

## SAÚDE E CONFORTO NO AMBIENTE CLIMATIZADO: O PAPEL DA VENTILAÇÃO NA QUALIDADE DO AR INTERNO

*Roberto Oranje<sup>1</sup>, Helene Mariko Ueno<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades – Universidade de São Paulo (EACH-USP). Contato: [oranjeroberto@usp.br](mailto:oranjeroberto@usp.br)

<sup>2</sup>Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências e Humanidades – Universidade de São Paulo (EACH-USP). Contato: [papoula@usp.br](mailto:papoula@usp.br)

**Resumo:** A relação entre edifícios climatizados e a prevalência de agravos à saúde em seus ocupantes é reconhecida. Analisando a literatura publicada sobre o tema, ventilação, filtragem, limpeza e manutenção de aparelhos de ar-condicionado são fatores críticos relacionados ao edifício, podendo ter impactos negativos à saúde quando há falhas na concepção ou operação dos sistemas prediais; esses mesmos fatores, se bem dimensionados, contribuem para a eficácia da ventilação e redução do risco. A falta de renovação de ar, devido à recirculação, é outro fator crítico, principalmente em condicionadores de ar divididos (sistema *split*). Faltam estudos para determinar o efeito do comportamento dos usuários em relação a aspectos de saúde e conforto no ambiente climatizado. Identifica-se o crescimento

da preferência pelo condicionamento de ar como solução de conforto, e uma menor tolerância térmica por parte de seus usuários frequentes. Ressalta-se a criticidade que estes aspectos podem adquirir num cenário de mudanças climáticas e desafios aos objetivos do desenvolvimento sustentável.

**Palavras-chave:** ventilação, saúde, qualidade do ar interno, objetivos de desenvolvimento sustentável.

## HEALTH AND COMFORT IN AIR-CONDITIONED ENVIRONMENTS THE IMPORTANCE OF VENTILATION FOR INDOOR AIR QUALITY

**Abstract:** There is an association between air-conditioned buildings and health symptoms prevalence among its occupants. This paper analyzes these issues by means of a literature review. Ventilation, filtration, cleaning and maintenance of air-conditioning units are identified as critical factors, and may have a negative impact on health, due to failures in their design or operation; these factors, if well designed and operated, contribute to an effective ventilation and health risk reduction. The lack of air renewal, due to recirculation, is also a critical factor, especially in split system air-conditioning units. More studies on user behavior are needed to determine the effect of user attitudes regarding health and comfort aspects in air-conditioned environments. A growing preference for air-conditioning as a comfort solution is identified, as well as a decrease in thermal tolerance among its frequent users. The criticality of these aspects in a climate change scenario and challenges to the sustainable development goals are emphasized.

**Keywords:** ventilation, health, indoor air quality. Sustainable Development Goals.

### 1. INTRODUÇÃO

Existe uma associação entre edifícios climatizados e a prevalência de agravos à saúde em seus ocupantes (BRIGHTMAN *et al.*, 2008; LUIZ *et al.*, 2009; MENDELL *et al.*, 2008). A relação entre a percepção de sintomas e a permanência dos ocupantes no edifício ficou caracterizada como síndrome do edifício doente, ou *sick building syndrome* (SBS). A causa dos sintomas é desconhecida, e a maioria não persiste após o ocupante deixar o edifício (BURGE, 2004).

A prevalência dos sintomas da SBS pode estar associada a fatores pessoais e individuais, como gênero, idade, condições de trabalho e fatores psicológicos, entre outros (STENBERG *et al.*, 1994). Dos fatores relacionados ao ambiente

construído, o principal aspecto relacionado aos sintomas dessa síndrome é a ventilação. A ventilação colabora para a percepção de bem-estar e é um item importante para o conforto do usuário. A falta de ventilação e de renovação do ar contribuem para a sensação de mal-estar e aumenta o risco à saúde (FISK; MIRER; MENDELL, 2009; FISK; BLACK; BRUNNER, 2012; SUNDELL *et al.*, 2011).

Conceitualmente, uma taxa de ventilação insuficiente pode ser resultado de parâmetros de projeto e normas que priorizam aspectos de conforto e eficiência energética sobre aspectos de saúde. Operacionalmente, uma ventilação insuficiente é determinada por problemas nos sistemas de ventilação e condicionamento de ar, como falhas na limpeza e manutenção, ou filtragem inadequada. Estes problemas podem deteriorar a qualidade do ar interno (QAI) no ambiente. Por isso, indicadores de QAI devem ser monitorados regularmente. Os problemas mencionados podem ser agravados por falta de conhecimento técnico do usuário final no caso de condicionadores de ar divididos (sistema *split*).

O comportamento deste usuário é variável e pode ser inesperado e imprevisível. A aceitação do condicionamento de ar como solução técnica depende de como ela é comunicada, e a compreensão do usuário sobre o funcionamento dos aparelhos de ar-condicionado (AC) determina como ele irá operar o equipamento. O usuário não decide apenas pelo critério técnico; é também um consumidor, tem expectativas e é influenciado por tendências de mercado.

Por isso, esta pesquisa se justifica pela necessidade de maior compreensão sobre o papel e comportamento do próprio usuário para propor ações de mitigação do risco à saúde no ambiente climatizado, não só nas condições atuais, mas olhando para cenários futuros, que abrangem mudanças do clima, e frequência de eventos extremos, como ondas de calor; aumento da permanência das pessoas em ambientes internos; expansão do uso de sistemas climatizados, com ênfase nos sistemas *split*; impactos desta expansão em termos de consumo de energia e recursos naturais, bem como emissões fugitivas (vazamento de gases refrigerantes).

O objetivo deste estudo é analisar como se configura a associação entre a ventilação em edifícios climatizados e a prevalência de agravos à saúde em seus ocupantes, e que fatores influenciam a exposição do usuário ao risco de agravos à saúde, incluindo o comportamento do usuário nos aspectos de saúde e conforto do ambiente climatizado. Por fim, deixamos reflexões sobre como a complexidade dessa temática desafia os objetivos do desenvolvimento sustentável.

## 2. METODOLOGIA

A revisão da literatura baseou-se em buscas pelos termos ventilação, saúde, qualidade do ar interno, nas bases de dados Web of Science, Scopus e PubMed. Foram incluídos somente artigos – incluindo os de revisão sistemática, sem restrição de período de publicação.

Após a leitura dos títulos dos artigos e, quando necessário, dos resumos, foram selecionados aqueles que abordavam uma associação entre ventilação e saúde. Os artigos foram classificados quanto ao aspecto abordado e agrupados em quadro descritivo.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização de síndrome do edifício doente está ligada a um conjunto diversificado de sintomas de saúde. Dentre os principais, destacamos: irritação nos olhos (LUIZ *et al.*, 2009; WOLKOFF, 2013), problemas respiratórios (MENDELL *et al.*, 2008; MYATT *et al.*, 2004; SEPPÄNEN; FISK, 2002), problemas alérgicos (GRAUDENZ, G. S. *et al.*, 2005), e problemas cardiovasculares (CHUANG *et al.*, 2017). A transmissão do SARS CoV-2 pelo ar também é abordada (CHIRICO *et al.*, 2020; CORREIA *et al.*, 2020; MORAWSKA; CAO, 2020).

O Quadro 1 estabelece tipos de associação entre ventilação e sintomas de saúde nos artigos analisados. Foram identificadas as seguintes classificações: i) existente – identifica uma associação, sem quantificar seu funcionamento; ii) ar-condicionado (AC) × ventilação natural (VN) – identifica uma prevalência maior de sintomas em edifícios climatizados artificialmente em relação a edifícios com ventilação natural; iii) não causal – menciona que não evidenciou uma relação causal na associação; iv) proporcional – quantifica a influência do nível de um dos termos sobre o outro; v) não comprovada – não identificou uma associação entre ventilação e saúde.

**Quadro 1** – Estudos sobre associação entre ar-condicionado (AC), ventilação natural (VN) e/ou qualidade do ar interno (QAI) e saúde em edifícios climatizados

<b>Autor, ano</b>	<b>Tipo de associação entre ventilação × saúde</b>	<b>Descrição</b>
(FISK, W. J., 2018)	Existente	Tendência de melhoras na saúde respiratória com incremento das taxas de ventilação.

(GHAFFARIANHOSEINI <i>et al.</i> , 2018)	Existente	Discute o conceito de edifícios saudáveis ( <i>healthy buildings</i> ).
(STENBERG <i>et al.</i> , 1994)	Existente	Prevalência de sintomas da SBS relacionada às características pessoais e psicossociais.
(WARGOCKI, 2013)	Existente	Taxas de ventilação em residências associadas a aspectos de saúde, como asma, alergias, obstrução de vias respiratórias e SBS.
(BARROZO COSTA; DA ROCHA BRICKUS, 2000)	Existente AC × VN	A prevalência de sintomas de SBS é maior em edifícios comerciais ( <i>shopping centers</i> ) com sistemas de AC em relação a lojas com VN.
(GRAUDENZ, G. S. <i>et al.</i> , 2005)	Existente AC × VN	Sugere prevalência maior de sintomas respiratórios em edifícios selados com AC do que em edifícios com ventilação natural.
(LUIZ <i>et al.</i> , 2009)	Existente AC × VN	A prevalência de sintomas respiratórios e cansaço no edifício selado com AC foi maior do que em edifícios com ventilação natural.
(SEPPÄNEN, O.; FISK, 2002)	Existente AC × VN	A prevalência de sintomas SBS em edifícios com AC foi maior do que em edifícios com ventilação natural.
(WARGOCKI <i>et al.</i> , 2002)	Existente AC × VN	Mostra uma associação robusta entre ventilação, conforto e saúde. Indica também associação entre ventilação e produtividade no trabalho.
(CARRER <i>et al.</i> , 2015)	Existente Não causal	Taxas de ventilação maiores mitigam problemas de saúde. Não foi definida uma taxa universal eficiente para todos os sintomas.
(LUONGO <i>et al.</i> , 2016)	Existente Não causal	De forma geral, é aceito que fatores ligados a sistemas de AC podem impactar a transmissão de patógenos pelo ar.
(MYATT <i>et al.</i> , 2004)	Existente Não causal	Relação entre quantidade de vírus em amostras de ar e o grau de ventilação sugere risco à saúde em edifícios com menor ventilação.
(APTE; FISK; DAISEY, 2000)	Existente inversamente proporcional	A concentração de CO <sub>2</sub> é um indicador <i>proxy</i> para avaliar concentração de poluentes e taxa de ventilação por pessoa.

(FISK; BLACK; BRUNNER, 2012)	Existente inversamente proporcional	Cálculo do benefício econômico do incremento da ventilação no local de trabalho, medido em maior produtividade e menor absenteísmo.
(FISK; MIRER; MENDELL, 2009)	Existente inversamente proporcional	Maior taxa de ventilação reduz a prevalência de sintomas SBS.
(LI <i>et al.</i> , 2021)	Existente inversamente proporcional	Estudos indicam que taxa suficientemente alta de ventilação reduz o risco de contágio por transmissão de vírus pelo ar.
(SEPPÄNEN, O. A., 1999)	Existente inversamente proporcional	Relaciona taxa de ventilação e concentração de CO <sub>2</sub> com SBS. Elenca fatores de confusão, como características pessoas, trabalho e QAI.
(SUNDELL <i>et al.</i> , 2011)	Existente inversamente proporcional	Associa taxas de ventilação baixa a incremento no risco de alergias, sintomas SBS e infecções respiratórias.
(MADDALENA <i>et al.</i> , 2015)	Não comprovada	Alterações na taxa de ventilação não tiveram efeito na percepção da QAI ou sintomas de SBS. Reduzir ventilação impacta produtividade.
(MENZIES <i>et al.</i> , 1993)	Não comprovada	A percepção e reporte de sintomas de SBS pelos usuários não foi alterada por incrementos na renovação de ar no ambiente.

### 3.1 Ventilação e saúde

De 20 artigos avaliados (Quadro 1), 18 identificam uma associação entre ventilação e prevalência de sintomas de saúde. Destes, 6 artigos estabelecem que o incremento na ventilação reduz a prevalência de sintomas. Para Fisk, Mirer e Mendell (2009) uma redução da taxa de ventilação de 10 L/s para 5 L/s acarreta um aumento de 23% na prevalência de sintomas, enquanto um incremento de 10 L/s para 25 L/s traz um decréscimo de 29%.<sup>1</sup> Apesar do reconhecimento geral de que níveis baixos de ventilação têm impacto negativo para a saúde, não existe consenso em relação a um valor mínimo universal que garanta a mitigação do risco para todos os sintomas estudados (CARRER *et al.*, 2015).

<sup>1</sup> L/s = litros por segundo – unidade para medir a taxa de ventilação no ambiente.

Nenhum dos artigos avaliados estabeleceu uma relação causal entre a quantidade de ventilação e a prevalência de sintomas. Essa incerteza decorre do próprio delineamento de estudos epidemiológicos observacionais, da premissa de que mais fatores contribuem para a prevalência de sintomas, e de fatores de confusão na definição do papel da ventilação nesta associação. Características pessoais (e.g. gênero idade, atopia, asma) e fatores psicossociais (e.g. estresse, carga de trabalho) e satisfação influenciam a percepção de saúde do usuário (STENBERG *et al.*, 1994). Outros fatores, como a idade do edifício, janelas fixas, *layout* e materiais de acabamento devem ser ponderados neste sentido (SEPPÄNEN, 1999).

Dois estudos não identificaram esta associação: Maddalena *et al.* (2015) concluíram que alterações na taxa de ventilação não tiveram efeito na percepção da qualidade do ar interno ou sintomas da síndrome do edifício doente. No entanto, a redução da ventilação prejudicou a produtividade, medida pelo desempenho em testes cognitivos. Menzies *et al.* (1993) também não identificaram uma associação, mas foram criticados pelo curto período do experimento, que pode ter prejudicado a percepção de sintomas de saúde (STENBERG *et al.*, 1994), e pelo uso de um método simplificado para cálculo da ventilação, utilizando a concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente. Mais do que uma crítica específica, os comentários espelham dificuldades comuns aos estudos sobre esta associação.

No contexto atual da pandemia por COVID-19, a ventilação é identificada como um meio para reduzir a transmissão do vírus pelo ar. Simulações computacionais confirmaram a eficácia da ventilação em encurtar o tempo de permanência de aerossóis (que podem conter o vírus) em suspensão no ambiente (JANKOVIC, 2020; LI *et al.*, 2021). Em situações de pouca ou nenhuma ventilação, os aerossóis podem permanecer no ambiente por horas. Os níveis atuais de filtragem não retêm estas partículas; foi analisada também a eficácia do uso de luz ultravioleta UVC para reduzir a transmissão do vírus (GARCÍA DE ABAJO *et al.*, 2020). Entretanto, ainda faltam estudos para determinar o papel do AC na transmissão pelo ar do SARS-CoV-2 (CHIRICO *et al.*, 2020; CORREIA *et al.*, 2020).

### 3.2 Ventilação natural × Ar-condicionado

Em comparação com edifícios com ventilação natural, edifícios com sistemas de condicionamento do ar (AC) apresentam uma prevalência maior de sintomas da síndrome do edifício doente (GRAUDENZ *et al.*, 2005; WARGOCKI *et al.*, 2002), que pode ser da ordem de 30% a 200% maior (SEPPÄNEN; FISK, 2002). Este resultado pode ser atribuído a características como recirculação do ar, acúmulo de poluentes em componentes do sistema, ou proximidade da tomada de

ar externo (TAE) de fontes de poluição externa, como veículos, coletores de lixo etc. (MENDELL *et al.*, 2008). Nem sempre é fácil identificar estas características; em um dos estudos analisados, apesar de ter sido medido um nível mais alto de poluentes no edifício com ventilação natural (VN), a prevalência de sintomas foi maior no edifício selado e com condicionamento de ar (LUIZ *et al.*, 2009).

Fatores psicológicos também colaboram para este resultado. Edifícios com janelas fixas, que não permitem abertura, tendem a ter uma prevalência maior de sintomas devido à insatisfação do usuário por não dispor desta opção de controle individual das condições ambientais. A sensação de isolamento em relação ao ambiente externo também pode influenciar o relato de sintomas (SEPPÄNEN; FISK, 2002). A memória térmica influencia a avaliação do usuário: pessoas com maior tempo de exposição a ambientes com AC são mais predispostas a preferir esta solução para seu conforto; e pessoas com pouca ou nenhuma exposição a ambientes com AC tendem a preferir a ventilação natural (CÂNDIDO *et al.*, 2010; RAMOS *et al.*, 2020; VECCHI; CÂNDIDO; LAMBERTS, 2016).

O uso contínuo do AC pode acarretar uma tolerância menor em relação ao estresse térmico devido às temperaturas altas no ambiente externo (KRÜGER; DRACH; BRÖDE, 2015). O choque térmico ao sair de um edifício climatizado para um ambiente externo com temperaturas altas (ou vice-versa) pode fazer mal à saúde de seus ocupantes (BARROZO COSTA; DA ROCHA BRICKUS, 2000).

### 3.3 Limpeza e manutenção de sistemas de ar-condicionado

Alguns fatores podem confundir a identificação do papel da ventilação em relação à prevalência de sintomas de saúde ou impactar a eficácia da ventilação, expondo o usuário a risco de saúde.

A ventilação é responsável por diluir e extrair poluentes, como o gás carbônico expirado pelos usuários, poeira, mofo, compostos orgânicos voláteis e patógenos. Componentes do sistema de condicionamento de ar, como dutos, filtros e bandejas de drenagem, podem acumular estes poluentes e reduzir a eficácia da ventilação, independentemente do porte do equipamento ou sistema.

Uma pesquisa em 150 residências com ventilação mecânica na Holanda constatou que em 66% das casas a manutenção ocorria em intervalos maiores do que um ano; contaminação por pó e sujeira nos dutos foi registrada em 77% das casas, apesar de terem sido recentemente construídas (BALVERS *et al.*, 2012). O estudo não menciona, mas é possível que essa sujeira seja ainda do processo de construção. Num estudo comparativo com 97 edifícios climatizados, Mendell *et al.* (2008) identificaram aumento na prevalência de sintomas quando a programação

de limpeza e manutenção é anual em vez de semestral, e incremento significativo na prevalência de sintomas nos edifícios em que não havia uma programação de manutenção preventiva definida. Em outro caso, verificou-se redução na prevalência de sintomas SBS em ocupantes de um edifício após uma intervenção para limpeza geral e renovação do sistema de AC (GRAUDENZ *et al.*, 2004). Existe, portanto, uma relação entre ventilação e exposição a poluentes; se houver maior controle das fontes de poluição, as taxas requeridas de ventilação poderão ser menores (WARGOCKI, 2013). Limpeza e manutenção são recursos essenciais para atingir este objetivo.

### 3.4 Filtragem

Outro recurso para o controle de fontes de poluição no ambiente interno é a filtragem do ar. Os poluentes acumulados nos sistemas de condicionamento do ar (AC) ou dispersos no ambiente podem ter como origem os usuários do edifício e suas atividades (CO<sub>2</sub>, odores, tabagismo, patógenos), a presença de compostos orgânicos voláteis (COV) nos materiais de construção utilizados, aspectos de qualidade do ar interno (umidade, mofo), e o ar externo (combustão de veículos, poeira, poluição atmosférica). O efeito para a saúde foi estudado: a filtragem do ar com filtro fino de alta eficiência (*high efficiency particulate arrestance* – HEPA) foi associada à redução de sintomas de asma (MCDONALD *et al.*, 2002); a filtragem de material particulado PM<sub>2,5</sub> foi associada à saúde cardiovascular em adultos (CHUANG *et al.*, 2017).

A filtragem não tem ação sobre a natureza do poluente, mas retém partículas de acordo com seu tamanho. Historicamente, a necessidade de filtragem é associada à função ou processo que ocorre no edifício. As classes de filtros mais finos da norma brasileira NBR 16401-3, por exemplo, são exigidas em bibliotecas, museus e gráficas. A norma ISO 16890, publicada em 2016, questiona este paradigma, e analisa classes de filtragem de acordo com seu efeito para a saúde humana. Esta norma considera a filtragem de partículas de poeira (PM<sub>10</sub>=10 µm), partículas inaláveis/respiráveis (PM<sub>2,5</sub>= 2,5µm) e partículas que podem entrar na corrente sanguínea (PM<sub>1</sub>=1 µm).

Especificar filtros mais eficientes (finos) tem impacto de custo, por necessidade de troca mais frequente, e por demandar mais energia do sistema de AC para manter a mesma taxa de ventilação. No entanto, o custo estimado devido a problemas de saúde em decorrência da exposição a um ambiente mais poluído chega a ser cinco vezes maior do que o custo da manutenção regular e adequada (BEN-DAVID; WARING, 2018).

### 3.5 Recirculação

Sistemas centrais de condicionadores de ar (AC) captam ar externo e o insuflam no ambiente regulando sua temperatura e umidade. Parte desse ar será exaurido, mas outra parte volta ao ambiente como ar recirculado (ar de retorno), visando à maior eficiência energética do sistema. No caso de AC divididos (sistema *split*), é comum que haja somente recirculação, sem captação de ar externo. A recirculação é um fator que confunde a definição do papel da ventilação, por falta de clareza quanto à terminologia (se a taxa de ventilação inclui ou não o ar recirculado), redundando em dificuldades metodológicas para o próprio cálculo da taxa de ventilação (LUONGO *et al.*, 2016; PERSILY, 2016).

A recirculação acarreta um aumento na concentração de CO<sub>2</sub>, de acordo com a ocupação e atividade humana no ambiente num dado momento. Um estudo em 33 edifícios de escritórios no Brasil mostrou que 9% deles não tinham qualquer dispositivo para captação de ar externo, e 21% apresentavam problemas, devido a tomadas de ar externo muito pequenas ou parcialmente bloqueadas (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2018).

Em condicionadores de ar divididos (sistema *split*), o problema de recirculação é crônico e inerente ao produto. Um experimento na Indonésia buscou contestar que a captação de ar externo por infiltração através de frestas é suficiente para atender à taxa mínima de ventilação (BIMARIDI *et al.*, 2017; PUTRA *et al.*, 2017). A medição indicou que essa captação de ar através das frestas atende apenas 7% do volume de ar necessário. Em outro experimento, dormitórios equipados com condicionadores divididos tipo *split* ou condicionadores compactos de janela alcançaram em média, respectivamente, uma taxa de ventilação por infiltração de 1,8 L/s e 3,4 L/s, ambas muito abaixo do mínimo estabelecido por norma em Hong Kong – 7,5 L/s por pessoa (LIN; DENG, 2003). Ainda outro estudo acompanhou o uso de condicionadores divididos tipo *split* em oito quitinetes em Hong Kong, e comparou a um período de controle sem uso do condicionador. No ambiente climatizado foi medida uma concentração de CO 312% maior e uma concentração de CO<sub>2</sub> 86% maior (CHEUNG; JIM, 2019).

Filragem, limpeza e manutenção são fatores que podem interagir com a ventilação no sentido de obter uma melhora na qualidade do ar interno e diminuir o risco à saúde. A recirculação de ar torna estes fatores mais críticos e exige um desempenho melhor de cada um deles.

Reduzir ou eliminar a recirculação de ar tem sido sugerido como medida de precaução ao risco de transmissão do SARS-CoV-2 pelo ar. Entretanto, implica o

aumento de consumo de energia em sistemas centrais de AC, principalmente em climas mais quentes. Em ambientes climatizados com condicionadores divididos tipo *split*, implica abrir as janelas, a não ser que se faça uma reforma no imóvel para dotar o ambiente de uma tomada de ar externo independente.

### 3.6 Gerenciamento da operação

Para gerenciar a qualidade do ar interno durante a operação e uso de condicionadores de ar, visando reduzir riscos à saúde, é importante medir e acompanhar em tempo real alguns indicadores principais, como concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade, permitindo ajustes rápidos e detecção de possíveis problemas (SAINI; DUTTA; MARQUES, 2020). Apesar da concentração de CO<sub>2</sub> não ser representativa para outros poluentes, é um indicador que evidencia a interação entre ocupação e atividade humana, taxa de ventilação e recirculação, e de poluentes. Existem dispositivos em desenvolvimento e já comercializados que permitem monitoramento remoto destes indicadores em tempo real, por meio da internet das coisas (ESQUIAGOLA *et al.*, 2018).

### 3.7 Definição de normas para taxas de ventilação

Os artigos analisados identificam que, em parte, os problemas nos sistemas de condicionamento do ar são originados na concepção de projeto. Assume-se que estes projetos estão aderentes às normas existentes, mas frequentemente limitados aos níveis mínimos prescritos. Partindo deste princípio norteador, as normas vigentes podem configurar um fator de risco ao usuário em relação à prevalência de sintomas de saúde associados à falta de ventilação.

Contudo, os resultados dos estudos analisados são insuficientes para elaboração de novas normas ou regulamentos técnicos, dadas as incertezas em relação aos estudos. Existe um movimento em direção à incorporação de aspectos de saúde na definição de normas de ventilação. O *framework* proposto subordina a ventilação ao controle de fontes de poluição, para que haja uma sinergia de esforços (CARRER *et al.*, 2018).

A definição de taxas de ventilação começou a ser estudada a partir da segunda metade do século XIX, com foco no controle de odores de bioefluentes humanos. Este é apenas um dos poluentes encontrados no ambiente interno, mas serve de base para normas vigentes (PERSILY, 2006). Incluir aspectos de saúde na definição de normas esbarra na própria definição de saúde: se considerarmos a definição da Organização Mundial de Saúde (OMS) de 1948, bem-estar e saúde se confundem.

Nesse sentido, se propiciar conforto (medido pela satisfação dos usuários) reduz riscos à saúde, apresenta-se como hipótese a ser testada (WARGOCKI, 2013).

### 3.8 Comportamento do usuário

Culturalmente, a maioria dos brasileiros ainda prefere a ventilação natural (VN) ao ar-condicionado (AC). Isto se deve a uma aceitabilidade térmica maior, mas também está ligado ao hábito: a preferência por VN é maior entre pessoas que não estudam, vivem ou trabalham em ambientes com AC (CÂNDIDO *et al.*, 2010). Indivíduos que permanecem mais de oito horas num ambiente climatizado preferem esta solução de conforto. O hábito condiciona ainda a percepção: 60% dos usuários expostos ao AC consideram 26 °C uma temperatura inaceitável, contra 20% dos usuários não expostos ao AC. Gênero também influencia a preferência: 75% dos homens preferem AC, contra 21% das mulheres (VECCHI; CÂNDIDO; LAMBERTS, 2016).

Do ponto de vista do usuário como consumidor, o AC não atende apenas o conforto fisiológico, mas também aspectos sociais e psicológicos. Ele evita o suor corporal e torna confortável o uso de vestimentas mais formais (GOU; LAU; LIN, 2017). Ele permite dormir com edredom no clima equatorial da Malásia (JAAFAR; CROXFORD, 2010). É um símbolo de *status* para seu usuário, mas acaba impondo uma homogeneização do conforto e perda de cultura local, em termos de estratégias adaptativas ou mesmo de convivência no ambiente externo (ARSENAULT, 1984; HEALY, 2008).

Em nível individual, é necessário entender que informação o usuário recebe para operar o equipamento de AC. Se os controles são ambíguos quanto à sua função, e não mostram mudança no ambiente quando são operados, é provável que não sejam utilizados para fazer o sistema funcionar como planejado. Se o usuário não entendeu a função do termostato, ou não irá utilizá-lo, limitando-se a ligar e desligar o equipamento, ou indicará uma temperatura bem mais baixa, pensando que assim a condição de conforto será atingida em menos tempo (KARJALAINEN; KOISTINEN, 2007; PEFFER *et al.*, 2011).

O comportamento humano é complexo. Hábitos pregressos, contexto cultural, consciência, atitude, crenças, valores, são construtos que fundamentam o comportamento do usuário na interação com sistemas de AC (HEYDARIAN *et al.*, 2020). Simulações tradicionais conferem um caráter determinístico em relação à operação, assumindo uma programação e temperatura fixas a partir das quais o usuário ligará o AC. Medições de campo indicaram que o comportamento do usuário é estocástico, com programações e temperaturas de acionamento variáveis

(YAO, 2018). A maioria dos estudos comportamentais enfoca os efeitos das atitudes do usuário em relação ao desempenho energético do edifício, quantificando a lacuna entre a eficiência planejada e a medida com o edifício em operação. Faltam estudos sobre como estas atitudes podem afetar as condições de saúde e conforto no ambiente climatizado.

### **3.9 Cenários futuros**

Algumas tendências que se desenham para o futuro poderão impactar a associação entre ventilação, prevalência de agravos à saúde, formas de uso e ocupação de ambientes fechados e influir nos fatores de risco apontados.

A temperatura deve subir, exigindo maior resiliência dos edifícios e seus sistemas para manter uma condição de conforto. Uma simulação calculou que a demanda de resfriamento irá dobrar na cidade de Belém, PA, até 2080 (INVIDIATA; GHISI, 2016). O estudo prevê ainda que a esta altura não será viável manter edifícios com VN, devido às condições extremas do clima. Cidades dependentes de AC se tornarão mais vulneráveis a panes num setor elétrico provavelmente sobrecarregado (LUNDGREN-KOWNACKI *et al.*, 2018). Além disso, a permanência em ambientes com AC pode impactar a capacidade do ser humano de (re) aclimação ao calor, tornando o usuário menos tolerante e mais dependente da climatização artificial. Embora não tenha sido tratada aqui, a preocupação com eventos climáticos extremos inclui ondas de frio e a eventual necessidade de elevar a temperatura em ambientes fechados. Do ponto de vista técnico, os desafios são equivalentes em relação à qualidade do ar interno, gasto energético, conforto térmico e riscos à saúde.

Medidas de adaptação e reforma em edifícios para aumentar sua resiliência em relação a cenários futuros envolvem não apenas o desenvolvimento de soluções técnicas, mas o questionamento de padrões uniformes de conforto atuais, promovendo a adaptação ao clima, em vez do controle sobre ele (CHAPPELLS; SHOVE, 2005). Para edificações novas, pode-se pensar em projetos mais adequados e adaptáveis, tanto ao frio quanto ao calor, e que considerem também padrões de uso e ocupação em relação a riscos de doenças transmissíveis pelas vias respiratórias.

Nesse cenário, atingir as metas dos objetivos da sustentabilidade torna-se mais desafiador: será necessário encontrar soluções para lidar com eventos climáticos extremos (ODS-13), com eficiência energética (ODS-7) e segurança à saúde (ODS-3). Contribuir para cidades sustentáveis (ODS-11) requer sistemas de produção e consumo conscientes (ODS-12), que dependem do comportamento do consumidor.

## 4. CONCLUSÕES

Identifica-se uma associação entre a ventilação e a prevalência de agravos à saúde em edifícios climatizados. Existe uma proporcionalidade nesta associação, ou seja, níveis baixos de ventilação têm impacto negativo para a saúde, e o aumento da ventilação pode acarretar uma redução da prevalência dos sintomas. Não foi possível definir uma taxa mínima de ventilação que fosse universal.

Edifícios com condicionamento de ar apresentam uma prevalência maior de sintomas, quando comparados com edifícios com ventilação natural. Isto decorre não só das características destes edifícios, mas de como são percebidos pelo usuário. Insatisfação com a falta de autonomia para, por exemplo, abrir uma janela, ou o choque térmico ao sair de um edifício climatizado para um ambiente externo com temperaturas altas, pode predispor o usuário a ter uma avaliação negativa. Em contrapartida, cada vez mais pessoas permanecem boa parte do dia em ambientes climatizados, tornando-se defensores e dependentes deste tipo de solução de conforto.

Alguns fatores impactam a eficácia da ventilação, expondo o usuário a risco de saúde. Filtragem, limpeza e manutenção podem ter um efeito negativo, quando há falhas na sua concepção ou operação; podem também colaborar para a efetividade e eficiência da ventilação. A recirculação do ar é um fator até certo ponto inevitável, e inerente a condicionadores de ar divididos (sistema *split*). Nesse sentido, é importante que as normas de ventilação sejam revistas, incluindo aspectos de saúde e olhando para a ventilação de forma mais abrangente.

Em relação ao comportamento do usuário, faltam estudos para determinar o efeito das atitudes em relação a aspectos de saúde e conforto. Culturalmente, a preferência pelo ar-condicionado cresce à medida que as pessoas passam mais tempo em ambientes climatizados, mesmo que isso acarrete uma menor tolerância e capacidade de aclimação. O uso social do ar-condicionado leva a uma monotonia térmica, à perda de valores locais e de convivência no ambiente externo. É reconhecida uma lacuna entre o comportamento esperado e o que acontece na realidade. Essa lacuna é bastante estudada do ponto de vista do desempenho energético resultante, mas ainda não suficientemente sob a ótica da saúde e do conforto.

O presente estudo busca contribuir nesse sentido, reforçando a importância do tema e alertando para o fato de que estas questões tendem a tornar-se mais críticas num cenário de mudanças climáticas. A solução para esta questão não são edifícios saudáveis, em contraposição a edifícios doentes. É uma dicotomia

desnecessária e improdutiva. Visando um ambiente saudável, será mais produtivo questionar a uniformidade dos padrões de conforto atuais, numa visão holística que respeite diferenças pessoais, regionais e climáticas. Mais do que cumprir metas dos objetivos de desenvolvimento sustentável, é necessário compatibilizar soluções. Do contrário, atingir algumas metas pode implicar retrocessos em outras, o que não é sustentável no longo prazo.

## REFERÊNCIAS

APTE, Michael G.; FISK, William J.; DAISEY, Joan M. Associations between indoor CO<sub>2</sub> concentrations and sick building syndrome symptoms in U.S. office buildings: An analysis of the 1994-1996 BASE study data. **Indoor Air**, v. 10, n. 4, p. 246–257, 2000.

ARSENAULT, Raymond. The End of the Long Hot Summer: The Air Conditioner and Southern Culture. **The Journal of Southern History**, v. 50, n. 4, p. 597–628, 1984.

BALVERS, Jaap; BOGERS, Rik; JONGENEEL, Rob; VAN KAMP, Irene; BOERSTRA, Atze; VAN DIJKEN, Froukje. Mechanical ventilation in recently built Dutch homes: Technical shortcomings, possibilities for improvement, perceived indoor environment and health effects. **Architectural Science Review**, v. 55, n. 1, p. 4–14, 2012.

BARROZO COSTA, Maria De Fatima; DA ROCHA BRICKUS, Leila Souza. Effect of ventilation systems on prevalence of symptoms associated with “sick buildings” in Brazilian commercial establishments. **Archives of Environmental Health**, v. 55, n. 4, p. 279–283, 2000.

BEN-DAVID, T.; WARING, M. S. Interplay of ventilation and filtration: Differential analysis of cost function combining energy use and indoor exposure to PM<sub>2.5</sub> and ozone. **Building and Environment**, v. 128, n. August 2017, p. 320–335, 2018.

BIMARIDI, A.; PUTRA, K. D.; DJUNAEDY, E.; KIROM, M. R. Assessment of Outside Air Supply for Split AC system – Part A: Affordable Instrument. **Procedia Engineering**, v. 170, p. 248–254, 2017.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L.M. Mapping failures in energy and environmental performance of buildings. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 476–485, 2018.

BRIGHTMAN, H. S.; MILTON, D. K.; WYPIJ, D.; BURGE, H. A.; SPENGLER, J. D. Evaluating building-related symptoms using the US EPA BASE study results. **Indoor Air**, v. 18, n. 4, p. 335–345, 2008.

BURGE, P. S. Sick building syndrome. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 61, n. 2, p. 185–190, 2004.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Cooling exposure in hot humid climates: Are occupants “addicted”? **Architectural Science Review**, v. 53, n. 1, p. 59–64, 2010.

CARRER, P.; DE OLIVEIRA FERNANDES, E.; SANTOS, H.; HÄNNINEN, O.; KEPHALOPOULOS, S.; WARGOCKI, P. On the development of health-based ventilation guidelines: Principles and framework. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 7, 2018.

CARRER, P.; WARGOCKI, P.; FANETTI, Annaclara; BISCHOF, W.; DE OLIVEIRA FERNANDES, E.; HARTMANN, T. *et al.* What does the scientific literature tell us about the ventilation-health relationship in public and residential buildings? **Building and Environment**, v. 94, n. P1, p. 273–286, 2015.

CHAPPELLS, H.; SHOVE, E. Debating the future of comfort: Environmental sustainability, energy consumption and the indoor environment. **Building Research and Information**, v. 33, n. 1, p. 32–40, 2005.

CHEUNG, P. K.; JIM, C. Y. Impacts of air conditioning on air quality in tiny homes in Hong Kong. **Science of the Total Environment**, v. 684, p. 434–444, 20 Sep. 2019.

CHIRICO, F.; SACCO, A.; BRAGAZZI, N. L.; MAGNAVITA, N. Can air-conditioning systems contribute to the spread of SARS/MERS/COVID-19 infection? Insights from a rapid review of the literature. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 17, p. 1–11, 2020.

CHUANG, H. C.; HO, K. F.; LIN, L. Y.; CHANG, T. Y.; HONG, G. B.; MA, C. M. *et al.* Long-term indoor air conditioner filtration and cardiovascular health: A randomized crossover intervention study. **Environment International**, v. 106, n. 250, p. 91–96, 2017.

CORREIA, G.; RODRIGUES, L.; GAMEIRO DA SILVA, M.; GONÇALVES, T. Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission. **Medical Hypotheses**, v. 141, n. April, p. 109781, 2020.

ESQUIAGOLA, J.; MANINI, M.; AIKAWA, A.; YOSHIOKA, L.; ZUFFO, M. Monitoring Indoor Air Quality by using IoT Technology. 2018. **Proceedings of the 2018 IEEE 25th International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing, INTERCON 2018** [...]. [S.l.]: IEEE, 2018. p. 2018–2021. <https://doi.org/10.1109/INTERCON.2018.8526380>.

FISK, W. J. How home ventilation rates affect health: A literature review. **Indoor Air**, v. 28, p. 473–487, 2018.

FISK, W. J.; MIRER, A. G.; MENDELL, M. J. Quantitative relationship of sick building syndrome symptoms with ventilation rates. **Indoor Air**, v. 19, n. 2, p. 159–165, 2009.

FISK, W. J.; BLACK, D.; BRUNNER, G.. Changing ventilation rates in U.S. offices: Implications for health, work performance, energy, and associated economics. **Building and Environment**, v. 47, n. 1, p. 368–372, 2012.

GARCÍA DE ABAJO, F. J.; HERNÁNDEZ, R. J.; KAMINER, I.; MEYERHANS, A.; ROSELL-LLOMPART, J.; SANCHEZ-ELSNER, T.. Back to Normal: An Old Physics Route to Reduce SARS-CoV-2 Transmission in Indoor Spaces. **ACS Nano**, v. 14, n. 7, p. 7704–7713, 2020.

GHAFFARIANHOSEINI, A.; ALWAER, H.; OMRANY, H.; GHAFFARIANHOSEINI, A.; ALALOUCH, C.; CLEMENTS-CROOME, D.; TOOKEY, J. Sick building syndrome: are we doing enough? **Architectural Science Review**, v. 61, n. 3, p. 99–121, 2018.

GOU, Z.; LAU, S. Y. S.; LIN, P. Understanding domestic air-conditioning use behaviours: Disciplined body and frugal life. **Habitat International**, v. 60, p. 50–57, 2017.

GRAUDENZ, G. S.; OLIVEIRA, C. H.; TRIBESS, A.; MENDES, C.; LATORRE, M. R.D.O.; KALIL, J. Association of air-conditioning with respiratory symptoms in office workers in tropical climate. **Indoor Air**, v. 15, n. 1, p. 62–66, 2005.

GRAUDENZ, G. S.; KALIL, J.; SALDIVA, P. H.; LATORRE, M. do R. D. O.; MORATO-CASTRO, F. F. Decreased Respiratory Symptoms after Intervention in Artificially Ventilated Offices in São Paulo, Brazil. **Chest**, Brazil, v. 125, n. 1, p. 326–329, 2004.

HEALY, Stephen. Air-conditioning and the “homogenization” of people and built environments. **Building Research and Information**, v. 36, n. 4, p. 312–322, 2008.

HEYDARIAN, A.; MCILVENNIE, C.; ARPAN, L.; YOUSEFI, S.; SYNDICUS, M.; S., Marcel *et al.* What drives our behaviors in buildings? A review on occupant interactions with building systems from the lens of behavioral theories. **Building and Environment**, v. 179, p. 106928, April 2020.

INVIDIATA, A.; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy and Buildings**, Brazil, v. 130, n. 2016, p. 20–32, 15 Oct. 2016.

JAAFAR, M. F. Z. bin; CROXFORD, B. Adapting to technology: The case of air conditioning use in Malaysian Homes. 2010. **Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort, WINDSOR 2010 [...]**. p. 9–11. 2010.

JANKOVIC, L. Experiments with self-organised simulation of movement of infectious aerosols in buildings. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 12, 2020.

KARJALAINEN, S.; KOISTINEN, O. User problems with individual temperature control in offices. **Building and Environment**, v. 42, n. 8, p. 2880–2887, 2007.

KRÜGER, E.; DRACH, P.; BRÖDE, P. Implications of air-conditioning use on thermal perception in open spaces: A field study in downtown Rio de Janeiro. **Building and Environment**, v. 94, p. 417–425, 2015.

LI, Y.; QIAN, H.; HANG, J.; CHEN, X.; CHENG, P.; LING, H.; *et al.* Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. **Building and Environment**, v. 196, p. 107788, February 2021.

LIN, Z.; DENG, S. The outdoor air ventilation rate in high-rise residences employing room air conditioners. **Building and Environment**, v. 38, n. 12, p. 1389–1399, 2003.

LUIZ, J.; RIOS, de M.; LAERTE, J.; GIODA, A.; YARA, C.; RADLER, F. *et al.* Symptoms prevalence among office workers of a sealed versus a non-sealed building: Associations to indoor air quality. **Environment International**, Brasil, v. 35, n. 8, p. 1136–1141, 2009.

LUNDGREN-KOWNACKI, K.; HORNYANSZKY, E. D.; CHU, T. A.; OLSSON, J. A.; BECKER, P. Challenges of using air conditioning in an increasingly hot climate. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, n. 3, p. 401–412, 2018.

LUONGO, J. C.; FENNELLY, K. P.; KEEN, J. A.; ZHAI, Z. J.; JONES, B. W.; MILLER, S. L. Role of mechanical ventilation in the airborne transmission of infectious agents in buildings. **Indoor air**, v. 26, n. 5, p. 666–678, 2016.

MADDALENA, R.; MENDELL, M. J.; ELISEEVA, K.; CHAN, W. R.; SULLIVAN, D. P.; RUSSELL, M. et al. Effects of ventilation rate per person and per floor area on perceived air quality, sick building syndrome symptoms, and decision-making. **Indoor Air**, v. 25, n. 4, p. 362–370, 2015.

MCDONALD, E.; COOK, D.; NEWMAN, T.; GRIFFITH, L.; COX, G.; GUYATT, G. Effect of air filtration systems on asthma: A systematic review of randomized trials. **Chest**, v. 122, n. 5, p. 1535–1542, 2002.

MENDELL, M. J.; LEI-GOMEZ, Q.; MIRER, A. G.; SEPPÄNEN, O.; BRUNNER, G. Risk factors in heating, ventilating, and air-conditioning systems for occupant symptoms in US office buildings: The US EPA BASE study. **Indoor Air**, v. 18, n. 4, p. 301–316, 2008.

MENZIES, R.; TAMBLYN, R.; FARANT, J.-P.; HANLEY, J.; NUNES, F.; TAMBLYN, R. The effect of varying levels of outdoor-air supply on the symptoms of sick building syndrome. **The New England Journal of medicine**, v. 328, n. 12, 1993.

MORAWSKA, L.; CAO, J. Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. **Environment International**, v. 139, April, p. 105730, 2020.

MYATT, T. A.; JOHNSTON, S. L.; ZUO, Z.; WAND, M.; KEBADZE, T.; RUDNICK, S.; MILTON, D. K. Detection of airborne rhinovirus and its relation to outdoor air supply in office environments. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, v. 169, n. 11, p. 1187–1190, 2004.

PEFFER, T.; PRITONI, M.; MEIER, A.; ARAGON, C.; PERRY, D. How people use thermostats in homes: A review. **Building and Environment**, v. 46, n. 12, p. 2529–2541, 2011.

PERSILY, A. K. Field measurement of ventilation rates. **Indoor Air**, v. 26, n. 1, p. 97–111, 2016.

PERSILY, A. What we think we know about ventilation. **International Journal of Ventilation**, v. 5, n. 3, p. 275–290, 2006. <https://doi.org/10.1080/14733315.2006.11683745>.

PUTRA, K. D.; DJUNAEDY, E.; BIMARIDI, A.; KIROM, M. R. Assessment of Outside Air Supply for Split AC System Part B: Experiment. **Procedia Engineering**, v. 170, p. 255–260, 2017.

RAMOS, G.; LAMBERTS, R.; ABRAHÃO, K. C.F.J.; BANDEIRA, F. B.; BARBOSA TEIXEIRA, C. F.; BRITO DE LIMA, M. et al. Adaptive behaviour

and air conditioning use in Brazilian residential buildings. **Building Research and Information**, Brasil, , p. 1–16, 2020.

SAINI, J.; DUTTA, M.; MARQUES, G. Indoor air quality prediction systems for smart environments: A systematic review. **Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments**, v. 12, n. 5, p. 433–453, 2020.

SEPPÄNEN, O. A. Association of ventilation rates and CO<sub>2</sub> concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. **Indoor Air**, v. 9, n. 4, p. 226–252, 1999.

SEPPÄNEN, O.; FISK, W. J. Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers. **Indoor Air**, v. 12, n. 2, p. 98–112, 2002.

STENBERG, B.; ERIKSSON, N.; HÖÖG, J.; SUNDELL, J.; WALL, S. The sick building syndrome (SBS) in office workers. a case-referent study of personal, psychosocial and building-related risk indicators. **International Journal of Epidemiology**, v. 23, n. 6, p. 1190–1197, 1994.

SUNDELL, J.; LEVIN, H.; NAZAROFF, W. W.; CAIN, W. S.; FISK, W. J.; GRIMSRUD, D. T.; et al. Ventilation rates and health: Multidisciplinary review of the scientific literature. **Indoor Air**, v. 21, n. 3, p. 191–204, 2011.

VECCHI, R. de; CÂNDIDO, C. M.; LAMBERTS, R. Thermal history and comfort in a Brazilian subtropical climate: a “cool” addiction hypothesis. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 7–20, 2016.

WARGOCKI, P. The Effects of Ventilation in Homes on Health. **International Journal of Ventilation**, v. 12, n. 2, p. 101–118, 2013.

WARGOCKI, P.; SUNDELL, J.; BISCHOF, W.; BRUNDRETT, G.; FANGER, P. O.; GYNTELBERG, F. et al. Ventilation and health in non-industrial indoor environments: Report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN). **Indoor Air**, v. 12, n. 2, p. 113–128, 2002.

WOLKOFF, P. Indoor air pollutants in office environments: Assessment of comfort, health, and performance. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 216, n. 4, p. 371–394, 2013.

YAO, J. Modelling and simulating occupant behaviour on air conditioning in residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 175, August, p. 1–10, 2018.