemente é considerado um sistema VRF quando, além do resfriamento, o aquecimento também é desejado. Um sistema VRF pode operar como uma bomba de calor, bem como um sistema de recuperação de calor para fornecer aquecimento e resfriamento simultâneos.

Em vez de uma válvula de expansão termostática (TXV), as unidades VRF geralmente utilizam uma válvula de expansão eletrônica (EXV) para monitorar as condições de entrada e saída do refrigerante e do fluxo de ar interno (Figura 11). Esse monitoramento adicional pode resultar em alguns valores de parâmetros, critérios de projeto de serpentina e considerações de controle exclusivos em relação a um sistema de divisão tradicional:

- Os parâmetros VRF padrão diferem:
 - A temperatura do líquido que entra no dispositivo de expansão será muito menor (por exemplo, 80 °F vs. 115 °F)
 - A temperatura de sub-resfriamento será muito maior (por exemplo, 27 °F vs. 10 °F)
 - Os parâmetros SST e SDT dependerão da temperatura ambiente externa, comprimento da linha e/ou modelo ODU
- O volume da serpentina, a queda de pressão do refrigerante e a velocidade do refrigerante devem estar dentro de faixas específicas

Figura 11. Válvulas de expansão



válvula de expansão termostática (TXV)



válvula de expansão eletrônica (EXV)

- Os controles limitarão a temperatura do ar de descarga:
- O controle da temperatura do ar de descarga e o controle da temperatura de zona terão limites diferentes
- O calor disponível da ODU também determinará um limite superior

Como mencionado anteriormente, a plotagem cruzada não é necessária em um sistema VRF. Mas podemos estender nosso método simplificado para incluir serpentinas VRF:

1. Selecione a serpentina e a ODU com base nos requisitos de resfriamento do dia projetado
2. Obtenha o calor disponível da ODU e execute o desempenho de aquecimento da serpentina
3. Compare o desempenho de aquecimento de saída com os requisitos de aquecimento do dia projetado
4. Se o desempenho de aquecimento de saída for insuficiente, retorne à Etapa 1 e selecione uma ODU maior

Considerações de aplicação

Quando uma serpentina DX for usada para resfriamento e aquecimento, o projetista do sistema deve estar ciente de várias considerações de aplicação.

Pressões de trabalho mais altas

As serpentinas DX oferecidas na unidade de tratamento de ar e dispositivos terminais geralmente são projetadas para funcionar como um evaporador, que opera no lado de baixa pressão do sistema de refrigeração. Muitas serpentinas são capazes de operar nos lados de baixa e alta pressão do sistema de refrigeração, mas as opções de diâmetro e espessura da parede do tubo podem ser limitadas.

Operação de VAV

Os efeitos da variação do fluxo de ar precisam ser considerados para um sistema em aquecimento. Por exemplo, muitos componentes elétricos podem ser limitados a uma temperatura operacional máxima. Os motores dos ventiladores de insuflamento tendem a determinar esse limite superior com uma temperatura máxima de até 104 °F. A localização da caixa de controle de baixa e/ou alta tensão também pode ser um fator. Para levar em conta essas restrições, o equipamento pode ser limitado na abertura ou controlado para reverter para fluxo de ar de volume constante durante o modo de aquecimento. Outros sistemas podem incluir controles para limitar a temperatura do ar de descarga. De toda forma, o sistema deve ser selecionado cuidadosamente para garantir que as temperaturas de saída do ar não excedam os limites superiores para os componentes incluídos na unidade de tratamento de ar.

Aquecimento auxiliar e combustível duplo (híbrido)

É comum dimensionar um aquecedor auxiliar para lidar com a carga de aquecimento do dia projetado completo no caso improvável de mau funcionamento da bomba de calor. Em muitas jurisdições, um sistema de combustível duplo (híbrido) pode ser fornecido onde o aquecedor auxiliar utiliza gás como fonte de combustível. Uma unidade de combustível duplo exigirá uma conexão de gás separada e um trocador de calor a gás classificado para combustível duplo. Quando isso é feito corretamente, o tamanho da conexão elétrica pode não precisar ser aumentado.

Em outras jurisdições, pode ser necessário o calor da resistência elétrica. Neste caso, as conexões elétricas deverão contemplar simultaneamente o aquecimento mecânico e o aquecimento por resistência elétrica (durante o degelo, por exemplo).

A eletrificação do aquecimento pode significar converter todas as formas de energia usadas para aquecer um edifício com eletricidade, minimizar os combustíveis fósseis como fonte de energia, ou alguma combinação de ambas as práticas. Uma unidade de combustível duplo é uma ferramenta útil para esse propósito, pois complementará a operação da bomba de calor somente quando necessário, enquanto fornece um passo inicial para futuras metas e requisitos de eletrificação.

Descongelamento

Todos os sistemas de bomba de calor precisarão entrar periodicamente em um ciclo de degelo quando as condições externas causarem o congelamento da serpentina externa. Quando uma unidade externa está em descongelamento, a serpentina do evaporador interno opera no modo de resfriamento e podem ser esperadas quedas rápidas na temperatura do ambiente interno.

Algumas unidades podem simplesmente desligar o ventilador interno durante o degelo. Em outros, o calor auxiliar é usado para aquecer o ar frio que sai da serpentina do evaporador. Se o ventilador interno permanecer energizado, um aquecedor auxiliar de ação rápida deverá ser energizado e ajustado para uma posição/estágio mínimo (recomenda-se o mínimo de 50 por cento).

Conclusão

A eletrificação do aquecimento usando bombas de calor está potencializando ainda mais a elaboração de metas de descarbonização. A correspondência de uma serpentina DX interna dividida com uma ODU pode ser simplificada usando um approach semelhante para resfriamento e aquecimento (Figura 12). Este EN sugeriu um método de seleção simplificado que começa com o resfriamento e volta para verificar o desempenho do aquecimento. Se o objetivo for aquecimento e resfriamento simultâneos, considere as características de seleção exclusivas inerentes a um sistema de Fluxo de Refrigerante Variável (VRF).

Por Dustin Meredith, Trane. Para assinar ou ver edições anteriores do Boletim de Engenheiros, acesse trane.com. Envie seus comentários para ENL@trane.com.

Figura 12. Sistema dividido tradicional, serpentina de tratamento de ar e unidade externa de fluxo variável de refrigerante



Junte-se a nós em 2023 para obter mais programas informativos do **ENGINEERS NEWSLETTER LIVE!**

MARÇO

Projeto de central de água gelada modular

MAIO

Controle de pressão predial

SETEMBRO

Descarbonização predial (eletrificação) para sistemas hidráulicos

NOVEMBRO

Recuperação de energia ar-ar de última geração

Entre em contato com o escritório local da Trane para obter mais informações ou acesse www.Trane.com/ENL.

Confira os programas mais recentes, agora disponíveis **SOB DEMANDA, O TEMPO TODO**

Aplicação de VRF em uma solução de edifício completa Parte II. Agora disponível on-line

Descarbonização de sistemas HVAC Parte II. Agora disponível on-line
Projeto de sistema de bomba de calor ar-água.

Eletrificação de resfriamento e aquecimento com armazenamento de energia térmica

Visite o Trane Education Center e ganhe créditos PDH.



Trane — por Trane Technologies (NYSE: TT), uma empresa de climatização global e inovadora — cria ambientes internos confortáveis que economizam energia por meio de um amplo portfólio de sistemas, controles, serviços, peças e suprimentos para aquecimento, ventilação e condicionamento de ar. Para obter mais informações, consulte trane.com ou tranetechnologies.com.

Todas as marcas registradas mencionadas neste documento são marcas registradas de seus respectivos proprietários.

© Trane. Todos os direitos reservados.

ADM-APN086-EN
Março de 2023