

More lembas bread...

Por J. Fernando B. Britto

Introdução

Os aficionados por J. R. R. Tolkien, entenderão a referência. Para os seres humanos que gozam de seu juízo perfeito, essa referência significa “mais do mesmo...”.

Em nosso caso, iremos tratar de psicrometria (novamente!!!) ou, mais especificamente, tentarei explicar a utilização da carta psicrométrica para análise do processo termodinâmico e estimativa da carga térmica total do sistema.

Tal como ocorre na evolução das espécies, o conhecimento técnico da engenharia foi paulatinamente adquirido ao longo dos séculos.

No século 17, Isaac Newton descreveu a gravidade como “uma força de atração entre objetos com massa”. No século 20, Albert Einstein descreveu a gravidade como “a curvatura do Espaço-tempo, causada pela massa” e a associando à energia.

O que nos trará a “gravidade quântica”?

Por enquanto, sabemos que nossa “curva de aprendizado” está se acelerando cada vez mais, quanto mais acumulamos conhecimento, mais e mais adquirimos novos conhecimentos, tal qual o espaço se curva sob o efeito da massa e de forma que semelhante ao que ocorre com a evolução das espécies: quanto mais espécimes com determinada “mutação benéfica”, maior sua interação com diferentes genéticas e tanto maior a probabilidade dessas mutações se fixarem e novas mutações surgirem. Por fim, as espécies mais dispostas a se adaptarem às mudanças, acabam por se tornarem dominantes.

Em nosso país, costumamos dizer que “tem leis que pegam e outras que não pegam...”, porém, as leis da física não dependem da aderência ou não daqueles sujeitos a seus efeitos.

Nosso conhecimento limitado dessas próprias leis, ou as dificuldades inerentes ao uso da matemática avançada capaz de explicar seus efeitos, acabam nos fazendo utilizar simplificações ou aproximações que nos permitem alcançar nossos objetivos principais, com elevado grau de acerto, tolerando um determinado nível de incerteza.

Insisto no tema, justamente para que aqueles que acham que as leis termodinâmicas que regem a psicrometria “não pegam”, possam compreender sua vital importância para a área de VAC – Ventilação e Ar-Condicionado.

E acrescento o alerta de que, ao longo de minha carreira, uma grande parte dos problemas encontrados em campo eram oriundos da falha na compreensão das variáveis e dos processos psicrométricos.

Vamos então ao estudo da Carta Psicrométrica.

Entendendo a psicrometria

Na termodinâmica e na mecânica dos fluidos, fazemos uso frequente de ábacos e gráficos, os quais nos permitem demonstrar de forma muitíssimo simplificada, o efeito de “fenômenos físicos interdependentes”, sem a necessidade imediata de grandes capacidades de processamento ou cálculos (frequentemente iterativos), que envolvem os processos psicrométricos.

Como já indiquei em meus artigos “Considerações sobre psicrometria – Revista SBCC – edição 45” e “A psicrometria e a carga térmica – Revista SBCC – edições 46, 47 e 48”, além de outras citações em artigos e palestras ao longo das últimas décadas, psicrometria é a ciência que estuda o envolvimento das propriedades do ar úmido (uma mistura de ar seco e vapor d’água) e do processo termodinâmico (secagem, umidificação, resfriamento, aquecimento etc.) na mudança da temperatura ou do conteúdo de vapor d’água da mistura.

Atualmente, encontramos no mercado diversos aplicativos e planilhas que nos permitem efetuar os cálculos psicrométricos, porém, nem sempre dispomos de acesso a computadores ou à internet quando estamos em campo, dificultando sua utilização.

Por outro lado, quando vemos apenas os resultados numéricos dos cálculos, nem sempre conseguimos perceber seu real significado com relação ao processo psicrométrico que estamos avaliando, ao passo que gráficos oferecem uma visualização rápida e facilitam a interpretação dos resultados, como veremos mais adiante, nesse artigo.

Assim sendo, recomendo a todos que possuam uma carta psicrométrica para a altitude das localidades mais comuns em seu mercado, plastificada e acessível dentro de sua mochila, juntamente com uma caneta de ponto porosa, uma prancheta e uma régua (se possível, um ou par de esquadros). Acredito que este artigo lhes mostrará a razão disso:

Conhecendo a carta psicrométrica

A carta psicrométrica, representada de forma simplificada na figura 1 da próxima página, apresenta 8 (oito) variáveis termodinâmicas expressas em um mesmo gráfico, todas referidas à altitude e pressão barométrica informada no cabeçalho da carta.

A Altitude e a Pressão Atmosférica (P) no cabeçalho, informam a referência utilizada para representação das linhas expressas na carta psicrométrica, sendo a pressão expressa em kPa para cartas em SI – Sistema Internacional de medidas, a qual é calculada para a altitude igualmente indicada no cabeçalho do gráfico.

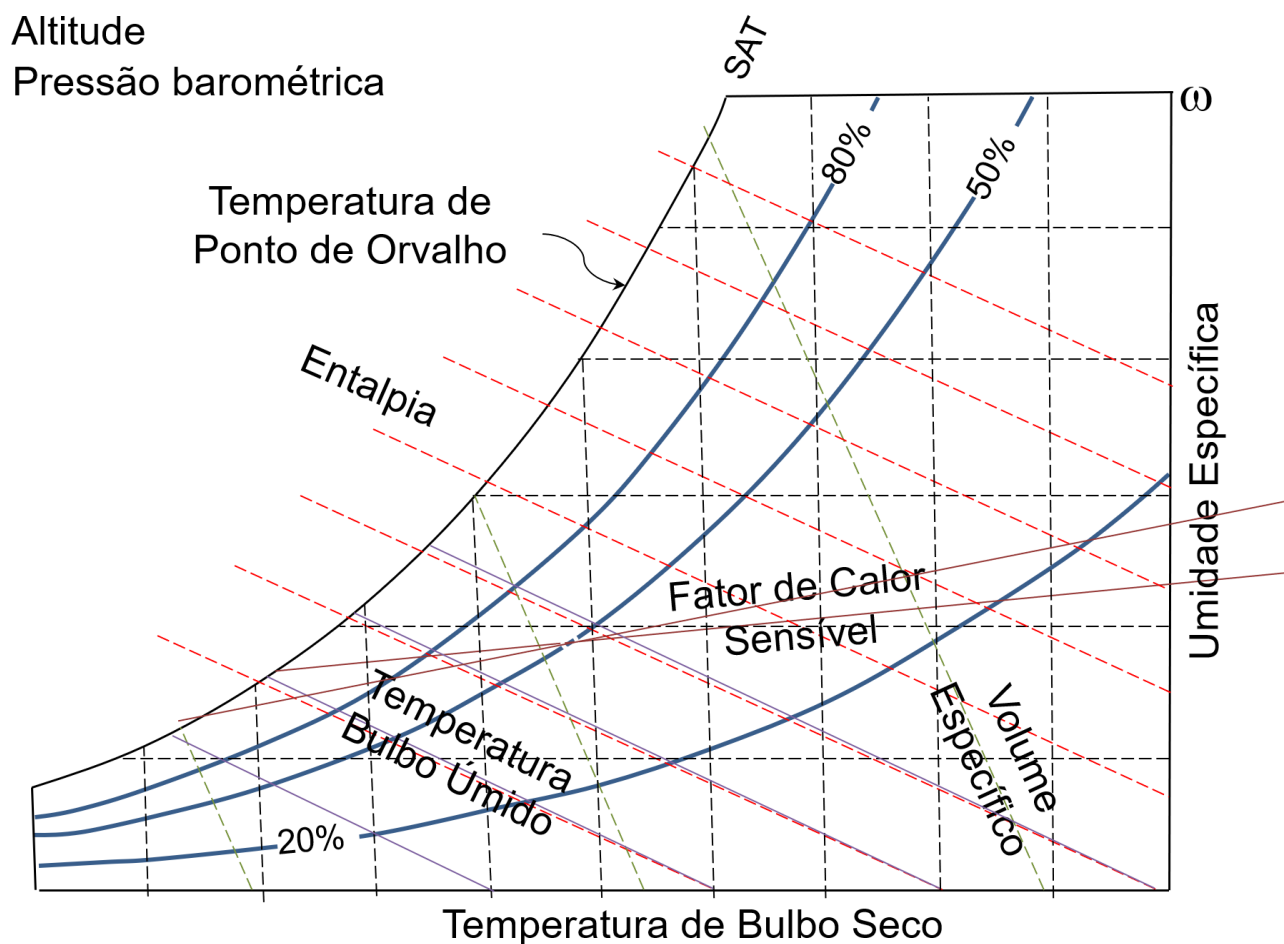
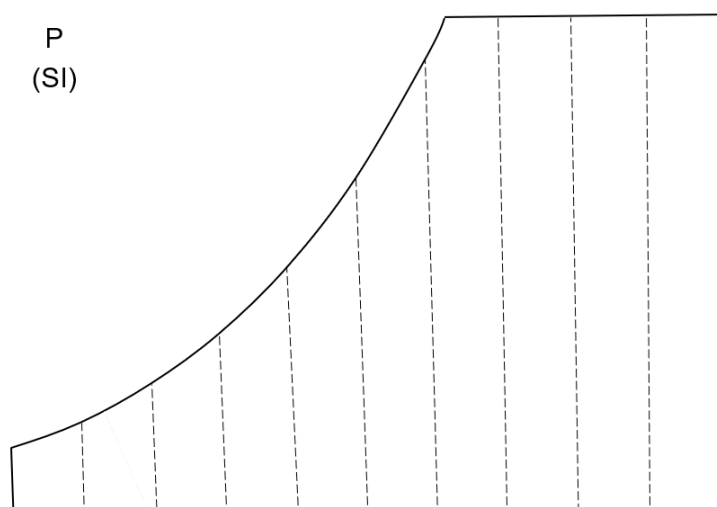


Figura 1- Variáveis representadas na carta psicrométrica

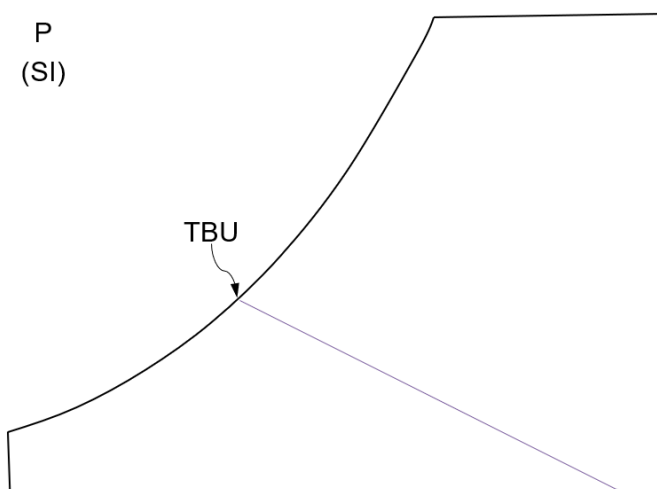
A seguir indicamos o que cada uma dessas variáveis representa:



Temperatura de Bulbo Seco (TBS):

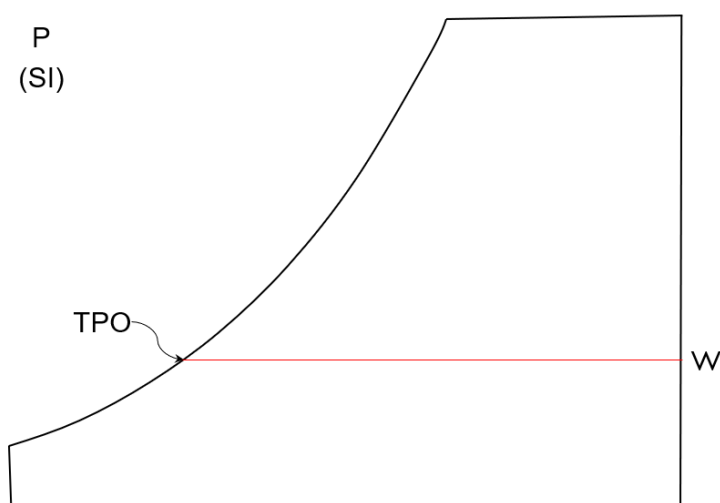
Expressa a quantidade de energia na forma de calor (vibração das moléculas) contida no ar através de uma escala. Expresso em °C.

Sua variação é designada como calor sensível (que pode ser medido diretamente).



Temperatura de Bulbo Úmido (TBU):

Indica a quantidade de energia na forma de calor contido no ar úmido. Está associada à mínima temperatura em que a água em estado líquido se transforma em vapor (temperatura de evaporação) para uma determinada quantidade física de água contida no ar (ver umidade específica). Também permite definir a condição de ponto de orvalho e a pressão parcial de vapor d'água. Expresso em °C.

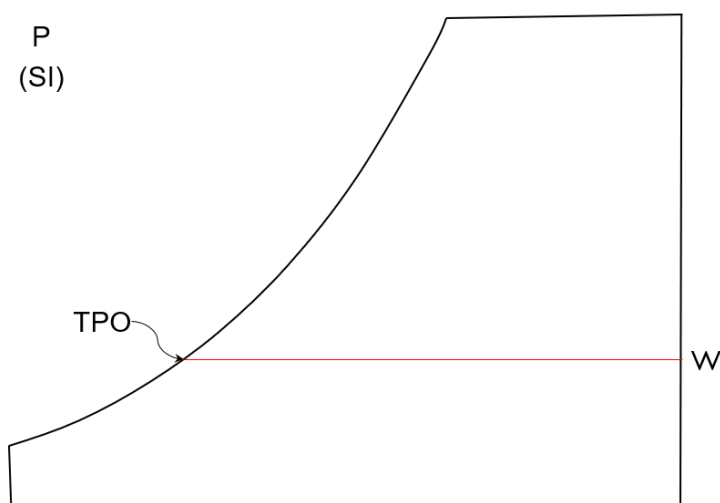


Umidade Específica (w):

Expressa a relação entre a massa de ar seco e a massa de vapor superaquecido contida na mistura de ar úmido ($m_{\text{VAPOR}}/m_{\text{AR SECO}}$).

Adimensional, pode ser representado como $g_{\text{VAPOR}}/kg_{\text{AR SECO}}$.

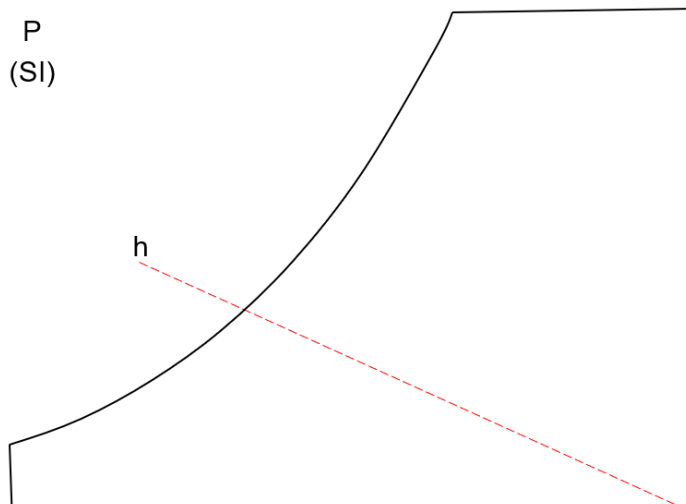
Sua variação é designada como calor latente (associado à mudança de fase da água).



Temperatura de Ponto Orvalho (TPO):

Expressa a condição mínima de temperatura de bulbo seco em que uma mistura ar-vapor consegue manter água no estado gasoso (vapor), abaixo da qual ocorre a condensação da umidade (ou a formação de névoa).

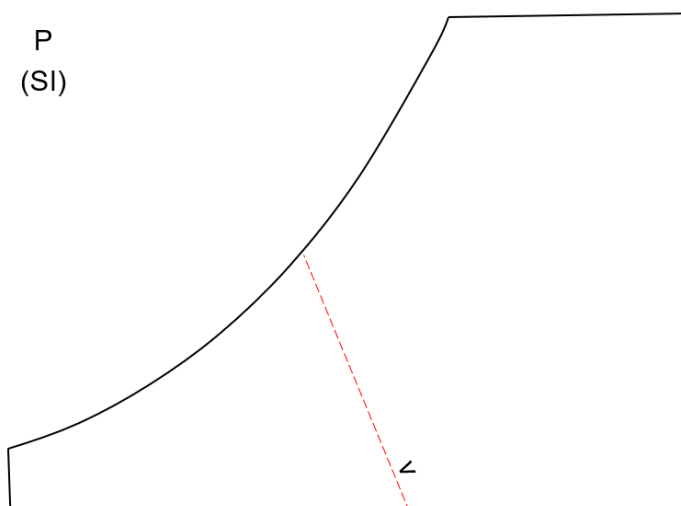
Expresso em °C.



Entalpia (h):

Expressa o conteúdo energético do ar úmido (calor total) por unidade de massa de ar de um estado psicrométrico em relação a um estado de referência (normalmente para $T_{BS} = 0$ e $\omega = 0$) e incorpora os conteúdos de calor sensível e latente.

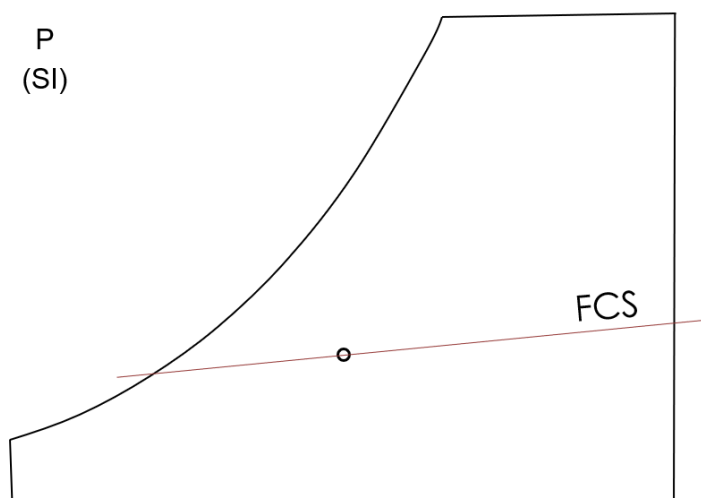
Expresso em kJ/kg.



Volume Específico (v):

Expressa a relação entre o volume e a massa do conteúdo de ar seco da mistura.

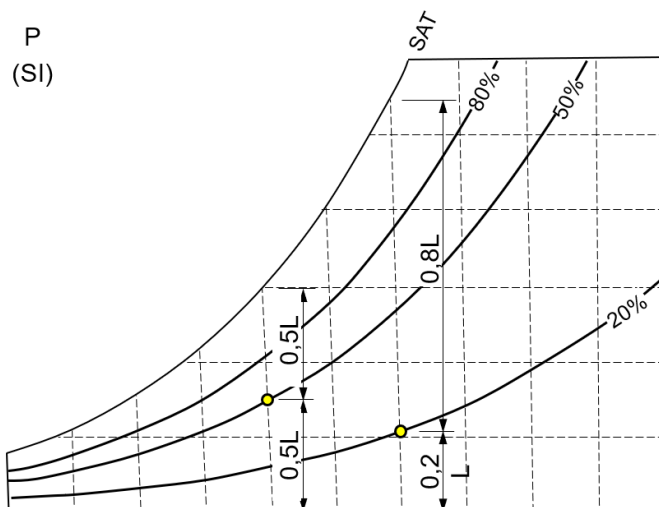
Expresso em m^3/kg .



Fator de Calor Sensível (FCS):

Indica a relação entre a carga térmica sensível interna e a carga térmica total (sensível + latente) interna.

Adimensional



Umidade Relativa (UR):

Representa o afastamento ou distância "vertical" até a Curva de Saturação.

Percentual do comprimento da reta de TBS entre seu início ($w = 0 \text{ g/kg}$) e a curva de saturação. Trata-se de um binário "relativo" à TBS em que está sendo referenciada.

Obtendo-se o valor de duas variáveis quaisquer dentre as oito disponíveis, ao plotarmos um ponto na Carta Psicrométrica, é possível conhecer as demais variáveis associadas à essa condição.

Outra consideração importante quando utilizamos a carta psicrométrica é que há um ponto aproximadamente no centro da carta, no cruzamento da condição de 24°C TBS com a curva de 50% UR, o qual é utilizado para traçarmos a reta de FCS (ou SHF, em inglês).

O traçado é feito com um lado do esquadro alinhado nesse ponto e a outra extremidade ajustada no valor apropriado da escala FCS.

Caso o ponto de ajuste do ambiente se encontre em outra condição, com o auxílio de um par de esquadros, é traçada uma reta paralela à reta FCS padrão (medida a partir de 24°C TBS / 50%UR), até seu cruzamento com a curva de saturação, à esquerda do gráfico.

A escala da carta psicrométrica é construída de forma que cada intervalo horizontal significa uma variação de 1°C , que equivale a $1,0048 \text{ kJ/kg}$ de ar seco de variação de entalpia e cada intervalo vertical significa a variação de $0,5 \text{ g/kg}$, que equivale a $1,2250 \text{ kJ/kg}$ (CNTP) de ar seco de variação de entalpia.

Portanto, os cantos opostos de um intervalo de 1°C TBS e um intervalo de umidade específica de $0,5 \text{ g/kg}$, equivalem ao FCS de:

$$1,0048 [\text{kJ/kg}] / (1,0048 [\text{kJ/kg}] + 0,0005[\text{kg/kg}] * 2450[\text{kJ/kg}]) = 0,45$$

Conforme vemos representado na carta psicrométrica da figura 2, na próxima página, as linhas principais verticais representam a subdivisão da escala de 1°C na temperatura de Bulbo Seco (TBS) e as horizontais representam a variação de $0,5 \text{ g/kg}$ na umidade específica (w) do ar:

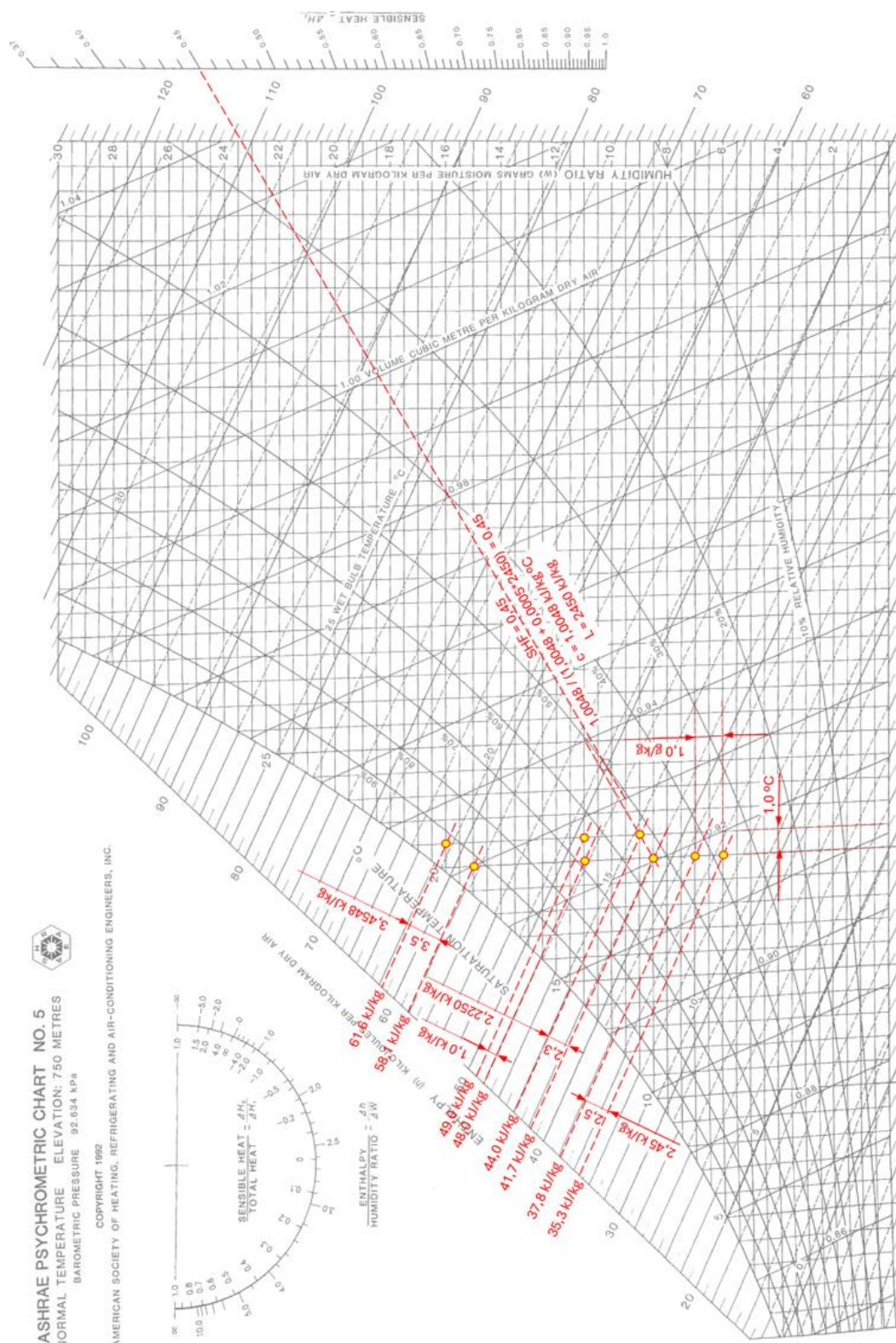


Figura 2 – Carta psicrometria ASHRAE Chart no. 5 – 750m [92,6340 kPa]

A Figura 3, é uma ampliação a partir da figura 2, elaborada para melhorar a visualização dos intervalos indicados de 1 °C TBS e 0,5 g/kg, bem como do traçado da reta FCS (ou SHF) = 0,45 (padrão, traçado a partir do ponto 24°C TBS e 50% UR) e a reta paralela passando pelos pontos dos cantos opostos do quadrilátero que delimita uma variação de 1°C TBS e 0,5 g/kg:

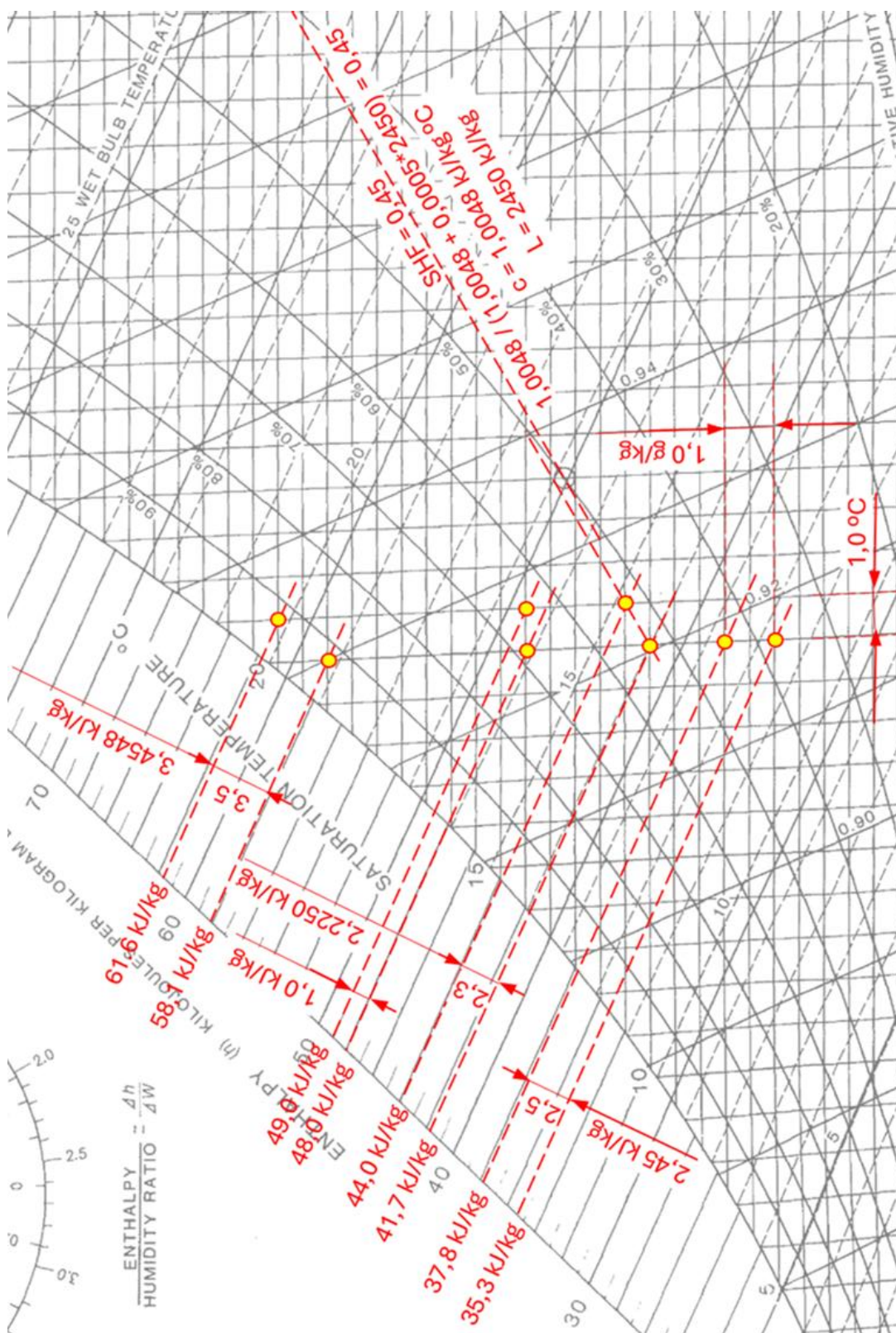


Figura 3 – Ampliação da carta psicrometria ASHRAE Chart no. 5

A partir dos intervalos representados na carta, podemos medir a variação na escala de entalpia e observamos que, devido à escala do gráfico, só é possível encontrarmos números inteiros na escala e efetuarmos subdivisões aproximadas com uma única casa decimal com o auxílio de um escalímetro.

Contudo, a diferença obtida por esta medição representa um erro máximo de 3,5%, o que está dentro de uma margem segura para os cálculos propostos, cabendo adotarem-se coeficientes de segurança adequados para a finalidade da aplicação avaliada, que geralmente são da ordem de 10% acima do valor calculado, minimizando os erros de escala e graficismo.

Processos psicrométricos

A figura 4, abaixo, representa os diferentes processos psicrométricos que podem ser representados e analisados em uma carta psicrométrica:

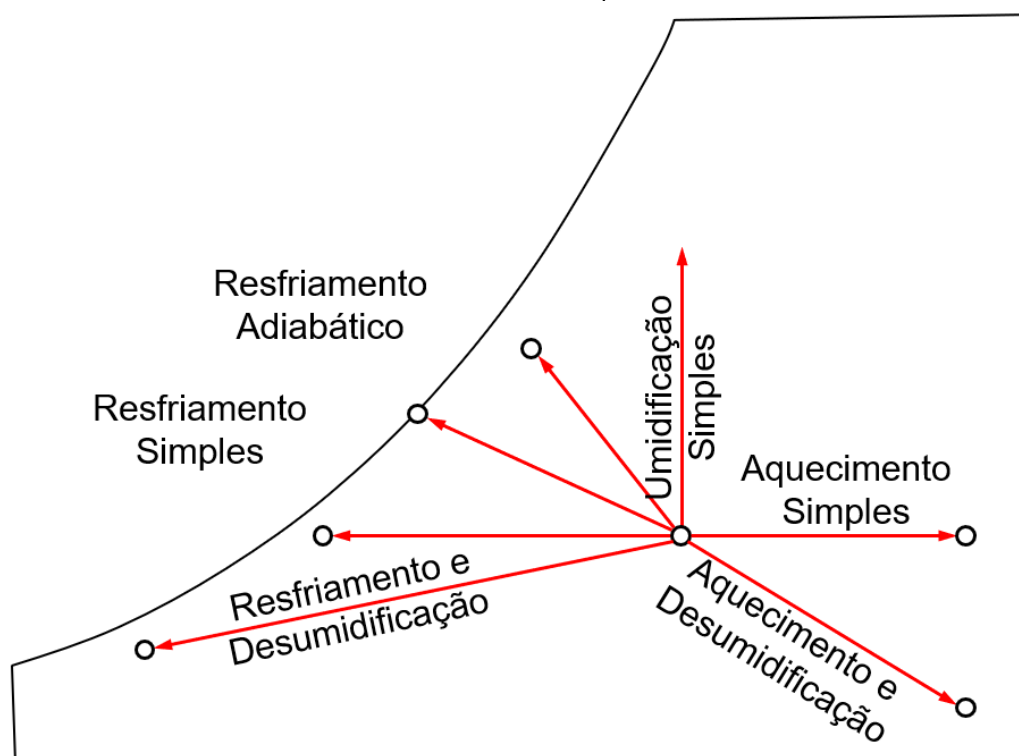
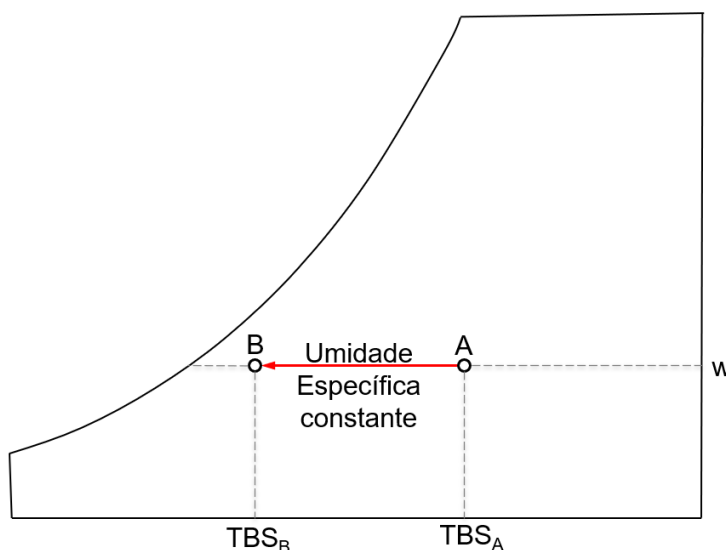


Figura 4 – Processos Psicrométricos

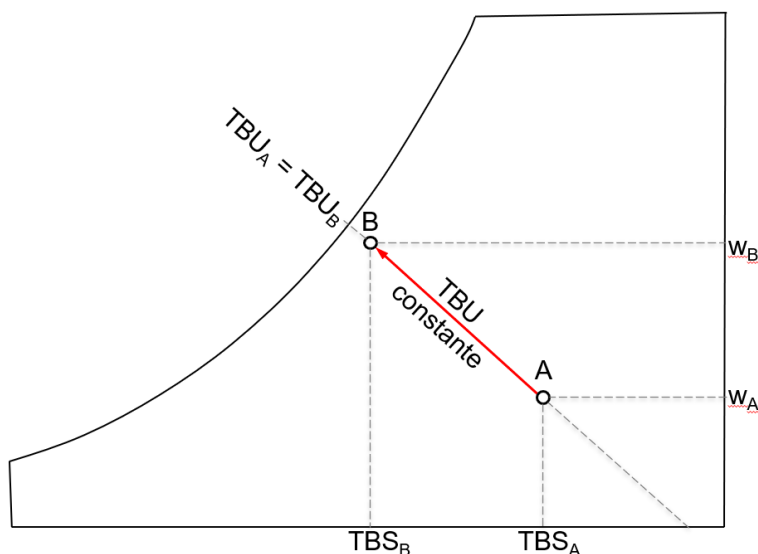


Resfriamento Simples:

O ar é resfriado do ponto A até o ponto B, sem ocorrer variação na umidade específica

$$TBS_A > TBS_B$$

$$w = \text{constante}$$



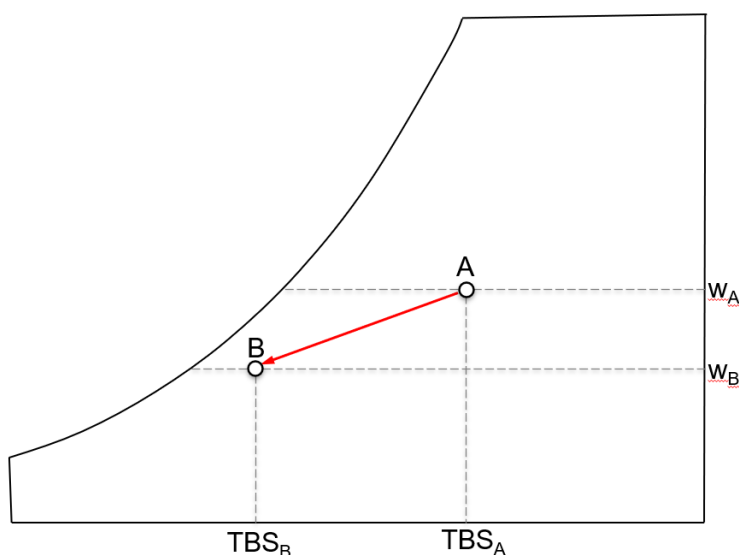
Resfriamento Adiabático:

O ar é resfriado do ponto A até o ponto B através de resfriamento evaporativo (trocando calor sensível do ar por calor latente da água), mantendo-se a TBU constante.

$$TBS_A > TBS_B$$

$$TBU_A = TBU_B = \text{constante}$$

$$w_A < w_B$$



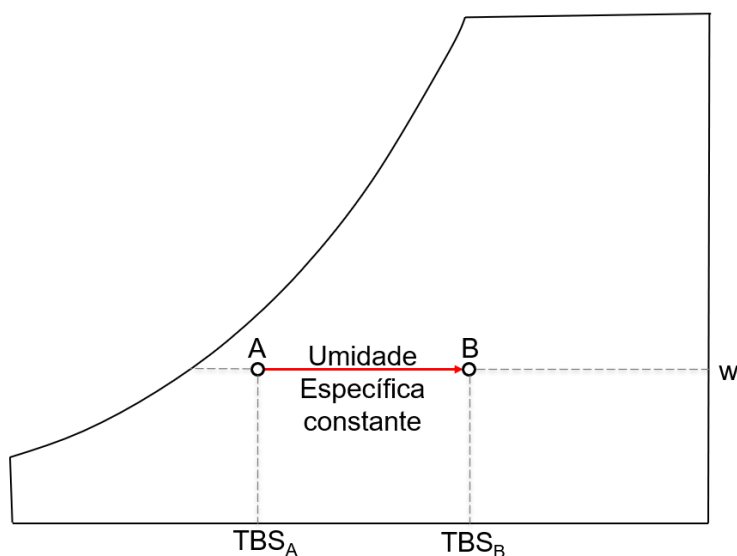
Resfriamento com desumidificação:

O ar é resfriado do ponto A até o ponto B por meio de refrigeração, reduzindo seu conteúdo de umidade durante o processo.

$$TBS_A > TBS_B$$

$$w_A > w_B$$

$$FCS = \text{constante}$$

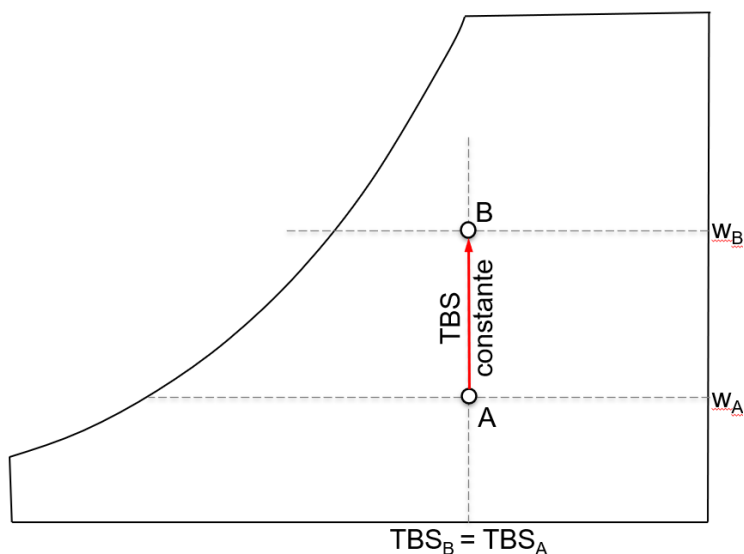


Aquecimento Simples:

O ar é aquecido do ponto A até o ponto B, sem ocorrer variação na umidade específica.

$$TBS_A < TBS_B$$

$$w = \text{constante}$$

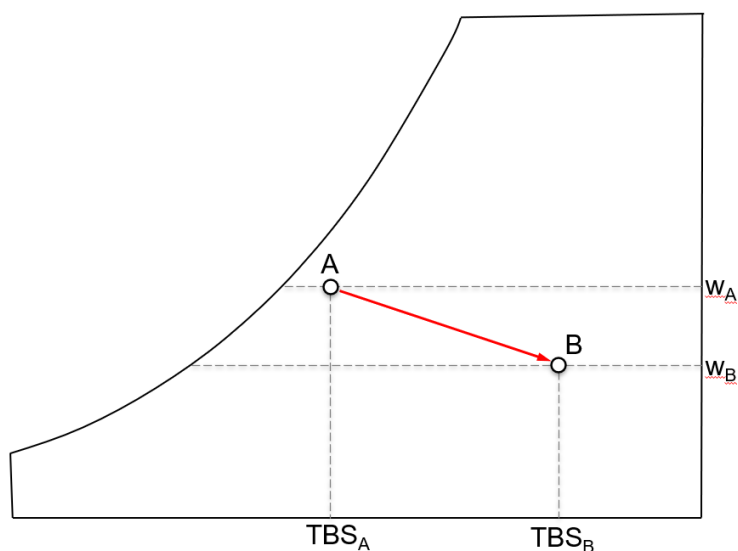


Umidificação Simples:

O ar é umedecido do ponto A até o ponto B, sem ocorrer variação em TBS

$$TBS_A = TBS_B = \text{constante}$$

$$w_A < w_B$$

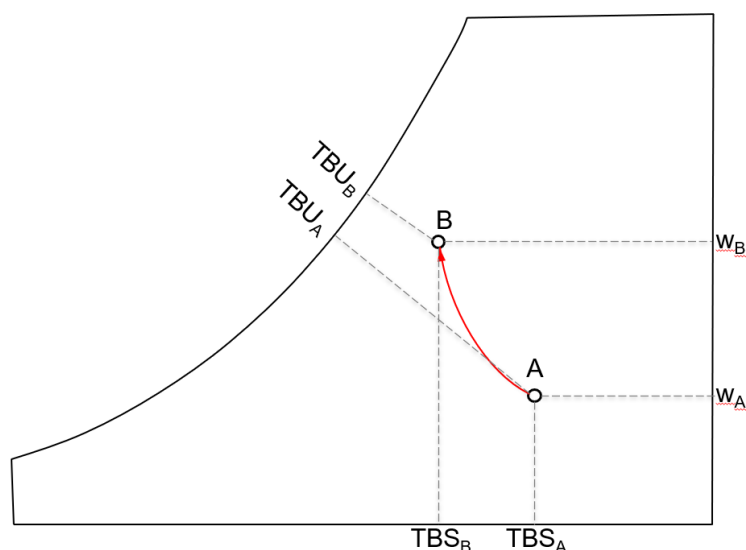


Desumidificação e aquecimento:

O ar é desumidificado do ponto A até o ponto B, por meio de cilindro dessecante regenerável, ocorrendo aumento de TBS.

$$TBS_A < TBS_B$$

$$w_A > w_B$$



Umidificação e Resfriamento Não Adiabático:

O ar é resfriado em processo evaporativo com água à temperatura diferente da condição de TBU Natural.

$$TBS_A > TBS_B$$

Podendo ocorrer:

$$TBU_A ; w_A < TBU_B ; w_B$$

OU

$$TBU_A ; w_A > TBU_B ; w_B$$

Utilizando a carta psicrométrica

O exemplo da figura 5 representa um processo de resfriamento com desumidificação, o qual nos permite avaliar a carga térmica Total e suas componentes Sensível e Latente, correspondentes à reta de fator de calor sensível determinada pelo cálculo de carga térmica:

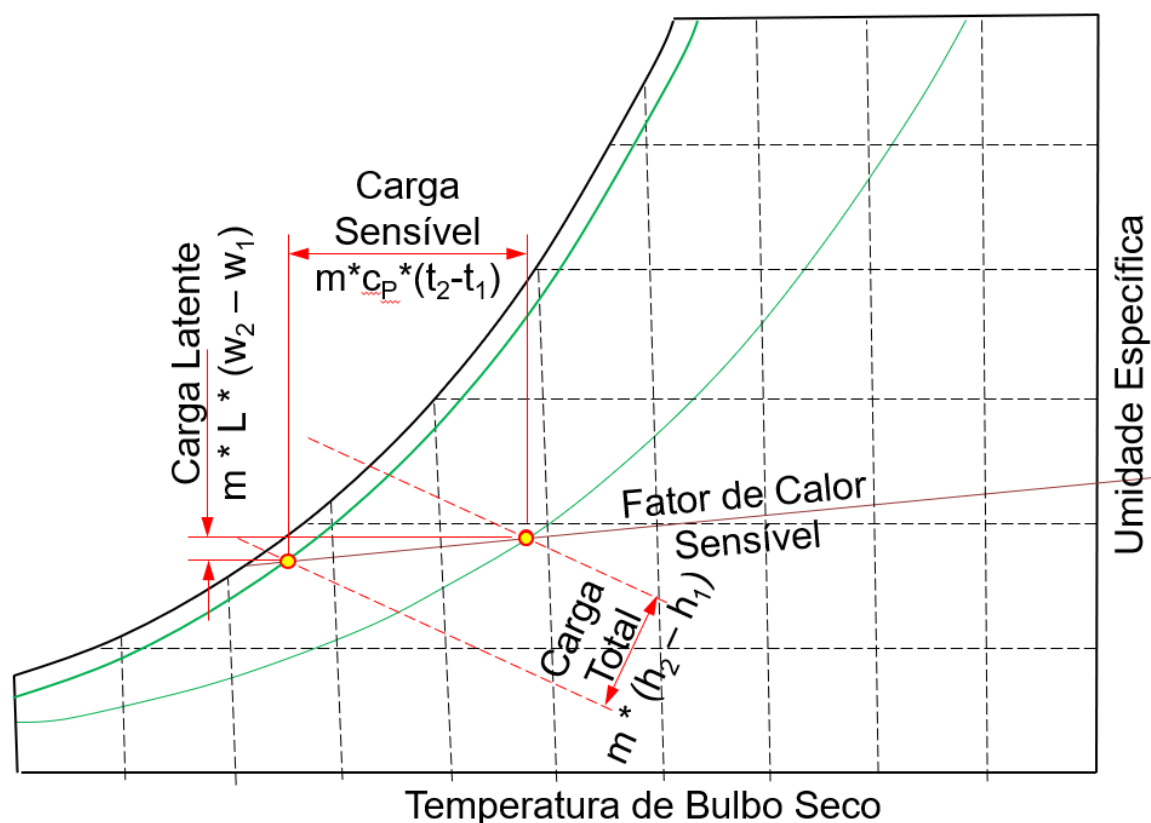


Figura 5 – Ampliação da carta psicrometria ASHRAE Chart no. 5

O traçado se inicia no ponto de maior TBS e w , geralmente associado à condição de ajuste do ambiente condicionado, a partir do qual é traçada a reta de FCS até o cruzamento com a curva de saturação. Então é adotado um ponto ao longo desta reta, cuja umidade relativa se encontre entre a saturação e 90% UR (sugestão do autor: geralmente adoto um valor entre 90% e 95% UR), correspondente à saída teórica da serpentina de resfriamento e desumidificação.

A condição indicada no ponto de menor TBS é a condição inicial que satisfaz a as cargas Sensível e Latente internas, porém, como o motoventilador responsável pelo escoamento do ar através do sistema, impõe aquecimento do ar por atrito e pela dissipação de suas perdas internas de energia ($1 - \text{eficiência}$), resultantes em dissipações de calor do motor, do ventilador e da transmissão, é necessário estimar o grau de aquecimento produzido pelo motoventilador e encontrar um novo ponto na reta de FCS, somando o aquecimento à TBS de saída da serpentina.

Na figura 6, a seguir, também representamos um processo termodinâmico inicial, representando uma mistura (M) teórica de ar de retorno (AMB) com ar externo (AE) de reposição, correspondente à condição de entrada da serpentina.

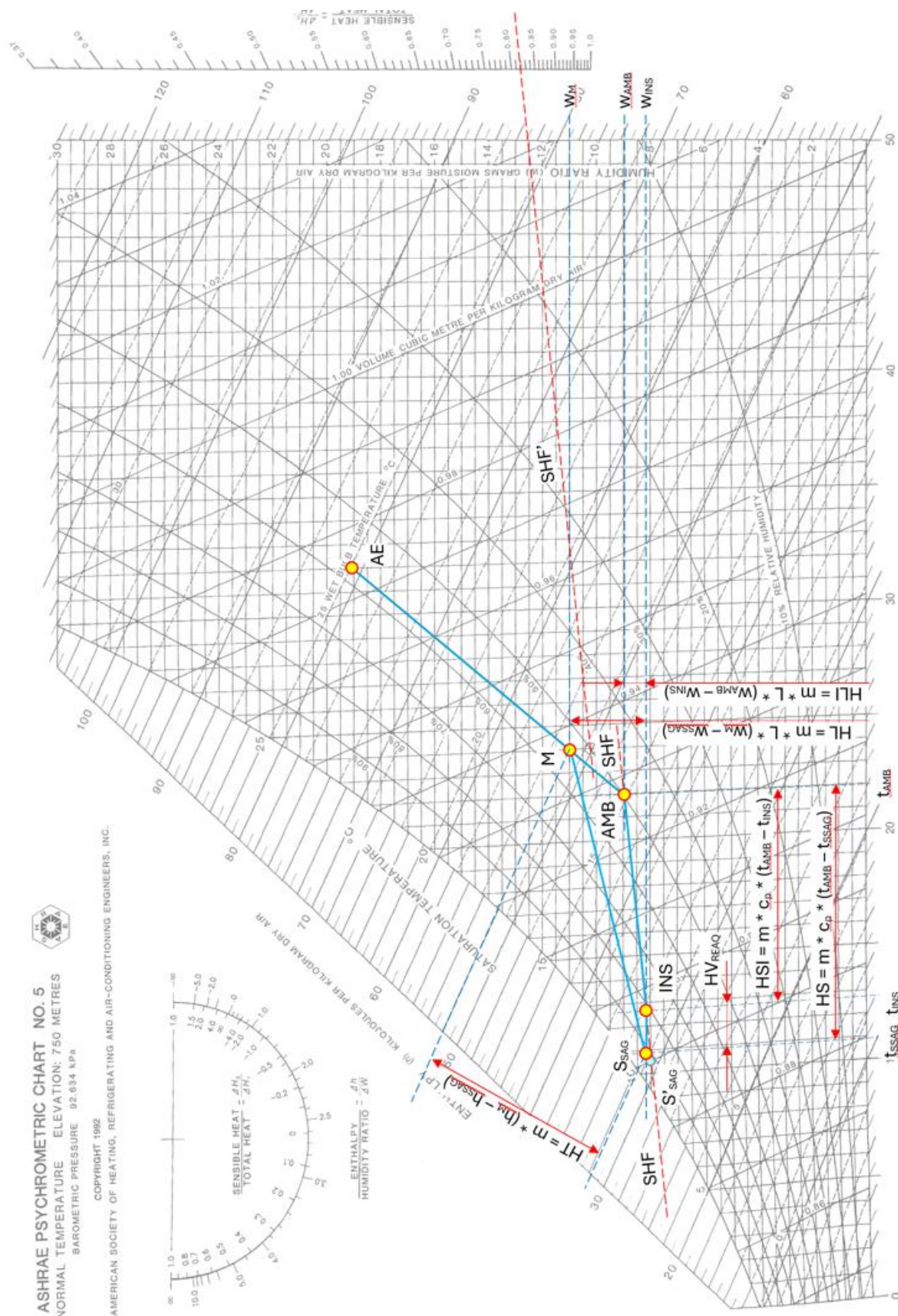


Figura 6 – Mistura, Resfriamento e desumidificação expressos em carta psicrometria ASHRAE Chart no. 5

A partir do ponto de ajuste da condição do ambiente e com o auxílio da reta de SHF (FCS, paralela à reta FCS padrão), encontramos o ponto teórico de saída da SAG (S'_{SAG}), a partir do qual acrescentamos a diferença de temperatura relativa ao reaquecimento do ar produzido pelo motoventilador.

Então marcamos o ponto de insuflação (INS) efetivo do sistema e traçamos uma reta com w constante igual a do ponto INS, até atingirmos a umidade relativa esperada na saída da SAG (geralmente entre 90% e 95% UR). Por fim, traçamos linhas unindo os pontos para representar o processo de resfriamento e desumidificação da serpentina (M até S_{SAG}) o reaquecimento produzido pelo motoventilador (S_{SAG} até INS), a difusão (INS até AMB) e a mistura de ar de retorno com ar externo de reposição (AMB até M e até AE):

Agora, conhecendo a difusão (diferença de temperatura entre a insuflação e o ambiente) e a carga térmica sensível interna, podemos determinar a vazão de ar de insuflação (m) necessária para remover o calor do ambiente e manter sua condição termoigrométrica.

$$m = HSI / [C_P * (t_{AMB} - t_{INS})]$$

Onde:

AE:	AR EXTERIOR
M:	Mistura
AMB:	Ambiente
S'_{SAG} :	Saída teórica da Serpentina de Água Gelada
S_{SAG} :	Saída Serpentina A.G.
INS:	Insuflação
SHF':	Fator de calor sensível da carta psicrométrica [adimensional]
SHF:	Fator de calor sensível real [adimensional]
HT:	Calor total [kW]
HSI:	Calor sensível interno [kW]
HLI:	Calor latente interno [kW]
HL:	Calor latente total [kW]
HS:	Calor sensível total [kW]
HV _{REQ} :	Reaquecimento produzido pelo motoventilador [kW]
m :	vazão mássica (kg/s)
C_P :	calor específico do ar seco [1,0048 kJ/kg.°C]
L:	calor latente do vapor [2450 kJ/kg]

Conhecendo a vazão (m) e as condições da mistura (M) e da saída da serpentina (S_{SAG}), podemos então calcular a carga térmica total (HT), sensível (HS) e latente (HL) do equipamento.

Conhecendo o escoamento (m) e os pontos de entrada (M) e saída da serpentina (S_{SAG}), a carga térmica total, sensível, latente, sensível interna e latente interna, podem ser calculadas utilizando as equações indicadas na carta da figura 6.

Why mr. Anderson? Why?

Faço referência à célebre frase da trilogia Matrix®, para lhes indicar **porque** devemos nos preocupar com o traçado da carta psicrométrica, uma vez que temos vários aplicativos que calculam e outros tantos que traçam os processos em cartas psicrométricas?

A razão, além da óbvia compreensão dos resultados, para poder interpretá-los, é que nem sempre temos os aplicativos ou o, cada vez mais necessário, acesso à web quando eles nos são mais úteis.

O exemplo a seguir, oriundo de um problema real encontrado durante a partida de uma instalação, poderá auxiliá-los no entendimento desse “**porquê**”:

Em determinada instalação, projetada para operar uma câmara fria com TBS $4,0 \pm 1^\circ\text{C}$ e UR <35%, foram efetuadas medições onde encontramos as seguintes vazões e condições de ar de insuflação e ar externo de reposição:

Saída do air handler:	$V_{\text{INS}} = 2246 \text{ Am}^3/\text{h}$ @ TBS $9,7^\circ\text{C}$; 38,5% UR
Insuflação:	$V_{\text{INS}} = \text{não medida}$ @ TBS $11,4^\circ\text{C}$; 30,4% UR
Ar exterior:	$V_{\text{AE}} = 275 \text{ Am}^3/\text{h}$ @ TBS $29,1^\circ\text{C}$; 51,9% UR
Retorno:	$V_{\text{RET}} = \text{não medida}$ @ TBS $16,4^\circ\text{C}$; 28,5% UR
Mistura:	$V_{\text{MIST}} = V_{\text{INS}}$ @ TBS $16,4^\circ\text{C}$; 28,5% UR
Altitude local:	635 m

Utilizando uma carta psicrométrica ASHRAE CHART NO. 5, para a altitude de 750m e plotando os pontos encontrados e os processos de mistura e difusão, temos:

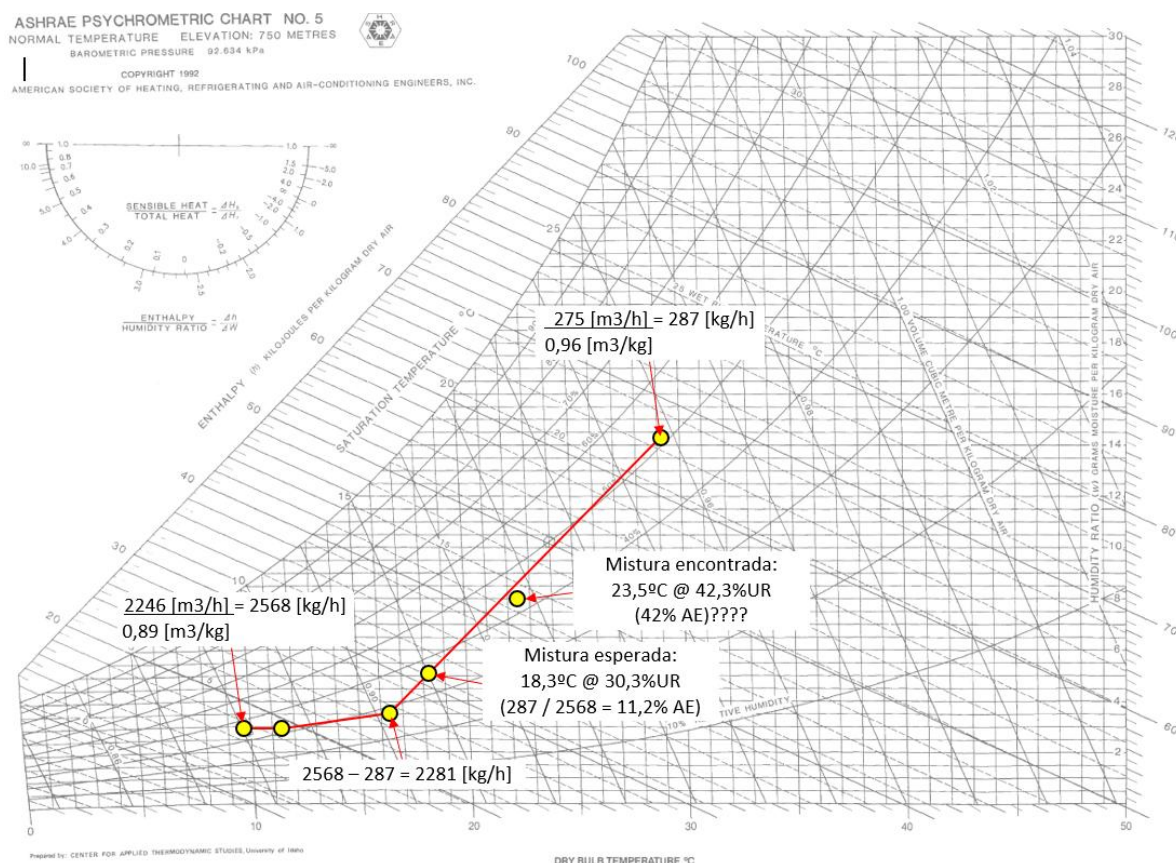


Figura 7 – Medições plotadas na carta psicrometria ASHRAE Chart no. 5

Utilizando os cálculos de mistura a partir das vazões mássicas de insuflação e ar exterior e das condições termoigrométricas desses pontos, conforme medições no local, deveríamos encontrar uma condição de mistura com TBS 18,3°C @ 30,3% UR. Porém, estávamos medindo no local TBS 23,5°C @ 42,3% UR.

Cabe observar também, que o ponto da mistura encontrada em campo, está fora da reta que liga a condição do ar exterior à do ambiente, o que, em si, já demonstra uma discrepância com relação à física.

Pela simples plotagem dos pontos e processos na carta, foi possível encontrar uma anomalia significativa na temperatura da mistura “real” encontrada no campo e, inspecionando a instalação no campo, foi verificado que a grelha de retorno não havia sido apropriadamente conectada ao duto retorno e devidamente selada, o que causava a captação de ar muito mais quente e úmido do entreforro, impedindo o equipamento de atender a carga térmica de projeto.

Também verificamos uma elevação de temperatura de 1,7°C ao longo da rede de dutos (de apenas 15m de comprimento), demonstrando isolamento térmico insuficiente na rede de dutos.

Como os comprimentos relativos dos segmentos entre o ambiente e a mistura e entre a mistura e ar externo são proporcionais às vazões mássicas de cada escoamento com relação à vazão total, usando a “regra da alavanca” podemos estimar que a infiltração de ar do entreforro representava ~38% da vazão total do sistema, uma vez que o ponto se localizava próximo ao meio da reta entre o ambiente e o ar externo e a vazão mássica de ar exterior medida representava ~12% da vazão total do sistema.

Foram encontrados problemas adicionais relativos ao sistema de refrigeração por expansão direta, porém, não cabe explorá-los nesse artigo.

Análise a partir de gráfico de monitoração (trend)

Os gráficos das figuras 8 e 9, na próxima página, oriundos do sistema de monitoramento de um armazém refrigerado, juntamente com a aplicação dos conhecimentos de psicrometria, nos permitem inferir ainda mais:

Vemos no gráfico da figura 9, que as medições de temperaturas oscilam ~3°C localmente (em um único sensor) e ~7°C no conjunto de sensores analisados.

Sobrepondo os gráficos, verificamos que as amplitudes das pulsações de umidade relativa oscilam 7% localmente (em um único sensor) e 30% no mesmo conjunto de sensores e instantes das medições correspondentes às medições de TBS do gráfico da figura 8.

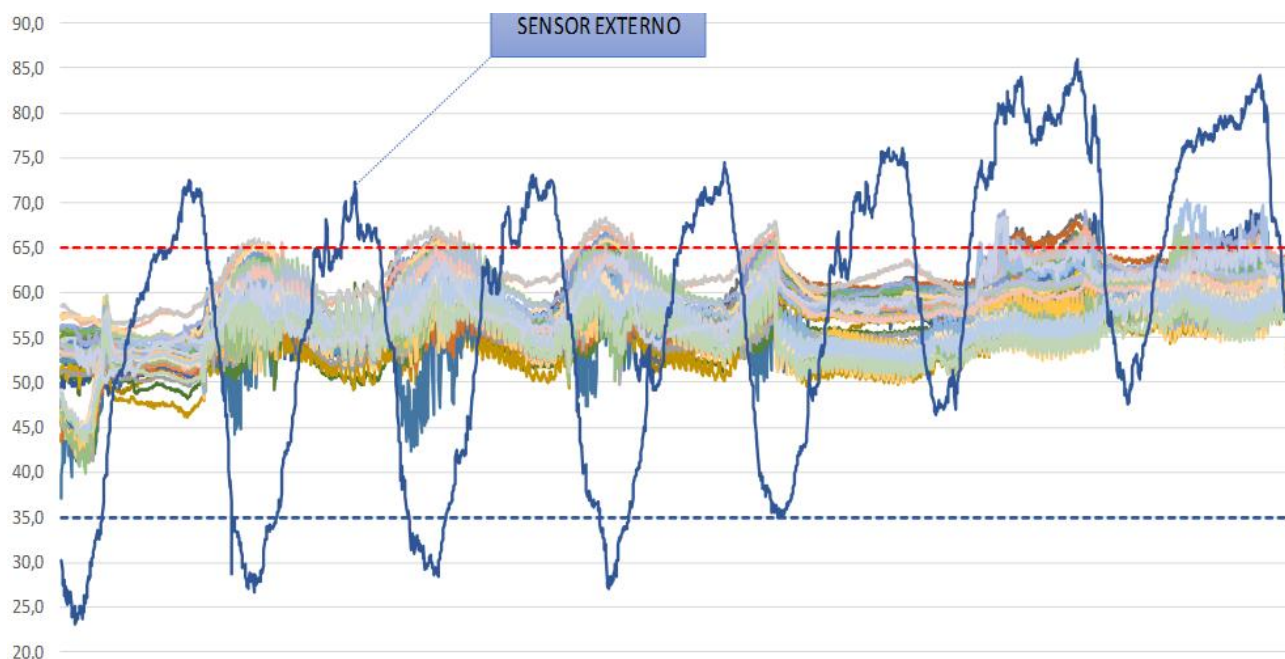


Figura 8 – Gráfico com medições de UR em diversos sensores do armazém

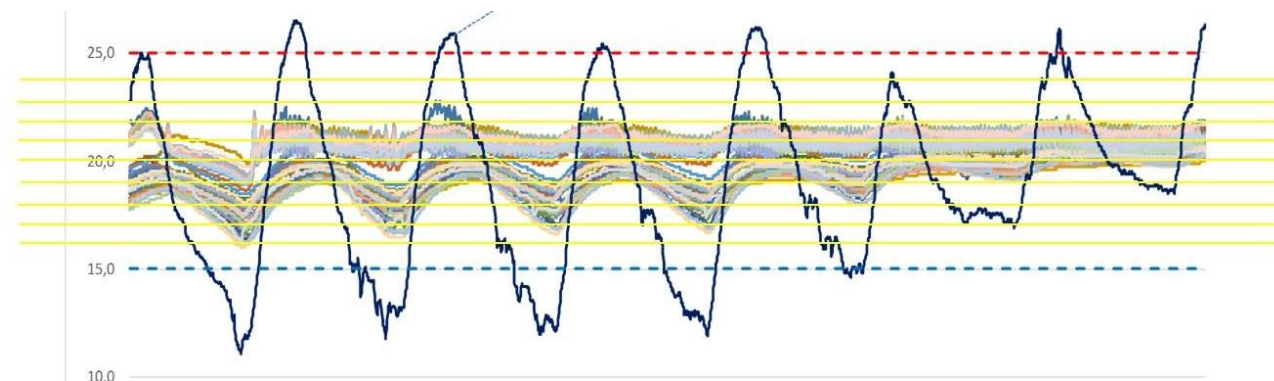


Figura 9 – Gráfico com medições de TBS concomitantes nos mesmos sensores do armazém

Verificamos no gráfico da figura 8, a ocorrência de excursões excedendo o limite superior de UR em alguns sensores e separamos seus gráficos para análise, conforme figura 9, na próxima página, no qual, considerando-se que a umidade específica (w) deveria ser constante ao longo das medições, uma vez que não existem fontes de carga latente (umidade) no interior do armazém, geramos uma nova curva no gráfico, baseada nos cálculos da variação de w relativas às mesmas leituras:

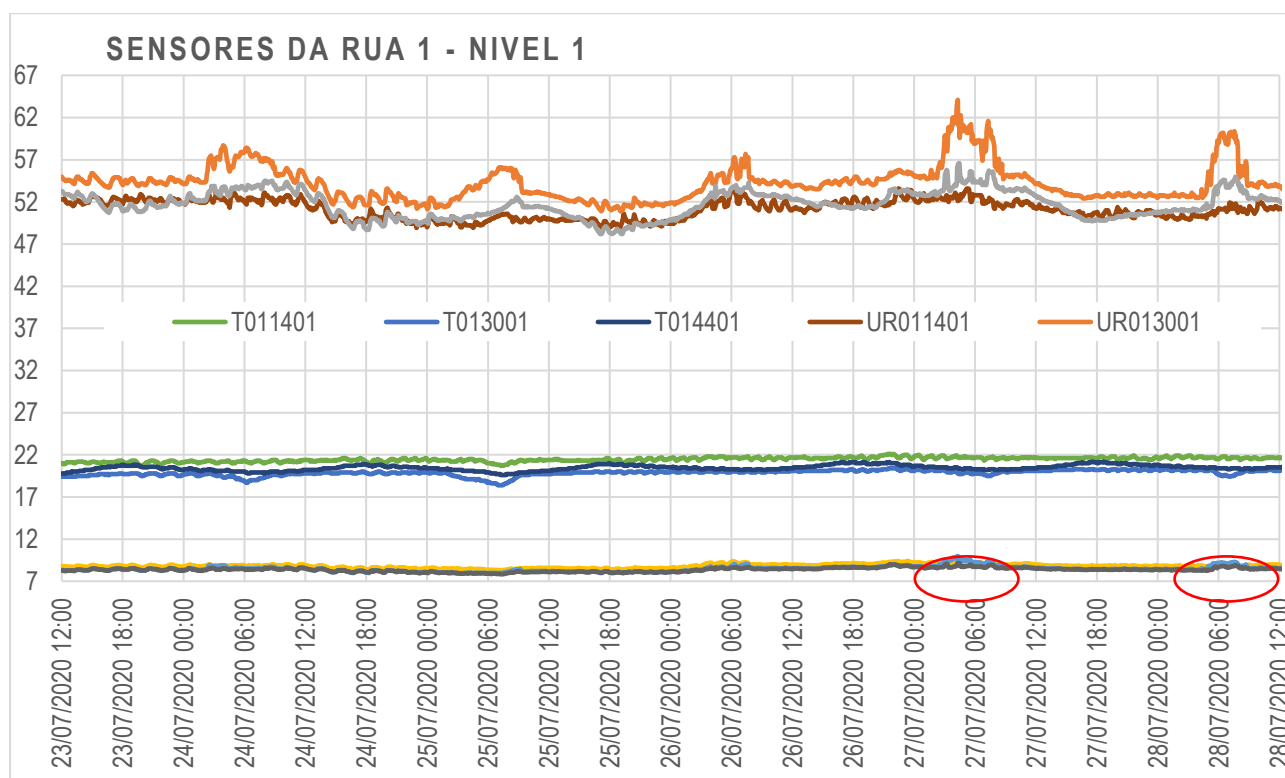


Figura 9 – Gráfico com medições de TBS/UR e cálculo de w concomitantes nos mesmos sensores do armazém

Com auxílio do traçado das curvas de variação de w medida registrada pelos sensores, verificamos que ocorriam variações inesperadas (elipses vermelhas) e discordantes, uma vez que todo o armazém recebe ar do mesmo equipamento e não há geração interna de calor latente, não poderia haver variação de umidade específica discordante em ponto algum.

As pulsações discordantes nos permitiram isolar ainda mais os sensores e procurar a fonte local e, durante inspeção detalhada, encontramos uma fresta vertical de ~200mm com ~20m de altura no fechamento lateral da edificação, razoavelmente próxima aos sensores que detectaram a variação, o que nos permitiu verificar que ocorria entrada de ar atmosférico nessa região do armazém e que, durante o período chuvoso, causava infiltração de umidade.

Fechando a fresta, cessaram as excursões.

“Potência não é nada sem controle”

Fazendo uso do famoso slogan do fabricante de pneus (sim, estou por aqui desde o milênio passado e talvez meus leitores mais jovens não conheçam a referência e devam procurá-la na web), finalizo este artigo apresentando uma estratégia resumida para o controle concomitante de TBS e UR, avaliando-a a partir da própria carta psicrométrica:

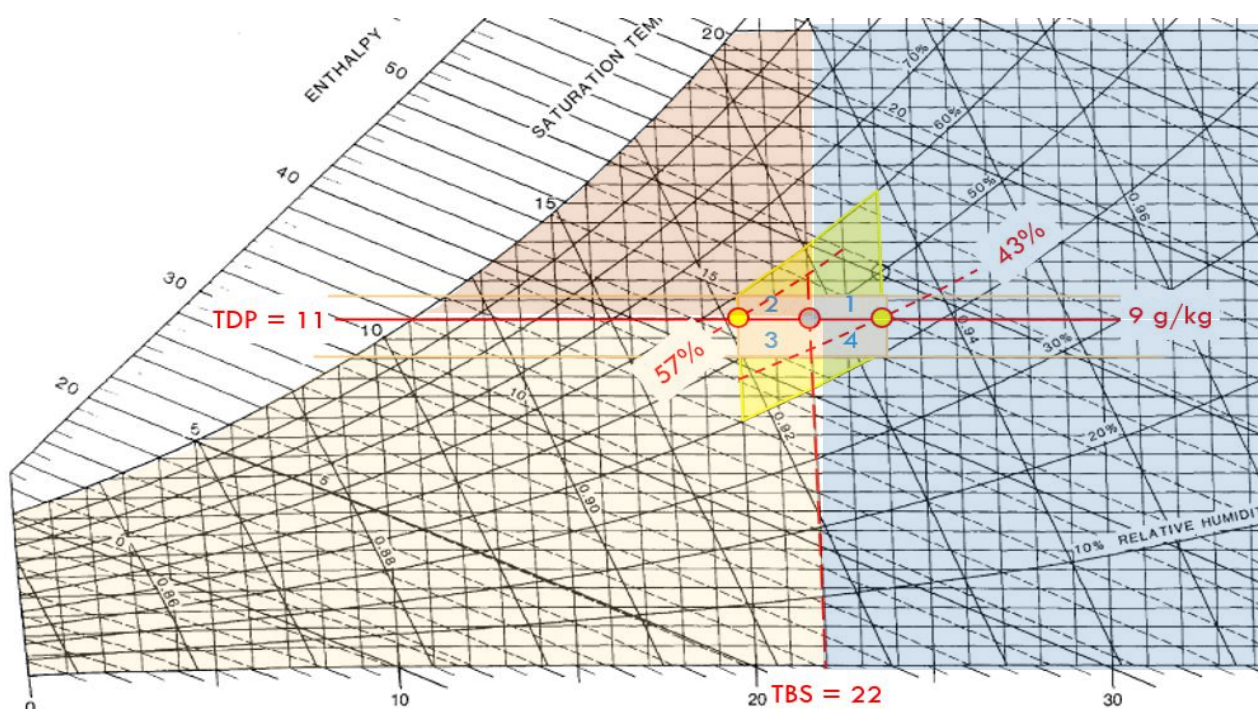


Figura 10 – Exemplo de estratégia de controle com base na psicrometria

Representei no trecho da carta psicrométrica da Figura 10, uma faixa de controle de segmento de curva de $\pm 10\%$ UR, delimitada entre segmentos de retas de TBS $\pm 2^\circ\text{C}$, a partir do ponto de ajuste de $22^\circ\text{C} / 50\%$ UR, representada pelo polígono hachurado em amarelo.

Isso nos permite observar que, considerando uma reta de w (ou TDP) constante @ $9,0 \text{ g/kg}$ (TDP = 11°C), variando a temperatura 2°C TBS, devemos esperar uma variação de umidade relativa de $\sim 3,5\% / 1,0^\circ\text{C}$. Ou seja, sem variar a quantidade física de umidade (w), a umidade relativa devido à sua dependência da TBS em que é medida e da quantidade de vapor d'água (w) existente no ar úmido, irá variar para representar o afastamento da saturação para a nova TBS.

Isso significa que um sistema de automação que opere o controle simplesmente pela medição da umidade relativa e acione a refrigeração quando esta aumenta, iria reduzir ainda mais a TBS do ambiente, consequentemente aumentando ainda mais a UR, caso o sistema de aquecimento não exista ou não possua potência suficiente (sim, "controle também não é nada sem potência").

Do ponto de vista do controle, quando se resfria e UR aumenta, algo que não é esperado pelo algoritmo de automação destinado a reduzir UR, acaba gerando um looping infinito no algoritmo PID interno do CLP, que não será capaz de oferecer um controle apropriado das variáveis baseado na curva de tendência armazenada pelo algoritmo.

Adicionalmente, as curvas de umidade relativa são oriundas de um polinômio de 6° grau, dependente da TBS e pressão parcial de vapor (associada a w) em que são medidas, portanto trata-se de cálculo recursivo e de alta complexidade, que causa dificuldades adicionais para a análise de tendência do PID.

No mesmo gráfico da figura 10, indiquei retas de TDP_{MAX} (linha superior laranja), cruzando TBS_{MIN} com UR_{MAX} , e TDP_{MIN} (linha inferior laranja), cruzando TBS_{MAX} com UR_{MIN} , de forma a estabelecer uma nova faixa de controle representada na cor bege, agora adotando estratégia de controle através da temperatura de dew point (ponto de orvalho).

A nova faixa de controle é delimitada por retas, sendo que todas as variáveis respondem na direção esperada da potência térmica aplicada, permitindo, desta forma, que o PID opere adequadamente e com grande previsibilidade baseada em suas curvas de tendência.

Adicionalmente, indiquei 3 zonas de controle para a potência térmica a ser aplicada pela automação:

- ✓ Área em azul: à direita do *set point* (ponto de ajuste). Nesta região, o sistema apresenta TBS acima da condição de controle, requerendo apenas refrigeração.
Caso o sistema possua conjunto de umidificação, não seria recomendado acioná-lo até que TBS esteja dentro da condição de controle, pois retardaria sua obtenção e estabilização do sistema.
- ✓ Área em marrom: à esquerda e acima do *set point*. Nesta região, o sistema apresenta TBS abaixo e TDP acima da condição de controle, requerendo uso concomitante de refrigeração (para desumidificar) e reaquecimento (para evitar que TBS excursions, mantendo a condição de controle).
- ✓ Área em amarelo: à esquerda e abaixo do *set point*. Nesta região, o sistema apresenta TBS e TDP abaixo da condição de controle, requerendo uso de reaquecimento (sem refrigeração) para restaurar TBS à condição de controle.
Caso o sistema possua conjunto de umidificação, esse também deve ser acionado, para restaurar UR e TDP à condição de controle.

E, diferentemente dos sistemas em que são utilizados sensores de temperatura na saída da serpentina de resfriamento e desumidificação (SR), o controle através de TPO reduz o consumo de refrigeração durante períodos com baixa carga térmica sensível interna, nos quais a umidade específica do ar (ou temperatura de ponto de orvalho) se encontra sob controle, evitando o consumo de refrigeração e posterior reaquecimento, quando o sistema não precisa remover carga latente.

Por fim, uma vez que TPO não irá variar após a SR (a menos que existam infiltrações no gabinete do condicionador, a jusante da SR), recomendo que a instalação do sensor de TPO seja efetuada após a descarga do ventilador, de forma que o mesmo homogenize todo o ar que escoar no sistema, algo que não ocorre na face da SR, que pode apresentar diferentes velocidades de escoamento, resultando diferentes temperaturas ao longo de sua face.