# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE NO CONSUMO DE CLIMATIZAÇÃO DE EDIFICAÇÃO ISOLADA TERMICAMENTE

**Luciane Andreola Beber (1); Luiza Coutinho Bernardes (2); Eduardo Grala da Cunha (3); Nathan Mendes (4)**

(1) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do PROGRAU-UFPEL, luandreolabeber@gmail.com;
(2) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do PROGRAU-UFPEL, luizacber@gmail.com;
(3) Arquiteto e Urbanista, Doutor do PROPAR-UFRGS, Professor titular UFPEL, eduardogralacunha@yahoo.com.br;
Universidade Federal de Pelotas, UFPEL, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, PROGRAU. Rua Benjamin Constant, 1359. Pelotas-RS, Cep: 96010-020. Tel.: (53) 91024127.
(4) Engenheiro Mecânico, Doutor do POSMEC-UFSC, Professor titular PUCPR, nathan.mendes@pucpr.br;
Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PPGEM. R. Imaculada Conceição, 1155. Curitiba-PR, Cep: 80215-901. Tel.: (41) 3271-1385.

## RESUMO

A presença de umidade nos materiais da envoltória da edificação pode alterar as características internas de conforto e consumo de energia elétrica dos ambientes internos. O estudo sobre umidade é fundamental para o correto dimensionamento dos sistemas de condicionamento de ar e para estimativas de consumo de energia elétrica mais precisas. Assim sendo, esse artigo tem como objetivo apresentar o consumo de desumidificação de uma edificação com elevado nível de isolamento térmico no envelope, comparando 7 estratégias de desumidificação. A análise foi desenvolvida com o uso da ferramenta *Passive House Planning Package* (PHPP), com uma edificação atendendo os requisitos da certificação *Standard Passive House*, a partir da definição de diversos cenários de análise os quais poderiam diminuir o consumo de energia de desumidificação. Os cenários analisados foram ventilação mecânica noturna, abertura noturna de janelas, e variação da vazão da ventilação noturna. Em relação aos resultados, as menores vazões testadas, as quais possibilitam a manutenção da qualidade do ar interior, obtiveram os melhores resultados em termos de consumo de resfriamento, envolvendo calor sensível e calor latente. Outro aspecto que ficou evidente nas simulações é o peso do processo de desumidificação no contexto geral do consumo de energia de climatização artificial no período de verão, a desumidificação impactou em 54,3% o consumo total de resfriamento, destacando a importância do calor latente no contexto total.

Palavras-chave: umidade, consumo energético, ferramentas computacionais.

## ABSTRACT

The presence of moisture in building envelope materials can change the internal characteristics of comfort and energy consumption of indoor environments. Moisture study is essential for the correct sizing of air conditioning systems and for more accurate prediction of electricity consumption. Therefore, this article aims to present the dehumidification consumption of tight and well insulated residential buildings, comparing 7 dehumidification strategies. The analysis was developed using the Passive House Planning Package (PHPP) tool, with a building that meets the requirements of the Standard Passive House certification, based on the definition of several analysis scenarios which could reduce dehumidification energy consumption. The scenarios under analysis considered nocturnal mechanical ventilation, nocturnal window opening, and nocturnal ventilation flow variation. Regarding the results, the lowest flow rates tested, which allow the maintenance of indoor air quality, obtained the best results in terms of cooling energy consumption, involving sensible and latent heat. Another aspect that was evident in the simulations is the weight of the dehumidification process in the general context of artificial air conditioning energy consumption in the summer period; dehumidification was responsible for 54.3% of the total cooling consumption, which highlights the importance of latent heat in the full context.

Keywords: moisture, energy consumption, computational tools.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos principais desafios enfrentados pelo setor da construção civil é a criação de estratégias eficientes para os projetos de edifícios, que garantam conforto térmico aos usuários com baixo consumo de energia elétrica. Cada edifício apresenta suas características próprias, as quais podem impactar negativamente no consumo energético (ZINA, 2020).

Além do conforto térmico dos ocupantes, a eficiência energética é uma questão importante para o desempenho de sistemas de climatização artificial. Em virtude do aumento dos custos e impactos ambientais relacionados ao consumo excessivo de energia, a questão da eficiência energética em edifícios tem se tornado cada vez mais relevante (FREIRE; OLIVEIRA; MENDES, 2008).

No âmbito de eficiência energética nas edificações, a presença de umidade nos materiais da envoltória da edificação pode alterar as características internas de conforto e consumo de energia elétrica dos ambientes internos, tornando importante o estudo do desempenho higrotérmico das edificações. Além disso, as paredes estão sujeitas a gradientes térmicos e de umidade, de modo que é necessário considerar simultaneamente os efeitos sensíveis e latentes. O estudo sobre umidade é fundamental para o correto dimensionamento dos equipamentos e sistemas de condicionamento de ar, para estimativas de consumo de energia elétrica mais precisas, e para adoção de políticas de conservação de energia elétrica (MENDES, 1997; MENDES *et al.*, 2003).

A partir disto, a Agência Internacional de Energia (EIA) em um documento intitulado *EBC Annex 41 – Whole Building Heat-Air-Moisture Response* (Anexo 41 – Resposta de Todo Edifício ao Calor, Ar e Umidade), abordou a relação entre o consumo de energia elétrica com o equilíbrio de calor, ar e umidade em edificações. A pesquisa teve início a partir da constatação de que as condições de calor, ar e umidade presentes nas edificações podem afetar significativamente tanto o conforto dos ocupantes, quanto o ambiente interno, além de influenciar o consumo de energia e a durabilidade do envelope do edifício. Destacou-se a importância do conhecimento sobre a umidade em edificações, que exige a combinação da modelagem, testes e experiência em campo (HENS, 2013).

Para isso, é fundamental compreender o desempenho higrotérmico das edificações, que estuda simultaneamente o transporte de calor e umidade nos elementos construtivos, analisando como as edificações e seus componentes se comportam quando expostos a condições climáticas específicas de temperatura e umidade do ar. Além disso, é essencial conhecer as propriedades higrotérmicas dos materiais utilizados na edificação (CIB W040, 2012; ZANONI, 2015; NASCIMENTO, 2016).

Segundo Mendes (1997), além de alterar o consumo de energia elétrica e o desconforto térmico, a degradação e a deterioração dos elementos construtivos também são problemas que se desenvolvem em decorrência da umidade. A umidade é mais frequente em edifícios de baixa qualidade ou sistemas construtivos mal resolvidos (GONZALES; OLIVEIRA; AMARANTE, 2020). A umidade é amplamente reconhecida como uma fonte significativa de problemas em edificações, afetando sua durabilidade, prejudicando a qualidade do ar interno e impactando negativamente a saúde dos ocupantes (HENS, 2015). A umidade pode ainda, favorecer o crescimento de fungos que prejudicam a saúde dos ocupantes das edificações (ZANONI, 2015).

A Organização Mundial de Saúde (OMS) define como Síndrome do Edifício Doente (SED), um conjunto de doenças causadas ou agravadas pela poluição e contaminação do ar em espaços fechados. Essa síndrome pode estar presente em dois tipos de edifícios: os temporários, construídos recentemente em que apresentam irregularidades que desaparecem com o tempo, e os permanentes, que possuem erros de projeto e falta manutenção. Ambos consomem alta energia elétrica com condicionamento de ar, e a manutenção dos equipamentos muitas vezes é precária, levando ao aumento da poluição do ambiente interno por microrganismos que se desenvolvem dentro do sistema de refrigeração e umidificação. A SED está diretamente relacionada à falta de manutenção do ar-condicionado, à impermeabilização dos prédios e ao descuido com a higienização, que são pontos relevantes para a qualidade do ar interno (STERLING; COLLETT; RUMEL, 1991).

Portanto, as elevadas exigências de qualidade do ar interior e de ventilação dificultam o uso de sistemas de climatização artificial convencionais, em regiões que possuem um clima com elevado nível de umidade relativa, devido ao alto consumo energético. Regiões com clima quente e úmido necessitam resfriar e desumidificar o ambiente, ocasionando um alto consumo energético devido as cargas sensíveis e latentes. Nesse sentido, a redução do consumo de energia dos sistemas de condicionamento de ar é um objetivo de pesquisa constante, especialmente devido ao aumento do uso desses equipamentos em todo o país (AZEVEDO, 2013; CRUZ; GALVEZ, 2013; CAMARGO, 2003).

O sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor preconizado na *Standard Passive House* possibilita a renovação do ar interior e a troca de calor sensível com o ar exterior. O sistema interno do recuperador de calor proporciona a troca de calor sensível por intermédio das paredes metálicas dos dutos de

entrada e saída de ar, esfriando o ar de insuflamento no verão e esquentando-o no inverno. Este ar de insuflamento segue padrões afim de manter a qualidade do ar interior, sendo 30m³/h por pessoa a vazão mínima recomendada pela norma. A partir do cálculo da vazão de insuflamento balanceado com a vazão de extração (45m³/h para cozinha e 20m³/h para banheiros) (PASSIPEDIA, 2023).

Segundo Mendes (1997), a interação entre calor e umidade impacta o balanço energético da edificação, em que a condensação ou evaporação da água corresponde ao calor latente, enquanto a diferença da temperatura entre o ar e a superfície da parede está ligada à parcela de calor sensível. Essas propriedades influenciam a carga total, e demonstram a diferença entre modelos de simulação que consideram ou não a umidade.

No contexto do resfriamento do ar exterior na condição de verão, uma parte da energia gasta é referente ao processo de desumidificação do ar e outra é referente à diferença de temperatura entre o ar interior e o ar exterior. A parcela referente à diferença de temperatura entre o interior e o exterior é o calor sensível e a parcela referente à mudança de estado da água, desumidificação, é o calor latente. A Figura 01 ilustra o calor sensível e o calor latente por intermédio de carta psicrométrica.

Na Figura 1 é possível verificar as características psicrométricas de uma condição hipotética exterior e uma hipotética interior, adaptado para a cidade de Florianópolis, Santa Catarina por Bogo *et al.* (1994). É possível observar o nível de umidade relativa e temperatura de bulbo seco na condição exterior (33ºC e 80% de UR) e na condição interior (23ºC e 50% de UR).

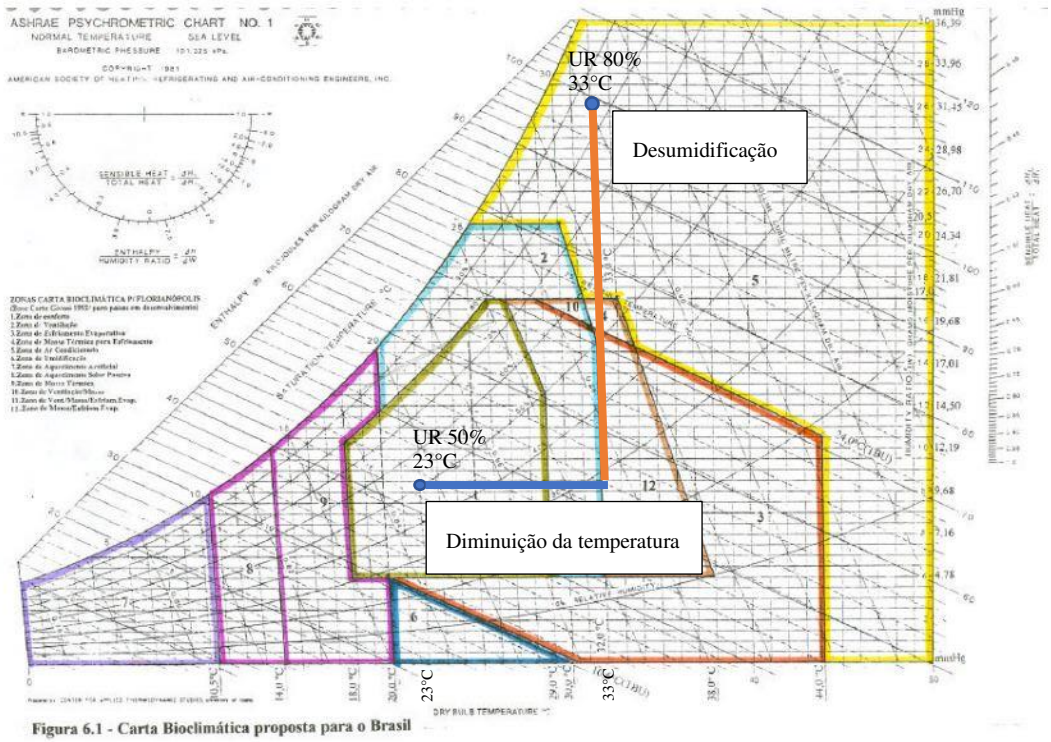



Figura 01 - Carta Psicrométrica – Calor sensível e calor latente. Fonte: Adaptado de Bogo *et al.* (1994).

Visto a importância da umidade no desempenho energético da edificação, assim sendo, a elaboração de um projeto com o sistema condicionamento de ar bem dimensionado, considerando o calor latente e sensível, é essencial para manter a qualidade do ar interno nos edifícios, evitando a proliferação de fungos, bactérias que fazem mal à saúde do usuário.

## 2. OBJETIVO

Esse artigo tem como objetivo apresentar o consumo de desumidificação de uma edificação com elevado nível de isolamento térmico no envelope, comparando 7 estratégias de desumidificação.

## 3. MÉTODO

A análise realizada foi desenvolvida com o uso da ferramenta *Passive House Planning Package* (PHPP). O PHPP é uma ferramenta desenvolvida no ambiente do software Microsoft Excel™ baseada no método de balanço térmico mensal de aquecimento e resfriamento na norma DIN ISO 52016 (ISO, 2017). A ferramenta

também calcula o balanço anual baseado na norma EN ISO 13790 (ISO, 2004). Com uso da ferramenta PPHP é possível criar alguns cenários para avaliar o balanço energético dos edifícios. A proposta desse artigo é criar alguns cenários que possibilitem uma discussão relacionando o consumo de energia da edificação e umidade presente no clima. O software considera alguns pressupostos básicos os quais estão relacionados com os indicadores de certificação de uma *Passive House*, embora possam ser modificados, ou seja, entradas editáveis. São elas:

- As cargas de aquecimento e de resfriamento para temperaturas de referência de 20ºC e 25ºC, respectivamente;
- Os ganhos internos, variando entre 2,1 e 4,1 W/m$^{2,}$ dependendo do tamanho da edificação;
- A vazão de água quente de consumo é considerada igual a 25 litros por pessoa por dia a uma temperatura de 60ºC.

O método consistiu em 03 etapas, como mostra a Figura 02. A Etapa 01 foi referente ao atendimento à *Passive House*, a Etapa 02 aos cenários de análise e a Etapa 03 à análise dos resultados.

A Etapa 01 consistiu no atendimento dos indicadores de desempenho para uma *Passive House*. Para isso foi utilizado a ferramenta PHPP por intermédio da qual é possível calcular em regime permanente o balanço térmico anual energético da edificação. A edificação para atender aos requisitos da *Passive House* necessita cumprir os seguintes indicadores:

- Consumo de energia primária anual inferior ou igual a 120 kWh/(m$^2$.ano);
- Consumo de energia para aquecimento inferior ou igual a 15 kWh/(m$^2$.ano) ou demanda inferior a 10 W/m$^2$;
- Consumo de energia para resfriamento inferior ou igual a 15 kWh/(m$^2$.ano) ou demanda inferior a 10 W/m$^2$. Mais até 10 kWh/m$^2$.ano com o consumo de energia para a desumidificação;
- Temperatura interior menor ou igual a 25ºC em 90% das horas do ano;
- Renovação do ar interior no máximo de 0,6 1/h.

A Etapa 02 consistiu na definição de cenários de análise os quais poderiam diminuir o consumo de energia de desumidificação. Os cenários analisados foram ventilação mecânica noturna, abertura noturna de janelas, e variação da vazão da ventilação noturna.

A Etapa 03 consistiu na análise de resultados e interpretação de fenômenos associados.

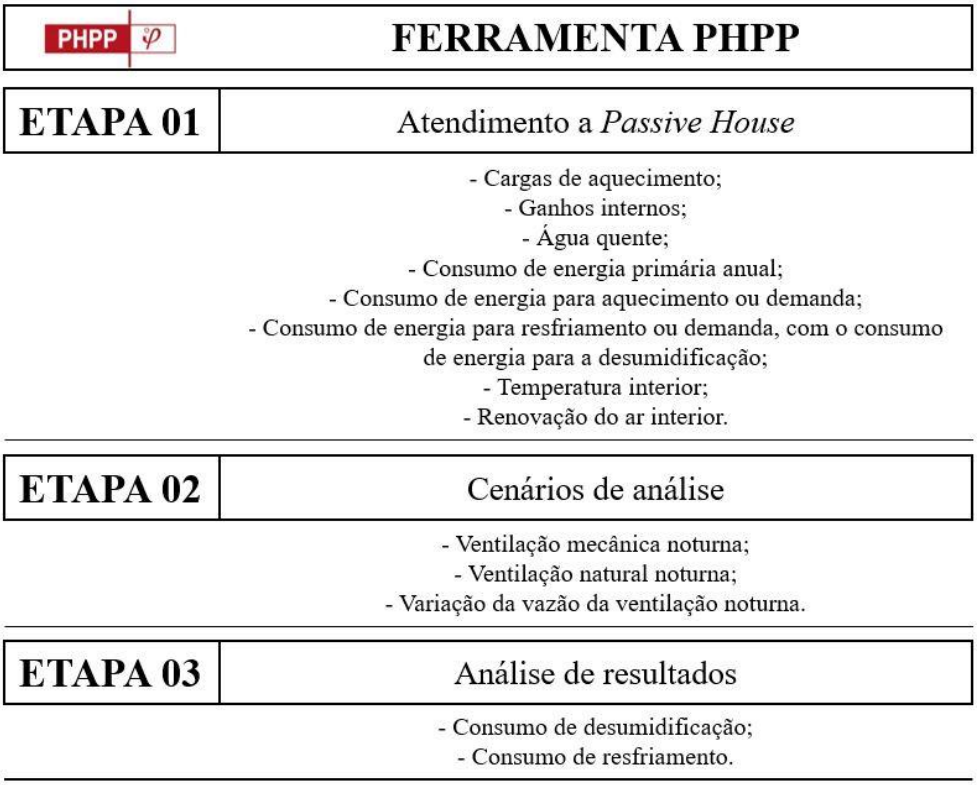



Figura 02 – Infográfico do método. Fonte: Autores.

O sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor é apresentado na Figura 03. Compõe o sistema discutido neste artigo um ventilador mecânico com recuperação de calor, com pré-aquecimento indireto por água quente, e também um sistema de refrigeração com expansão direta, Split, utilizado quando o ar de insuflamento entra com mais de 26ºC.

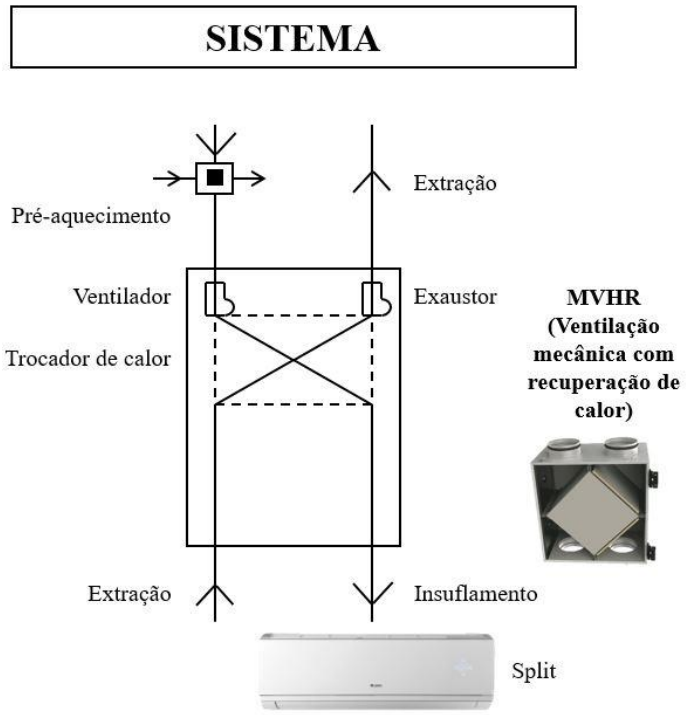



Figura 03 – Sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor e sistema de expansão direta (Split). Fonte: Autores

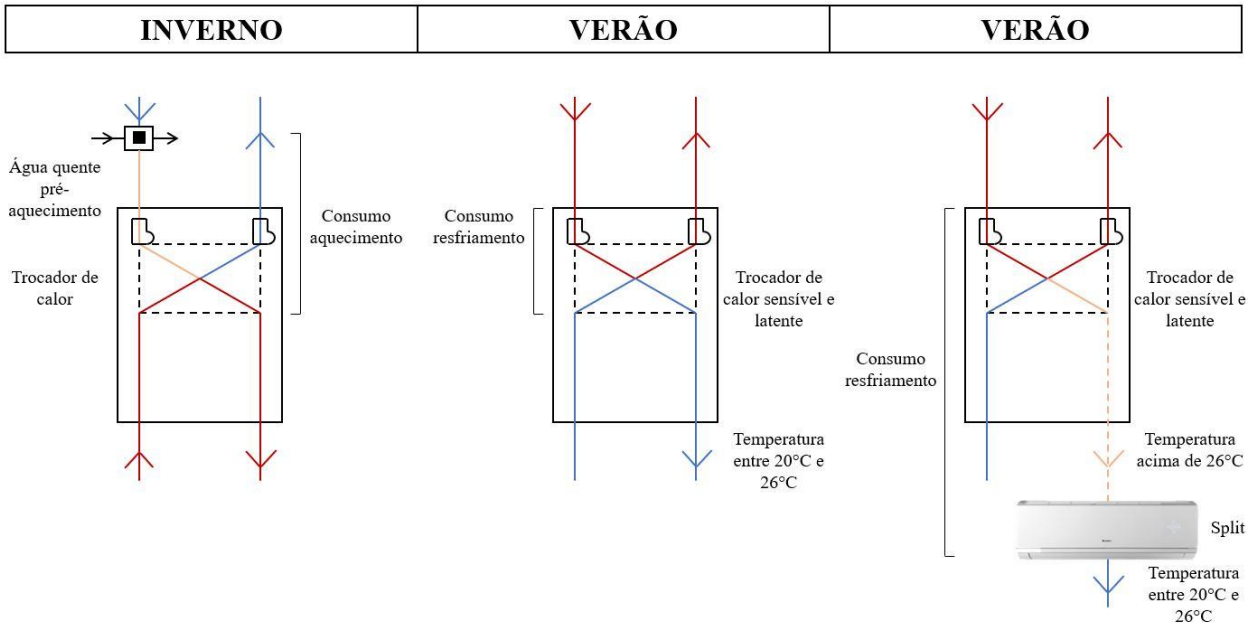



Figura 04 – Sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor e sistema de expansão direta (Split), verão e inverno. Fonte: Autores.

Na condição de inverno o ar exterior é pré-aquecido passando pelo trocador de calor – ar interior aquecido aquece o ar interior, sendo aquecido à temperatura próxima de 20ºC. Na condição de verão o ar exterior é resfriado no trocador de calor - ar interior com menor temperatura resfria ar exterior. Quando o ar exterior na condição de verão é insuflado com temperatura superior a 26ºC o sistema auxiliar Split é acionado para resfriar a temperatura para o intervalo de 20 a 26ºC.

## 3.1. Atendimento aos indicadores da *Passive House*

A edificação consiste em uma edificação residencial unifamiliar, com área total de 144,43m². Possui três quartos, sendo um suíte, três banheiros, sala e cozinha integrados, um ambiente de escritório, lavanderia e a sala técnica do sistema de ventilação mecânica, apresentada nas Figuras 5 e 6. Após a modelagem da edificação, para atender os critérios da *Standard Passive House* foi realizada a análise do desempenho da edificação utilizando o programa PHPP.

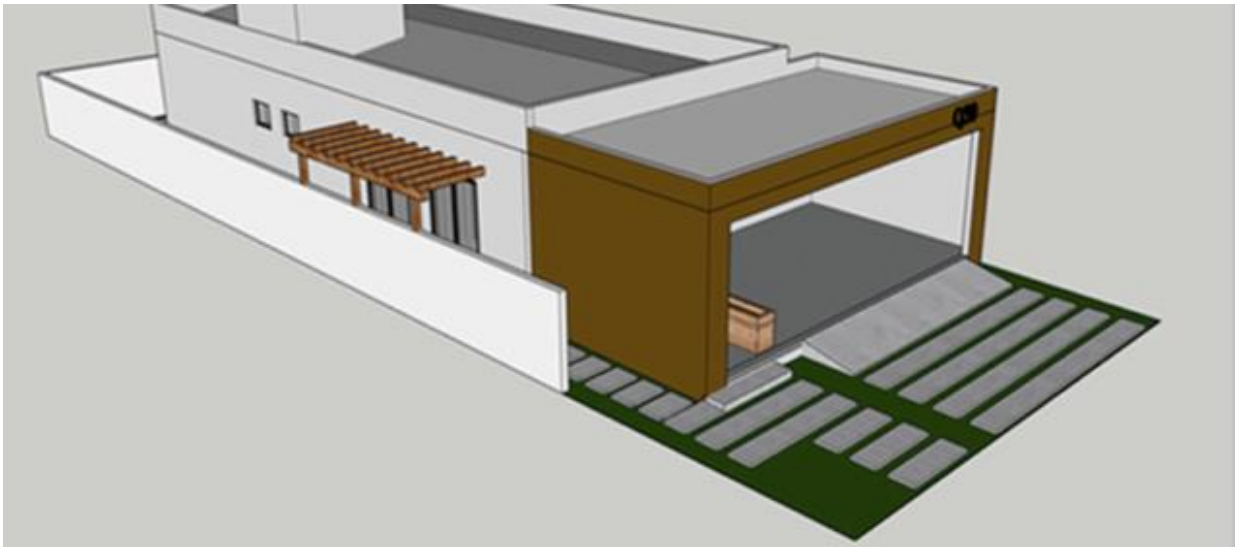


Figura 05 – Modelagem da edificação no programa S*ketchup* com o plugin *PHDesign*. Fonte: Autores.

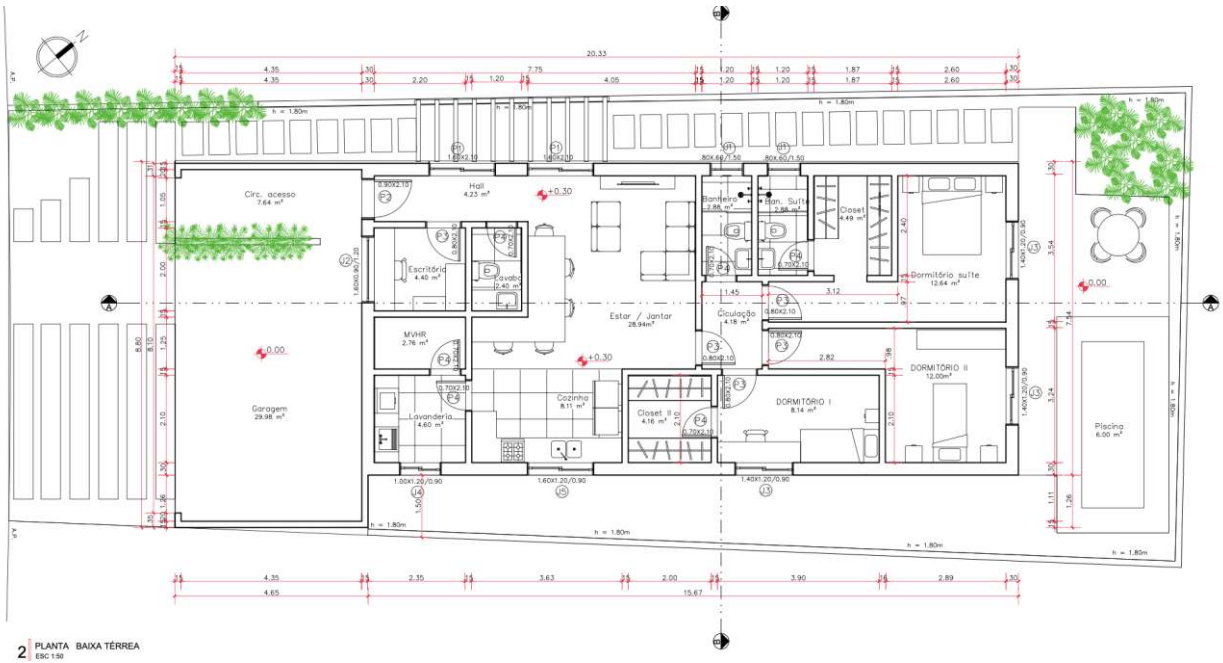



Figura 06 – Planta baixa da edificação analisada, Pelotas, RS. Fonte: Autores.

Na figura 07 é apresentada as características físicas dos materiais utilizados na edificação, a condutividade térmica, espessura, resistência térmica e transmitância térmica. Os materiais utilizados são: o piso da edificação com piso cerâmico, argamassa, isolamento térmico XPS, laje de concreto e laje com bloco cerâmico horizontal; a parede externa, com reboco interior, tijolo cerâmico, reboco de regularização, isolamento em EPS e reboco exterior; e o telhado da edificação, com argamassa, isolamento térmico EPS e laje de concreto.

**U-Value**

Passive House with PHPP Version 10.3 EN

Passive House Grala da Cunha

| Description of building assembly | | | Description of building assembly | | | Description of building assembly | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Floor | | | External wall | | | Roof | | |
| Area section 1 | λ [W/(mK)] | Thickness [mm] | Area section 1 | λ [W/(mK)] | Thickness [mm] | Area section 1 | λ [W/(mK)] | Thickness [mm] |
| Ceramic floor | 1,000 | 10 | Interior Plaster | 1,150 | 30 | Mortar | 1,150 | 50 |
| Mortar | 1,150 | 50 | Ceramic Brick | 0,600 | 190 | EPS | 0,035 | 250 |
| XPS | 0,035 | 30 | Regularization Plaster | 1,150 | 20 | Concrete Slab | 2,100 | 100 |
| Concrete Slab | 2,100 | 50 | EPS | 0,035 | 126 | | | |
| Slab with Horizontal ceramic block | 0,650 | 80 | Exterior Plaster | 1,150 | 10 | | | |
| Heat transmission resistance coefficients | | | Heat transmission resistance coefficients | | | Heat transmission resistance coefficients | | |
| Interior $R_{si}$: | 0,10 | | Interior $R_{si}$: | 0,13 | | Interior $R_{si}$: | 0,17 | |
| Exterior $R_{se}$: | 0,00 | | Exterior $R_{se}$: | 0,04 | | Exterior $R_{se}$: | 0,04 | |
| Total thickness [cm]: | 22,0 | | Total thickness [cm]: | 37,6 | | Total thickness [cm]: | 40,0 | |
| U-value [W/(m²K)]: | 0,864 | | U-value [W/(m²K)]: | 0,242 | | U-value [W/(m²K)]: | 0,134 | |

Figura 07 – Características dos materiais no programa PHPP. Fonte: Autores adaptado de PHPP.

A Figura 08 ilustra a tela inicial do programa PHPP em que é apresentado os indicadores de análise com os resultados da simulação. É mostrada a área de piso climatizada, que corresponde a 106,8m². Com relação ao aquecimento, o consumo de aquecimento do ambiente é 4kWh/(m²a), e a demanda de aquecimento é 8 W/m². Possui também os dados de refrigeração do ambiente, a maior dificuldade foi a carga de desumidificação (consumo de desumidificação e refrigeração) com 23kWh/(m²a). Como o ambiente é climatizado artificialmente, não existem horas de sobreaquecimento, apresentando nulos os resultados de frequência de superaquecimento e a frequência de umidade excessivamente alta. Os resultados apresentam que a edificação atende os padrões de estanqueidade da *Passive House* com 0,6 ren/h. Nos últimos dados são mostrados o consumo de energia primária, na faixa de 91kWh/(m²a), considerando que a fonte de energia a qual a casa está sendo abastecida não é renovável, não é considerado o abastecimento de energia renovável. Á direita é ilustrado quais quesitos a edificação atende, em relação ao aquecimento atende os critérios de ≤15 de consumo de aquecimento e ≤10 de demanda de aquecimento. No quesito refrigeração o consumo de desumidificação e refrigeração atende com ≤25. Atende também, a estanqueidade da edificação com ≤0,6 ren/h, e atende os requisitos de energia com ≤120. Por fim, como última informação, a edificação foi classificada como *Passive House Classic*.

**Passive House-Verification**

10.3 EN

**Specific building characteristics with reference to the treated floor area**

| | | | | | Criteria | Alternative criteria | Fullfilled?[2] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Treated floor area m² | 106,8 | | | | | |
| **Space heating** | Heating demand kWh/(m²a) | 4 | ≤ | | 15 | - | Yes |
| | Heating load W/m² | 8 | ≤ | | - | 10 | |
| **Space cooling** | Cooling & dehum. demand kWh/(m²a) | 23 | ≤ | | 25 | | Yes |
| | Frequency of overheating (> 25 °C) % | - | ≤ | | - | | - |
| | Frequency of excessively high humidity (> 12 g/kg) % | 0 | ≤ | | 10 | | Yes |
| **Airtightness** | Pressurisation test result $n_{50}$ 1/h | 0,6 | ≤ | | 0,6 | | Yes |
| **Non-renewable Primary Energy (PE)** | PE demand kWh/(m²a) | 91 | ≤ | | 120 | | Yes |
| **Primary Energy Renewable (PER)** | PER demand kWh/(m²a) | 66 | ≤ | | - | - | - |
| | Generation of renewable energy (in relation to projected building) kWh/(m²a) | 63 | ≥ | | - | - | |

I confirm that the values given here have been determined following the PHPP methodology and based on the characteristic values of the building. The PHPP calculations are attached to this verification.

**Passive house Classic?** Yes

| Task: | First name: | Surname: | Signature: |
|---|---|---|---|
| | grala | dacunha | |
| Certificate-ID | Issued on: | City: | |
| 1099_G_SFH_Pelotas_Brazil_DA | | Pelotas | |

Figura 08 – Tela inicial do software PHPP com os indicadores de desempenho. Fonte: Autores adaptado de PHPP.

## 3.2. Definição dos cenários de análise

Os cenários de análise tiveram como objetivo verificar o impacto do consumo da desumidificação no contexto do consumo de climatização observando diferentes estratégias de desumidificação dentre elas a ventilação noturna observando diferentes vazões de ar utilizando tanto a ventilação natural com a abertura de janelas

quanto o aumento da vazão do sistema de ventilação mecânico. Para o dimensionamento da vazão da renovação de ar por intermédio do sistema de ventilação mecânica com recuperação de calor, observam-se alguns aspectos. A vazão por pessoa é de 30 m³/h, considerando 2 pessoas por dormitório, e considerando também vazões de extração de ar da cozinha de 45 m³/h e 20 m³/h para cada banheiro. A partir da vazão de insuflamento e vazão de extração é realizado um balanço total do sistema. O índice de renovação do ar dos ambientes por hora varia entre 0,3 1/h e 0,6 1/h.

No caso da pesquisa, os cenários testados foram os seguintes:

- Cenário 01 – Configuração base – vazão de projeto calculada = 0,46 1/hora, 123 $m^3$/h;
- Cenário 02 – Ventilação Mecânica noturna – vazão de projeto - 20% = 0,38 1/h, 108 $m^3$/h;
- Cenário 03 – Ventilação Mecânica noturna – vazão de projeto + 20%;
- Cenário 04 – Ventilação Mecânica noturna – vazão de projeto + 30%;
- Cenário 05 – Ventilação Natural noturna – abertura de janelas Suíte (1,21 $m^2$);
- Cenário 06 – Ventilação Natural noturna – abertura de janelas Suíte + Bedroom 01(2,42 $m^2$);
- Cenário 07 – Ventilação Natural noturna – abertura de janelas Suíte + Bedroom 01 + Bedroom 02 (3,63 $m^2$);

Ambas as estratégias de ventilação natural e de variação da vazão de ar afetam tanto o consumo de resfriamento (*Cooling*) como o de desumidificação (*Dehumidification*).

É importante contextualizar também o clima de Pelotas, RS, local de desenvolvimento do projeto residencial em análise. A cidade está localizada no extremo sul do Rio Grande do Sul, e caracteriza-se por apresentar um clima temperado subtropical úmido, com temperaturas médias anuais de 17,6ºC e umidade relativa do ar em torno dos 80,7%. A Figura 9 apresenta as características do clima no programa PHPP, a temperatura exterior, radiação em cada orientação solar, temperatura de ponto de orvalho, e umidade relativa mensais.

**Climate data** — Passive House with PHPP Version 10.3 EN

Passive House Grala da Cunha / Climate: BR1003a / TFA: 107 m² / Heating: 3,5 kWh/(m²a) / Cooling: 22,7 kWh/(m²a) / PER: 66,5 kWh/(m²a)

| | Month | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Days | 31 | 28 | 31 | 30 | 31 | 30 |
| ° C | Exterior temperature | 25,8 | 25,6 | 24,0 | 20,7 | 17,1 | 14,5 |
| kWh/(m²month) | Radiation North | 74 | 78 | 108 | 123 | 139 | 114 |
| kWh/(m²month) | Radiation East | 127 | 93 | 94 | 79 | 65 | 50 |
| kWh/(m²month) | Radiation South | 70 | 51 | 44 | 34 | 28 | 24 |
| kWh/(m²month) | Radiation West | 115 | 96 | 94 | 81 | 66 | 50 |
| kWh/(m²month) | Horizontal radiation | 209 | 162 | 155 | 124 | 103 | 77 |
| ° C | Dew point temperature | 20,1 | 20,1 | 18,9 | 16,4 | 13,8 | 11,6 |
| | Relative humidity | 71% | 72% | 73% | 76% | 81% | 83% |

| | Month | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Days | 31 | 31 | 30 | 31 | 30 | 31 |
| ° C | Exterior temperature | 13,7 | 15,3 | 16,8 | 19,7 | 21,9 | 24,6 |
| kWh/(m²month) | Radiation North | 120 | 103 | 88 | 86 | 73 | 72 |
| kWh/(m²month) | Radiation East | 55 | 58 | 71 | 101 | 113 | 131 |
| kWh/(m²month) | Radiation South | 26 | 32 | 39 | 52 | 62 | 77 |
| kWh/(m²month) | Radiation West | 57 | 62 | 70 | 87 | 108 | 125 |
| kWh/(m²month) | Horizontal radiation | 85 | 98 | 115 | 158 | 188 | 220 |
| ° C | Dew point temperature | 10,4 | 11,5 | 12,8 | 14,8 | 16,1 | 17,9 |
| | Relative humidity | 81% | 78% | 77% | 73% | 70% | 66% |

Figura 09 – Clima de Pelotas/RS no programa PHPP. Fonte: Autores adaptado de PHPP.

## 3.3. Interpretação de dados

A interpretação de resultados foi definida com base na observação dos consumos de desumidificação e resfriamento das diferentes propostas. O caso base de referência possui um consumo de 10,0 kWh/($m^2$.ano) para resfriamento e 12,7 kWh/($m^2$.ano) para a desumidificação, totalizando 22,7 kWh/($m^2$.ano). No caso base o percentual do consumo de resfriamento referente à desumidificação é de 56% do total. Este é um aspecto importante já que a proposta do artigo é mostrar a parte referente ao processo de desumidificação no montante de energia referente ao resfriamento.

## 4. RESULTADOS

Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 01 e Figura 10. O cenário 01 representa o caso base, os cenários 02 ao 04 possuem ventilação mecânica noturna, e os cenários 05 ao 07 possuem ventilação natural noturna.

Antes de interpretar os dados apresentados na Tabela 1 é necessário contextualizar a ventilação mecânica com recuperação de calor de uma *Passive House*. A elevada estanqueidade caracterizada por esquadrias de alto desempenho juntamente ao envelope estanque faz com que o índice de renovação do ar interior não seja superior a 0,6 renovações por hora, observando o sistema de ventilação mecânica. Uma das estratégias para minimizar as cargas de resfriamento, sobretudo em edificações de alta inércia térmica, é a ventilação noturna.

Tabela 01 – Simulações variando estratégias para minimizar o consumo de energia referente à desumidificação. Fonte: Autores.

| **Cenário** | **Consumo de resfriamento kWh/(m².ano)** | **Consumo da desumidificação kWh/(m².ano)** | **Vazão L/h** | **TOTAL kWh/(m².ano)** |
|---|---|---|---|---|
| Cenário 01 – Configuração base – vazão de projeto calculada = 0,46 L/hora, 123 m³/h; abertura de janelas Suíte + Bedroom 01(2,42 m²); | 10 | 12,7 | 0,46 | 22,7 |
| Cenário 02 – Ventilação Mecânica noturna – vazão de projeto - 20% = 0,38 L/h, 108 m³/h; | 10,1 | 12,0 | 0,38 | 22,1 |
| Cenário 03 – Ventilação Mecânica noturna – vazão de projeto + 20%; | 9,9 | 13,6 | 0,55 | 23,5 |
| Cenário 04 – Ventilação Mecânica noturna – vazão de projeto + 30%; | 9,8 | 14,2 | 0,60 | 24,0 |
| Cenário 05 – Ventilação Natural noturna – abertura de janelas Suíte (1,21 m²); | 10,2 | 12,7 | 1,66 | 22,9 |
| Cenário 06 – Ventilação Natural noturna –- Cenário 07 – Ventilação Natural noturna – abertura de janelas Suíte + Bedroom 01 + Bedroom 02 (3,63 m²); | 10,3 | 12,7 | 2,87 | 23,0 |
| Cenário 07 – Ventilação Natural noturna – abertura de janelas Suíte + Bedroom 01 + Bedroom 02 + Porta Janela Living (6,00) m². | 10,4 | 12,7 | 4,53 | 23,1 |

No caso da ventilação natural noturna (cenários 05, 06 e 07), a partir da abertura de janelas observa-se níveis de vazão do ar maiores do que 0,6 L/h. Na Figura 10, observa-se a contribuição do consumo de desumidificação no âmbito do consumo de resfriamento.

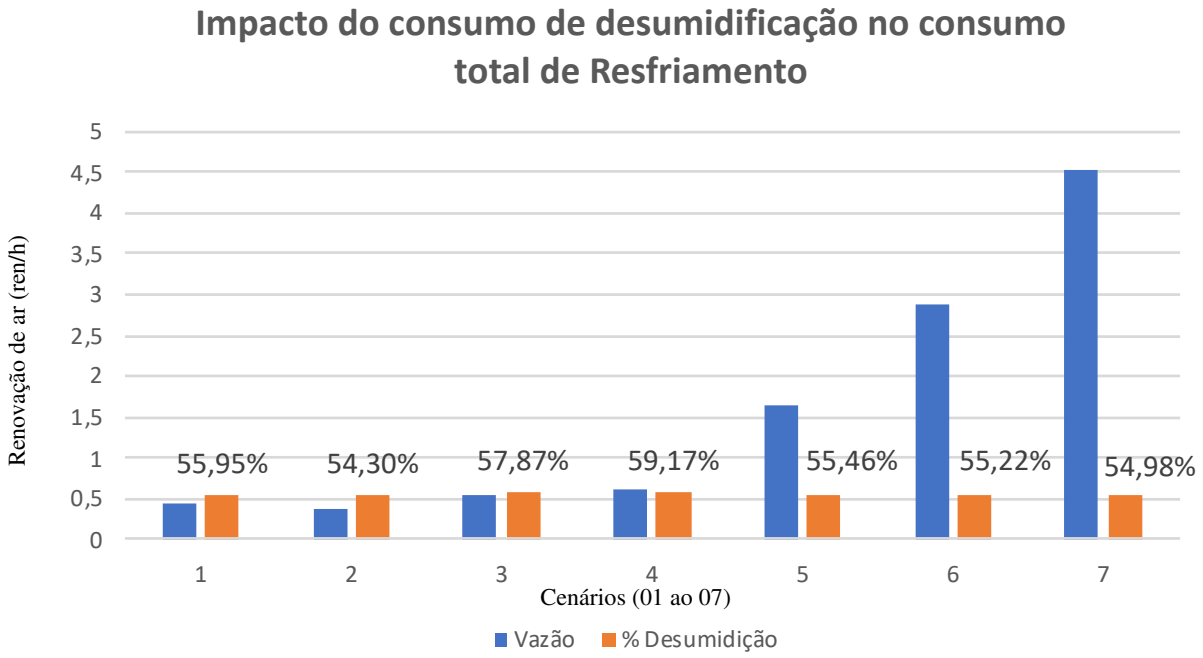



Figura 10 – Impacto do consumo de desumidificação no âmbito do consumo total de resfriamento. Fonte: Autores.

Observando os resultados para as alterações da vazão do sistema de ventilação mecânica, o menor consumo de resfriamento foi observado com a menor vazão 0,38 L/h, e 22 L kWh/(m².ano), cenário 02. É justamente neste cenário que encontramos o menor impacto do consumo de desumidificação no consumo total

de resfriamento. As maiores vazões com a utilização da abertura de janelas durante a ventilação noturna também podem reduzir o impacto da desumidificação no consumo total de resfriamento, já que o ar exterior com menores temperaturas possibilita a entrada de ar com menor razão de umidade (razão de massa de vapor d'água por massa de ar seco).

## 5. CONCLUSÕES

Este ensaio teve como objetivo por um lado observar o impacto do consumo de desumidificação no consumo total de resfriamento e, por outro procurou, verificar o desempenho de possíveis estratégias para mitigar os efeitos do ar externo úmido. A partir da simulação computacional com a utilização do software PHPP – *Passive House Planning Package* versão 10, foi possível analisar 7 cenários com características específicas quanto à vazão de ar como também o tipo de renovação do ar interior. Foram testadas a ventilação natural noturna e a alteração da vazão do sistema de ventilação mecânica.

As menores vazões testadas, as quais possibilitam a manutenção da qualidade do ar interior, já que o índice de renovação mínima preconizado na *Passive House* é $0{,}3h^{-1}$, obtiveram os melhores resultados em termos de consumo de resfriamento, envolvendo calor sensível e calor latente. Outro aspecto que ficou evidente nas simulações é o peso do processo de desumidificação no contexto geral do consumo de energia de climatização artificial no período de verão. Na melhor hipótese, a desumidificação impactou em 54,3% o consumo total de resfriamento, destacando a importância do calor latente no contexto total.

Como trabalho futuro, destaca-se a possibilidade de desenvolver e simular estratégias de desumidificar o ar exterior antes de resfriá-lo e verificar a eficiência destas possibilidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


AZEVEDO, J. D. L. **Sistemas dedicados ao tratamento do ar de renovação no condicionamento de ar.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BOGO, A.; PIETROBON, C. E.; BARBOSA, M. J.; GOULART, S.; PITTA, T.; LAMBERTS, R. **Bioclimatologia Aplicada ao Projeto de Edificações.** Núcleo de Pesquisa em Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, 1994.

CAMARGO, J. R. **Sistemas de resfriamento evaporativo e evaporativo-adsortivo aplicados ao condicionamento de ar.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2003.

CIB W040. Heat, air and moisture transfer terminology: Parameters and concepts. **CIB - W040**, p. 50, 2012.

CRUZ, A. M. J., GALVEZ, J. M. Modelagem, simulação e controle de um processo desumidificador dessecante multimalha. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**. v. 1, n. 1, 2013.

DIN - Deutsches Institut Für Normung, ISO – International Organization for Standardization, **DIN ISO 5016-1.** Energetische bewertung von gebauden – Energiebedarf für Heizing und Kühlung, IOnnentemperaturen sowie fühbare und latent Heizlasten – Teil 1: Berechnungesverfahren. Ausgabe 2018-4, DIN, Berlin, 2018.

EN ISO INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **EN ISO 13790**. **Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Haizzenergiebedarfs**. Deutsch Fassung EN ISO 13790: 2004.

GONZALES, F. D.; OLIVEIRA, D. L.; AMARANTE, M. S. Patologias na construção civil. **Revista Pesquisa e Ação**, v. 6, n. 1, 2020.

HENS, H. L. S. C**.** EBC. **Annex 41 - Whole Building Heat-Air-Moisture Response.** United Kingdom, 2013

HENS, H. L. S. C. Combined heat, air, moisture modelling: A look back, how, of help? **Building and Environment**, v. 91, p. 138-151, 2015.

MENDES, N. **Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 1–219, 1997.

MENDES, N.; WINKELMANN, F. C.; LAMBERTS, R.; PHILIPPI, P. C. Moisture effects on conduction loads. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 7, p. 631–644, 2003.

NASCIMENTO, M. L. M. **Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2016.

PASSIVE HOUSE INSTITUT. **PHPP - Passive House Planning Package**. Version 10. Germany, 2021.

PASSIPEDIA. **Passipedia – The Passive House Resource.** Disponível em: <https://passipedia.org/>. Acesso: dia 19 de abril de 2023.

STERLING, T. D.; COLLETT, C.; RUMEL, D. A epidemiologia dos "edifícios doentes". **Revista de Saúde Pública**, v. 25, n. 1. p. 56-63. São Paulo, 1991.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília.** Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília, 2015.

ZINA, C. M. **Atributos de Desempenho Ambiental: Uma ferramenta de apoio para Projetos Residenciais.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2020.


## AGRADECIMENTOS


Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento da pesquisa.