

ANÁLISE DE CONDENSAÇÃO EM SUPERFÍCIES EM UMA CÂMARA CLIMÁTICA  
POR SIMULAÇÃO TERMO ENERGÉTICA

Mateus Coimbra Gus – mcoimbragus@gmail.com

Eduardo Gus Brofman – eduardo@b2pengenharia.com.br

F3 – Cálculo, Projeto e Simulação Termo Energética

**Resumo:** Este trabalho é um estudo com o objetivo de avaliar a influência de diferentes soluções construtivas nas condições psicrométricas de uma câmara climática. O ambiente será utilizado para testes de disjuntores em uma indústria localizada na serra do Rio Grande do Sul. Serão exigidas condições específicas de temperatura, umidade e de movimentação de ar. O estudo baseou-se em resultados de simulações termo energéticas ao longo de um ano de operação. Utilizou-se o software Energy Plus, com o arquivo climático de Bento Gonçalves, RS. Foram realizadas duas rodadas de simulações. Na primeira, o ambiente é estanque, sem entrada de pessoas ou trocas de ar com outros meios. Na segunda rodada buscou-se compreender o impacto da entrada de pessoas e da infiltração de ar. Comparou-se o ponto de orvalho do ar da câmara climática com as temperaturas das superfícies internas de janelas e paredes. A superfície crítica é o lado interno da janela exterior do ambiente. Concluiu-se que o uso de vidro triplo ou a substituição da janela por uma superfície opaca são as alternativas onde há menor probabilidade de ocorrência de condensação. No entanto, a entrada de pessoas e a infiltração de ar podem aumentar o nível de umidade durante o teste. Em vista deste fato, foi proposto o controle da umidade antes da partida dos testes, a níveis que garantam que o ponto de orvalho permaneça abaixo do nível máximo indicado no estudo.

**Palavras-chave:** Simulação energética, Energy Plus, Condensação em superfícies, Câmara Climática

## 1. INTRODUÇÃO

A simulação termo energética para análise do desempenho de edificações tem se tornado uma tecnologia de fundamental importância para o mercado da construção civil. Essa ferramenta possibilita análises inviáveis anteriormente, permitindo entender e projetar de maneira mais científica as soluções cujos impactos no desempenho termo energético de uma edificação eram até então estimados com menos precisão.

Existem diferentes tipos de controle das condições de conforto em um ambiente. O uso de equipamentos convencionais de climatização, como por exemplo os equipamentos de expansão direta 1x1 (como os popularmente conhecidos como “split”), possibilita o controle da temperatura de bulbo seco medida por um sensor de temperatura. Sistemas que utilizam dutos possibilitam um projeto com distribuição de ar mais adequada, sistemas com UTAs (Unidades de Tratamento de Ar) possibilitam o controle de temperatura e umidade e uma filtragem fina e assim pode-se citar outros sistemas e suas aplicações.

A busca por condições de temperatura, umidade e movimentação de ar combinadas é uma questão complexa. As aplicações mais comuns, como residências, escritórios, salas limpas ou ambientes hospitalares, já possuem soluções consolidadas e materiais de referência difundidos, que estão em constante evolução e teste pelos usuários e pelos fabricantes dos sistemas. A aplicação em projetos não convencionais, no entanto, exige uma combinação entre experiência de engenharia e ferramentas de simulação computacional para a decisão do tipo de sistema e do tipo de controle a serem projetados.

O EnergyPlus é um dos softwares mais utilizados e completos dentro do universo da simulação computacional de desempenho termo energético de edificações. É um software desenvolvido pelo Department of Energy (DOE) americano. O EnergyPlus possui modelos de alta complexidade para simulação de diversos fenômenos físicos e tipos de sistemas.

### 1.1 Objetivo do trabalho

Este estudo buscou avaliar a influência de diferentes soluções construtivas e de sistemas de climatização nas condições psicrométricas de uma câmara climática, buscando atender exigências deste ambiente controlado. O objetivo do estudo é apresentar soluções viáveis para evitar a ocorrência de condensação da umidade presente no ar dentro da câmara climática.

O ambiente será utilizado para testes de disjuntores em uma indústria localizada na serra do Rio Grande do Sul. Devido à aplicação, a ocorrência de condensação da umidade em superfícies não é aceitável e é exigido um controle rígido de temperatura, com pouca movimentação de ar. A Câmara Climática deve atender uma temperatura de set point entre 30 e 35 °C e as cidades da serra do RS registram baixas temperaturas e alta umidade relativa ao longo do ano. Estas são condições típicas para a ocorrência de condensação em superfícies envidraçadas.

## 2 METODOLOGIA

O estudo baseou-se em resultados de simulações termo energéticas, que são capazes de calcular as propriedades psicrométricas do ar e as temperaturas das superfícies da edificação ao longo de um ano de operação. Utilizou-se o software Energy Plus, com o arquivo climático de Bento Gonçalves, RS.

Modelou-se a câmara climática e os ambientes adjacentes a ela, baseando-se no projeto arquitetônico da edificação e utilizando-se a NBR 15220 e materiais técnicos de fabricantes de vidro para a obtenção das propriedades térmicas dos materiais.

Foram realizadas duas rodadas de simulações. Desenvolveu-se um modelo chamado de cenário base e alterou-se diferentes parâmetros a partir dele. Na primeira rodada, o ambiente é estanque, sem entrada de pessoas ou trocas de ar com outros meios. Na segunda rodada buscou-se compreender o impacto da entrada de pessoas e da infiltração de ar.

Em todos os cenários comparou-se o ponto de orvalho do ar da câmara climática com as temperaturas das superfícies internas de janelas e paredes.

### 3 FUNDAMENTOS

#### 3.1 Propriedades termo físicas dos materiais

A tabela 1 mostra a definição de propriedades termo físicas de materiais e componentes (NBR 15220)

Propriedades	Símbolo	Definição	Unidade
Resistência térmica total	Rt	Somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa.	(m <sup>2</sup> K)/W
Coefficiente global de transferência de calor	U	Inverso da resistência térmica total.	W/(m <sup>2</sup> K)
Capacidade térmica	C	Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema	J/K
Capacidade térmica de componentes	Ct	Quociente da capacidade térmica de um componente pela sua área.	J/(m <sup>2</sup> K)
Absortância à radiação solar*	α	Quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície.	adim.
Emissividade à radiação solar**	ε	Quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro, à mesma temperatura.	adim.
Fator solar de elementos transparentes ou translúcidos	FSt	Quociente da taxa de radiação solar diretamente transmitida através de um componente transparente ou translúcido, sob determinado ângulo de incidência, mais a parcela absorvida e posteriormente retransmitida para o interior, pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo.	adim.

\* Chamada simplesmente de "absortância" no desenvolvimento do trabalho.

\*\* Chamada simplesmente de "emitância" no desenvolvimento do trabalho.

Tabela 1 – Propriedades termo físicas de materiais e componentes

O Energy Plus possui dois modelos para a simulação de uma superfície translúcida. A forma simplificada utiliza 3 parâmetros e a forma utiliza 11 parâmetros. Neste estudo obteve-se os 11 parâmetros para cada tipo de vidro. No entanto, a composição de vidros duplos e triplos não pode ser descrita por 11 parâmetros, mas sim da forma simplificada. Desta forma, o presente relatório irá descrever os diferentes cenários através das propriedades simplificadas de superfícies translúcidas. O Fator Solar, representado pela sigla SHGC (do inglês, Solar Heat Gain Coefficient) define a porcentagem de radiação solar que passa do lado externo para o lado interno do vidro. O Fator U, ou Coeficiente Global de Transferência de Calor, mede quanta energia é transferida pelo vidro em função da diferença de temperatura entre os lados interno e externo. O Fator VLT (do inglês, Visible Light Transmittance) mede o percentual de luz visível incidente sobre o vidro que o atravessa. Um vidro incolor, por exemplo, possui alto VLT.

#### 3.2 Fenômeno de condensação de umidade em superfícies

A ocorrência de condensação em uma superfície depende das condições psicrométricas do ar em contato com esta superfície e da temperatura dela mesma. As condições psicrométricas do ar determinam a temperatura de ponto de orvalho (T<sub>0</sub>). Qualquer superfície com temperatura inferior à temperatura de ponto de orvalho do ar, ao entrar em contato com este ar, provocará condensação da umidade contida nele. Quando isto acontece, se verifica o aparecimento de gotas de água na superfície.

#### 3.3 Fator de forma para superfícies radiantes

A distribuição da radiação emitida por um aquecedor radiante dentro de um ambiente pode ser modelada utilizando-se o conceito de fator de forma. Segundo Incropera et al. (2007), o fator de forma F<sub>ij</sub> é definido como a fração da

radiação que deixa a superfície  $i$  e é interceptada pela superfície  $j$ . O software Energy Plus possibilita a inserção dos fatores de forma como parâmetros para a modelagem do fenômeno de radiação dentro de um ambiente.

Incropera et al. (2007) apresenta fatores de forma para diferentes geometrias. Considerou-se o aquecedor como uma placa fixada paralelamente a uma parede. O aquecedor e a parede oposta, em um ambiente retangular, são considerados placas paralelas uma à outra e a figura 1, apresentada por Incropera et al. (2007), apresenta os parâmetros para o cálculo do fator de forma para placas paralelas.

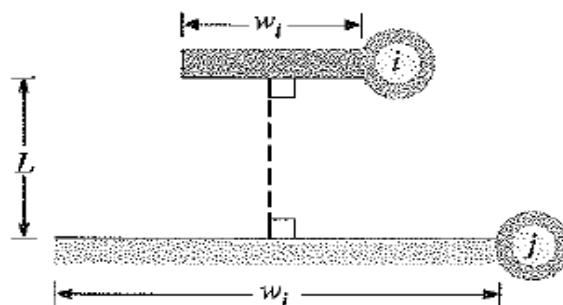


Figura 1 – Parâmetros para o cálculo do fator de forma para placas paralelas, Incropera et al. (2007)

O equacionamento do fator de forma para placas paralelas é apresentado nas Eq. 1, 2 e 3.

$$F_{i,j} = \frac{[(W_i+W_j)^2+4]^{1/2}-[(W_j-W_i)^2+4]^{1/2}}{2W_i} \quad (1)$$

$$W_i = w_j/L \quad (2)$$

$$W_j = w_i/L \quad (2)$$

A regra da soma para superfícies de uma cavidade fechada determina que o somatório dos fatores de forma de uma superfície para as demais superfícies da cavidade fechada é igual a 1. Utilizou-se a regra da soma para obter-se o fator de forma entre o aquecedor e as paredes perpendiculares à parede do aquecedor. O fator de forma da parede onde o aquecedor está instalado é zero. Utilizou-se o mesmo equacionamento para a determinação dos fatores de forma do piso e do teto.

## 4 O ESTUDO DE CASO

### 4.1 Descrição da edificação

A câmara climática possui 18 m<sup>2</sup> de área interna, com pé direito de 4,5 m. Considerou-se forro na altura de 3,5 m. A figura 2 apresenta uma planta baixa da área modelada. As posições 1 e 2 demarcadas referem-se às duas possibilidades de posicionamento do aquecedor elétrico no ambiente.

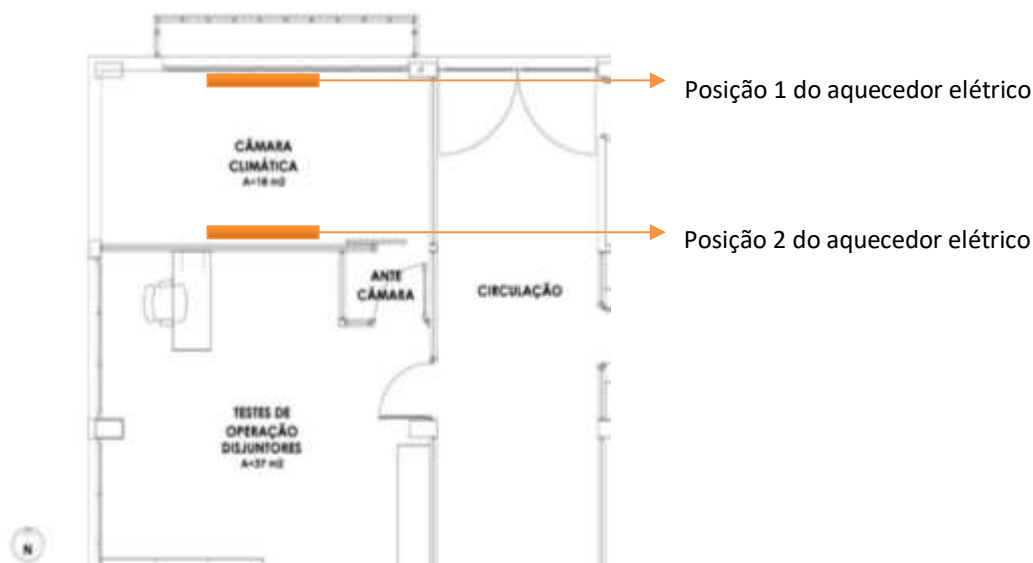


Figura 2 – Planta baixa da câmara climática e ambientes adjacentes

Além da câmara climática, foram modelados os ambientes adjacentes a ela que se encontram no mesmo pavimento. São eles o laboratório “teste de operação de disjuntores”, a ante câmara e uma circulação. A figura 3 apresenta imagens do modelo. A câmara climática possui uma fachada com orientação Norte, com janela e brises, e uma fachada com orientação Oeste. As paredes internas possuem janelas de vidro com um corredor, uma antecâmara e uma sala de laboratório/escritório.

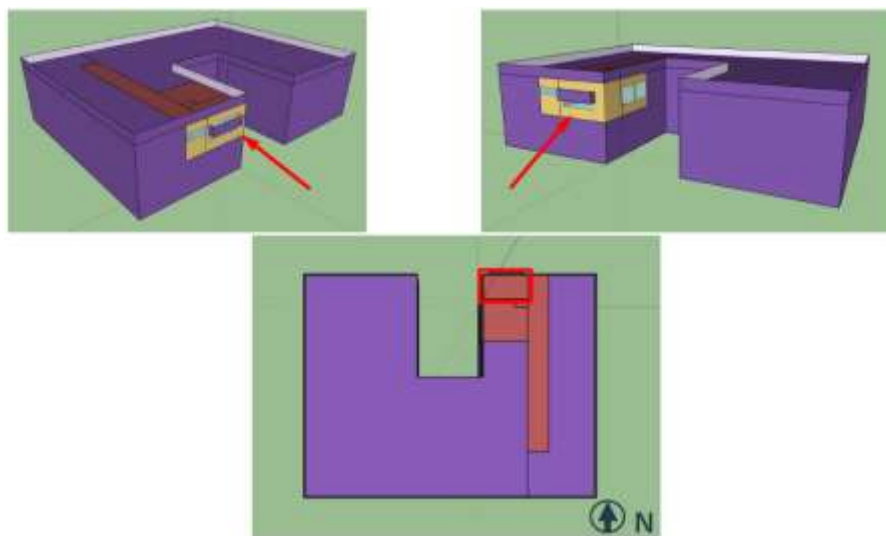


Figura 3 – Imagens da geometria do modelo no software Google Sketchup

As propriedades termo físicas foram consideradas conforme a NBR 15220, com exceção dos vidros, para os quais uma empresa fabricante informou as propriedades. A laje entre pavimentos é de concreto, maciça, com 35 cm de espessura e contrapiso de 7 cm. A cobertura é também uma laje de concreto, maciça, com 35 cm de espessura e isolante com proteção mecânica somando 20 cm de espessura. As paredes externas são construídas com blocos de 25 cm de alvenaria. Considerou-se cor média em todas as superfícies externas, com absorvância igual a 0,5. Os vidros utilizados possuem as propriedades descritas na tabela 2.

	Vidro simples (comum)	Vidro simples (controle solar)	Vidro duplo (comum + controle solar)	Vidro triplo (comum + comum + controle solar)
SHGC	0,86	0,42	0,34	0,29
VLT	0,90	0,38	0,30	0,28
U (W/m <sup>2</sup> K)	5,60	5,60	2,71	1,76

Tabela 2 – Propriedades termo físicas das superfícies translúcidas

#### 4.2 Modelo de aquecedor convectivo radiante

O Energy Plus possui um modelo para aquecedores elétricos convectivos radiantes, que foi utilizado neste trabalho. Os parâmetros requisitados são um horário de operação, capacidade, eficiência, fração radiante e fator de forma para cada superfície da zona térmica.

O equipamento foi considerado disponível 100% do tempo, já que se trata de uma câmara onde são realizados testes ininterruptos que podem durar uma dezena de dias. A eficiência utilizada para o equipamento foi de 97%, valor sugerido pelo arquivo de exemplo de aplicação disponibilizado pelo software. Segundo o Handbook HVAC Systems and Equipment, ASHRAE (2020), para ser considerado um aquecedor radiante, um dispositivo deve possuir fração radiante mínima de 0,5. Considerou-se este valor mínimo no trabalho. A capacidade do equipamento é de 10 kW e foi definida pela carga térmica do ambiente, calculada também no software Energy Plus.

#### 4.3 Descrição do estudo paramétrico

Na primeira rodada de simulações, estudou-se a consequência de diferentes tipos de vidro e a ausência de superfície translúcida na parede Norte. Também foi estudado o impacto da posição do aquecedor. Para compreender de forma isolada o impacto destes parâmetros, considerou-se a câmara climática como um ambiente sem saída nem entrada de ar durante o ano. Os cenários estudados na primeira rodada de simulações são apresentados na figura 4.

<b>BASE</b>	
Aquecimento:	Aquecedor elétrico convectivo radiante.
Set Point de aquecimento:	33°C
Posição do aquecedor:	Parede Norte (fachada com janela)
Vidro externo do Laboratório:	Simplex laminado de controle solar
Vidro externo da Câmara Climática:	Simplex laminado de controle solar
Vidros internos:	Simplex incolor 3mm
<b>CENÁRIO 01</b>	
Vidro externo da Câmara Climática:	Vidro duplo: (controle solar + incolor)
<b>CENÁRIO 02</b>	
Vidro externo da Câmara Climática:	Sem vidro (parede no lugar do vidro)
<b>CENÁRIO 03</b>	
Posição do aquecedor:	Parede Sul (divisória com laboratório)
<b>CENÁRIO 04</b>	
Vidro externo da Câmara Climática:	Vidro triplo: (controle solar + incolor + incolor).

Figura 4 – Cenários da primeira rodada de simulações

Na segunda rodada de simulações, utilizou-se como base de comparação o cenário 1 da rodada 1. Esta escolha deve-se aos resultados da primeira rodada, que serão discutidos no capítulo 5. Desta vez, fixou-se os parâmetros de envelope e sistemas. Buscou-se compreender o impacto da troca de ar com o ambiente adjacente e da entrada de pessoas na câmara climática.

O tipo de atividade considerado para os laboratoristas que entram na câmara climática foi de trabalho leve, ficando de pé. Utilizou-se a classificação fornecida pelo Handbook of Fundamentals, Ashrae (2013), de nível de atividade “de pé, trabalho leve, caminhando” onde o calor total dissipado é de 160 W por pessoa, sendo 60% a fração de calor sensível.

Os cenários estudados na segunda rodada de simulações são apresentados na figura 5.

<b>CENÁRIO 01</b>	
Aquecimento:	Aquecedor elétrico convectivo radiante.
Set Point de aquecimento:	33°C.
Posição do aquecedor:	Parede Norte (fachada com janela)
Vidro externo do Laboratório:	Simplex laminado de controle solar
Vidro externo da Câmara Climática:	Vidro duplo (controle solar + incolor)
Vidros internos:	Simplex incolor 3mm.
<b>CENÁRIO 05</b>	
Cenário 01 (vidro duplo) com entrada de duas pessoas durante 15 minutos em um dia de inverno;	
<b>CENÁRIO 06</b>	
Cenário 01 (vidro duplo) com entrada de duas pessoas durante 1 hora em um dia de inverno;	
<b>CENÁRIO 07</b>	
Cenário 01 (vidro duplo) com infiltração de ar do laboratório para a câmara climática. Vazão de ar de 0,01 ACH.	

Figura 5 – Cenários da segunda rodada de simulações

Considerou-se para o cenário 07 uma vazão de infiltração de ar muito baixa, de 0,01 ACH (trocas de ar por hora). A vazão de infiltração natural especificada para testes de desempenho de edificações pela NBR 15575, por exemplo, é de 1 a 10 ACH.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise dos cenários estudados – rodada 1

A janela com condições críticas é aquela voltada para o ambiente externo, pois as baixas temperaturas externas provocam redução na temperatura da face interna do vidro, que em contato com o ar da câmara climática pode provocar condensação. Nesta etapa de discussão dos cenários, todas as análises serão a respeito da janela exterior.

O número de horas por ano em que ocorre condensação na janela, do lado interno da câmara climática, é apresentado na tabela 3.

Cenário	Descrição	Janela externa (no CN02, parede externa)				Ar da câmara climática					
		Condensação em um ano (horas)	Temp. da superfície int. (°C)			Umidade relativa (%)			Ponto de orvalho (°C)		
			Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínimo	Médio	Máximo
BASE	Aquecedor na parede externa (abaixo da janela com o exterior)	776	6.2	23.3	41.7	21%	36%	43%	16.5	16.7	16.9
CN01	Vidro duplo (S32 + 13 mm de ar + incolor)	10	16.2	26.0	40.2	21%	35%	42%	16.5	16.7	16.9
CN02	Parede no lugar de vidro	0	22.2	28.1	37.6	21%	35%	42%	16.5	16.7	16.9
CN03	Aquecedor na parede interna (abaixo da janela com o laboratório)	674	6.4	23.4	41.7	21%	36%	43%	16.5	16.7	16.9
CN04	Vidro triplo (S32 + 13 mm de ar + incolor + 13 mm de ar + incolor)	0	19.5	27.3	39.4	21%	35%	42%	16.5	16.7	16.9

Tabela 3 – Resultados da primeira rodada de simulações

A evolução anual da temperatura da face interna da janela é apresentada nas figuras 6,7,8,9 e 10, para cada cenário da rodada 01.

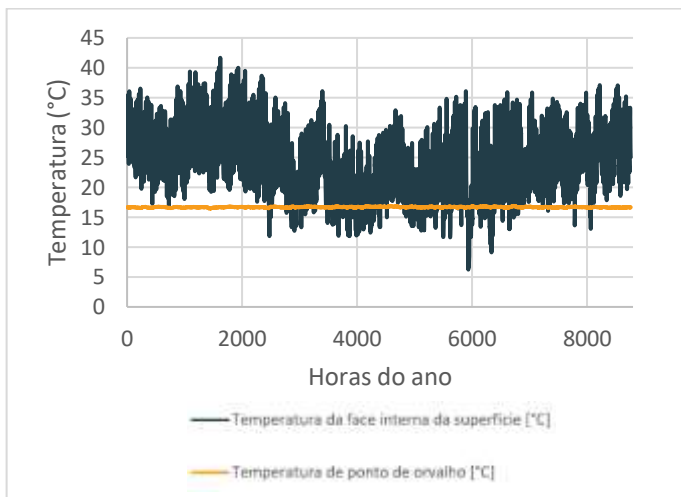


Figura 6 – Temperatura do vidro e ponto de orvalho do ambiente (cenário BASE)

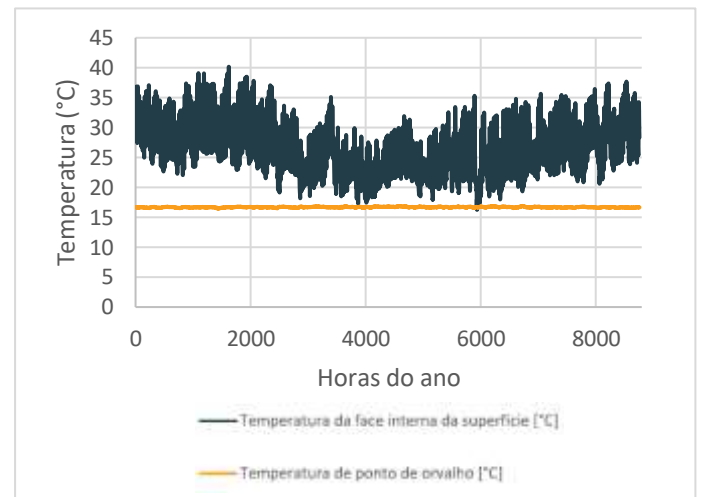


Figura 7 - Temperatura do vidro e ponto de orvalho do ambiente (cenário 01)

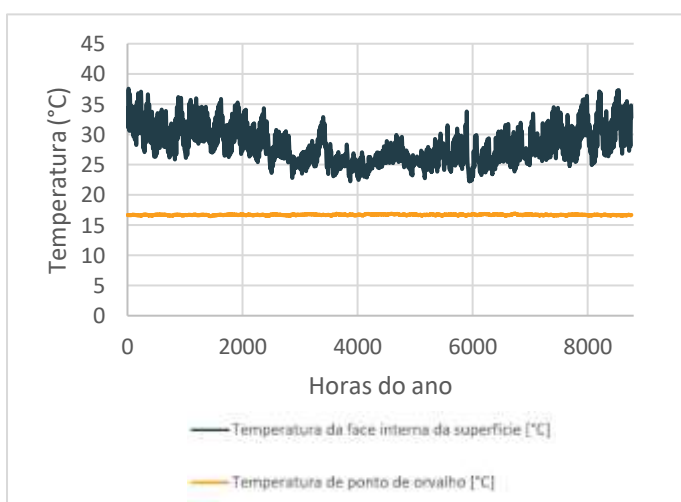


Figura 8 - Temperatura do vidro e ponto de orvalho do ambiente (cenário 02)

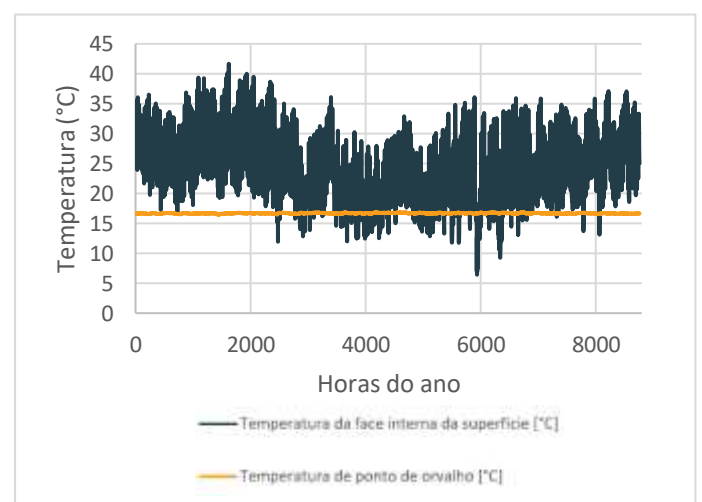


Figura 9 - Temperatura do vidro e ponto de orvalho do ambiente (cenário 03)

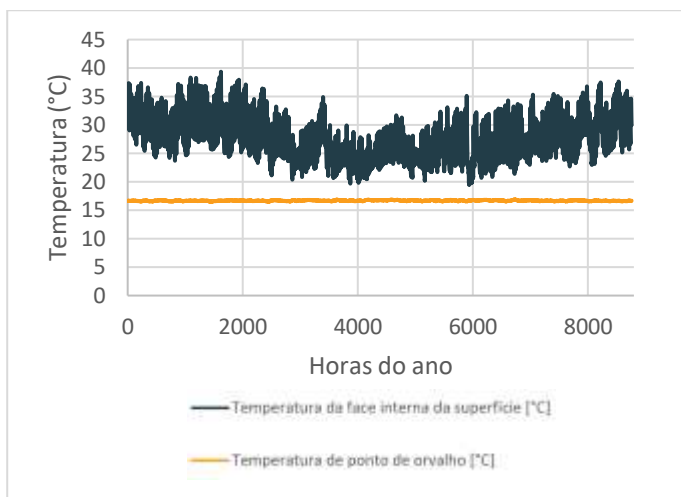


Figura 10 - Temperatura do vidro e ponto de orvalho do ambiente (cenário 04)

As Figuras 6 a 10 demonstram que a condição mais crítica para a ocorrência de condensação no ambiente ocorre nos meses de invernos. É quando a temperatura de bulbo seco externa é mais baixa e a radiação solar menos intensa, impactando diretamente na temperatura do vidro. Observou-se o mesmo efeito para as demais superfícies que delimitam o volume da sala.

A posição do aquecedor tem impacto insignificante nas temperaturas mínima e máxima atingidas pela superfície interna do vidro ao longo do ano. No entanto, o posicionamento do aquecedor na parede oposta à janela externa (cenário 3) provoca uma redução de 13% nas horas em que ocorre condensação no vidro. Isto ocorre porque no cenário BASE o fator de forma do aquecedor convectivo radiante para o vidro exterior é zero. Já no cenário 03, este fator de forma é de 12,8%. É importante ressaltar que as simulações realizadas não levam em consideração o efeito de convecção gerado pelo aquecedor, que provoca um filme de ar quente sobre ele. Este efeito, quando o aquecedor é posicionado como no cenário BASE, poderia provocar um aumento na temperatura da janela exterior. Para incluir este efeito no estudo, seria necessário realizar uma simulação com software CFD.

A temperatura da face interna do vidro é sensível à mudança de composição da janela. O uso de vidros duplos ou triplos reduz a variação da temperatura ao longo do ano e diminui a amplitude térmica entre os dias mais frios e dias mais quentes. A substituição de uma janela com vidro simples (cenário BASE) por uma parede (cenário 02) provoca também este efeito, reduzindo a amplitude térmica anual da superfície interna do vidro de 35,5°C para 15,5 °C.

## 5.2 Análise dos cenários estudados – rodada 2

O número de horas por ano em que ocorre condensação na janela, do lado interno da câmara climática, nos cenários da rodada 2, é apresentado na tabela 4. O cenário CN01 é utilizado como base de comparação.

Cenário	Descrição	Janela externa (no CN02, parede externa)			Ar da câmara climática						
		Condensação em um ano (horas)	Temp. da superfície int. (°C)			Umidade relativa (%)			Ponto de orvalho (°C)		
			Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínimo	Médio	Máximo
CN01	Vidro duplo (532 + 13 mm de ar + incolor)	10	16.2	26.0	40.2	21%	35%	42%	16.5	16.7	16.9
CN05	CN01 com 2 pessoas entrando 15 minutos em um dia de inverno	20	16.2	26.0	40.2	21%	36%	44%	16.5	17.1	17.5
CN06	CN01 com 2 pessoas entrando 1 hora em um dia de inverno	151	16.2	26.0	40.2	21%	39%	49%	16.5	18.1	19.3
CN07	CN01 com infiltração	22	16.2	26.0	40.2	15%	32%	48%	10.1	14.8	20.0

Tabela 4 – Resultados da segunda rodada de simulações

As figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam o efeito da entrada de pessoas na câmara climática.

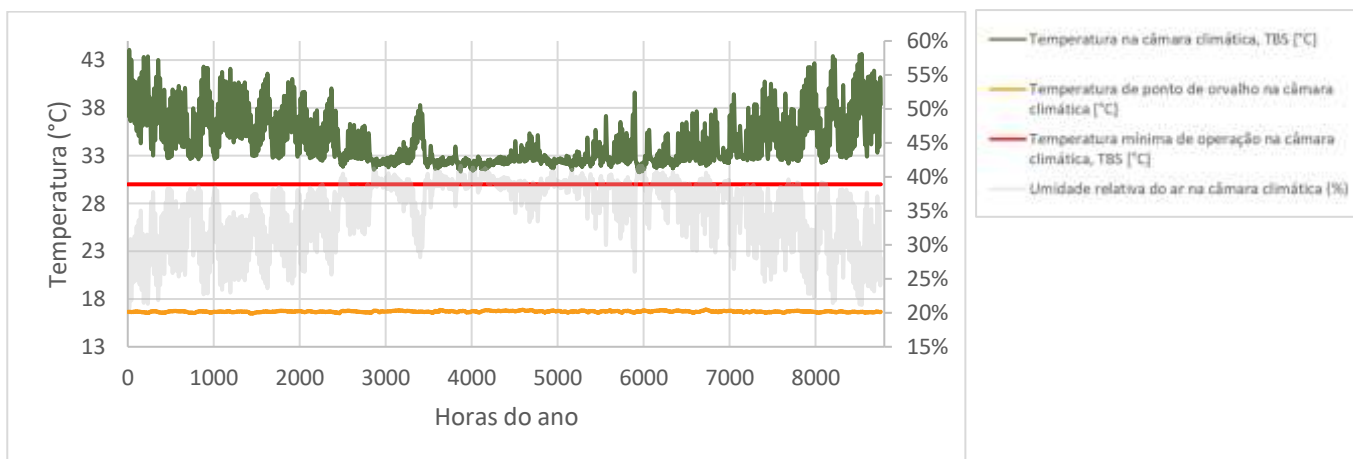


Figura 11 – Outputs das simulações da rodada 02 de simulações (cenário 01)

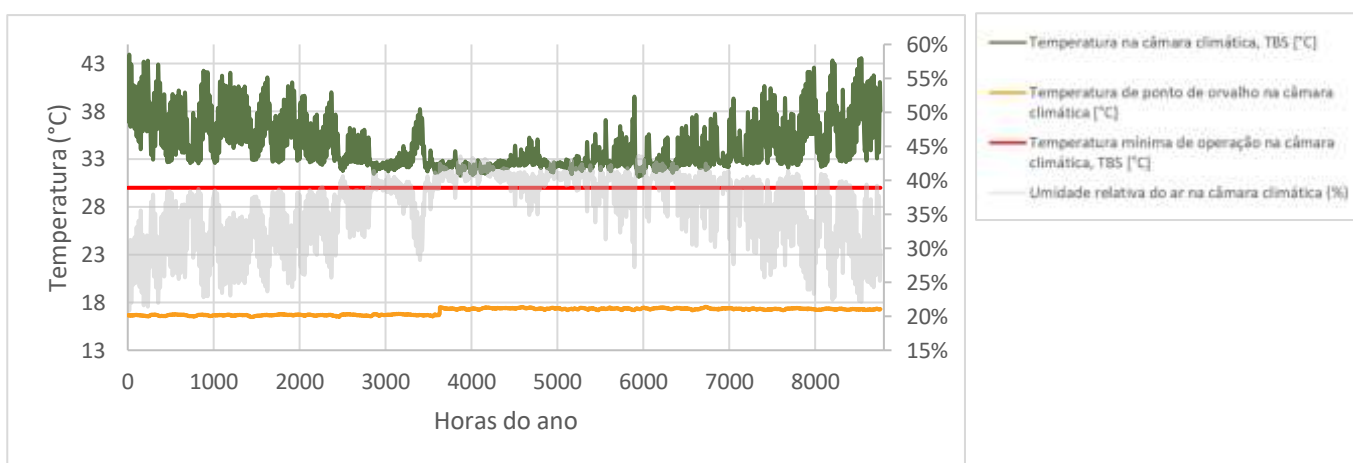


Figura 12 – Outputs das simulações da rodada 02 de simulações (cenário 05)

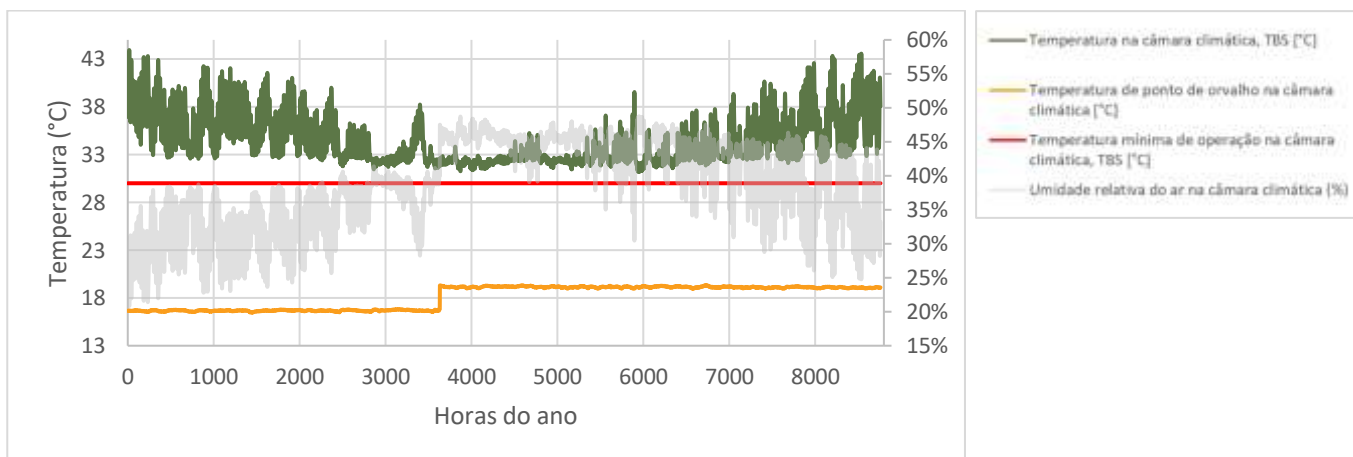


Figura 13 – Outputs das simulações da rodada 02 de simulações (cenário 06)



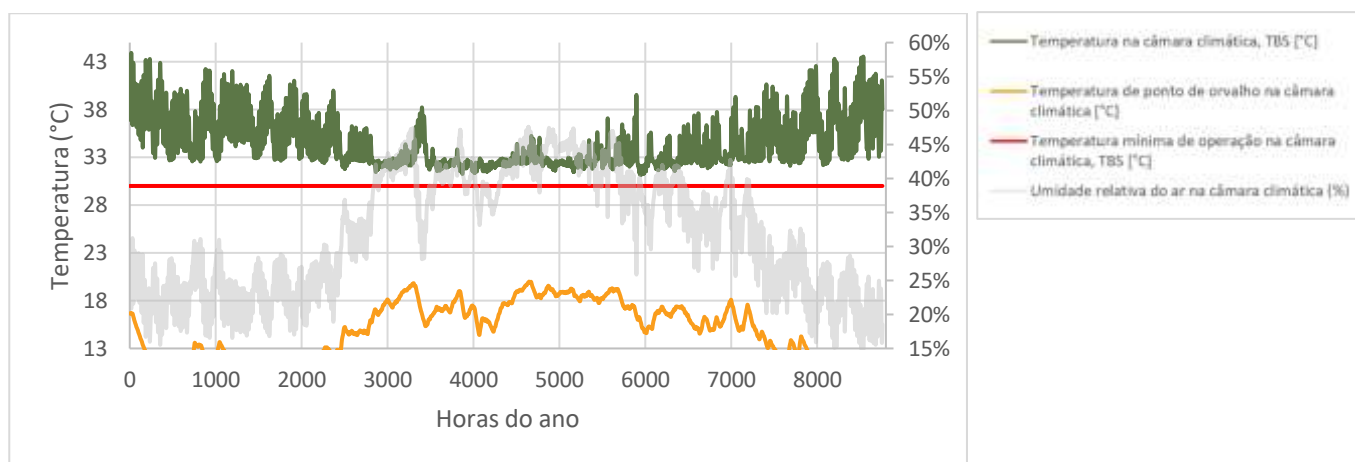


Figura 14 – Outputs das simulações da rodada 02 de simulações (cenário 07)

Os dados dos cenários 05 e 06 demonstram que a presença de pessoas aumenta sensivelmente o ponto de orvalho dentro da câmara climática. Isto ocorre devido à carga latente oriunda do metabolismo humano. Com a umidade transferida da pessoa para o ar, aumenta a temperatura de ponto de orvalho. Nesta condição, aumenta a possibilidade de ocorrência de condensação nas superfícies em contato com o ar do ambiente.

O cenário 07 demonstra como a infiltração de ar, mesmo em baixa vazão, interfere na umidade relativa e na temperatura de ponto de orvalho do ambiente. Durante os períodos mais quentes, quando o ar do laboratório está mais seco devido à climatização em modo resfriamento, o ar que entra na câmara climática ajuda a reduzir o conteúdo de umidade. Durante os períodos mais frios, o ar do laboratório está mais úmido porque o modo aquecimento não resseca o ar insuflado.

A cada vez que uma pessoa entra na câmara climática, aumenta o conteúdo de umidade no ambiente. Isto significa que tem mais massa de água dispersa no ar, para cada kg de ar. Isto provoca aumento na temperatura de ponto de orvalho. O processo descrito é influenciado pelas trocas de ar através de frestas como na porta da câmara. A condição do ar que entra na câmara tende a aumentar o conteúdo de umidade do ambiente nos períodos mais frios, quando é mais crítica a condensação nos vidros. Se não for removida por meio de algum sistema de desumidificação de ar, em algum momento a umidade presente no ar poderá condensar em alguma superfície. Isto possui maior probabilidade de ocorrer quanto menor a temperatura atingida pelas superfícies internas.

Os cenários estudados permitem concluir que a temperatura de ponto de orvalho do ar dentro da câmara climática está sujeita a fatores difíceis de serem controlados. Sugere-se a utilização de algum tipo de sistema para controle de umidade na câmara climática.

### 5.3 Proposta de solução

Devido à exigência de baixa movimentação de ar, buscou-se soluções para controle de temperatura sem insuflamento de ar no ambiente. Para o aquecimento, pode-se utilizar aquecedores convectivos radiantes, solução convencional em diversas aplicações residenciais e comerciais. Para o resfriamento, pode-se adotar a solução de teto radiante, que consiste em placas com uma serpentina de água gelada instaladas no forro do ambiente. A temperatura da serpentina deve ser projetada para ser sempre superior à temperatura de ponto de orvalho do ambiente, para não haver condensação.

A combinação destas soluções pode contemplar a exigência de baixa movimentação de ar. No entanto, não resolve o controle de umidade. Como a entrada de operadores no ambiente é programada, pode-se prever o acréscimo de umidade no ambiente devido à entrada de pessoas. Se o ambiente contar com portas com fechamento estanque, é possível impedir a infiltração de ar nos demais momentos, o que remove esta variável como uma possível fonte de umidade no ambiente.

Para garantir condições em que não ocorra a condensação em vidros, paredes ou outras superfícies, sugere-se o controle da condição de umidade do ambiente no início de cada conjunto de testes. Em função do cenário para a construção da câmara climática (CN01 a CN04), deve-se atender uma condição de temperatura de ponto de orvalho máxima no ambiente antes da partida dos testes. Para realizar-se este controle, foi proposto o uso de uma unidade evaporadora do tipo fancolete hidrônico (com água gelada), com um sistema de automação que leia um sinal de um sensor de umidade no ambiente, ligue o ventilador e atue na válvula de água gelada.

Na tabela 5 é apresentada a condição crítica em que o sistema deve atuar em cada cenário. Considerou-se que o ponto de orvalho máximo deve ser pelo menos 1°C inferior à temperatura mais baixa atingida pelas superfícies internas do ambiente durante um ano (obtida através da simulação). É também apresentada, para duas temperaturas de bulbo seco (TBS) internas, qual a umidade relativa (UR) que satisfaz esta condição.

Cenário	Descrição	Temp. mínima da superfície mais fria (°C)	Ponto de orvalho máximo (°C)	Conteúdo de umidade na condição crítica (g água/kg ar)	UR com TBS = 30°C	UR com TBS = 35°C
BASE	Aquecedor na parede externa (abaixo da janela com o exterior)	6.2	5.2	5.9	21%	16%
CN01	Vidro duplo (S32 + 13 mm de ar + incolor)	16.2	15.2	11.7	41%	31%
CN02	Parede no lugar de vidro	18.9	17.9	13.9	48%	37%
CN03	Aquecedor na parede interna (abaixo da janela com o laboratório)	6.4	5.4	6.0	21%	16%
CN04	Vidro triplo (S32 + 13 mm ar + inc. + 13 mm ar + inc.)	18.7	17.7	13.7	48%	36%

Tabela 5 – Conteúdo de umidade máximo e UR na câmara climática para cada cenário da rodada 01 de simulações

Nos cenários 02 e 04, o maior risco de condensação (superfície com temperatura mais baixa durante o ano) ocorre na janela da câmara climática com o corredor, que é um vidro simples comum. Os cenários BASE e 03 apresentam temperaturas mínimas anuais bem mais baixas do que os demais cenários (em torno de 10°C de diferença). Mesmo sendo garantida uma condição antes do início dos testes, a entrada de operadores ou a eventual infiltração de ar representam um risco maior.

O cenário 02 apresenta o melhor resultado para evitar-se a ocorrência de condensação nas superfícies. Isto ocorre porque o ambiente torna-se mais isolado do meio exterior, estando menos suscetível às variações de temperatura externa e à radiação solar. No entanto, a substituição de uma janela por uma parede gera um impacto considerável na fachada da edificação. Isto pode inviabilizar a situação.

O cenário 04 apresenta um resultado parecido com o cenário 02, sem interferir na fachada da edificação. O aumento de custo provocado por um vidro triplo não foi considerado impeditivo para adotar-se a solução. No entanto, a solução provoca uma complexidade maior de instalação, pois exige a utilização de caixilhos especiais e o alargamento da parede.

No cenário 01, a temperatura mínima atingida pelas superfícies internas da câmara climática pode ser considerada suficientemente alta para realizar-se o controle a partir das condições iniciais dos testes. Conhecendo-se as necessidades e restrições do cliente, sugeriu-se a adoção do cenário 01.

## 6 REFERÊNCIAS

ASHRAE, ASHRAE Handbook - Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2013.

ASHRAE, ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2020.

ENERGYPLUS. **Input Output Reference** – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008

Incropera, F. P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer** 6th Edition. LTC, Rio de Janeiro, 2008.

**Abstract.** *This study evaluates the impact of different building envelope options in the psychrometric conditions of a climatic chamber. The zone will be used for testing electrical devices in an industry located at Bento Gonçalves, RS, Brazil. Specific conditions of temperature, humidity, and air distribution are required. The study was based in building energy simulation during a year of operation. Energy Plus Software was used, with climate data from Bento Gonçalves, RS. Two rows of simulations were done. The first one considered the zone sealed, without the entry of people or changes of air with other zones or the exterior. In the second row of simulations, the impact of people circulation and air infiltration was studied. The dew point of the air inside the chamber was compared to walls and windows surface temperatures. The internal surface of the exterior window is the most critical one. It was found that the use of triple layer window or the substitution of the window by a wall were the best alternatives. However, people entry and air infiltration may increase humidity level inside the chamber during the tests. To assure a safe humidity level before the beginning of the tests, a humidity control system was proposed.*

**Keywords:** *Building energy simulation, Energy Plus, Condensation on surfaces, Climatic chamber.*