

# A psicrometria e a carga térmica

## Parte 3 – Áreas Limpas com baixa umidade

**Autor:** J. Fernando B. Britto, engenheiro mecânico, sócio da Adriferco Engenharia, secretário da GEC-4 e membro do conselho editorial da revista SBCC  
**Contato:** adriferco@gmail.com

**J. Fernando B. Britto**

### Introdução

Como vimos nas edições anteriores, a já difícil tarefa de se determinar a carga térmica interna do ambiente se torna ainda mais complexa quando é requerido o controle da umidade do ar no sistema.

Em sistemas destinados ao tratamento de ar para áreas limpas com controle de umidade, o estudo psicrométrico deve ser ainda mais rigoroso, pois geralmente este tratamento visa satisfazer um maior número de parâmetros, quais sejam:

- Classe de limpeza
- Temperatura
- Pressurização ou sentido de fluxo entre ambientes
- Umidade

Agravando ainda mais o problema, geralmente os ambientes que mais demandam a utilização de baixos níveis de umidade costumam ser as áreas de produção de pós, as quais usualmente requerem um sentido de fluxo na cascata de pressões que introduz infiltrações de ar, não necessariamente com as mesmas condições de umidade do ambiente, o que introduz uma carga latente adicional que deverá ser tratada no ambiente.

Adicionalmente, devido aos baixos níveis de umidade do ambiente, se faz necessário o cálculo da carga térmica interna latente oriunda da difusão de vapor através dos elementos construtivos dos ambientes, podendo ser necessário a seleção de materiais construtivos que bloqueiem a difusão de vapor, para garantir a manutenção dos níveis de umidade desejados.

Embora este artigo não se destine a fornecer metodologias para o cálculo da carga térmica destes sistemas, abordaremos a seguir os principais conceitos envolvidos no tema.

### O interrelacionamento entre as variáveis controladas

Nas salas limpas, para se manter a concentração de partículas em suspensão no ar do ambiente dentro dos limites aceitáveis, é necessário impor ao sistema um escoamento (m/dt) grande o suficiente para permitir a diluição do particulado.

Isto implica em um determinado valor mínimo de vazão volumétrica constante (sob condições normais de operação), o qual, usualmente, é muito maior que o requerido para combater as cargas térmicas sensíveis e latentes do sistema.

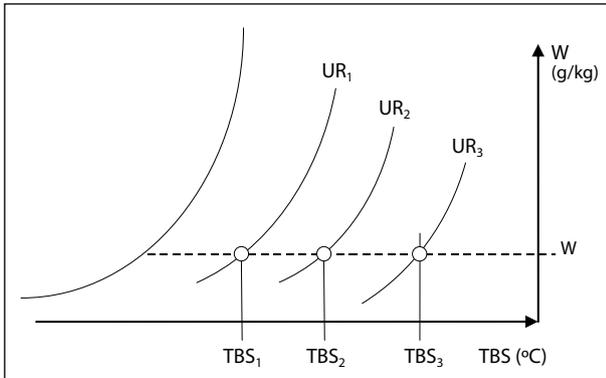
Considerando-se que o escoamento possui valor fixo e maior que o requerido em função da carga térmica, a temperatura de bulbo seco (TBS) média do ambiente dependerá da carga térmica sensível interna (HSI) imposta pelo mesmo e, conseqüentemente, do diferencial de temperatura entre o ambiente e sua insuflação ( $t_{AMB} - t_{INS}$ ).

Tal como visto na parte 2 deste artigo, para controlar tanto sua temperatura, quanto sua umidade relativa, sistemas deste tipo irão obrigatoriamente requerer algum dispositivo de reaquecimento, para ajustar a carga térmica à vazão requerida.

Uma vez que a umidade relativa (UR) é função da temperatura de bulbo seco e da umidade específica ( $w$ , associada à pressão vapor), a faixa de controle da temperatura deve ser bastante rígida, de modo a impedir que, embora a umidade específica possa estar correta, o sistema apresente um desvio devido a temperaturas muito baixas ou muito altas, o que pode causar uma instabilidade muito grande no controle da umidade.

Cabe lembrar que para uma mesma umidade específica (linhas horizontais da carta psicrométrica), a umidade

relativa irá diminuir à medida que a temperatura de bulbo seco aumentar, uma vez que o ponto estará afastando-se da curva de saturação, conforme verificamos na figura 1:



**Figura 1** – Variação da umidade relativa em função da temperatura

$UR_1(TBS_1) > UR_2(TBS_2) > UR_3(TBS_3)$ , embora  $w$  permaneça constante

Em outras palavras, sob condições usuais de conforto humano e para uma mesma umidade específica, uma tolerância de +/-10% sobre a UR, permite admitir uma variação de +/- 3°C na TBS.

Se adotarmos uma tolerância menor, como por exemplo, +/- 5% sobre a UR, a tolerância na variação de TBS deveria ser reduzida para +/- 1,5°C, para evitamos uma grande instabilidade no controle do sistema e garantirmos efetivamente a operação fora da faixa de controle da umidade.

No caso dos escoamentos impostos pela cascata de pressões entre os ambientes, ocorrem duas possibilidades distintas:

- Ambientes com pressão inferior à dos ambientes contíguos sofrerão infiltração de ar vindo dos ambientes circundantes, devendo ser avaliado o impacto devido à condição termoigrométrica do ar infiltrado.

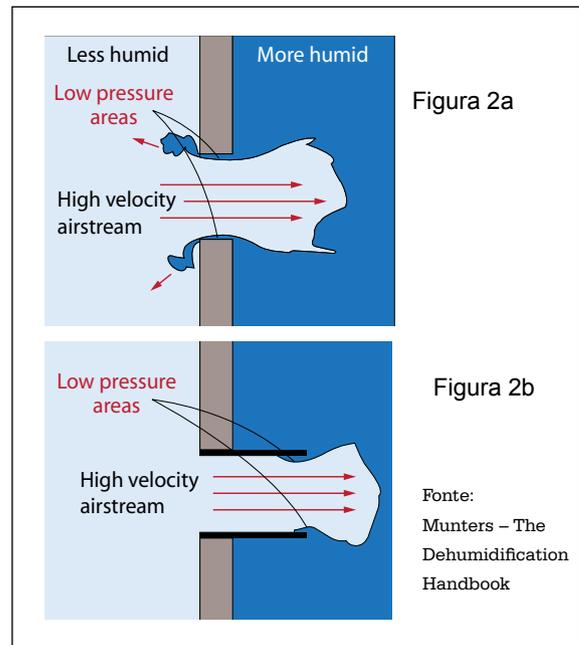
Estes sistemas podem requerer a implantação de exaustão forçada para garantir o diferencial de pressão requerido.

Em alguns casos, pode ser adotado um pequeno expurgo de ar diretamente do duto de insuflação, de modo a promover a remoção de ar do sistema, contudo cabe lembrar que devem ser introduzidos

dispositivos que permitam a manutenção de vazão de expurgo constante e impeçam a entrada de umidade através do ramal de expurgo.

- No caso dos ambientes com pressão superior à dos ambientes contíguos, será requerida uma parcela adicional de ar externo para garantir sua sobrepressão, impondo cargas térmicas externas adicionais sobre a unidade de tratamento de ar. Os métodos usuais para dimensionamento dos vazamentos devidos à sobrepressão são suficientes para atender as necessidades das frestas de portas e pequenas frestas e fissuras. Porém, no caso de grandes aberturas, como as utilizadas para a passagem de esteiras, ocorre uma inesperada troca de massa entre o sistema e meio-ambiente contíguo.

Esta migração se deve à difusão molecular acarretada pelos gradientes de temperaturas e de pressão de vapor entre os ambientes e pelos vórtices formados junto às arestas da abertura, conforme observamos na figura 2a:



Nestes casos, os fabricantes recomendam a adoção de duas técnicas para eliminação do problema:

- Velocidade mínima de escoamento de ar de 0,75 m/s através da área da abertura da fresta.
- Conectar um trecho de duto sobre a abertura (ver figura 2b), para eliminação dos efeitos do vórtice sobre as arestas da abertura.

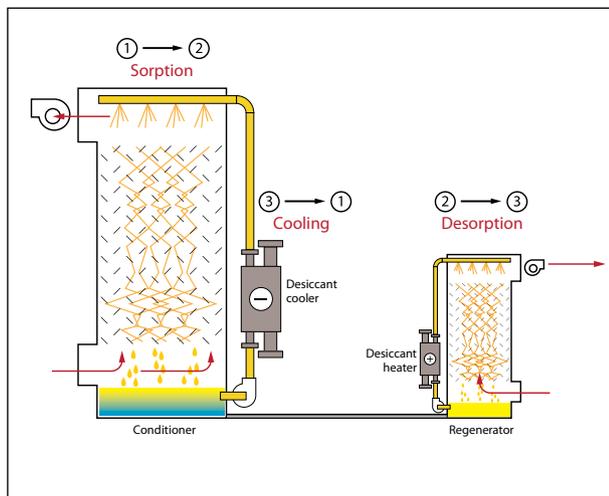
## As principais tecnologias empregadas para desumidificação do ar

Em sistemas que operam com TBS e UR padrão para conforto humano ( $TBS \geq 22^{\circ}\text{C}$  e  $UR \geq 45\%$ ), usualmente a remoção da umidade ocorre diretamente na serpentina de resfriamento (e desumidificação), uma vez que a condição de saída da serpentina geralmente satisfaz as necessidades do sistema.

Porém, para obtenção de umidades mais baixas, seria necessário que a condição de saída da serpentina se encontrasse muito próxima ou abaixo do ponto de congelamento da água, o que, para efeitos práticos, pode impedir sua utilização.

Nestes casos, são utilizados equipamentos denominados desumidificadores químicos regeneráveis de ar, os quais empregam dessecantes para remoção da umidade do ar.

No Brasil, adotam-se três principais tecnologias de desumidificação:

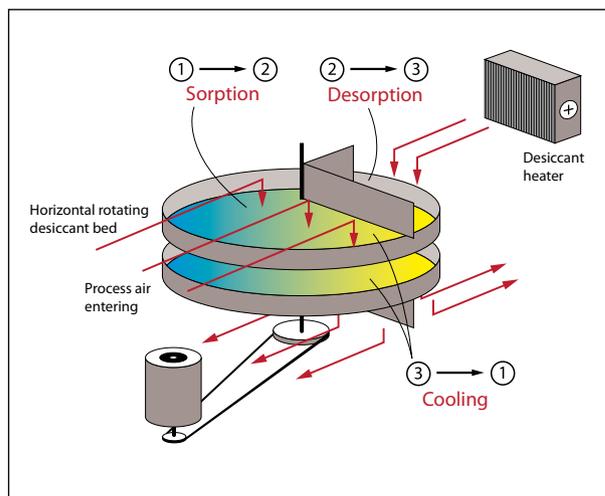


**Figura 3** – Desumidificador tipo Torre de pulverização  
Fonte: Munters – The Dehumidification Handbook

- Torre de pulverização (spray) de líquido dessecante: semelhante a um lavador de gases (ver figura 3), porém utilizando um fluido adsorvente aquecido, o qual é pulverizado diretamente sobre o fluxo de ar que se deseja desumidificar (denominado ar de processo), removendo sua umidade e se depositando num reservatório.

Quando o volume do reservatório ultrapassa um determinado limite, parte do fluido é drenada, aquecida e novamente pulverizada em um fluxo de ar secundário, chamado ar de reativação, para o qual cede seu excesso de umidade, sendo novamente coletado e bombeado para o reservatório principal, reiniciando o processo.

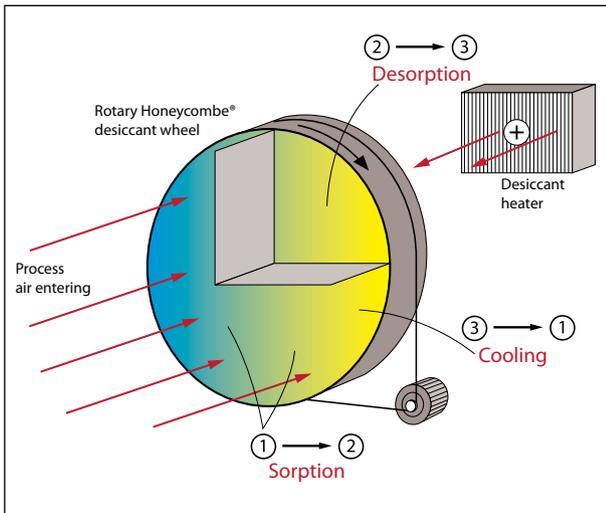
- Leitões cilíndricos preenchidos com pellets de material dessecante: o ar de processo é escoado através de um trecho de leito rotativo, horizontal (ver figura 4) ou vertical, preenchido com pellets pré-aquecidos de material dessecante (geralmente de sílica), o qual adsorve sua umidade. A rotação do cilindro expõe os pellets a um fluxo de ar secundário pré-aquecido, também denominado reativação, para o qual será cedido o excesso de umidade, reiniciando o processo.



**Figura 4** – Desumidificador tipo Leito Cilíndrico Rotativo

Fonte: Munters – The Dehumidification Handbook

- Colmeias cilíndricas rotativas impregnadas com filme dessecante (geralmente cloreto de lítio) ou construídas com ligas de material dessecante (geralmente sílica): o ar de processo é escoado através das cânulas de um trecho da colmeia rotativa (ver figura 5) pré-aquecida, a qual adsorve sua umidade. A rotação do cilindro expõe a colmeia a um fluxo de ar secundário pré-aquecido, também denominado reativação, para o qual será cedido o excesso de umidade, reiniciando o processo.



**Figura 5** – Desumidificador tipo Colmeia Cilíndrica Rotativa

Fonte: Munters – The Dehumidification Handbook

Sendo mais comumente utilizados no Brasil, as colméias e os leitos rotativos.

## O impacto das necessidades do sistema no dimensionamento dos equipamentos de tratamento de ar das áreas limpas

Devido à pequena escala de produção, aos materiais empregados e ao pequeno número de fabricantes mundiais, estes equipamentos usualmente possuem um alto custo de aquisição.

Além disso, os desumidificadores demandam muita energia térmica para sua operação, grande parte da qual aquece o fluxo de ar de processo e precisa ser removida antes da insuflação nos ambientes, o que aumenta ainda mais os custos operacionais do sistema e, conseqüentemente, da produção.

Em função de seu elevado custo de propriedade, o selecionamento e a utilização destes equipamentos deve ser bastante criterioso, de forma a minimizar os custos do produto final.

NOSSA QUALIDADE APARECE  
NA HORA DE CUIDAR  
DO QUE NINGUÉM MAIS VÊ.

twecomunicacao.com.br



**Esterilizadores a vapor**  
*Científico e Laboratório*



Fone +55 47 3801-9090 - Fax +55 47 3801-9099  
e-mail: cisa@cisabrasile.com.br  
[www.cisabrasile.com.br](http://www.cisabrasile.com.br)

CE 0123

Isto se torna ainda mais imperativo no caso das salas limpas, em função do grande escoamento (m/dt) imposto ao sistema para satisfazer a concentração de partículas.

Como o processo de adsorção é tanto mais eficaz quanto menor a temperatura (e consequentemente, maior a saturação) de entrada do ar de processo, conforme verificamos no gráfico de seleção abaixo:

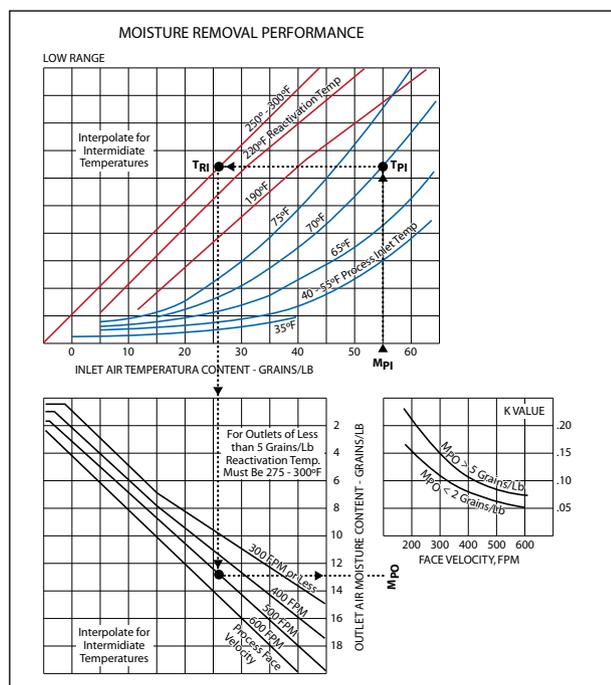


Figura 6 – Gráfico de Seleção para Desumidificador tipo Colmeia Rotativa

Fonte: Munters – The Dehumidification Handbook  
(Obs.: 1 g/kg – 7,14 grain/lb)

Então, a maioria dos fabricantes adota uma serpentina de pré-resfriamento e desumidificação do ar, o que permite elevar ao máximo o rendimento do sistema.

Conforme verificamos no gráfico da figura 6, o fabricante indica não haver diferença significativa no resultado, para a faixa de temperatura de bulbo seco de entrada entre 4,4 e 12,8°C, exceto a decorrente da umidade específica do ar na entrada.

Na prática, obtêm-se ótimos resultados com uma temperatura de 10 +/- 1°C, com umidade específica em torno de 8 +/- 1 g/kg na entrada de ar de processo do desumidificador.

Abaixo desta condição, os ganhos obtidos são relativamente pequenos para justificar as tecnologias empregadas. Além disso, a condição de entrada do fluido

refrigerante na serpentina de pré-resfriamento se encontra perigosamente próxima do ponto de congelamento, podendo acarretar em reduções do escoamento devido ao bloqueio da área de face da serpentina.

Por outro lado, como o ar de processo sai com temperaturas elevadas devido à regeneração do sistema, na maioria dos casos é necessário efetuar um novo resfriamento (pós resfriamento) do ar de processo antes de insuflá-lo nos ambientes.

Uma vez que o material dessecante precisa atingir uma temperatura mínima para promover sua reativação, a qual está associada à condição de entrada de ar de reativação (TBS > 85 °C) e, principalmente, de saída do ar de reativação, que geralmente deve ser superior a 49 °C, a temperatura de saída do ar de processo será grandemente influenciada pelo tempo de permanência no interior do cilindro do desumidificador.

Isto significa que quanto menor a velocidade do escoamento do ar de processo no interior do cilindro do desumidificador, em relação à sua velocidade nominal, tanto maior será a sua necessidade de pós-resfriamento.

Deste modo, recomenda-se a utilização do equipamento em sua vazão nominal para se obter a máxima eficiência possível do sistema.

É usual adotar a secagem parcial do fluxo de ar do sistema, apenas desviando o restante do fluxo, evitando-se assim o desumidificador e misturando-o com o ar desumidificado na entrada da unidade de tratamento de ar. Isto porque a umidade na saída do ar de processo pode atingir valores muito baixos (entre 0,5 e 1,5 g<sub>VAPOR</sub> / kg<sub>AR SECO</sub>), que supera com folga as necessidades dos ambientes (1 g/kg @ 22°C ⇔ UR < 8%).

Por outro lado, como o custo de aquisição dos desumidificadores (por unidade de ar tratado) pode chegar a ser 5 vezes maior que o custo das unidades de tratamento de ar, esta técnica, amplamente utilizada pelos fabricantes dos desumidificadores, permite reduzir significativamente o custo de implantação do sistema.

## O selecionamento dos desumidificadores químicos de ar para as áreas limpas

O equacionamento do sistema é definido pelo seguinte algoritmo:

1. Determina-se o escoamento total de ar requerido em função da estimativa de carga térmica (CT):

$$m_{INS}/dt \text{ (CT)}$$

2. Determina-se o escoamento total de ar requerido em função da diluição de partículas determinada pela classificação (CL) da sala limpa:  $m_{INS}/dt \text{ (CL)}$

3. Comparam-se os valores obtidos nos passos 1 e 2 e adota-se o pior caso, ou seja, o maior valor escoamento.

$$m_{INS}/dt = \text{máximo}(m_{INS}/dt \text{ (CT)}, m_{INS}/dt \text{ (CL)})$$

4. Determina-se a umidade específica de insuflação em função da umidade específica do ar requerida no ambiente, do calor latente de vaporização da água ( $L = 2450 \text{ kJ/kg}$ ) e do diferencial de umidade específica imposto pela carga latente interna (HLI) do sistema:  $w_{INS} = w_{AMB} - HLI / (L * m_{INS}/dt)$
5. Determina-se o percentual mínimo de ar de processo (que passará pelo desumidificador) requerido pelo sistema. Inicialmente adota-se uma condição de saída no desumidificador ( $w_{AP}$ ) de  $1,5 \text{ g}_{VAPOR} / \text{kg}_{AR SECO}$ :

$$AP = 1 - [(w_{INS} - w_{ap}) / (w_{ret} - w_{ap})]$$

6. Determina-se o escoamento mínimo requerido no desumidificador multiplicando-se o valor da proporção de ar de processo requerida pelo escoamento total de ar do sistema:  $m_{AP}/dt = AP * m_{INS}/dt$
7. Seleciona-se um desumidificador com vazão suficiente para atender o escoamento requerido.

Obs.:

- a) Pode ser desejável ajustar para baixo a umidade específica adotada no passo nº 5, caso a vazão de ar de processo encontrada seja ligeiramente superior à vazão padronizada fornecida pelo fabricante do equipamento. Neste caso, repetem-se os passos 05, 6 e 7 até se encontrar uma condição apropriada.
  - b) Como o desempenho do equipamento irá diminuir ao longo e sua vida útil, deve ser evitado reduzir a umidade de saída do desumidificador para condições muito críticas, sob pena de, a médio prazo, não se conseguir obter a condição requerida.
8. Determina-se a umidade específica de saída do desumidificador ( $w_{AP}$ ) selecionado:

$$w_{AP} = (w_{INS} * m_{INS}/dt - w_{RET} * m_{RET}/dt) / (m_{AP}/dt)$$

## PROJETOS MODULARES ESPECIAIS

*Solução Prática, Rápida e Adaptável*



Novo Horizonte Jacarepaguá

Importação e Exportação Ltda  
MÓDULOS OPERACIONAIS EM CONTEINERES

Projetos que atendem aos mais diversos tipos de ambientes, desde convencionais à classificados (SALAS LIMPAS). Reproduzem inovação em forma de módulos e containeres. Podem ser adaptados para:

Biotecnologia - Indústrias e Laboratórios Farmacêuticos - Indústria Veterinária - Indústrias Alimentícias - Laboratórios de Manipulação - Hospitais - Centros Cirúrgicos, entre Outros.



Matriz: Av. Brasil, 4880 - Manguinhos - Rio de Janeiro

PABX: (21) 3094-4400 / 2590-8243

Email: comercial@nhjcontainer.com.br

Site: www.nhjcontainer.com.br



## Monitoramento e controle dos desumidificadores químicos de ar

O processo depende basicamente de duas variáveis relativas às condições de entrada dos fluxos de ar de processo e ar de reativação:

- A temperatura de ponto de orvalho de entrada de ar de processo do desumidificador;
- A temperatura de bulbo seco de entrada do ar de reativação.

Considerando-se que os escoamentos de ar de ambos os fluxos (processo e reativação) são tidos como constantes, então, a condição de saída de ar de processo dependerá exclusivamente do controle destas duas variáveis.

Adotando-se controles de temperatura de ponto de orvalho de boa exatidão e repetibilidade na entrada do fluxo de ar de processo, a variação decorrente da condição de entrada se torna praticamente desprezível.

Deste modo, o controle da condição de saída acaba sendo feito através da variação da temperatura do ar de reativação.

No entanto, devido à baixa velocidade de rotação do cilindro do desumidificador, que geralmente ultrapassa 5 minutos por volta, a histerese do sistema se torna gigantesca, impedindo que o sistema possa responder a picos de umidade de curta duração nos ambientes, tais como aqueles causados por aberturas de porta, independentemente do algoritmo utilizado.

Para agravar ainda mais este problema, quando um aumento de umidade é detectado no ambiente, geralmente, o sistema de controle atua aumentando imediatamente a potência de reativação, o que pode acarretar no desligamento total dos bancos de aquecimento, caso se exceda a temperatura limite de segurança na entrada de ar de reativação do equipamento (em torno de 150°C).

Isto causa um resfriamento momentâneo do cilindro, até que se restabeleça uma condição segura de operação, aumentando ainda mais a histerese do sistema e prolongando o efeito do pico de umidade ou causando um pico secundário.

Deste modo, é recomendado que seja introduzido um sensor / controlador de temperatura na entrada do ar de reativação, entre a bateria de aquecimento e o cilindro,

de forma a impedir que ocorram aumentos adicionais de potência de reativação após ser atingida uma temperatura ajustada para uma condição ligeiramente inferior ao limite de operação recomendado pelo fabricante do equipamento.

Como os picos de umidade devidos à abertura de portas costumam ser transitórios e rápidos, podem ser implantados algoritmos no sistema que retardem o aumento de potência e o realizem apenas se o pico de umidade se mantiver após um intervalo ajustável de tempo, o que pode acarretar em uma razoável economia de energia.

Então, é recomendada a implantação de antecâmaras e barreiras que minimizem a migração de umidade entre os ambientes, permitindo a passagem de pessoal e produto entre os ambientes sem interferência significativa no processo.

Também se recomenda o monitoramento das seguintes variáveis:

- Temperatura de entrada e saída do ar de reativação, incluindo alarme de “temperatura alta na reativação”.
- Temperatura de entrada e saída do ar de processo;
- Rotação do cilindro;
- Estado operacional dos moto-ventiladores de ar de processo e ar de reativação (alarmes de sobrecarga);
- Existência dos fluxos de ar de processo e ar de reativação;
- Saturação dos filtros de ar de processo e ar de reativação.

Como a umidade do ar na saída do desumidificador é muito reduzida, seu monitoramento acaba se mostrando dispendioso e pouco eficaz. Sendo assim, é comum controlar o sistema de desumidificação, utilizando-se apenas a leitura da umidade no ambiente ou na insuflação (após a mistura com ar de recirculação) ●

## Fontes de consulta

- ASHRAE – 2008 Handbook of Systems and Equipment
- ASHRAE – 2009 Handbook of Fundamentals
- Munters – The Dehumidification Handbook