



**XVIII CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR**  
São Paulo Expo – 13 a 15 de setembro de 2023

## **SIMULAÇÃO E ANÁLISE PSICROMÉTRICA EM SISTEMAS COM LAVADORES DE AR**

### **PAPER 35**

#### **RESUMO**

Lavadores de ar são equipamentos utilizados para promover umidificação do ar quando em contato direto com um fluxo de água. Eles podem ser utilizados para limpeza do ar, removendo grandes particulados que são arrastados pelo fluxo da água. Em geral, sistemas de climatização que possuem lavadores de ar operam com grandes vazões de ar e água, e requerem quantidades significativas de energia elétrica e térmica, além de utilizarem grande volume de água. Uma das principais aplicações de lavadores de ar são as indústrias têxteis, em que se deseja principalmente estabelecer um controle da umidade no interior da área fabril. Nesta aplicação, o controle de umidade ocorre, principalmente, através do *by-pass* existente no sistema de climatização, o que permite a mistura entre o ar na saída do lavador e o ar de retorno. No entanto, dado o grande porte do sistema de climatização que as indústrias têxteis utilizam, nem todo sistema é automatizado e em alguns casos, todo o sistema é operado manualmente. Para simular o sistema de climatização com lavadores de ar, um modelo matemático baseado nas equações termodinâmicas que regem a psicrometria, foi implementado em *MatLab*. Com esse modelo, foram determinadas a temperatura de bulbo seco e umidade relativa, após o equilíbrio térmico dentro do sistema, considerando algumas combinações de condições termo higrométricas do ar externo, ar de retorno, *by-pass* e carga térmica. Os resultados obtidos com a simulação são coerentes com as expectativas para esses parâmetros, dada as combinações de condições do ar utilizadas.

**Palavras-chave:** Lavadores de ar. Simulação psicrométrica. Simulação em *Matlab*.

#### **ABSTRACT**

Air washers are equipment used to promote air humidification when in direct contact with a water flow. It can be used as an equipment to clean the air, mainly removing large particles that are dragged by the flow of water. In general, air conditioning systems which uses air washers operates with large air and water flows, and need electrical and thermal energies, as well as a large volume of water. One of the main applications of air washers are textile processing plants, where humidity control inside the manufacturing area is needed. In this application, humidity control occurs mainly through the existing *by-pass* in the air conditioning system, which allows mixing between the leaving air at the washer and the return air. However, given the large size of the HVAC system that textiles use, not the entire system is controlled and, in some cases, the entire system is manually operated. In order to simulate the air conditioning system with air washers, a mathematical model based on the thermodynamic equations that govern psychrometry was implemented in *MatLab*. With this model, was determined the dry-bulb temperature and relative humidity after thermal equilibrium within the system, considering the combination of thermo hygrometric conditions of external air, return air, *by-pass* and thermal load. The results obtained with the simulation are consistent with the expectations of the combined air conditions used.

**Keywords:** Air Washers. Psychrometric simulation. *MatLab* Simulation.

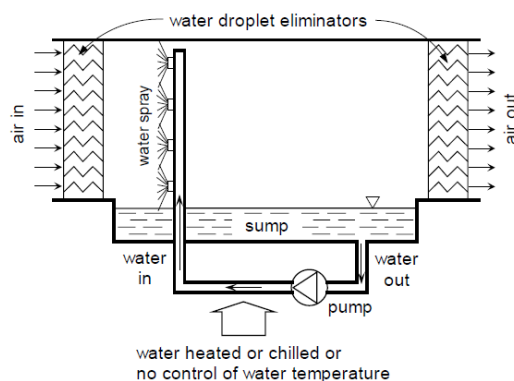
## 1. INTRODUÇÃO

O condicionamento do ar, seja para fins industriais, conforto térmico ou qualidade do ar, requer estudos psicrométricos para que as propriedades do ar sejam avaliadas a medida em que os processos termodinâmicos ocorrem. Estes estudos podem ser realizados de diversas maneiras, tais como: uso tradicional de cartas psicrométricas, métodos analíticos por meio da aplicação direta de equações termodinâmicas, assim como a utilização de ferramentas computacionais que auxiliam na sistematização, agilidade e precisão dos resultados. Santos et al (2011) apresentam estudo com soluções analíticas para simular os processos simultâneos de transferência de calor e massa em lavadores de ar. Chakrabarti et al (2015) apresentam uma abordagem matemática implementada em *Matlab* para avaliação de equipamentos de resfriamento evaporativo direto. Ghiaus (2022), por meio algoritmos implementados em *Python*, apresenta diversos resultados sobre simulação computacional de processos resfriamento e desumidificação, somados a métodos de otimização. A escolha da ferramenta computacional a ser utilizada para análise psicrométrica baseia-se na conveniência que o processo psicrométrico requer, assim como na familiaridade do usuário com uma determinada ferramenta de estudo. Neste artigo foi utilizado o software *Matlab* para análise dos processos psicrométricos em sistemas de climatização que possuem lavadores de ar.

### 1.1. Lavadores de ar e suas aplicações

A Figura 1 ilustra esquematicamente o modo de funcionamento de lavadores de ar. Nestes equipamentos ocorrem transferências de calor e massa através de contato direto entre ar e água em que o fluxo de água pode ter sua temperatura controlada ou não em um sistema independente de resfriamento ou aquecimento (Halasz, 2007). A utilização de controle de temperatura para a água dependerá, portanto, das condições de temperatura e umidade desejadas na saída do lavador e, sobretudo, nos ambientes atendidos pelo sistema de climatização.

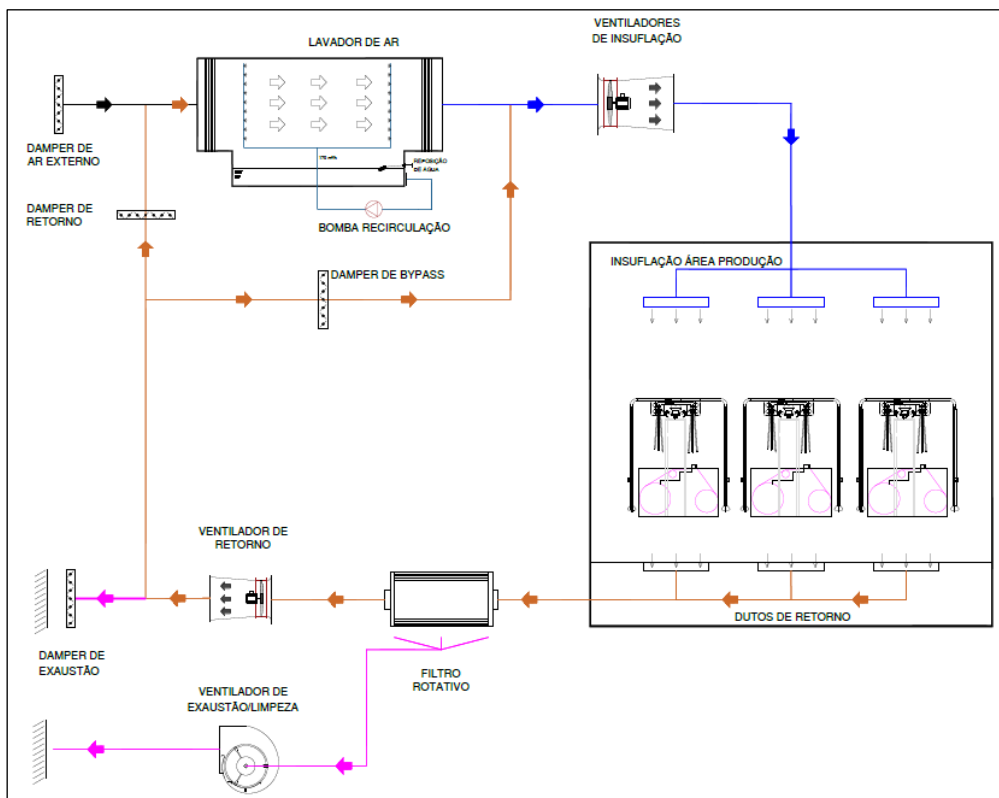
Figura 1 – Representação esquemática de lavador de ar



Fonte: Adaptado de Halasz (2007).

Sistemas de climatização que possuem lavadores de ar para fins de limpeza e condicionamento do ar não são aplicados para promover conforto térmico as pessoas, mas sim para atender condições específicas do ar em instalações industriais. Algumas das aplicações para esses sistemas são nas áreas industriais de metalurgia, química, têxteis, papel, borrachas, etc. (Watt, 1986). A Figura 2 apresenta um fluxograma esquemático de sistema de climatização aplicado em indústrias têxteis. Para o sistema apresentado, não há controle de temperatura da água no sistema, seja a água de recirculação ou de reposição. O ar na entrada do lavador é uma mistura dos ares de retorno e ar externo. O ar ao sair do lavador pode ser misturado com uma parcela de ar de retorno de acordo com o fato de *by-pass*, ajustado pelo seu respectivo *damper*. Por meio do ventilador de insuflação, o ar é conduzido para a área de produção. O ventilador de retorno movimenta o ar desde a área de produção até o lavador de ar. Uma vez que o ar de retorno é relativamente sujo, devido aos resíduos de algodão decorrentes do processo fabril de tecidos, é necessário um sistema de filtragem do ar de retorno. Assim, um sistema intermediário nos dutos de retorno realiza a limpeza do ar através de filtros rotativos, que possuem uma manta de filtragem, a qual é limpa por meio do ventilador de exaustão.

Figura 2 – Fluxograma de sistema com lavador de ar

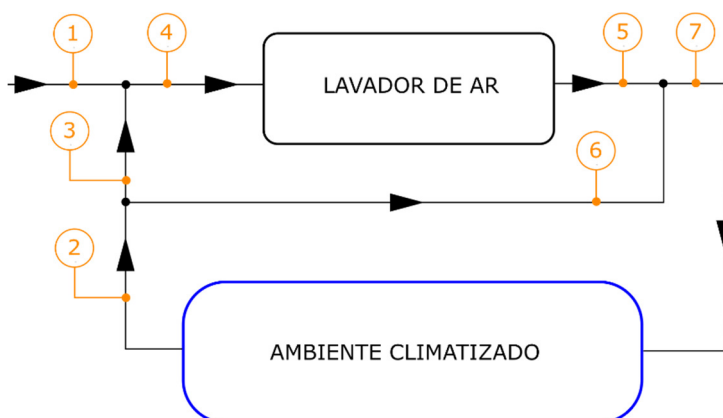


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

## 1.2. Estudo psicrométrico

Como pode ser observado no fluxograma apresentado na Figura 2, a análise psicrométrica é fundamental para se avaliar de que maneira e em quais quantidades as propriedades do ar se alteram, de modo a se alcançar condições termo higrométricas desejadas, preferencialmente, no ambiente climatizado (área de produção) ou até mesmo para se determinar as condições obtidas a partir de modificação no modo operacional do sistema, tais como alterações nas vazões de água e ar. Por meio de registros para controle de vazão distribuídos ao longo do sistema, é possível alterar as vazões de ar externo, retorno e by-pass, e, portanto, promover alterações nas propriedades do ar ao longo de todo sistema. A Figura 3 indica os locais adotados, representados pelos números de 1 a 7, em que as propriedades do ar serão avaliadas ao longo do sistema.

Figura 3 – Pontos de processo para estudo psicrométrico



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Cada ponto indicado na Figura 3 possui uma designação para também facilitar o entendimento de qual parte do sistema se está tratando especificamente. Assim, a Tabela 1 apresenta o nome que representa cada um dos pontos adotados.

Tabela 1 – Descrição dos pontos de processo para estudo psicrométrico

Ponto de processo	Descrição
1	Ar externo
2	Retorno total
3	Retorno para o lavador
4	Ponto de mistura (entrada do lavador)
5	Saída do lavador
6	By-pass
7	Ponto de mistura (condição de insuflação)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Como já mencionado, ao longo do sistema as propriedades do ar variam, no

entanto, o local em que essas mudanças ocorrem de maneira significativa é dentro do lavador de ar, que é o equipamento no sistema que promove processo psicrométrico entre os pontos 4 e 5. O fluxo de ar que entra no lavador tem contato com o fluxo de água, seja em fluxo cruzado, paralelo ou misto, de modo que se estabelece um processo de resfriamento evaporativo adiabático e de umidificação. Neste processo, a medida em que o ar avança no interior do lavador, o ar tende a se tornar saturado, o que faz com que sua temperatura de bulbo seco se aproxime da temperatura de bulbo úmido. Para um sistema que tem como finalidade a climatização para remover calor do ambiente atendido, o fluxo de água, que inicialmente possui temperatura menor que a temperatura de bulbo seco do ar, neste processo, se aquece ao remover calor da massa de ar, enquanto sua massa é diminuída em função da evaporação e do arraste. Por este motivo é comum a utilização de água de reposição para manter o fluxo de água adequado dentro do lavador. No que se refere ao controle de temperatura da água, este pode ser para promover o resfriamento ou aquecimento do ar, ou ainda ser sem controle. No caso de ser sem controle de temperatura da água, devido a sua recirculação dentro do lavador, ainda que exista a mistura com a água de reposição, no equilíbrio a temperatura de bulbo úmido do ar e a temperatura da água se aproximam, em que quanto maior for o grau de saturação do ar na saída do lavador maior é a aproximação dessas temperaturas.

### 1.3. Modelagem matemática

Considerando os pontos de processos estabelecidos no fluxograma esquemático indicados na Tabela 1, em cada ponto é necessário a determinação de diversas propriedades termodinâmicas do ar. Por meio de métodos analíticos, ou seja, métodos que utilizam equações matemáticas, é possível determinar de modo sistemático as propriedades do ar. Dessa maneira consegue-se implementar rotinas computacionais para realização dos cálculos.

Sendo as propriedades de temperatura de bulbo seco (TBS) e umidade relativa (UR) parâmetros de fácil obtenção, é conveniente iniciar a avaliação das demais propriedades a partir de **TBS** e **UR** conhecidas. Neste trabalho o estudo psicrométrico envolve a determinação das propriedades indicadas na Tabela 2 para cada ponto de processo apresentado na Tabela 1.

Tabela 2 – Propriedades do ar avaliadas em cada ponto dos processos psicrométricos

<b>Propriedade termodinâmica</b>
Temperatura de bulbo seco
Umidade relativa
Temperatura de bulbo úmido
Pressão de vapor d'água
Umidade específica
Volume específico
Entalpia específica

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

De acordo com método empírico apresentado por Chen (2022), a temperatura de bulbo úmido (TBU) pode ser determinada pela equação (1).

$$TBS(TBU, UR) = -4,391976 + 0,0198197 \cdot UR + 0,526359 \cdot TBS + 0,00730271 \cdot UR \cdot TBS + 2,4315 \times 10^{-4} \cdot UR^2 - 2,58101 \times 10^{-5} \cdot TBS \cdot UR^2 \quad (1)$$

A pressão de vapor d'água ( $P_v$ ) é determinada pela equação (2).

$$\ln(P_v) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10} \cdot T + C_{11} \cdot T^2 + C_{13} \cdot T^3 + C_{13} \ln(T) \quad (2)$$

onde,

$$C_8 = -5,8002206 \times 10^3$$

$$C_9 = 1,3914993$$

$$C_{10} = -4,8640239 \times 10^{-2}$$

$$C_{11} = 4,1764768 \times 10^{-5}$$

$$C_{12} = -1,4452093 \times 10^{-8}$$

$$C_{13} = -6,5459673$$

Sendo  $T$  a temperatura absoluta (Kelvin) e  $P_v$  em Pascal.

Para determinar a umidade específica  $W$  é necessária a utilização das equações (3), (4) e (5).

$$W_s(TBU) = 0,621945 \cdot \frac{P_v(TBU)}{P - P_v(TBU)} \quad (3)$$

$$W(TBS, UR) = 0,621945 \cdot UR \cdot \frac{P_v(TBS)}{P - P_v(TBS)} \quad (4)$$

$$W(TBS, TBU) = \frac{(2501 - 2,326 \cdot TBU) \cdot W_s - (TBS - TBU) \cdot 1,006}{2501 + 1,86 \cdot TBS - 4,186 \cdot TBU} \quad (5)$$

Em que  $W_s$  é a umidade específica do ar na sua condição saturada, e, portanto, função da pressão de vapor avaliada a partir da **TBU**. Nas equações 3 e 4, **W(TBS, UR)** e **W(TBS, TBU)** referem-se a mesma umidade específica, porém avaliadas em função de **TBS** e **UR**, bem como de **TBS** e **TBU** respectivamente.

Assim, ao se utilizar essas equações, espera-se que os resultados obtidos sejam iguais. Essa é uma maneira de verificar se a **TBU** obtida com a equação 1 está correta, confiabilidade para os demais parâmetros que dependem das temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e umidade relativa.

Para determinar o volume específico **v** do ar do ar úmido utiliza-se a equação 6.

$$v = 0,287042(TBS + 273,15) \cdot \frac{1+1,607858.W}{P} \quad (6)$$

Por fim, por meio da equação 7 é possível determinar a entalpia **h** do ar úmido.

$$h = 1,006.TBS + W.(2501 + 1,86.TBS) \quad (7)$$

Assim, por meio das equações de (1) a (7) as propriedades psicrométricas podem ser determinadas.

Além das equações que permitem determinar as propriedades psicrométricas, é necessário utilizar as equações que avaliam o balanço térmico e mássico, que derivam da primeira lei da termodinâmica, sendo elas:

$$H_s = \dot{m}. C_p. \Delta T \quad (8)$$

$$H_l = \dot{m}. L. \Delta W \quad (9)$$

onde,

$H_s$  – Quantidade de calor sensível;

$H_l$  – Quantidade de calor latente;

$\dot{m}$  – Vazão mássica;

$\Delta T$  – Variação de temperatura de bulbo seco;

$\Delta W$  – Variação de umidade específica.

Com exceção da equação 1, que permite obter a temperatura de bulbo úmido com uma aproximação de 0,022°C, (Chen, 2022), as demais equações podem ser encontradas no capítulo 1 do livro ASHRAE Handbook – Fundamentals 2017.

Aplicando o princípio da conservação da massa no processo indicado na Figura 3 e considerando **BP** como o percentual de abertura do registro de *bypass*, o balanço mássico envolvido é:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_7 - \dot{m}_1 \quad (10)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 \cdot (1 - BP) \quad (11)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 + \dot{m}_3 \quad (12)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_4 + (W_5 - W_4) \cdot \dot{m}_4 \quad (13)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_2 \cdot BP \quad (14)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6 \quad (15)$$

Considerando ainda o processo psicrométrico de saturação adiabática que ocorre no lavador de ar, temos:

$$TBS_5 = (1 - \epsilon_{lav}) \cdot TBS_4 + \epsilon_{lav} \cdot TBU_4 \quad (16)$$

Onde  $\epsilon_{lav}$  é a eficiência de saturação em resfriadores evaporativos de contato direto ar e água (ASHRAE, 2008).

A fim de não definir uma eficiência para lavadores de ar, no modelo matemático implementado neste artigo,  $\epsilon_{lav}$  foi parametrizado em função da umidade relativa na saída do lavador, a qual foi mantida constante e igual a 95%. Dessa maneira,  $\epsilon_{lav}$  é determinado através da equação 17 e utilizada na equação 16 para determinação da temperatura de bulbo seco na saída do lavador,  $TBS_5$ .

$$\epsilon_{lav} = \frac{UR_5 - UR_4}{100 - UR_4} \quad (17)$$

## 2. OBJETIVO

Considerando o sistema de climatização apresentado na Figura 2 e simplificado na Figura 3, em que o controle das condições termo higrométricas do ar ocorre apenas através da modulação de registro de vazão de ar (*dampers*), o objetivo deste trabalho é avaliar, através de análise de processos psicrométricos, os efeitos da quantidade de vazão de ar de *by-pass* nos parâmetros de ar no interior do ambiente climatizado.

Esses efeitos são avaliados a partir da determinação das propriedades do ar em cada ponto de processo e, por meio de rotina de cálculos iterativos, estima-se a temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar resultantes no ambiente.



### 3. METODOLOGIA

O desenvolvimento das análises psicrométricas a partir das propriedades termodinâmicas do ar foi realizada através de implementação de um algoritmo baseado em rotinas de cálculos dos parâmetros em cada ponto dos processos de condicionamento do ar. Essas rotinas foram implementadas no *software* Matlab, utilizando sua linguagem própria de programação. O código implementado, com comentários, está disponível em: [https://bit.ly/artigo\\_conbrava](https://bit.ly/artigo_conbrava).

O processo de análise a partir do código implementado está estruturado conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3 – Estrutura das rotinas para determinação dos resultados com a simulação computacional implementada no *Matlab*

Etapas	Descrição	Função
1	Definição das condições e parâmetros iniciais	Altitude e pressão atmosférica
		Condição de ar externo
		Demandas térmicas
		Vazões de ar e <i>by-pass</i>
2	Laço iterativo de cálculos para análise psicrométrica	Determinação das propriedades do ponto 1
		Determinação dos demais pontos de processo
		Definição da quantidade de iterações
		Psicrometria no lavador de ar – Pontos 4 e 5
		Determinação das condições de insuflação
3	Geração dos gráficos de temperatura e umidade relativa	Balço térmico – Determinação do ponto 2 (resultante)
		Preparação dos dados de saída – curva de convergência da temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ponto 2

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o desenvolvimento deste estudo, foram adotadas algumas premissas que simplificam os cálculos e os custos computacionais para processamento das rotinas e obtenção dos resultados. Assim, foram consideradas que as cargas térmicas de calor sensível e latente permanecem constantes, bem como as vazões de ar externo ( $m_1$ ). As vazões de retorno para o lavador ( $m_3$ ), a total na entrada do lavador ( $m_4$ ) e vazão de *by-pass* ( $m_6$ ) variam de acordo com o fator de *by-pass* atribuído ao sistema. A vazão de insuflação ( $m_7$ ) possui um valor inicial para começo do processo iterativo, porém seu valor sofre alteração em função da vazão de *by-pass* e da vazão de saída no lavador ( $m_5$ ). Como premissa para as simulações, foram consideradas as demandas de 170kW de calor sensível, 1,7kW de calor latente, vazão de ar externo de 53.200 kg/h, num local qualquer ao nível do mar. Condição inicial dentro do ambiente climatizado: temperatura do ar em 24°C e umidade relativa de 65%.

Uma vez que as condições de ar externo possuem forte influência nos resultados, foram consideradas quatro combinações de temperatura e umidade relativa, conforme indicadas na Tabela 4. Dessa maneira, ambientes externos frio e úmido, frio e seco, quente e úmido, e quente e seco foram simulados. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com as simulações computacionais. A Figura 4 apresenta os mesmos resultados na forma gráfica, o que permite verificar o comportamento da temperatura e umidade a medida em que o fator de by-pass varia de 0 a 100%, a cada 20%.

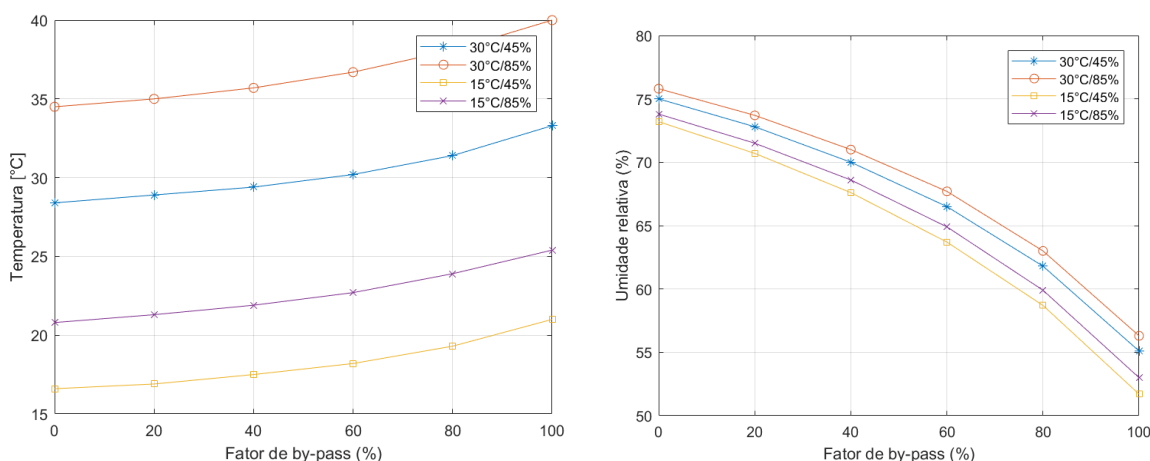
Como pode ser observado nos resultados, a medida em que o fator de by-pass aumenta, a temperatura de bulbo seco resultante no ambiente climatizado também aumenta, ao passo que a umidade relativa diminui. O contrário também se observa, ou seja, diminuindo o by-pass, a temperatura do ar diminui e a umidade relativa aumenta. Alterar o fator de by-pass representa permitir maior ou menor vazão no lavador de ar. Assim, aumentar o percentual de by-pass representa redução da quantidade de ar que sofrerá resfriamento e umidificação, o que está coerente com os resultados, que indicam aumento da temperatura e redução da umidade relativa no ambiente climatizado.

Tabela 4 – Resultados obtidos a partir de condição de ar externo pré-definida

Condição do ar externo	Parâmetro	Fator de by-pass					
		0%	20%	40%	60%	80%	100%
15°C / 85%	TBS [°C]	20,8	21,3	21,9	22,7	23,9	25,4
	UR (%)	73,8	71,5	68,6	64,9	59,9	53,0
15°C / 45%	TBS [°C]	16,6	16,9	17,5	18,2	19,3	21,0
	UR (%)	73,2	70,7	67,6	63,7	58,7	51,7
30°C / 85%	TBS [°C]	34,5	35,0	35,7	36,7	38,1	40,0
	UR (%)	75,8	73,7	71,0	67,7	63,0	56,3
30°C / 45%	TBS [°C]	28,4	28,9	29,4	30,2	31,4	33,3
	UR (%)	75,0	72,8	70,0	66,5	61,8	55,1

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 4 – Efeito do fator de by-pass na temperatura e umidade relativa



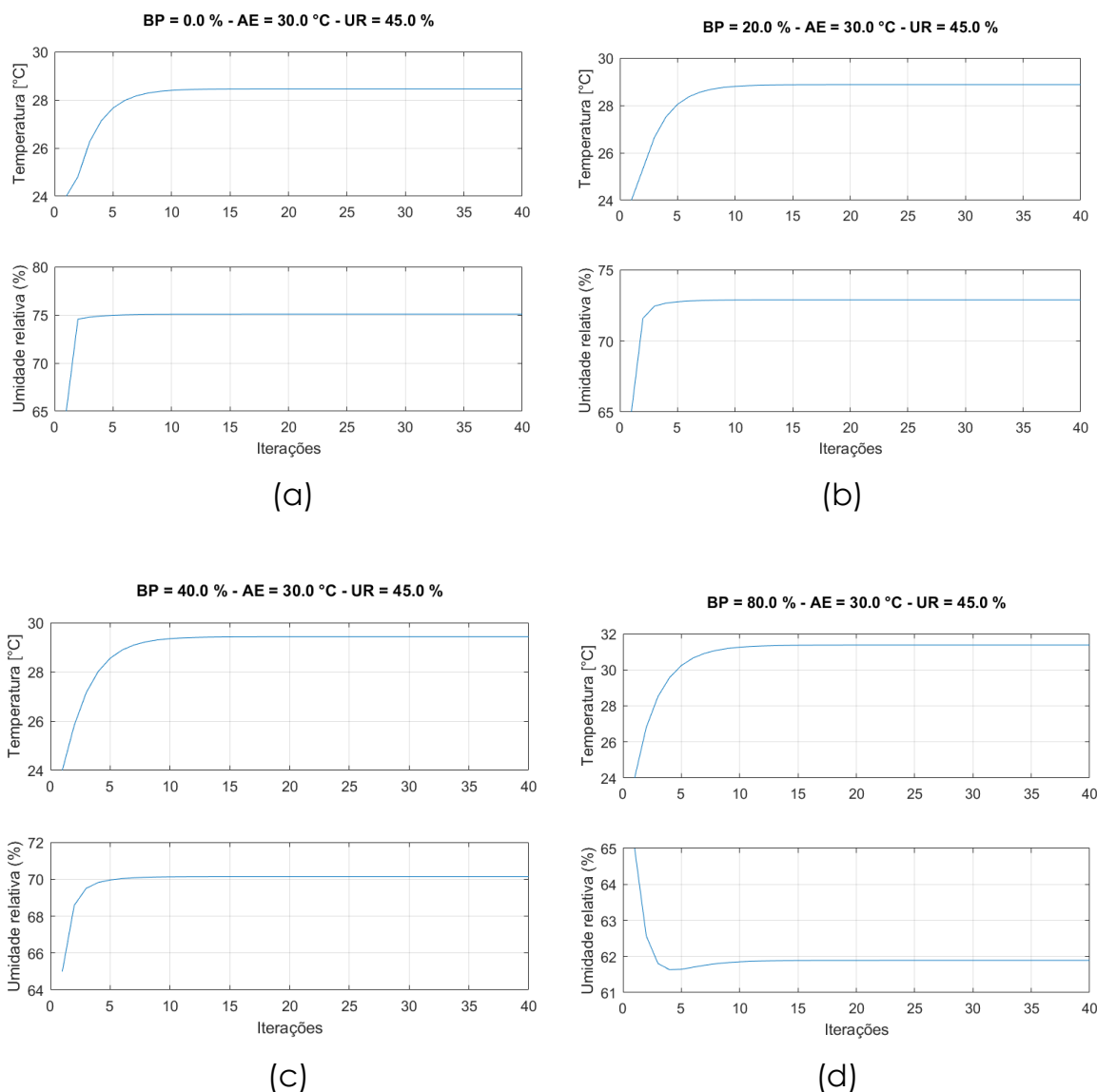
(a)

(b)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A Figura 5 apresenta a curva de convergência de temperatura e umidade a medida em que o percentual de by-pass sofre alteração.

Figura 5 – Curvas de convergência de temperatura e umidade relativa



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Verifica-se pelas curvas apresentadas na Figura 5 que a partir a décima iteração a convergência foi alcançada.

A tabela 5 apresenta todas as propriedades determinadas a cada iteração e permite avaliar se os cálculos psicrométricos estão corretos, quando comparados com softwares ou aplicativos comerciais. Os valores apresentados na Tabela 5 considerou a iteração 1, com um fator de by-pass

de 80%. Os pontos de processos indicados são os mesmos apresentados na Figura 3, sendo o ponto 8 a condição final obtida após análise psicrométrica e balanço térmico. A cada iteração, as propriedades do ponto 8 são atribuídas ao ponto 2 como meio de atualizar as condições de retorno de ar para o sistema.

Tabela 5 – Propriedades psicrométrica avaliadas em cada ponto do sistema e a cada iteração computacional

Parâmetro	Unidade	Pontos de processos psicrométricos							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Temperatura de bulbo seco	[°C]	30,0	24,0	24,0	28,4	21,5	24,0	22,8	26,8
Umidade relativa	(%)	45,0	65,0	65,0	50,4	95,0	65,0	79,4	62,6
Temperatura de bulbo úmido	[°C]	21,1	19,3	19,3	20,7	20,9	19,3	20,2	21,5
Pressão de vapor, TBS	[kPa]	4,2460	2,9851	2,9851	3,8657	2,5676	2,9851	2,7776	3,5272
Pressão de vapor, TBU	[kPa]	2,4990	2,2437	2,2437	2,4491	2,4762	2,2437	2,3729	2,5574
Umidade específica, TBU	[kg/kg]	0,0157	0,0141	0,0141	0,0154	0,0156	0,0141	0,0149	0,0161
Umidade específica, TBU-UR	[kg/kg]	0,0120	0,0121	0,0121	0,0122	0,0153	0,0121	0,0138	0,0138
Umidade específica, TBS-TBU	[kg/kg]	0,0120	0,0121	0,0121	0,0122	0,0153	0,0121	0,0138	0,0138
Volume específico	[m <sup>3</sup> /kg]	1,1424	1,1651	1,1651	1,1481	1,1691	1,1651	1,1667	1,1511
Entalpia específica	[kJ/kg]	60,7430	55,0545	55,0545	59,6947	60,6278	55,0545	58,1481	62,2933

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

## 5. CONCLUSÃO

A análise psicrométrica em conjunto com um balanço térmico permite avaliar de maneira consistente o condicionamento do ar a medida em que este é submetido à processos termodinâmicos. A utilização de ferramentas computacionais permite esta análise e auxiliam na determinação das propriedades térmicas. Neste trabalho essas propriedades foram determinadas a partir do software *Matlab* por meio das equações que regem a psicrométrica do ar. Com o balanço térmico aplicado nas rotinas de cálculos foi possível obter os resultados a medida em que o fator de by-pass é alterado. Os resultados mostram coerência com o que se espera ao fazer a modulação deste fator, que controla a quantidade de ar que circular pelo lavador de ar. Quanto maior o fator de by-pass, maior é a temperatura do ar e menor sua umidade relativa, sendo verdadeiro o contrário. Portanto, dada as premissas adotadas neste trabalho, pode-se concluir que a implementação está adequada e que pode ser aperfeiçoada através de rotinas que permitam simular a variação das condições de ar externo, da dissipação térmica no ambiente, dentre todos os demais parâmetros que se alteram ao longo do tempo no sistema. Além disso, essas rotinas podem contemplar conceitos e estratégias de automação para melhorar eficiência e uso das energias térmicas e elétricas.

Vale ressaltar que o método adotado através da definição de uma quantidade pré-estabelecida de iterações é uma maneira de simular o efeito do tempo (inércia térmica) até o sistema de climatização alcançar seu equilíbrio térmico, a partir do qual os parâmetros permanecem razoavelmente estáveis.

## REFERÊNCIAS

ASHRAE Handbook System & Equipment, SI, Ed. 2008, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers – Chapter 40.

ASHRAE Handbook Fundamentals, SI, Ed. 2017, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers – Chapter 1.

Chakrabarti, S. S.; Bhandarkar, L. R.; Vijawargiya, A.; Nageshwar Rao, P. S. R. K.; A mathematical approach in the formulation of direct evaporative cooling device. International Journal of Engineering Research & Technology. Vol. 4 Issue 02, February-2015.

Chen, H.; Chen, C.; An Empirical Equation for Wet-Bulb Temperature Using Air Temperature and Relative Humidity, 2022. MPDI Journal. <https://doi.org/10.3390/atmos13111765>.

Ghiaus, C., Computational psychrometric analysis as a control problem: case of cooling and dehumidification systems, International Journal of Building Performance Simulation, 15(1), pp. 21-38, [DOI: 10.1080/19401493.2021.1995498](https://doi.org/10.1080/19401493.2021.1995498).

HALASZ, BORIS. Air washer as a means of air conditioning. In: 22<sup>nd</sup> International Congress of Refrigeration, 2007, Beijing. China.

Santos, J.C.; Medeiros, J.M.; dos Santos, J.C.; Gurgel, J.M.; Marcondes, F.; Analytical solution for the simultaneous heat and mass transfer problem in air washers. International Journal of Refrigeration 34 (2011) 353-361.

WATT, J.R. Evaporative Air Conditioning Handbook. 2<sup>nd</sup> ed. New York. Chapman & Hall, 1986.