# ESTUDO BIBLIOMÉTRICO SOBRE A ENVOLTÓRIA DE HABITAÇÕES RESIDENCIAIS NA ÓTICA DA FORMAÇÃO DE FUNGOS FILAMENTOSOS, QUALIDADE DO AR INTERIOR, CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÃO DE GASES POLUENTES

**Letiane Benincá (1); Ana Carolina Badalotti Passuello (2); José Maria González Barroso (3); Eva Crespo Sanchez (4); Rodrigo Karini Leitzke (5)**
(1) Mestre em arquitetura e urbanismo, arquiteta, benincalf@gmail.com, IMED, UFRGS e UPC, Estrada do Trigo, 1215, Passo Fundo/RS, (54) 99905 7874
(2) Doutora em engenharia, engenheira, ana.passuello@ufrgs.br, UFRGS, Av. Osvaldo Aranha, 99, Porto Alegre, (51) 3308 4848
(3) Doutor em arquitetura, arquiteto, jose.m.gonzalez@upc.edu, UPC, Av. Diagonal, 649, Barcelona, +34 934 016 333
(4) Doutora em arquitetura, arquiteta, eva.crespo@upc.edu, UPC, Av. Diagonal, 649, Barcelona, +34 934 016 333
(5) Mestre em arquitetura, cientista da computação, rodrigokarinileitzke@gmail.com, UFPel, R. Benjamin Constant, 1359, Pelotas, (53) 3284 5500

## RESUMO
As habitações possuem um fundamental papel de inserção do direito à moradia em famílias de diferentes contextos econômicos e sociais. No que diz respeito aos desempenhos destes edifícios, a qualidade das construções está atrelada principalmente com a composição dos seus fechamentos (opacos e translúcidos), bem como as estratégias passivas para o projeto arquitetônico. Observando em especial a composição da envoltória, este trabalho busca identificar na literatura as diferentes considerações envolvendo a possibilidade de formação de fungos filamentosos, a qualidade do ar interior (QAI), o consumo energético e a emissão de gases poluentes na fase operacional destas edificações. O processo de seleção das produções analisadas passou um protocolo de revisão sistemática de literatura (RSL), um total de 304 produções foram identificadas nas bases de dados consideradas pelo estudo. Os principais resultados apontam para uma predominância do método de simulação computacional como instrumento para análise das variáveis de desempenho consideradas, além disso, habitações unifamiliares predominam as discussões. Observou-se também uma lacuna quanto a combinação de características de análise, visto que a maioria das produções identificadas considerou como condições de avaliação apenas parte das variáveis necessárias para análise dos temas de interesse desta investigação.

Palavras-chave: Revisão sistemática de literatura, desempenho térmico e energético, edificações residenciais.

## ABSTRACT
Residential buildings have a fundamental role in the inclusion of the right to housing for families from different economic and social contexts. Concerning the performance of these buildings, the quality of the constructions is linked mainly with the composition of their envelopes (opaque and translucent), as well as the passive strategies architectural design. Observing the composition of the envelope, this paper aim to identify in the literature the different considerations involving the possibility of filamentous fungi formation, indoor air quality (IAQ), and energy consumption of these buildings. The selection process of the analyzed papers passed a protocol of systematic literature review (SLR), a total of 304 papers were identified in the databases investigated in this study. The main results point to a predominance of the computer simulation method as a tool for exploring the performance variables; moreover, single-family dwellings predominate as model of discussion. It was also observed a gap regarding a combination of analysis characteristics since most of the identified productions considered as evaluation conditions only part of the variables necessary for the analysis of the themes of interest of this research.

Keywords: Systematic literature review, thermal and energy performance, residential buildings.

## 1. INTRODUÇÃO

Este artigo tem a intenção de analisar o que a academia vem discutindo sobre o estado das edificações de Habitação de Interesse Social (HIS) em relação a condensação superficial, risco de formação de fungos filamentos, da Qualidade do Ar Interior (QAI) e o respectivo consumo energético. Para isso, foram revisadas as publicações, inicialmente, de eficicações em geral, para logo entender o panorama da HIS.

No Brasil, as normas NBR 15.220 (ABNT, 2005) e NBR 15.575 (ABNT, 2013).vieram para regular e organizar as construções de forma que se adequem a uma padrão edificatório com melhor desempenho e com características mais apropriadas a classificação climática brasileira (FERREIRA et al., 2017). É imprescindivel dizer, que a norma de desempenho (NBR 15 575), foi revisada este ano, e da mesma forma, a classificação climática está sendo revisada e adaptada a realidade nacional. O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012), também passou por revisão e está em período de adaptações.

No contexto europeu, com um parque de edifícios consolodidado, a maior parte das pesquisas tem foco na reabilitação, retofit e melhora dessas edificações de forma a que se adaptem as novas exigências das directivas energéticas (CARO E SENDRA, 2020). O foco das estratégias de avaliação está concentrado no papel da composição do edifício na demanda energética, na emissão de gases poluentes e nas condições internas do edifício (SOUTULLO et al., 2020; LORENZO-SÁEZ et al., 2020; LARSEN et al., 2020)

## 2. OBJETIVO

O presente trabalho de revisão sistemática de literatura tem como foco principal responder a seguinte pergunta: "É possível de forma integrada definir características da envoltória de HIS observando a condensação superficial, risco de formação de fungos filamentosos, QAI e consumo energético?"

Assim, o objetivo principal identificar as produções que contribuam com a discussão da melhoria da envoltória de habitações residenciais levando em consideração a QAI nos níveis de conforto térmico interior e higiene, aprofundando os temas de condensação superficial e de formação de fungos filamentosos, considerando a diminuição da intensidade de uso de energia.

## 3. MÉTODO

Foram consideradas as habitações residenciais em geral, HIS ou privado, unifamiliares ou multifamiliares, com o intuito de identificar o método de análise utilizado nos estudos, a fim de interpretar metodologicamente a forma como as variáveis se manifestam frente aos diferentes contextos geográficos e climáticos. As bases de dados usadas para realização da revisão foram: SciELO, ScienceDirect e Scopus.

Foi realizada uma análise preliminar quantitativa da produção disponível através da base de dados Scopus (mais ampla em produções), permitindo avaliar a concentração da produção com os termos estabelecidos inicialmente em uma perspectiva histórica e sem restrições de data e acesso aos periódicos. A primeira string de busca da análise quantitativa foi estruturada de modo a identificar os trabalhos que apresentam discussões sobre o desempenho do envelope ou, conforto térmico, somente em habitações de interesse social, de modo a estabelecer a seguinte estrutura lógica: ("Thermal performance" OR "thermal comfort" OR "comfort" OR "thermal") AND ("social housing" OR "building"), chamada de Srt_qt1. Como resultado, foram identificados 2.070 artigos, sem a aplicação de filtros temporais, apenas considerando produções finais em periódicos.

Em seguida, a partir das condições observadas na análise quantitativa, foram definidas outras quatro proposições de busca, estruturadas para responder à pergunta inicial do protocolo, listadas na Tabela 1.

Tabela 1. *Strings* de busca utilizadas nas bases consideradas para realização da RSL.

| ID | Proposição | Estrutura lógica |
|---|---|---|
| Str1 | Thermal performance of the envelope of residential buildings | ("thermal" OR "thermic") AND ("performance") AND ("envelope" OR "enclosure" OR "building envelope" OR "facade") AND ("residential") AND ("building") |
| Str2 | Thermal comfort in residential buildings | ("thermal" OR "thermic") AND ("comfort") AND ("residential" OR "residency" OR "dwelling") AND ("building" OR "house" OR "edifice") |
| Str3 | Formation of mold or condensation in residential buildings | ("formation" OR "generation") AND ("mold" OR "mustiness" OR "filamentous fungi" OR "condensation") AND ("residential") AND ("building") |
| Str4 | Thermal bridges in residential buildings | ("thermal bridge") AND ("residential" OR "residence" OR "residency") AND ("building" OR "house") |

Como critérios de inclusão foram selecionados os artigos que continham as palavras-chave no título ou *abstract*; a partir de 2014, de acesso livre (*open access*). Como critérios de exclusão foram eliminadas as publicações que não continham as palvras-chave no título ou *abstract,* anteriores à 2014 e os trabalhos com enfoque em edifícios comerciais. A partir das buscas realizadas nas três bases definidas anteriormente, com os novos recortes, se pode evidenciar o novo número de publicações como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Produções totais identificadas e filtradas nas buscas pelas bases de dados.

| ScienceDirect | Scopus | SciELO | Produções duplicadas | Total |
|---|---|---|---|---|
| 79 | 260 | 11 | 46 | 304 |

Ainda pelo processo de seleção e identificação das produções, a ferramenta StArt v. 2.3.4.2 foi utilizada como instrumento de organização do conhecimento, permitindo também a filtragem de produções duplicadas. Inicialmente, foram lidos os abstracts dos 58 artigos selecionados com maior relevância para o tema. Destes, 9 foram desqualificados por estudarem edificações comerciais. Dos 48 artigos restantes, foram lidos os que se inseriam no contexto europeu e latino-americano, totalizando 27 artigos.

## 4. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DO TEMA DE PESQUISA

### 4.1. Produções com contexto climático europeu

Lorenzo-Sáez et al. (2020), buscando elaborar um método para mapear as condições de eficiência energética e emissão de poluentes das edificações residenciais na cidade de Quart de Poblet, província de Valência, Espanha, elaboram a caracterização e os cálculos para obtenção da eficiência energética e emissão de poluentes, assim como o desenvolvimento e aplicação de um modelo com dados alfanuméricos e geográficos para obtenção destas informações. A análise é realizada a partir da seleção das amostras representativas para a cidade escolhida e, ao final, a elaboração de uma integração do modelo criado a nível local. Os resultados, mostram que, em média, estas tipologias são responsáveis por uma emissão média anual de 45 kg $CO_2/m^2$. Além disso, na classificação do modelo proposto a nível nacional, apenas 1% apresentam o nível A, que representa alto nível de eficiência energética e baixa emissão de poluentes. Neste caso, a maioria dos edifícios está classificada nos níveis E (50%), F (12%) e G (19%).

Carpio et al. (2014), apresentam discussão sobre a influência do projeto do envelope térmico na demanda energética e na emissão de $CO_2$ operacional de duas edificações posicionadas em seis zonas climáticas espanholas. Para estratégia metodológica foram definidos os dois modelos, sendo um unifamiliar e outro multifamiliar. Foram testadas, através de simulações computacionais com o *software EnergyPlus* v. 7.4, três diferentes composições de envelope partindo da mais isolada até menor nível de isolamento. Os resultados apresentados apontam que edifícios no clima espanhol (zonas climáticas A4 e B3 para avaliar as condições mais quentes e D2 e E1 para avaliar as condições frias) com soluções construtivas com altos valores de transmitância térmica apresentam demanda energética de 179 a 211% maior quando comparados com modelos com menores valores de transmitância térmica (mais isolados). No mesmo sentido, o aumento no nível de isolamento pode representar uma redução de até 95% da emissão de $CO_2$ para edifícios unifamiliares e 65% para edifícios multifamiliares.

Coma et al. (2019) realizam estudo de projeção histórica (2000 a 2014) sobre a emissão de gases poluentes e a demanda energética de diferentes tipologias no clima europeu, partindo da definição de modelos residenciais representativos em países da Europa. A partir destes modelos foram realizadas análises por simulação através da ferramenta TABULA Web tool visando comparar o desempenho das diferentes tipologias nestes contextos climáticos. Em linhas gerais, considerando os dados analisados no clima espanhol em três diferentes níveis: clima temperado (região do Atlântico), clima quente (mediterrâneo) e clima frio (continental), os autores apontam que o aumento da qualidade dos envelopes com o passar dos anos na Espanha contribuiu com a redução da emissão de $CO_2$ nos edifícios unifamiliares, multifamiliares e em blocos de apartamentos. Entretanto, o consumo energético destes edifícios aumentou no mesmo recorte histórico avaliado.

Domínguez-Amarillo et al. (2019), estudaram o desempenho dos edifícios espanhóis construídos entre 1950 e 1979, com a norma NBE CT-79 (*Norma Básica de la Edificación*, primeira legislação espanhola com foco no desempenho dos edifícios residenciais), selecionaram 21 modelos e avaliaram as estratégias construtivas utilizadas, assim como as demandas energéticas e as temperaturas internas e externas por meio

de simulação computacional com o software *DesignBuilder* (v. 5.0.2.003). Os resultados mostram que a infiltração no período frio era um dos pontos frágeis dos edifícios daquele período, apresentando de 15 a 25% do consumo total de energia para aquecimento. Segundo os autores, a melhora na estanqueidade das edificações espanholas representou uma redução de até 7,2% destas perdas, mesmo nas regiões mais frias do país.

Caro e Sendra (2020) realizaram um trabalho de monitoramento e simulação com o *software DesignBuilder* (v. 4.7.0.027) de HIS em Sevilha para situação de verão. O estudo realiza uma etapa inicial de monitoramento dos modelos durante o verão de 2017, avaliando as condições internas dos ambientes. Em seguida, são realizadas simulações computacionais considerando os mesmos modelos monitorados. Os resultados mostram que é possível reduzir a emissão de $CO_2$ e maximizar o conforto térmico dos usuários para condição de verão, na região estudada, sendo necessário considerar estratégias de refrigeração eficientes, mesclando o uso de energias renováveis com as não renováveis. Além disso, o trabalho aponta como estratégias para redução da necessidade de climatização no verão, como a instalação de dispositivos de sombreamento nas janelas e maior exploração da ventilação noturna, visto que as condições climáticas aferidas tanto por medição quanto por simulação, se mostram propícias durante este período do ano.

Em estudo sobre a avaliação dos impactos climáticos e das condições dos edifícios residenciais de Madrid e região, Soutullo et al. (2020) abordam as diferenças entre a normativa espanhola CTE, os dados meteorológicos dos últimos 10 anos do CIEMAT e os arquivos TMY do *EnergyPlus*, através de dois modelos sde estudo de caso (um de 1979 e outro de 2006). Foram feitas análises por observação sensorial, como também simulações computacionais considerando as condições climáticas dos três modelos de dados. Os resultados destacam que a base de dados em tempo real (CIEMAT) apresenta um aumento de 1,8°C na temperatura externa anual e uma diminuição de 9% da umidade relativa externa quando comparado com as bases sintéticas (CTE e TMY). O estudo conclui que, para as condições climáticas atuais nos cenários mais alarmantes, um aumento da demanda energética do edifício por resfriamento que pode chegar à 82% das necessidades energéticas totais.

Quanto ao comportamento dos edifícios residenciais, como destaca o estudo de Domínguez-Amarillo et al. (2019), construções que antecedem a normativa CT 79 apresentam problemas em sua composição, sobretudo com relação à infiltração. A preocupação com as condições de estanqueidade e de isolamento térmico, assim como mostra Carpio et al. (2014), permitiram com que fosse possível mitigar as condições de demanda energética e de emissão de poluentes.

Contudo, de acordo com o modelo de avaliação de Lorenzo-Sáez et al. (2020), a maior parte dos edifícios residenciais espanhóis ainda está concentrada nos níveis mais baixos, indicando menor nível de eficiência energética e elevada emissão de $CO_2$. Somado a isso, como destacam Soutullo et al. (2020), o aumento nas condições de temperatura externa e a diminuição da umidade relativa, apontam-se como pontos de inflexão para o entendimento do atual modelo construtivo do país.

Considerando o clima da Dinamarca, Larsen et al. (2020), propuseram uma nova ferramenta (*IEQCompass*) para avaliação holística da qualidade ambiental interna. O trabalho consiste no processo de elaboração da ferramenta que deve, fundamentalmente, abordar aspectos que garantam uma boa QAI do edifício, sem considerar necessariamente os padrões de uso. No estudo são considerados como parâmetros de avaliação as condições de conforto térmico, visual e acústico, bem como a QAI e a ambiental. A ferramenta também busca proporcionar uma qualidade do ar para o usuário com base nas suas necessidades (controle pessoal), incluindo, portanto, aspectos da QAI e de conforto térmico como elementos do processo de avaliação.

Contudo, o que se destaca no estudo para esta RSL são condições da qualidade do ar preconizadas pelos regulamentos (sempre que possível) estabelecidas pelos autores. A partir delas, os resultados preliminares de testes da ferramenta mostram que os resultados dos dados observados para elaboração das ferramentas destacam que o aspecto holístico na avaliação das condições internas das habitações é parte fundamental para o correto entendimento dos fenômenos.

A ferramenta *IEQCompass* apresenta, através do estudo de caso avaliado, um escalonamento das condições do edifício em contraste com o que estabelecem as normativas vigentes dinamarquesas, o que permite com que sejam identificadas separadamente as formas como o edifício responde às condições climáticas, individualizando sempre que possível os elementos que compõem e determinam o desempenho do edifício. Quanto à contribuição do artigo para RSL, destaca-se o ponto de não conformidade entre os dados obtidos pela ferramenta através do estudo de caso e o que preconiza a normativa dinamarquesa vigente a respeito dos pontos avaliados, indicando novamente a dificuldade dos regulamentos nacionais/continentais para recomendação de determinados aspectos da composição dos edifícios.

Na Polônia, Kuczyński e Staszczuk (2020), realizaram a comparação de paredes externas leves e pesadas em dois edifícios residenciais unifamiliares. O método consiste na avaliação em um espaço z2laboratorial com forma semelhante, variando a capacidade térmica de suas paredes externas. Neles foram realizadas medições através de cinco termohigrômetros em cada uma das edificações, posicionados de modo a compreender o comportamento de toda a edificação.

Com foco nas condições de verão observadas pela medição dos dois edifícios, os resultados mostram que o uso de paredes de concreto celular ao invés de paredes leves de estrutura de madeira pode ser muito eficaz na redução das temperaturas diárias máximas durante verões quentes em países de clima temperado. A substituição da estrutura leve das paredes por concreto celular permitiu reduzir o tempo total de ocorrência de temperaturas mais altas de 18,6 dias para apenas 8h. O efeito de resfriamento da massa térmica permaneceu estável durante a onda de calor e foi relativamente independente da duração e distribuição dos dias mais quentes. O uso de alta massa térmica nos edifícios estudados reduziu, também, a demanda por energia de resfriamento em 67%.

## 4.2. Produções com contexto climático brasileiro

Para o contexto climático brasileiro, os trabalhos identificados reforçam em especial os aspectos das normativas nacionais quanto ao comportamento termoenergético dos envelopes residenciais brasileiros. Cabe ressaltar que as normativas brasileiras e o RTQ-R estão sendo revisadas, sendo uma das maiores contribuições a modificação das zonas bioclimáticas, sendo divididas em um maior número de zonas. Rodrigues et al. (2015) e Ferreira et al. (2017) discutem aspectos relacionados com o modelo de ventilação no desempenho do edifício e a identificação das propriedades termofísicas mais influentes no comportamento das edificações residenciais, tendo como base as normas NBR 15.220 (ABNT, 2005) e NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Tubelo, Rodrigues e Gillott (2014) realizaram uma comparação entre a etiquetagem do RTQ-R (INMETRO, 2012) e os preceitos da Standard alemão *Passivhaus* (PH), o método consistiu em interpretar as estratégias e buscar limitações entre estas duas regulamentações a fim de compará-las. Os resultados apresentados mostram que o principal foco do RTQ-R (INMETRO, 2012) é diminuir o consumo de energia elétrica das edificações, enquanto a PH busca um menor consumo global de energia, além de um maior conforto térmico dos usuários. Também é possível observar que o regulamento brasileiro apresenta uma solução branda para questão das esquadrias e estanqueidade, já que a ventilação noturna e a exploração das estratégias bioclimáticas são os únicos indicadores estabelecidos pela normativa.

A fim de comparar o comportamento de uma HIS projetada conforme o RTQ-R (INMETRO, 2012) e pela NBR 15.575 (ABNT, 2013), Silva e Ghisi (2014) definiram um modelo de HIS para Zona Bioclimática 3 (ZB3) com base nas condições estabelecidas pela duas normativas, realizando um estudo de sensibilidade dos seus parâmetros. Através das simulações computacionais realizadas, foram avaliados diferentes componentes construtivos, tendo os seus resultados interpretados de modo a identificar possíveis contradições entre as duas normas. Os resultados apresentados mostram que 2/3 dos níveis obtidos não conduzem para resultados equivalentes entre as normativas, em especial na condição do consumo de aquecimento para o RTQ-R (INMETRO, 2010) e as temperaturas observados no dia típico de inverno da NBR 15.575 (ABNT, 2013), que apresentaram diferenças em todas as análises. Os autores apontam como possíveis causas para este cenário a limitação na representação do dia típico para o que estabelece a NBR 15.575 (ABNT, 2013) em um *software* de simulação dinâmica como é o caso do *EnergyPlus*. Também discutem que a falta de carga interna e a simplificação do modelo de ventilação contribuem com as discordâncias entre as estratégias de avaliação.

Se observa, portanto, que a norma de desempenho vigente no Brasil (NBR 15.575), apresenta fragilidades observadas nos trabalhos acima, sendo o RTQ-R o que mais se aproxima em termos de garantia das condições de conforto térmico de usuários e menor demanda de energia, embora também apresente fragilidades, como apontam os estudos aqui apresentados.

## 4.3. Produções com a temática do conforto térmico dos ocupantes

Para a temática do conforto térmico dos ocupantes (CT) de edifícios residenciais, o retorno das buscas estabelecidas pelo protocolo de revisão permitiu com que fosse possível realizar recortes geográficos para a apresentação destas produções.

Escandón et al. (2019) apresentam um estudo quantitativo a respeito do impacto das mudanças climáticas no conforto térmico dos edifícios residenciais em Sevilha, Espanha. Como abordagem para realização do trabalho, foram definidos edifícios residenciais dentro de um recorte temporal de construção. O

trabalho utiliza a simulação computacional através do *EnergyPlus* (v. 8.0.0) como estratégia para avaliar o percentual de horas em desconforto e as condições de temperatura no inverno e no verão. Em seguida, é proposta e aplicada uma estratégia de predição climática para 2050.

Como destaque dos resultados apresentados, as condições preditivas para 2050 apontam um aumento de 1,5°C para o inverno e de 4,0°C para verão nas condições externas de Sevilha, impactando consequentemente nas condições internas dos edifícios. No cenário crítico, observou-se um aumento médio de 36,6% das horas de desconforto no verão, além da possibilidade de temperaturas externas máximas de 47,5°C neste mesmo período do ano.

Já Pineda, Suárez e Salas (2017) apresentam resultados de um estudo de monitoramento durante um ano (a cada 30min) de edificações residenciais em Sevilha da década de 1950. Os edifícios selecionados foram monitorados de abril de 2013 a março de 2014, registrando mais de 563 mil entradas de temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, ponto de orvalho, direção e velocidade do vento.

Os resultados para o verão mostram que as temperaturas externas à noite (de 15 a 20°C), não representaram variações internas expressivas (0,5 a 2,5°C), gerando, por vezes, sobreaquecimento. O mesmo ocorreu para o inverno, onde as variações externas ao longo do dia (de 5 a 10°C) não ocorreram de forma abrupta internamente, apresentando variações menores (de 1,5 a 3°C). Observa-se, portanto, que as condições de conforto térmico dos usuários foram mantidas através da baixa oscilação para os períodos frios do ano, contudo as condições internas no verão precisam passar por modificações, seja através de *retrofit* para estratégia de ventilação e envelope, ou do comportamento dos usuários quanto ao uso das esquadrias.

Blázquez, Suárez e Sendra (2017) apresentam a elaboração de um protocolo considerando uma avaliação de diagnóstico com o objetivo de fornecer diretrizes para *retrofit* com foco na redução do consumo de energia e na melhora das condições internas de conforto em edifícios de 1950 a 1980 na cidade de Córdoba, Espanha, com base no *Horizon* 2020 (H2020), , programa de financiamento para pesquisas promovido pela UE. Os autores definiram inicialmente três modelos de edifícios residenciais e avaliaram a temperatura do ar, umidade relativa, emissão de $CO_2$ e consumo de energia, de modo a estabelecer o protocolo proposto a partir destas avaliações conforme o H2020. Os resultados obtidos mostram que os modelos residenciais avaliados atingiram níveis baixos pelo protocolo H2020 à medida que as demandas energéticas para resfriamento nos três modelos foram pelo menos quatro vezes maiores do que o limite, indicando problemas destes edifícios no período de verão. Quanto à emissão de $CO_2$, os resultados ficaram entre 37,5 e 49,9 (Kg $CO_2/m^2$), indicando também uma emissão de poluentes acima do que o protocolo estabelece como recomendado.

A partir das projeções climáticas do IPCC para 2050, Suaréz et al. (2018) buscaram avaliar as condições de uma edificação unifamiliar, também na cidade de Córdoba. A estratégia metodológica passou por avaliar a temperatura operativa interna, a temperatura externa, emissão de $CO_2$ e a demanda energética com base no IPCC a partir de um estudo de caso. Os resultados apresentados destacam o aumento de 1,5°C no inverno e 6,0°C no verão na temperatura externa para 2050. As condições internas de temperatura também variaram, apresentando um aumento de 3,5°C na temperatura operativa interna para o mesmo período.

O que se projeta, a partir dos dados apresentados, é um aumento no desconforto térmico por calor entre 14 e 40% e por frio entre 8 e 17%. Os autores salientam que mesmo em um edifício de alto padrão construtivo é possível observar a partir deste cenário de projeção para 2050, que o aumento das temperaturas externas impactará nas condições de conforto, sobretudo para o verão.

Em um estudo sobre o modelo adaptativo de avaliação no clima mediterrâneo considerando o conforto térmico dos usuários e o consumo energia, Bienvenido-Huertas, Sánchez-García e Rubio Bellido (2020) definiram um estudo de caso, no qual foi realizado o monitoramento das condições internas de temperatura do ar e a temperatura externa. Em seguida, foram realizadas simulações considerando um arquivo *.epw (*EnergyPlus Weather File*) atual e dois cenários prognósticos para 2050 e 2080 tendo como base os limites preconizados pelo modelo adaptativo da ASHRAE 55 para definição dos cenários de avaliação.

Dos resultados apresentados, o uso dos *setpoints* de temperatura do modelo adaptativo auxiliou na redução do consumo de energia para o contexto atual, representando uma redução de até 57% no consumo total de energia. Para análises das condições futuras, o modelo adaptativo não se mostrou uma boa estratégia, visto que o aumento nas condições externas de temperatura impôs a necessidade de uma revisão dos limites estabelecidos pelo modelo, já que as condições de conforto tendem a mudar com base nas variações externas.

Sánchez-García et al. (2019) propuseram um modelo de conforto térmico baseado na EN 15251, visando manter as condições de conforto dos usuários e reduzir o consumo de energia em edificações residenciais espanholas. Para tanto foram definidos os modelos da análise sendo um chamado de estático e outros dois considerados pela normativa.

A partir destes modelos foram definidas propriedades térmicas e hipóteses de configuração, em seguida foram feitas considerações sobre as condições atuais, para 2050 e para 2080. Os resultados mostram que a utilização de um modelo preditivo será necessária considerando os valores obtidos para projeções futuras. Os autores salientam também que a constante revisão dos *setpoints* para conforto térmico em cada contexto climático se mostra fundamental para redução das necessidades energéticas e da manutenção das condições, criticando os dados estáticos da atual normativa europeia.

Sánchez-García et al. (2018) realizaram através da ASHRAE 55 (2013) e da EN 15251 (2007) a avaliação de conforto térmico em edifícios de apartamento na zona climática espanhola B4. O trabalho consistiu na coleta dos dados dos edifícios escolhidos em Sevilha, considerando as características construtivas bem como a operação e funcionamento. Em seguida foi feito um monitoramento das condições térmicas dos edifícios, por fim são feitas duas análises: uma para condição presente e outra para o futuro.

Mostra que as condições de conforto da ASHRAE 55 para 80% de aceitabilidade apresentam um comportamento mais restritivo do que a EN 15251 (2007), embora não suficiente para garantir o atendimento das condições de conforto na predição realizada para 2080, onde as temperaturas operativas internas chegaram a atingir 40°C no verão, estabelecendo um constante período de desconforto no verão de Sevilha.

É possível destacar a preocupação dos autores com o que é estabelecido pelas normativas vigentes. Para além, os estudos com foco de projeção indicam um cenário alarmante para condições de conforto no futuro próximo em diferentes regiões de Espanha.

Foster et al. (2016), com base no aumento das construções de moradia com baixa energia, observaram a lacuna emergente no conhecimento em relação à saúde e bem-estar dos ocupantes, conforto térmico e QAI. O trabalho consistiu no monitoramento de cinco casas passivas no clima escocês, considerando a qualidade do ar interior, umidade e emissão de poluentes e temperatura operativa interna como os parâmetros de avaliação. A metodologia do trabalho consistiu no acompanhamento durante o ano de 2013 através do *Solar Powered Wireless Sensor Technology* (WIST), uma tecnologia que permite acompanhar via WiFi as condições de temperatura interna, umidade e emissão de poluentes, além de possibilitar o acompanhamento do padrão de uso das esquadrias.

Como resultados os autores apontam que a questão do comportamento dos usuários é o ponto fundamental para melhoria das condições das cinco edificações avaliadas, principalmente no que diz respeito à utilização dos seus sistemas. A baixa QAI e a maior emissão de poluentes observadas na avaliação durante o uso do edifício estão relacionadas, segundo os autores, ao uso indevido do edifício passivo por aspectos culturais, assim como pelo dimensionamento de projeto inadequado da estratégia mecânica com recuperação de calor (sistema MVHR) observado em alguns casos, comprometendo também as condições internas de conforto térmico.

Lavafpour e Sharples (2015), discutem sobre a definição ideal para inclinação da fachada sul (maior incidência solar no hemisfério norte) de modo a criar uma estrutura auto protetiva em Londres. O trabalho consistiu na escolha de um projeto representativo, modelado em *DesignBuilder* e avaliação preliminar do desempenho, em um estudo piloto inicial sobre as condições observadas, assim como a definição das condições climáticas de simulação, avaliação dos potenciais riscos de sobreaquecimento, propostas de mudança na fachada e discussão sobre as variações na geometria para o desempenho do edifício.

As observações testadas se aprofundaram nas condições que interferem no sobreaquecimento. Os autores salientam que para o clima de Londres, uma inclinação de 115° nas fachadas combinada com um uso consciente por parte dos usuários quanto ao uso dos dispositivos de sombreamento, permite com que as condições críticas de verão apontadas pelas simulações sejam mitigadas.

Para o clima do Chile, Pérez-Fargallo, Rubio-Bellido e Gallego-Maya (2018), realizaram a avaliação de conforto térmico a partir da condição de isolamento de HIS. O método baseou-se na identificação de um edifício residencial unifamiliar avaliado por meio da ASHRAE 55 (2017) para 80 e 90% de aceitabilidade, assim como o CAS/EN 15251 (2007), buscando avaliar a influência do isolamento térmico no desempenho deste edifício.

O estudo assume como pressuposto que as HIS não irão obter uma redução no consumo de energia apenas com o isolamento o envelope, já que, exceto em situações extremas de frio e/ou calor, trata-se de edificações sem climatização artificial. Desta forma, os resultados apresentados mostram o quanto de isolamento foi necessário para melhorar as condições de conforto dos usuários.

A adoção de 40mm de isolamento no piso, parede e cobertura proporcionaram ao edifício uma condição de conforto de 87,1% (CAS) e 80,5% (ASHRAE), além da redução de situações de superaquecimento. Em contrapartida, é estabelecido um aumento de 58,2% dos custos de investimento em isolamento térmico, o que pode ser considerado um problema no caso de HIS.

### 4.4. Produções com a temática do risco de formação de fungos filamentosos, condensação e qualidade do ar interior (QAI)

Sobre as pesquisas que analisaram o risco de formação de fungos filamentosos, condensação e QAI, cabe o destaque de que as *strings* de busca utilizadas não retornaram produções relacionadas ao contexto climático brasileiro..

Hidalgo-Betanzos et al. (2018) avaliaram as condições de umidade relativa de apartamentos para identificar eventuais problemas na taxa de renovação do ar que contribuam para formação de fungos. Quanto ao processo metodológico, foi realizado um monitoramento da temperatura interna e da umidade relativa, assim como as temperaturas próximas às superfícies de duas fachadas e duas pontes térmicas. Também foi realizada uma análise termográfica.

As três etapas foram analisadas simultaneamente, a fim de comparar os fenômenos observados entre os experimentos. A partir dos resultados, os autores apontam que adequar os padrões de uso da ventilação e do aquecimento, identificar e reduzir as pontes térmicas mais frias e a instalação de composições externas de isolamento nas superfícies, podem contribuir com a redução das condições de umidade interna no norte da Espanha (zona climática D1), reduzindo assim a formação de fungos filamentosos e melhorando a qualidade do ar.

Feijó-Muñoz et al. (2019) elaboraram um estudo a respeito da estanqueidade em edifícios residenciais na Espanha. Os autores definiram 129 edificações representativas na região continental da Espanha para avaliar as características destes prédios quanto a estanqueidade, considerando as trocas de ar, o fluxo do ar e as perdas e ganhos por infiltração.

Nos resultados, os autores apontam que as pontes térmicas causadas pela interrupção das camadas externas nas curvas dos fechamentos foram entendidas como um dos principais problemas das edificações espanholas quanto à possibilidade de condensação. Além disso, através de análise por câmera térmica, é possível observar que as regiões próximas das janelas e próximas das juntas (pontes) são os pontos com maiores perdas das edificações, apresentando taxa média de 0,62 para o expoente de escoamento.

Krzaczek e Tejchman (2014) realizaram um trabalho de investigação numérica sobre a emissão de $CO_2$ interna e a QAI em edificações de baixo padrão energético na Alemanha, apresentando o comportamento dos fenômenos físicos durante estas interações. Foram avaliados 22 edifícios com forma idêntica localizados em Leipzig, neles foram feitas análises numéricas com CFD usando modelos 2D a fim de interpretar as condições interna de sub-espaços identificados nessas edificações chamados de zonas de respiração.

O estudo aponta que o posicionamento da exaustão influencia diretamente na quantidade de $CO_2$ dentro da zona térmica. Também é informado, como esperado, que as maiores concentrações de $CO_2$ foram identificadas nas avaliações com janelas fechadas. Por fim, o trabalho relata que a concentração de $CO_2$ não é o único fator prejudicial à QAI, os efeitos dos comportamentos dos usuários com o ambiente influenciam na qualidade do ar, necessitando para tanto analisar também as questões de umidade relativa do ar e a formação de fungos filamentosos.

Singh, Mahapatra e Teller (2014) elaboraram um estudo sobre a QAI na cidade de Liége, na Bélgica, observando as condições adequadas de renovação do ar. O método adotado considerou as condições externas e internas de 20 edifícios por meio de simulação, além da avaliação de 85 edifícios através de sensores (*data loggers*). Através da análise sensorial, o trabalho buscou observar os padrões de uso e comportamento dos usuários quanto ao uso da edificação e, principalmente, quanto à renovação do ar. Por fim, os autores propõem uma discussão considerando estes dois cenários, comparando os resultados obtidos com os dados identificados na literatura.

Quanto aos resultados, o fato de as edificações escolhidas terem sido construídas na segunda metade do século XX, porém com reformas recentes e, por vezes, desconexas com as boas práticas construtivas para garantir as condições internas de qualidade do ar, a variação da amostra se tornou um ponto de inflexão para realização da análise.

Contudo, o estudo do desempenho térmico das casas monitoradas mostra que os ocupantes das casas preferem temperaturas diferentes no quarto e na sala de estar. Foi verificado também que a sala de estar em todas as casas monitoradas é mais ativa, com temperaturas preferencialmente mais altas. O estudo também relata que situações de sobreaquecimento no verão foram identificadas, assim com uma grande quantidade de ocupantes que utilizam aquecedores portáteis nos períodos frios. Embora a maioria aponte a questão da qualidade do ar de suas edificações como "moderado", os dados obtidos e os padrões observados contrapõem as situações relatadas.

## 5. RESULTADOS

A partir do recorte final das 48 produções, foi possível evidenciar as combinações de variáveis analisadas. . Neste sentido, predominam as análises com duas ou três variáveis testadas de forma combinada. Como variáveis em destaque, a temperatura Interna avaliada como um dos principais indicadores das condições de habitabilidade interna nas edificações residenciais analisadas parece como uma constante na maioria das produções, seguida pela análise energética. As questões de umidade relativa e emissão de gases poluentes também aparecem em combinação com as demais variáveis de forma recorrente, porém não avaliadas simultaneamente em um estudo.

O método por simulação computacional, foi encontrado como o mais recorrente nas investigações analisadas, seguido pela medição sensorial, simulação e análise sensorial, medição com termo-higrômetro, análise numérica (2D) e a combinação de simulação com medições em termo-higrômetro. Cabe um destaque para o papel da simulação termoenergética no processo de avaliação destes edifícios, à medida que este processo metodológico foi maior do que duas vezes a segunda alternativa metodológica, indicando uma concentração deste procedimento como alternativa para avaliar simultaneamente diferentes variáveis que interferem no desempenho do edifício.

Neste sentido, a partir do recorte das RSL, é possível destacar o predomínio das produções nos periódicos Sustainability (22,5%), Energies (22,5%) e Buildings (10,0%), as três da mesma editora (MDPI). Em relação à distribuição geográfica dos artigos, a Espanha (37,5%) e Brasil (12,5%) tiveram um maior número de publicações selecionadas.

Foi possível verificar que a discussão acadêmica, tanto na Europa como no Brasil, é bastante relevante e que tem dois vieses diferentes: na Europa, com um parque edificado mais consolidado, as pesquisas são voltadas para *retrofit* e a melhora energética, enquanto a produção brasileira está discutindo e avaliando o que as normativas propõem.

A partir do conjunto de produções elencadas através da RSL, pode-se observar que as análises apresentadas consideram as diferentes variáveis de interesse como critérios de avaliação. Contudo, os trabalhos não apresentam simultaneamente todos os aspectos de avaliação, de modo que seja possível compreender os fenômenos térmicos e físicos, relacionando as condições internas do ar e da umidade relativa no que diz respeito ao conforto térmico dos usuários e QAI, da demanda energética quanto a IUE e da emissão de gases poluentes através da análise da pegada de carbono. A questão da formação de fungos filamentosos observada nos estudos mostra uma predominância para análises observacionais aferidas através de análises térmicas em ambientes edificados ou por simulação computacional, tendo como apontamentos principais para o contorno da situação a redução das pontes térmicas e o aumento do nível do isolamento térmico. Destaca-se também, a impossibilidade de contraste entre as produções identificadas para esta temática entre o contexto europeu e brasileiro, visto que a revisão sistemática não identificou em sua execução o debate sobre a temática em produções nacionais ou acerca do clima brasileiro.

## 6. CONCLUSÕES

Do objetivo principal do trabalho foram identificadas diferentes produções bibliográficas considerando o protocolo de RSL proposto, visando avaliar o papel de diferentes variantes no desempenho de habitações residenciais. A partir do conteúdo exposto e apresentado, além dos aspectos técnicos como elementos passíveis de contraponto entre os artigos lidas, é possível apontar a discussão conjunta dos elementos de avaliação como uma necessidade para o preenchimento da lacuna do conhecimento destacada e observada durante a revisão. Essa lacuna se evidencia à medida que o número de variáveis estudadas nas produções gira em torno de 2 ou 3, ou seja, a avaliação conjunta do comportamento das variantes elencadas não se apresenta nas produções identificadas por esta revisão.

Os resultados obtidos através desta revisão destacam a possibilidade de aplicação de um estudo conjunto entre as variáveis consideradas como elementos de avaliação, sendo essa uma contribuição com potencial de ineditismo e de grande valia para discussão acadêmica acerca do desempenho de edificações residenciais, ainda que o objetivo deste trabalho, cujo o questionamento sobre a possibilidade de avaliar de forma integrada características da envoltória de HIS observando a condensação superficial, risco de formação de fungos filamentosos, QAI, consumo energético não tenha sido respondido com os trabalhos identificados nesta revisão, à medida que em nenhum estudo elencado tenha considerado simultaneamente todos estes aspectos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**. Desempenho Térmico de Edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 15575**. 1: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. Atlanta, 2017.

BIENVENIDO-HUERTAS, D.; SÁNCHEZ-GARCÍA, D.; RUBIO-BELLIDO, C. Comparison of energy conservation measures considering adaptive thermal comfort and climate change in existing Mediterranean dwellings. **Energy**, v. 190, 2020.

BLÁZQUEZ, T.; SUÁREZ, R.; SENDRA, J. J. Protocol for assessing energy performance to improve comfort conditions in social housing in a Spanish Southern city. **International Journal of Energy Production and Management**, v. 2, n. 2, p. 140–152, 2017.

CARO, R.; SENDRA, J. J. Evaluation of indoor environment and energy performance of dwellings in heritage buildings. The case of hot summers in historic cities in Mediterranean Europe. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, 2020.

CARPIO, M. et al. Impact of the envelope design of residential buildings on their acclimation energy demand, CO2 emissions and energy rating. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 186, p. 387–398, 2014.

COMA, J. et al. Comparative analysis of energy demand and CO2 emissions on different typologies of residential buildings in Europe. **Energies**, v. 12, n. 12, 2019.

DOMÍNGUEZ-AMARILLO, S. et al. Effect of airtightness on thermal loads in legacy low-income housing. **Energies**, v. 12, n. 9, 2019.

CAS/EN. 15251: 2007: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. **British Standards Institution**, London, UK, 2007.

ESCANDÓN, R. et al. Predicting the impact of climate change on thermal comfort in a building category: The Case of Linear-type Social Housing Stock in Southern Spain. **Energies**, v. 12, n. 11, 2019.

FEIJÓ-MUÑOZ, J. et al. Airtightness of residential buildings in the Continental area of Spain. **Building and Environment**, v. 148, p. 299–308, 2019.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. De; ASSIS, E. S. De. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 183–200, 2017.

FOSTER, J. et al. Scottish Passive House: Insights into environmental conditions in monitored Passive Houses. **Sustainability** (Switzerland), v. 8, n. 5, 2016.

HIDALGO-BETANZOS, J. M. et al. Combination of diagnostic tools for the proper identification of moisture pathologies in modern residential buildings. **Infrastructures**, v. 3, n. 3, 2018.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia. **Requisitos Técnicos para a Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**, RTQ-R. Brasília: INMETRO, 2012.

KRZACZEK, M.; TEJCHMAN, J. Numerical investigations of effect of indoor air quality on thermal comfort in residential buildings. **Archives of Civil Engineering**, v. 60, n. 1, p. 91–121, 2014.

KUCZYŃSKI, T.; STASZCZUK, A. Experimental study of the influence of thermal mass on thermal comfort and cooling energy demand in residential buildings. **Energy**, v. 195, 2020.

LARSEN, T. S. et al. IEQ-Compass – A tool for holistic evaluation of potential indoor environmental quality. **Building and Environment**, v. 172, 2020.

LAVAFPOUR, Y.; SHARPLES, S. Summer thermal comfort and self-shading geometries in Passivhaus dwellings: A pilot study using future UK climates. **Buildings**, v. 5, n. 3, p. 964–984, 2015.

LORENZO-SÁEZ, E. et al. Energy efficiency and GHG emissions mapping of buildings for decision-making processes against climate change at the local level. **Sustainability** (Switzerland), v. 12, n. 7, 2020.

PÉREZ-FARGALLO, A.; RUBIO-BELLIDO, C.; GALLEGO-MAYA, I. Influence of adaptive comfort models in execution cost improvements for housing thermal environment in Concepción, Chile. **Sustainability** (Switzerland), v. 10, n. 7, 2018.

PINEDA, T. B.; SUÁREZ, R.; SALAS, J. J. S. Monitoring a Pre-Normative Multi-Family Housing Case-Study in a Mediterranean Climate. **Buildings** (2075-5309), v. 7, n. 1, 2017.

RODRIGUES, E. et al. How reliable are geometry-based building indices as thermal performance indicators?. **Energy Conversion and Management**, v. 101, p. 561-578, 2015.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1.

SÁNCHEZ-GARCÍA, D. et al. Adaptive comfort models applied to existing Dwellings in Mediterranean climate considering globalwarming. **Sustainability** (Switzerland), v. 10, n. 10, 2018.

SÁNCHEZ-GARCÍA, D. et al. Adaptive comfort control implemented model (ACCIM) for energy consumption predictions in dwellings under current and future climate conditions: A case study located in Spain. **Energies**, v. 12, n. 8, 2019.

SINGH, M. K.; MAHAPATRA, S.; TELLER, J. Relation between indoor thermal environment and renovation in liege residential buildings. **Thermal Science**, v. 18, n. 3, p. 889–902, 2014.

SOUTULLO, S. et al. How climate trends impact on the thermal performance of a typical residential building in Madrid. **Energies**, v. 13, n. 1, 2020.

SUÁREZ, R. et al. Impact of climate change: Environmental assessment of passive solutions in a single-family home in Southern Spain. **Sustainability** (Switzerland), v. 10, n. 8, 2018.

TUBELO, R. C. S.; RODRIGUES, L. T.; GILLOTT, M. A comparative study of the Brazilian energy labelling system and the passivhaus standard for housing. **Buildings**, v. 4, n. 2, p. 207–221, 2014.