



Documento de Posição da ASHRAE sobre a Concentração de Dióxido de Carbono em Ambiente Interno

Traduzido sob licença da ASHRAE

Aprovado pelo Conselho de Administração da ASHRAE
2 de fevereiro de 2022

Expira
2 de fevereiro de 2025

LISTA DE COMITÊ

O Documento de Posição da ASHRAE sobre a Concentração de Dióxido de Carbono em Ambiente Interno foi desenvolvido pelo Comitê de Estudo do Documento de Posição da Concentração de Dióxido de Carbono em Ambiente Interno da ASHRAE, tendo Andrew Persily como seu presidente.

Andrew Persily, PhD

National Institute of Standards and
Technology Gaithersburg, Maryland, USA

Corinne Mandin, PhD

Scientific and Technical Centre for Building (CSTB)
Paris, France

William P. Bahnfleth, PhD, PE
The Pennsylvania State University
University Park, Pennsylvania,
USA

Chandra Sekhar, PhD
National University of Singapore
Singapore

Howard Kipen, MD, MPH
Rutgers University – School of Public Health
Piscataway, New Jersey, USA

Pawel Wargocki, PhD
Technical University of
Denmark Copenhagen,
Denmark

Josephine Lau, PhD
University of Nebraska
Lincoln, Nebraska, USA

Lan Chi Nguyen Weekes, PEng, ing.
La Cité College
Ottawa, Ontario, Canada

Os autores declaram não ter conflito de interesse relacionado ao assunto deste documento de posicionamento.

COMITÊ CONHECIDO

O presidente do Comitê de Saúde Ambiental da ASHRAE também atuou como membro da diretoria, em gestão anterior, atuando no Conselho de Administração.

Luke Leung, PE

Environmental Health Committee
Skidmore Owings & Merrill
Clarendon Hills, Illinois, USA

This position document was translated with permission in 2022 from the English edition published by ASHRAE © 2022. ASHRAE assumes no responsibility for the accuracy of the translation. To purchase the English-language edition, contact ASHRAE, 180 Technology Parkway, Peachtree Corners, GA 30092 USA, www.ashrae.org. Translation completed by:

Este documento de posição foi traduzido em 2022, com permissão da edição em inglês publicada pela ASHRAE ©2022. A ASHRAE não assume nenhuma responsabilidade pela precisão da tradução. Para adquirir a edição em inglês, entre em contato com ASHRAE, 180 Technology Parkway, Peachtree Corners, GA 30092 USA, www.ashrae.org. Tradução concluída por:

Christiane Lacerda, MBA

Co-chair Chapter Technology Transfer Committee
Rio de Janeiro, Brasil
ART CREA-RJ 2020220204949

HISTÓRICO DE DATAS DE REVISÃO/REAFIRMAÇÃO/RETIRADA

O seguinte resume as datas de revisão, reafirmação e retirada deste documento:

2/2/2022—BOD aprova o Documento de Posição intitulado Documento de Posição ASHRAE em Dióxido de Carbono em Ambiente Interno.

Nota: O Conselho de Tecnologia da ASHRAE e o comitê competente recomendam a revisão, reafirmação ou retirada a cada 30 meses.

Nota: Os documentos de posicionamento da ASHRAE são aprovados pelo Conselho de Administração e expressam a opinião da Sociedade sobre um assunto específico. O objetivo desses documentos é fornecer informações objetivas e confiáveis para pessoas interessadas em questões dentro da expertise da ASHRAE, particularmente em áreas onde tais informações serão úteis na elaboração de políticas públicas sólidas. O propósito é também servir como uma ferramenta educacional, esclarecendo a posição da ASHRAE para seus membros e profissionais em geral, avançando no estudo científico do setor de Aquecimento, Ventilação, Ar Condicionado e Refrigeração (AVAC-R).

CONTEÚDO

Documento de Posição da ASHRAE sobre a Concentração de Dióxido de Carbono em Ambiente Interno

SEÇÃO	PÁG.
RESUMO	1
SUMÁRIO EXECUTIVO	2
1. A QUESTÃO	4
2. HISTÓRICO	4
2.1 História do CO ₂ em Relação à Ventilação Predial e à QAI.....	4
2.2 Efeitos Cognitivos e à Saúde a Partir da Exposição ao CO ₂	5
2.3 Padrões e Regulamentos Existentes para Concentração de CO ₂ Interno	5
2.4 CO ₂ como um Indicador da QAI e de Taxas de Ventilação.....	6
2.5 Uso do CO ₂ Gerado Pelos Ocupantes como um Gás Marcador.....	6
2.6 Aumento das Concentrações de CO ₂ Externo	7
2.7 Limpeza de Ar Direcionada a Remoção Apenas de CO ₂	7
2.8 CO ₂ como Indicador de Risco de Transmissão Aérea de Doenças	7
APÊNDICE	9
A.1 História do CO ₂ em Relação a Ventilação Predial e QAI.....	9
A.2 Efeitos Cognitivos e a Saúde da Exposição ao CO ₂	9
A.3 Padrões e Regulamentos Existentes para Concentração de CO ₂ Interno	10
A.4 CO ₂ como um Indicador de QAI e Ventilação	11
A.5 Uso do CO ₂ Gerado Pelos Ocupantes como um Gás Marcador.....	12
A.6 Aumento das Concentrações de CO ₂ no Ar Externo.....	13
A.7 Limpeza do Ar Direcionada a Remoção Apenas de CO ₂	13
A.8 CO ₂ como Indicador de Risco de Transmissão Aérea de Doenças	14
REFERÊNCIAS	16

RESUMO

A concentração de dióxido de carbono (CO_2), em ambiente interno, desempenhou um papel fundamental nas discussões sobre ventilação e qualidade do ar interno (QAI) durante séculos. Essas discussões evoluíram para se concentrar no uso de CO_2 como métrica para a QAI, estimativa de taxas de ventilação usando CO_2 como gás marcador, controle de ventilação do ar com base nas concentrações de CO_2 e impactos do CO_2 nos ocupantes do edifício. Mais recentemente, a medição de CO_2 em ambientes fechados tem sido discutida no contexto da transmissão de doenças infecciosas pelo ar. No entanto, muitas aplicações de CO_2 em ambientes fechados não refletem a compreensão técnica da relação entre as concentrações internas de CO_2 , ventilação e QAI. Algumas aplicações apresentam falhas técnicas, levando a interpretações errôneas do significado da concentração do CO_2 no ambiente interno. O presente documento discute o papel do CO_2 no contexto de ventilação predial e da QAI, com base no longo envolvimento da ASHRAE com esses tópicos, assim como os interesses de seus membros e partes interessadas. As posições indicadas abordam o uso de CO_2 como métrica para avaliação da QAI e ventilação, os impactos do CO_2 nos ocupantes do edifício, a medição das concentrações de CO_2 , o uso de CO_2 para avaliar e controlar a vazão de ar exterior e a relação do CO_2 interno com a transmissão de doenças infecciosas pelo ar. Este documento recomenda pesquisas sobre os impactos do CO_2 na saúde, conforto e desempenho dos ocupantes e na aplicação de concentrações internas de CO_2 na operação do edifício, bem como no desenvolvimento de orientações sobre a medição e aplicação prática das concentrações de CO_2 .

SUMÁRIO EXECUTIVO

Embora as concentrações internas de CO₂ tenham sido consideradas no contexto da ventilação de edifícios e da QAI, o uso do CO₂ como um indicador de QAI e ventilação é comumente mal interpretado na indústria de Aquecimento, Ventilação, Ar Condicionado e Refrigeração (AVAC-R), na comunidade científica e entre o público em geral. Apesar de muitos esforços para resolver essa confusão em normas e documentos orientativos, publicações técnicas, apresentações em conferências e workshops, ainda há mal-entendidos significativos. Dado o envolvimento da ASHRAE na pesquisa de padrões de ventilação e QAI, este documento de posicionamento foi desenvolvido para esclarecer o papel do CO₂ interno e como ele pode ser usado para entender e gerenciar o desempenho do edifício. Aborda a história do CO₂ em relação à ventilação e à QAI, o que se sabe sobre os impactos cognitivos à saúde dos ocupantes do edifício pela exposição ao CO₂, normas e diretrizes existentes sobre concentrações de CO₂ em ambientes fechados, limitações no uso de CO₂ como indicador de ventilação e QAI, como o CO₂ pode ser usado para avaliar e controlar a ventilação do ar externo, aumentos e variações nas concentrações externas de CO₂, limpeza do ar interno para remover o CO₂ e o uso do CO₂ como indicador do risco de transmissão de doenças pelo ar em ambientes internos. Ele se concentra em ambientes internos não industriais destinados à ocupação humana, incluindo residências, escritórios, escolas e ambientes de transporte.

ASHRAE assume as seguintes posições:

- As concentrações de CO₂ interno não fornecem uma indicação geral da QAI, mas podem ser uma ferramenta útil nas avaliações da QAI se os usuários compreenderem as limitações dessas aplicações.
- As evidências existentes de impactos diretos do CO₂ na saúde, bem-estar, evolução do aprendizado, e desempenho no trabalho, comumente observadas, são inconsistentes e, portanto, não justificam atualmente mudanças nos padrões, regulamentos ou diretrizes de ventilação e QAI.
- O uso de medições de CO₂ interno para avaliar e controlar o risco de transmissão de doenças transmitidas pelo ar deve levar em conta a definição de risco aceitável, o tipo de espaço e sua ocupação, e as diferenças nas emissões, destino e transporte subsequentes de CO₂ e aerossóis infecciosos.
- As diferenças entre as concentrações de CO₂ no ar dos ambientes interno e externo podem ser usadas para avaliar as taxas de ventilação e distribuição de ar usando métodos analíticos de medição estabelecidos, mas resultados precisos exigem a validação de várias suposições e precisão nos valores analisados, para o input de dados.
- A precisão, a localização e a calibração do sensor são essenciais para extrair conclusões significativas das medições das concentrações de CO₂ no ambiente interno.
- As tecnologias de purificação do ar que removem apenas o CO₂ não necessariamente melhorarão a QAI geral e podem interferir nos sistemas que usam CO₂ para controle de ventilação ou monitoramento da QAI.

A ASHRAE recomenda pesquisas sobre os seguintes tópicos:

- A presença de CO₂ no ambiente interno como influenciador das respostas humanas a outros fatores ambientais, como conforto térmico e outros contaminantes transportados pelo ar;

- O desenvolvimento de métricas de avaliação da QAI que contemplem a ampla gama de contaminantes internos e as possíveis fontes geradoras destes;
- Impactos na saúde e no desempenho, de humanos de diferente faixa etária, sexo e estado de saúde, simulando um ambiente típico não-industrial em laboratório e também monitorando um ambiente padrão em campo, cobrindo uma gama diversificada de assuntos;
- Impactos fisiológicos de concentrações elevadas de CO₂, como alterações químicas no sangue e na respiração, incluindo aquelas associadas ao aumento de concentrações de CO₂ ao ar livre;
- A relação entre as concentrações internas de CO₂ e os riscos de transmissão aérea de doenças infecciosas;
- Medição de concentração de CO₂ interno, incluindo sensor de desempenho, sensor local para diferentes aplicações e sensores de CO₂ para desempenho e aplicação de baixo custo;
- O uso de CO₂ gerado pelos ocupantes como gás marcador para estimar as taxas de ventilação do edifício, incluindo abordagens que alcancem os efeitos transitórios e consideram sistemas de ventilação de múltiplos espaços e diferentes abordagens de distribuição de ar;
- Estratégias para Ventilação Controlada por Demanda (VCD) usando CO₂ e outros indicadores de ocupação, que supere as limitações das abordagens atuais e controle os contaminantes que não estão ligados à ocupação;
- Taxas de concentrações de CO₂ interno, ventilação e ocupação em diferentes tipos de edifícios de diferentes países para estabelecer dados de referência e entender melhor os impactos dos novos edifícios e sistemas de projeção, construções mais rígidas, estratégias avançadas de controle e operação, e outras mudanças nos edifícios.

A ASHRAE também recomenda as seguintes atividades:

- Desenvolvimento de orientações e padrões sobre medição de concentração de CO₂ em ambientes internos e seleção de sensores, especialmente para aplicações com VCD;
- Desenvolvimento de programas educacionais, sessões de conferências e workshops, e documentos de orientação para ajudar profissionais e pesquisadores a entender a aplicação de concentrações CO₂ interno como um indicador de ventilação e da QAI;
- Desenvolvimento de orientações sobre equipamentos e controles de sistemas AVAC-R, usando monitoramento de CO₂;
- Desenvolvimento de orientações sobre o uso de CO₂ como gás marcador para medição de taxas de ventilação predial e distribuição de ar.

1. A QUESTÃO

O CO₂ interno tem sido considerado no contexto de ventilação e da QAI por séculos. Essas discussões se concentraram em duas áreas: como as concentrações de CO₂ se relacionam com a percepção dos ocupantes dos bioefluentes humanos e outros aspectos de QAI, e o uso de CO₂ para avaliar as taxas de ventilação do ar externo. Embora esses tópicos tenham sido estudados por décadas, a interpretação errônea da concentração de CO₂ como um indicador de QAI e ventilação ainda ocorre na indústria de AVAC-R, na comunidade de pesquisa de QAI e no público em geral. Apesar de muitos esforços para resolver esta confusão em normas e documentos de orientação, publicações técnicas, apresentações em conferências e workshops, ainda persistem equívocos significativos.

Além da necessidade de esclarecer a relação da concentração CO₂ interno com a QAI e a ventilação, outra motivação para este documento de posicionamento é a necessidade de abordar resultados de pesquisas recentes sobre os impactos do CO₂ no desempenho humano em concentrações internas comumente observadas. Dadas as tendências do aumento das concentrações de CO₂ externo, preocupações adicionais foram expressas em relação a esses potenciais impactos na saúde e no desempenho humano. Além disso, várias organizações e órgãos governamentais emitiram normas e regulamentos para concentrações de CO₂ em ambientes fechados de locais de trabalho não industriais. Outrossim, existem preocupações há muito tempo em relação à precisão das medições de concentração de CO₂ em ambientes fechados, que são cada vez mais comuns, devido à disponibilidade e aplicação mais ampla de sensores mais baratos. O monitoramento de CO₂ interno também foi promovido como um indicador de ventilação no contexto do gerenciamento dos riscos de transmissão aérea de doenças. Finalmente, a maioria dessas aplicações de medições de CO₂ interno requer valores para a taxa na qual os ocupantes do edifício geram CO₂ e outros insumos, e a incerteza desses valores não foi bem caracterizada.

2. HISTÓRICO

Esta seção expande os tópicos da seção anterior em apoio às posições e recomendações deste documento. Especificamente, esta seção cobre o histórico do papel das concentrações de CO₂ interno no contexto de ventilação e da QAI, impactos cognitivos e na saúde devido a exposição ao CO₂, padrões e regulamentos existentes para concentrações internas de CO₂, CO₂ como indicador de QAI e ventilação, uso de CO₂ como gás marcador para estimar as taxas de ventilação, aumentos nas concentrações de CO₂ externo, limpeza do ar direcionada à remoção de CO₂ e CO₂ como indicador do risco de transmissão aérea de doenças. Mais detalhes sobre esses tópicos, incluindo referências extensas para as declarações aqui contidas, estão dispostos no apêndice deste documento de posicionamento.

2.1 História do CO₂ em Relação à Ventilação Predial e à QAI

O dióxido de carbono tem sido discutido no contexto da ventilação predial desde os séculos XVII e XVIII, quando o CO₂, ao invés da falta de oxigênio, era considerado a causa de efeitos fisiológicos atribuídos ao ar ruim. No século XIX, Pettenkofer afirmou que não era o CO₂, mas a presença de matéria orgânica da pele e dos pulmões humanos que causava os efeitos negativos atribuídos à má ventilação, propondo que o CO₂ não fosse considerado um causador de desconforto, mas sim um substituto para ar viciado. No início do século XX, estudos de Billings, Hermans, Flugge, Hill e outros mostraram que o calor combinado com cheiros em uma sala lotada era uma fonte de desconforto em salas mal ventiladas. O trabalho

de Lemberg e, mais tarde, Yaglou mostrou que a percepção dos ocupantes do odor corporal produzido por humanos poderia ser usada como critério para ventilação. A intensidade do odor percebida foi usada como critério para requisitos de taxa de ventilação de cerca de 7,5 a 10 L/s (15 a 20 cfm) por pessoa, e novamente o CO₂ não foi considerado um poluente, mas sim um indicador de odor corporal. Estudos nesta última parte do século XX por Fanger, Cain e Iwashita confirmaram os resultados de Yaglou e Lemberg. Esta pesquisa sobre a percepção do odor corporal foi usada para desenvolver os requisitos de ventilação nos padrões ASHRAE e do Comitê Europeu de Normas (CEN). A edição de 1989 do padrão de ventilação da ASHRAE, Standard 62 (posteriormente Standard 62.1), propôs um limite de CO₂ de 1000 ppm_v, mas isso foi removido das edições posteriores devido a sua má interpretação.

2.2 Efeitos Cognitivos e à Saúde a Partir da Exposição ao CO₂

Concentrações de CO₂ interno superiores a 1000 ppm_v têm sido associadas a aumentos de autorrelatos de sintomas inespecíficos, comumente referidos como sintomas da *Síndrome do Edifício Doente* (SED). No entanto, essas observações não foram controladas em conjunto com outros contaminantes ou parâmetros ambientais; portanto, tais concentrações elevadas de CO₂ provavelmente indicaram uma ventilação inadequada, fator este que aumentou as concentrações de todos os contaminantes que estavam sendo produzidos no ambiente interno. Mais recentemente, vários grupos exploraram os efeitos cognitivos da exposição de curto prazo (2 a 8 h) ao CO₂ puro em concentrações entre 600 e 5000 ppm_v. Alguns desses estudos demonstraram imparidade na concentração-dependência, um indicador de causa-efeito, porém outros estudos não mostraram quaisquer efeitos na cognição. Essas inconsistências requerem investigação adicional, incluindo o estudo dos mecanismos envolvidos. Esta pesquisa é prioritária devido à onipresença de concentrações internas de CO₂ superiores a 1000 ppm_v.

2.3 Padrões e Regulamentos Existentes para Concentração de CO₂ Interno

Muitos países propuseram valores de orientação obrigatórios ou sugeridos para o CO₂ interno em espaços não industriais. Deve-se notar que os fundamentos que sustentam esses padrões referenciais geralmente não são fornecidos junto aos mesmos. Esses limites internos de CO₂ tendem a ser da ordem de 1000 ppm_v, mas atingem cerca de 1500 ppm_v. Eles são geralmente destinados ao gerenciamento de preocupações genéricas em torno da QAI e de sintomas da SED. Diretrizes de valores de CO₂ no contexto da transmissão de doenças infecciosas por via aérea são discutidos na última seção sobre CO₂ como um indicador de risco de transmissão de infecção pelo ar.

Para locais de trabalho, o departamento de Administração de Saúde e Segurança Ocupacional dos Estados Unidos (OSHA) e o Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH) estabeleceram um valor limite médio ponderado no tempo de 5000 ppm_v para exposição em qualquer turno de trabalho de 8 horas durante uma semana de trabalho de 40 horas e 30.000 ppm_v como limite de exposição de curto prazo, ou seja, uma média ponderada de tempo de 15 minutos, que não deve ser excedida em nenhum momento da jornada de trabalho. A norma ASHRAE 62.1 não contém um valor limite para CO₂ interno desde a edição de 1989 da norma. A incompreensão das edições anteriores do padrão referencial continua a levar muitos a atribuir incorretamente um limite de 1000 ppm_v à ASHRAE.

2.4 CO₂ como um Indicador da QAI e de Taxas de Ventilação

Conforme observado anteriormente, o CO₂ interno tem se destacado nas discussões sobre ventilação e QAI durante séculos. Enquanto as concentrações de CO₂ estão relacionadas com a percepção de bioefluentes humanos e o nível de aceitação de seus odores, eles não são uma boa métrica geral para avaliar a QAI, pois muitas fontes contaminantes importantes não dependem do número de ocupantes presentes em um determinado ambiente. Por exemplo, contaminantes emitidos por materiais de construção, e aqueles que entram diluídos no ar exterior, não são correlacionados com as concentrações de CO₂. No entanto, se as taxas de ventilação do ar externo forem reduzidas em um prédio ocupado, as concentrações de CO₂ aumentarão junto com as concentrações de outros contaminantes gerados em ambientes fechados.

Uma concentração de CO₂ interno abaixo de 1000 ppm_v tem sido considerada um indicador de QAI aceitável, mas esta concentração é, na melhor das hipóteses, um indicador da taxa de ventilação do ar externo por pessoa. Este valor de 1000 ppm_v tem sido usado por décadas sem uma compreensão de sua base, que é ligada a percepção do odor do corpo humano pelos ocupantes do edifício. Este mal-entendido do significado de 1000 ppm_v resultou em muitas informações confusas e conclusões errôneas sobre a QAI e a ventilação predial. O uso de CO₂ como indicador de ventilação do ar deve refletir o fato de que os requisitos de ventilação do ar externo dependem do tipo de ambiente, da densidade de ocupantes e de suas características (por exemplo, idade, massa corporal e níveis de atividade). Portanto, uma única concentração de CO₂ não se aplica a todos os tipos de espaços e ocupações para avaliar a taxa de ventilação. Ademais, as concentrações de CO₂ podem variar significativamente dentro de um edifício ou ambiente, com base nos detalhes de como a ventilação e a distribuição de ar são implementadas.

As concentrações de CO₂ interno têm sido usadas há muito tempo para controlar as taxas de entrada de ar externo, usando o conceito de Ventilação Controlada por Demanda (VCD). Essa estratégia de controle reduz o uso de energia associado com superventilação durante os períodos de baixa ocupação e ajuda a garantir que os espaços sejam adequadamente ventilados com base em sua ocupação real. A VCD é, de fato, exigida por alguns padrões referenciais de eficiência energética, como o padrão ASHRAE/IES 90.1, e o monitoramento de CO₂ é um meio de implementação da VCD. Observe que esta estratégia de controle pode ser mais complexa de implementar em sistemas de ventilação para espaços múltiplos do que quando comparado com os requisitos de ventilação do padrão ASHRAE 62.1, e o projetista ainda deve considerar contaminantes não associados aos níveis de ocupação.

2.5 Uso do CO₂ Gerado Pelos Ocupantes como um Gás Marcador

A utilização da concentração de CO₂ no ambiente interno, como indicador da adequação das taxas de ventilação do ar externo, baseia-se na aplicação do CO₂ como um gás marcador. Métodos de diluição do gás marcador para medição das taxas de mudança do ar externo tem sido usada há décadas e está bem documentada em normas ASTM e ISO existentes. A aplicação de CO₂ com esses métodos simplesmente aproveita o fato de que as fontes produtoras desse gás marcador sejam os próprios os ocupantes do edifício. Métodos de gás marcador também existem para quantificar a distribuição do ar e a eficiência da ventilação nos ambientes internos, e o CO₂ pode ser usado para essas medidas também.

Existem dois métodos comuns de gás marcador para estimar as taxas de ventilação do ar externo usando CO₂: decaimento e estado estacionário, ambos mais adequados para

zonas individuais. Ambos os métodos são baseados nas seguintes suposições: a concentração do gás marcador é uniforme no espaço a ser monitorado, a concentração de CO₂ externo é constante durante o teste (ou monitorada em tempo real), e a taxa na qual os ocupantes geram CO₂ é conhecida e constante para o método de estado estacionário. As pessoas emitem uma taxa de CO₂ baseada no seu sexo, idade, massa corporal e nível de atividade, dessa forma, informações sobre os ocupantes são necessárias para estimar esses valores. Como estes são métodos de zona única, eles não levam em conta o fluxo de ar ou o transporte de CO₂ entre a zona de interesse e outras zonas de construções. Os erros de medição associados ao uso de uma abordagem de zona única em um espaço ou edifício que não é uma zona única com concentração uniforme são difíceis de quantificar, e esses erros são muitas vezes negligenciados na aplicação desses métodos.

2.6 Aumento das Concentrações de CO₂ Externo

As concentrações de CO₂ externo são relevantes para a consideração do CO₂ interno por duas razões. Primeiro, ao usar o VCD com base na concentração absoluta de CO₂ interno, e não na diferença interna-externa, a taxa de entrada de ar externo varia não apenas com a ocupação, mas também com a concentração de CO₂ externo. Em segundo lugar, se for estabelecido que a exposição ao CO₂ tem impactos cognitivos e na saúde, então o aumento das concentrações externas aumentará a prevalência desses impactos.

As concentrações médias globais de CO₂ são determinadas por uma complexa interação de fontes e forças motrizes. Em uma escala de tempo geológica, eles variaram muito, mas por centenas de milhares de anos, até o início do século XX, eles estavam abaixo de 300 ppm_v, excedendo pela primeira vez este valor, em 1912. Desde então, a concentração média de CO₂ ao ar externo vem aumentando, atingindo 420 ppm_v, em 2021. Sobreposto à tendência de aumento da concentração de CO₂ no ar externo, estão as variações diárias e sazonais, bem como as maiores variações nas áreas urbanas. Essas variações na concentração de CO₂ tornam importante a avaliação das concentrações do ar externo, ao monitorar o CO₂ no ambiente interno.

2.7 Limpeza de Ar Direcionada a Remoção Apenas de CO₂

Embora o CO₂ possa ser um indicador útil de ventilação e da QAI, em circunstâncias limitadas, as concentrações de CO₂ em ambientes internos não são necessariamente bem correlacionadas com outros poluentes importantes como vírus, mofo, formaldeído, monóxido de carbono, amianto e partículas transportadas pelo ar. O uso de tecnologias de purificação do ar para reduzir as concentrações de CO₂ interno, comumente observadas, podem resultar em uma expectativa injustificada de que outros poluentes internos não sejam uma preocupação. É fundamental não presumir que o tratamento do ar direcionado apenas à remoção ou conversão de CO₂, removerá outros contaminantes importantes do ar interno. Além disso, ao usar VCD à base de CO₂, o sistema de ventilação não funcionará conforme o esperado, se estiver utilizando um tratamento para remoção de CO₂.

2.8 CO₂ como Indicador de Risco de Transmissão Aérea de Doenças

Durante a pandemia de COVID-19, foram feitas recomendações para usar a medição de CO₂ interno como um indicador do risco de transmissão de infecções transmitidas pelo ar. A ASHRAE não recomenda uma concentração específica de CO₂ como métrica de risco de infecção, mas outras organizações emitiram limites recomendados ou obrigatórios de

concentração de CO₂. Muitos deles são baseados no CO₂ como indicador da taxa de ventilação externa por pessoa. As taxas de ventilação nas quais muitas dessas concentrações de CO₂ se baseiam podem ser derivadas de padrões de ventilação que se destinam a fornecer um perfil de QAI aceitável, mas não visam o controle da transmissão de doenças transmitidas pelo ar, exceto em ambientes de saúde. Recomendações ou requisitos para taxas de ventilação e concentrações de CO₂ para limitar a transmissão de doenças infecciosas foram sugeridos, mas são altamente incertos, devido aos muitos fatores que afetam o risco de infecção, incluindo diferenças entre patógenos.

À despeito dos demais contaminantes que possam estar presentes, concentrações mais altas de CO₂ correspondem a taxas mais baixas de ventilação do ar externo e um potencial risco de transmissão aérea aumentado. Embora as concentrações de CO₂ possam ser um indicador qualitativo útil, elas não capturam os impactos da ocupação reduzida, que é comum em muitos edifícios ou os impactos da filtragem de partículas e limpeza do ar, no risco de infecção. Outros fatores afetam a exposição e o risco de transmissão, como a quantidade de vírus no ar (que não necessariamente aumenta com o CO₂), a atividade respiratória e o tipo de patógeno. Observe também que, se a VCD baseada no CO₂ estiver sendo utilizada, uma ocupação menor reduzirá a taxa ventilação do ar externo e, presumivelmente, aumentará o risco de transmissão, razão pela qual várias organizações recomendaram desabilitar os sistemas VCD.

Em vez de usar a concentração de CO₂ interno como um indicador das taxas de ventilação desejadas, várias análises de risco de infecção pelo ar usaram o CO₂ como um indicador da “fração reinalada” do ar interno (a fração do ar inalado que foi exalado por outra pessoa no espaço). Se a incidência de uma doença transmitida pelo ar na população e a dose infecciosa do patógeno são conhecidos, esses métodos podem ser usados para estimar a porcentagem de novas infecções, para um determinado cenário. Esses métodos dependem de várias suposições sobre a distribuição de CO₂ interno e do aerossol infeccioso, da relativa significância dos diferentes modos de infecção, e a dose de resposta das relações que estão sujeitas a grandes incertezas. Consequentemente, eles podem não ser indicadores de risco altamente precisos.

APÊNDICE

Este apêndice contém uma expansão detalhada e completamente referenciada da discussão na seção Histórico deste documento de posição para leitores que desejam uma compreensão profunda desse material. Assim como a seção Histórico, este apêndice expande os tópicos identificados na seção A Questão em apoio às posições e recomendações neste documento: a história do papel das concentrações de CO₂ interno no contexto da ventilação predial e da QAI, impactos cognitivos e na saúde devido a exposição ao CO₂, normas e regulamentos existentes para concentrações de CO₂ interno, CO₂ como indicador de QAI e ventilação predial, uso de CO₂ como gás marcador para estimar as taxas de ventilação, aumentos nas concentrações de CO₂ externo, limpeza do ar direcionada a remoção apenas de CO₂, e CO₂ como indicador de risco de transmissão aérea de doenças.

A.1 História do CO₂ em Relação a Ventilação Predial e QAI

A visão geral da pesquisa inicial de CO₂ discutida neste parágrafo é fornecida por Wargocki (2021). O dióxido de carbono tem sido discutido no contexto da ventilação de edifícios desde o século XVII, quando Mayow propôs partículas igneo-aéreas produzidas por velas, como sendo causadoras da morte dos animais. No século XVIII, Lavoisier atribuiu os efeitos dessas partículas ao CO₂. Naquela época, o CO₂, em vez da falta de oxigênio, era considerado a causa dos efeitos fisiológicos atribuídos ao ar ruim e um indicador se o ar era antigo ou fresco. Dentro século XIX, Max Josef von Pettenkofer afirmou que não era CO₂, mas a presença de matéria orgânica da pele e pulmões humanos que causaram os efeitos negativos atribuídos a má ventilação. Ele e Saeltzer propuseram que o CO₂ não fosse considerado causa de desconforto, mas sim como um substituto para o ar viciado e um indicador de substâncias deletérias transportadas pelo ar vindas de origem desconhecida. Pettenkofer propôs 1000 ppm_v de CO₂ como marcador para ventilação inadequada dentro de casa e, 700 ppm_v, para quartos. No início do século XX, estudos de Billings, Hermans, Flugge, Hill e outros mostraram que o calor combinado com cheiros em uma sala lotada eram uma fonte de desconforto em salas mal ventiladas. Experimentos com aumento de CO₂ para 3% ou 4% e oxigênio caindo para 17% não mostraram efeitos negativos, exceto para respiração profunda e a necessidade de resfriamento. O trabalho de Lemberg, e mais tarde Yaglou, mostrou que a resposta ao odor corporal produzidos por humanos poderia ser usado como critério de ventilação. A intensidade do odor percebida foi usada como critério para requisitos de taxa de ventilação de cerca de 7,5 a 10 L/s (15 a 20 cfm) por pessoa (Persily 2015). O CO₂ não foi, novamente, considerado um poluente, mas sim um marcador de percepção de odor, uma vez que os humanos emitem CO₂ e bioefluentes em taxas relacionadas ao seu metabolismo. Estudos na última parte do século XX por Fanger, Cain e Iwashita, nos quais aceitabilidade da qualidade do ar percebida foi usado como critério para os requisitos de ventilação, confirmou os resultados de Yaglou e Lemberg. Esta pesquisa sobre a percepção do odor corporal foi usada para desenvolver os requisitos de ventilação dos padrões ASHRAE e do Comitê Europeu de Padronização (CEN). A edição de 1989 do padrão de ventilação da ASHRAE, Padrão 62 (posteriormente Padrão 62.1), tinha um limite de CO₂ de 1000 ppm_v, mas isso foi removido das edições posteriores, devido a uma comum má interpretação.

A.2 Efeitos Cognitivos e a Saúde da Exposição ao CO₂

O dióxido de carbono é considerado não tóxico em concentrações de até 5.000 ppm_v, o qual é o padrão federal nos EUA (Nível de Exposição Permissível) para locais de

trabalho definido pelo departamento de Administração de Saúde e Segurança Ocupacional (OSHA), conforme observado na seção posterior sobre padrões e regulamentações existentes. As diretrizes para a Estação Espacial Internacional e os submarinos dos EUA atualmente sugerem que as concentrações de CO₂ sejam mantidas em 4.000 a 5.000 ppm_v para reduzir a incidência de dores de cabeça (James e Zalesak 2013; Scully et al. 2019). Concentrações internas superiores a 1.000 ppm_v têm sido associadas a aumentos nos autorrelatos de sintomas inespecíficos, comumente referidos como sintomas da síndrome do edifício doente (SED), bem como diminuição do desempenho do trabalho de escritório e escolar, conforme discutido no parágrafo a seguir. Essas observações não foram controladas para outros contaminantes ou parâmetros ambientais; portanto, concentrações elevadas de CO₂ provavelmente serviram como indicadores de ventilação inadequada, a qual aumenta a concentração de todos os contaminantes com fontes internas de produção (Persily 2015; Lowther et al. 2021).

Vários grupos exploraram os efeitos da exposição aguda (duração de 2 a 8 h) ao CO₂ puro em concentrações entre 600 e 5000 ppm_v, conforme resumido por Fisk et al. (2019), Du et al. (2020), e Lowther et al. (2021). Cinco estudos relataram uma associação entre CO₂ e diminuição do desempenho cognitivo em concentrações na faixa de 1000 ppm_v (Satish et al. 2012; Allen et al. 2016, 2018; Kajtar e Herczeg 2012; Lee et al. 2022), e um foi ambíguo (Scully et al. 2019). Enquanto três desses estudos demonstraram imparidade na concentração-dependência, um indicador de causa-efeito, outros estudos não mostraram nenhum efeito cognitivo (Zhang et al. 2016a, 2016b). Essas inconsistências requerem investigação adicional, incluindo estudo dos mecanismos envolvidos. Outras pesquisas com seres humanos são uma prioridade devido à onipresença de concentrações internas superiores a 1.000 ppm_v, bem como ao trabalho recente com animais que fornece orientação para a investigação de mecanismos para declínios na função cognitiva.

Embora o CO₂ não tenha reatividade química direta, estudos recentes com camundongos mostram alterações inflamatórias no sangue de 2.000 a 4.000 ppm_v e vazamento de fluido dos vasos sanguíneos para o tecido cerebral a 2.000 ppm_v (Thom et al. 2017a). Uma confirmação adicional desses resultados foi encontrada em experimentos *in vitro* com neutrófilos humanos (um tipo de glóbulo branco) nas mesmas concentrações (Thom et al., 2017b). Essas descobertas apoiam o fenômeno da toxicidade cerebral do CO₂ puro e são mecanicamente consistentes com relatos de mudanças cognitivas observadas em experimentos humanos em concentrações internas comumente observadas. Novas pesquisas para resolver questões relacionadas à neurotoxicidade do CO₂ devem ser uma prioridade (Jacobson et al. 2019).

A.3 Padrões e Regulamentos Existentes para Concentração de CO₂ Interno

Muitos países propuseram valores de orientação obrigatórios ou sugeridos para o CO₂ interno em espaços não industriais. Deve-se notar que os fundamentos que sustentam esses valores de orientação não são necessariamente fornecidos nos documentos de referência e que os valores de orientação de CO₂ propostos no contexto da pandemia de COVID-19 não estão incluídos nesta discussão. Os valores motivados pela pandemia são discutidos na seção posterior sobre transmissão de risco de infecção pelo ar.

Vários países publicaram limites de CO₂ interno, em alguns casos para todos os edifícios ocupados e em outros casos fazendo uma distinção entre edifícios residenciais e não residenciais. Esses limites tendem a ser da ordem de 1.000 ppm_v, mas variam até cerca de 1.500 ppm_v. Eles são geralmente destinados ao gerenciamento de preocupações genéricas de QAI e sintomas de SED, com o CO₂ sendo usado como indicador de ventilação. De particular interesse é o limite de 1000 ppm_v no Japão que foi emitido em 1970; milhares de edifícios são testados todos os anos para determinar se estão em

conformidade com a *Lei de Manutenção de Saneamento Predial*.

Para os locais de trabalho, o departamento de Administração de Saúde e Segurança Ocupacional dos Estados Unidos (OSHA) e o Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH) estabeleceram um valor limite médio ponderado no tempo de 5000 ppm_v para exposição no ar, em qualquer turno de trabalho de 8 horas, durante uma semana de trabalho de 40 horas, e 30.000 ppm_v como limite de exposição de curto prazo, ou seja, uma média ponderada de 15 minutos, que não deve ser excedida em nenhum momento durante um dia de trabalho (NIOSH 1976; OSHA 2017).

Apesar de muitas declarações contrárias, a Norma ANSI/ASHRAE 62.1 (ASHRAE 2019b) não fornece um valor limite para CO₂ interno. A incompreensão das informações do padrão referencial nas edições anteriores, continua a levar muitos a atribuir incorretamente um limite de 1000 ppm_v à ASHRAE. A CEN 16798-1 (2019) fornece quatro categorias de qualidade ambiental interna que incluem concentrações de CO₂ acima da externa, observando que esses valores servem como indicadores das taxas de ventilação do ar externo por pessoa: Categoria I, 550 ppm_v; Categoria II, 800 ppm_v; e Categoria III e IV, 1350 ppm_v. Estas categorias correspondem às expectativas dos ocupantes, correspondendo a Categoria II às expectativas normais.

O dióxido de carbono também é abordado nos programas de certificação de edifícios verdes. Duas revisões recentes das principais certificações de edifícios verdes desenvolvidas em todo o mundo e os indicadores que elas usam para avaliar a qualidade do ambiente interno mostraram que o CO₂ é uma das principais métricas de QAI nessas certificações (Wei et al. 2015, 2020). No entanto, os valores de referência utilizados para avaliar as concentrações de CO₂ não são uniformes, variando de 530 a 1500 ppm_v (Wei et al. 2015).

A.4 CO₂ como um Indicador de QAI e Ventilação

Como observado anteriormente na seção da história, o CO₂ interno tem sido proeminente nas discussões sobre ventilação e QAI, por séculos. Embora as concentrações de CO₂ estejam relacionadas à percepção dos bioefluentes humanos e ao nível de aceitação de seus odores, elas não são uma boa métrica geral da QAI, pois muitas fontes importantes de contaminantes não dependem do número de ocupantes de um espaço. Por exemplo, contaminantes emitidos por materiais de construção e aqueles que entram pela tomada do ar externo, não estão correlacionados com as concentrações de CO₂. No entanto, mesmo tudo mais sendo igual, se as taxas de ventilação do ar externo forem reduzidas em um prédio ocupado, as concentrações de CO₂ aumentarão junto com as concentrações de outros contaminantes gerados no ambiente interno. Esse fato provavelmente explica as associações observadas de concentrações aumentadas de CO₂, com taxas mais altas de sintomas de SED, absenteísmo e outros efeitos (Apte et al. 2000; Shendell et al. 2004; Gaihare et al. 2014; Fisk 2017).

Uma concentração interna de CO₂ abaixo de 1.000 ppm_v tem sido considerada um indicador de QAI aceitável, mas essa concentração é, na melhor das hipóteses, um indicador da taxa de ventilação do ar externo por pessoa. Essa relação é baseada no uso de CO₂ como gás marcador, conforme descrito na próxima seção e está associada a uma taxa de ventilação do ar externo de cerca de 8 L/s (16 cfm) por pessoa. Este valor de 1000 ppm_v tem sido utilizado por décadas sem uma compreensão de sua base, que é sua ligação com a percepção do odor corporal humano pelos ocupantes do edifício. Este mal-entendido do significado de 1000 ppm_v resultou em muitas conclusões confusas e errôneas sobre QAI e ventilação predial. O uso de CO₂ como indicador de ventilação do ar externo deve refletir o fato de que os requisitos de ventilação do ar externo são uma função do tipo de espaço e das características dos ocupantes (por exemplo, idade e

massa corporal), níveis de atividade e densidade. Portanto, uma única concentração de CO₂ não se aplica a todos os tipos de espaço e ocupações para fins de avaliação da taxa de ventilação. Além disso, as concentrações de CO₂ podem variar significativamente dentro de um edifício ou espaço com base nos detalhes de como a ventilação e a distribuição de ar são implementadas.

As concentrações de CO₂ interno têm sido usadas há muito tempo para controlar as taxas de entrada de ar externo, usando um processo conhecido como ventilação controlada por demanda (VCD) (Emmerich e Persily 1997). Essa estratégia de controle reduz o consumo de energia associado à superventilação durante os períodos de baixa ocupação e ajuda a garantir que os espaços sejam adequadamente ventilados com base em sua real ocupação. O VCD é de fato exigido por alguns padrões de eficiência energética, como o ASHRAE/IES Standard 90.1 (ASHRAE 2019a), e o monitoramento de CO₂ é um meio de implementar o VCD. Observe que essa estratégia de controle pode ser mais complexa de implementar em sistemas de ventilação de vários espaços ao cumprir os requisitos de ventilação no ASHRAE Standard 62.1 (ASHRAE 2019b) e o projetista ainda deve abordar contaminantes não associados aos níveis de ocupação. Pesquisas recentes sobre VCD levaram a sequências de controle para sistemas de espaço múltiplo (Lin e Lau 2015), que também devem abordar o número e a localização dos sensores em diferentes zonas de construção e variações na geração de CO₂ entre as zonas e ao longo do tempo.

A.5 Uso do CO₂ Gerado Pelos Ocupantes como um Gás Marcador

A utilização da concentração de CO₂ interno como indicador da adequação das taxas de ventilação do ar externo baseia-se na aplicação do CO₂ como gás marcador. Os métodos de diluição do gás marcador para medir as taxas de mudança do ar externo são usados há décadas e estão bem documentados nos padrões existentes (ASTM 2011; ISO 2017). A aplicação do uso do CO₂ a esses métodos ocorre pelo fato de sua fonte principal de produção serem os ocupantes do edifício, o que torna conveniente seu uso. Também existem métodos de gás marcador para quantificar a distribuição de ar e a eficiência da ventilação em espaços, e o CO₂ também pode ser usado para essas medições. No entanto, a maioria das aplicações de CO₂ como gás marcador assume que o espaço em questão é uma única zona com uma concentração uniforme deste gás.

Conforme observado na ASTM D6245 (2018), existem dois métodos de gás marcador para estimar as taxas de ventilação do ar externo usando CO₂: decaimento e estado estacionário, ambos mais adequados para zonas únicas. Ambos os métodos são baseados nas seguintes suposições: a concentração do gás marcador é uniforme no espaço que está sendo monitorado, a concentração de CO₂ externa é constante durante o teste (ou monitorada em tempo real) e a taxa na qual os ocupantes geram CO₂ é conhecida e constante para o método do estado estacionário. As pessoas emitem CO₂ a uma taxa baseada em seu sexo, idade, massa corporal e nível de atividade, conforme descrito na ASTM D6245 e, portanto, são necessárias informações sobre os ocupantes para estimar essas taxas. Ao relatar os resultados dessas medições de gás marcador, é essencial também relatar a incerteza dos resultados. ASTM D6245 discute como estimar essas incertezas. Por serem métodos de zona única, eles não levam em conta o fluxo de ar e o transporte de CO₂ entre a zona de interesse e outras zonas de construção. Os erros de medição associados ao uso de uma abordagem de zona única em um espaço ou edifício que não é uma zona única, com uma concentração uniforme, são difíceis de quantificar, e esses erros são frequentemente negligenciados na aplicação desses métodos.

As concentrações de pico de CO₂ são comumente usadas para estimar as taxas de ventilação por pessoa usando o método de diluição de gás marcador de injeção constante.

Para que esta abordagem produza um resultado válido, a concentração interna deve estar no estado estacionário e a taxa de ventilação deve ser constante. Usar uma concentração de CO₂ medida antes de atingir o estado estacionário, irá superestimar a taxa de ventilação. Em um estudo da incerteza associada às medições do CO₂ em um espaço ocupado (Kabirikopaei e Lau 2020), a abordagem de estado estacionário resultou na menor incerteza e a precisão do sensor de CO₂ foi o fator dominante na determinação da incerteza geral.

A.6 Aumento das Concentrações de CO₂ no Ar Externo

Concentrações externas de CO₂ são relevantes para a consideração do CO₂ no ambiente interno por duas razões. Primeiro, ao usar o VCD com base na concentração absoluta de CO₂ interno, e não na diferença interna-externa, a taxa de entrada de ar externo varia não apenas com a ocupação, mas também com a concentração do ar externo. Em segundo lugar, se a exposição ao CO₂ for comprovada para efeitos na saúde e cognição, então os aumentos nas concentrações ao ar livre aumentarão a prevalência desses impactos.

As concentrações médias globais de CO₂ são determinadas por uma complexa interação de fontes e forças motrizes. Em uma escala de tempo geológica, eles variaram muito, mas por centenas de milhares de anos, até o início do século XX, estavam abaixo de 300 ppm_v, excedendo pela primeira vez 300 ppm_v em 1912 (EPA 2021). Ao longo do meio século que se seguiu, a concentração média de CO₂ ao ar livre cresceu lentamente, atingindo 317 ppm_v em 1960, conforme medido no observatório Mauna Loa, no Havaí. Desde então, as concentrações atmosféricas de CO₂ aumentaram mais rapidamente, passando de 400 ppm_v em 2013 e atingindo 420 ppm_v em 2021. A taxa de crescimento anual aumentou de menos de 1 ppm_v por ano em 1959 para cerca de 2,5 ppm_v por ano (NOAA 2021).

Sobrepostas à tendência de aumento da concentração de CO₂ ao ar livre estão as variações diárias, sazonais e anuais. As variações diárias são geralmente pequenas, mas um estudo de concentração em ecossistemas terrestres encontrou uma amplitude média sazonal de pico a vale de 14,8 ppm_v, aproximadamente três vezes a variação observada no observatório Mauna Loa (Liu et al. 2015). As variações sazonais são atribuídas aos ciclos de biomassa e atividade fotossintética das plantas, com a taxa de CO₂ sendo maior quando as plantas são menos ativas (Cleveland et al. 1983). As áreas urbanas podem experimentar excursões muito maiores de CO₂ acima da média global devido à falta de vegetação e aos efeitos dos veículos com motor de combustão interna, bem como grandes variações verticais (Lietzke e Vogt 2013). Concentrações locais transitórias podem estar centenas de ppm_v acima da média em alguns locais, aproximando-se ou excedendo 600 ppm_v (Balling et al. 2001). As concentrações locais também podem estar abaixo da média dependendo da estação, hora do dia e vegetação local (Liu et al. 2015). Essas variações na concentração de CO₂ no ar externo tornam importante seu acompanhamento, ao se monitorar o CO₂ no ambiente interno.

A.7 Limpeza do Ar Direcionada a Remoção Apenas de CO₂

Embora o CO₂ possa ser útil como um indicador de ventilação e QAI em circunstâncias limitadas, as concentrações de CO₂ em ambientes internos não são, necessariamente, diretamente relacionadas a outros poluentes importantes do ar interno, como vírus, mofo, formaldeído, monóxido de carbono, amianto e partículas transportadas pelo ar. O uso de tecnologias de purificação do ar para reduzir as concentrações internas de CO₂ comumente observadas, pode resultar em uma expectativa injustificada de que outros poluentes internos não sejam preocupantes.

É importante distinguir entre as diferentes tecnologias de purificação do ar e como elas impactam os diferentes tipos de poluentes. A remoção ou conversão de CO₂ no ar pode ser alcançada apenas por processos de reação química usando filtros de ar do tipo sorção (Hu et al. 2017). A remoção de outros contaminantes internos importantes requer outras abordagens, por exemplo, a remoção de partículas transportadas pelo ar por filtros mecânicos. É fundamental não presumir que a limpeza do ar direcionada apenas à remoção ou conversão de CO₂ removerá outros contaminantes do ar interno que possam ser mais preocupantes. Além disso, ao usar VCD baseada em CO₂, o sistema de ventilação não funcionará como pretendido se estiver usando dispositivos de remoção de CO₂, pois esses controles de ventilação assumem que a concentração interna de CO₂ medida é proporcional à ocupação humana.

A.8 CO₂ como Indicador de Risco de Transmissão Aérea de Doenças

Durante a pandemia da COVID-19, foram feitas recomendações para usar medições de CO₂ interno como um indicador do risco de transmissão aérea de infecções. A ASHRAE não recomenda uma concentração específica de CO₂ como métrica de risco de infecção, mas outras organizações recomendaram (Centro de Controle e Prevenção de Doenças [CDC 2021], nos Estados Unidos; Federação das Associações Europeias de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado [REHVA 2021], na Europa; e Grupo de Modelagem Ambiental e Grupo de Insights Científicos da Pandemia [EMG/SPI-B 2021], no Reino Unido) ou impuseram (Governo Federal Belga [BFG 2021]), limites de concentração de CO₂. Muitos deles são baseados no CO₂ como indicador da taxa de ventilação externa por pessoa, o que implica implicitamente o uso de CO₂ como gás marcador juntamente com uma taxa de ventilação desejada. As taxas de ventilação nas quais essas concentrações de CO₂ se baseiam podem ser derivadas de padrões de ventilação, que não são baseados no controle de transmissão aérea de doenças, exceto em ambientes de saúde, ou de uma taxa de ventilação especificamente destinada a controlar a transmissão. Observe que os requisitos de ventilação no padrão ASHRAE 62.1 (2019b) são uma função do uso e ocupação do espaço e, portanto, o correspondente a concentração de CO₂ interno varia de acordo com o tipo de espaço. Por exemplo, as concentrações de CO₂ em estado estacionário, correspondentes aos requisitos de ventilação na Norma 62.1, variam de cerca de 1000 ppm_v em escritórios e salas de aula com alunos mais jovens para entre 1500 e 2000 ppm_v em restaurantes, salas de aula e espaços de varejo e acima de 2500 ppm_v em salas de conferência e auditórios. Recomendações ou requisitos para taxas de ventilação e concentrações de CO₂ para limitar a transmissão de doenças infecciosas foram sugeridos, mas são altamente incertos, dados os muitos fatores que afetam o risco de infecção, incluindo diferenças entre patógenos. É importante ter em mente que a ventilação é apenas uma estratégia de controle que deve ser implementada como parte de uma abordagem em camadas, para o gerenciamento de risco.

Mesmo tudo o mais sendo constante, maiores concentrações de CO₂ correspondem a menor ventilação do ar externo e, potencialmente, um risco aumentado de transmissão aérea. Enquanto as concentrações de CO₂ podem ser um indicador qualitativo útil, eles não capturam os impactos da ocupação reduzida, que é comum em muitos edifícios, ou os impactos da filtragem de partículas e limpeza do ar, no risco de infecção. Outros fatores afetam a exposição e o risco de transmissão, como a quantidade de vírus no ar (que não necessariamente aumenta com o CO₂), atividade respiratória e tipo de patógeno. Observe também que, se o VCD baseado em CO₂ estiver sendo usado, a ocupação menor reduzirá a taxa de ventilação do ar externo e, presumivelmente, aumentará o risco de transmissão, razão pela qual várias organizações recomendaram desabilitar os sistemas VCD ou diminuir seus pontos de ajuste. Essas duas estratégias terão diferentes impactos nas

taxas de ventilação do ar externo, com o antigo design de manutenção entrada mínima de ar externo e o último potencialmente aumentando a ventilação do ar externo.

Em vez de usar a concentração de CO₂ interno como um indicador das taxas de ventilação desejadas, várias análises de risco de infecção no ar usaram o CO₂ como um indicador da “fração reinalada” do ar interno (a fração do ar inalado que foi exalado por outra pessoa no espaço). Se a incidência de uma doença transmitida pelo ar na população e a dose infecciosa do patógeno são conhecidos, esses métodos podem ser usados para estimar a porcentagem de novas infecções para um cenário particular (Rudnick e Milton 2003; Peng e Jimenez 2021). Esses métodos baseiam-se em várias suposições sobre a distribuição de CO₂ no ambiente interno e de aerossol infeccioso, a relativa significância de diferentes modos de infecção e relações dose-resposta que estão sujeitas a grandes incertezas. Consequentemente, eles podem não ser indicadores altamente precisos quanto ao risco absoluto.

REFERÊNCIAS

- Allen, J.G., P. MacNaughton, U. Satish, S. Santanam, J. Vallarino, and J.D. Spengler. 2016. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office workers: A controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environ. Health Perspect.*, 124, 805–12.
- Allen, J.G., P. MacNaughton, J.G. Cedeno-Laurent, X. Cao, S. Flanigan, J. Vallarino, et al. 2018. Airplane pilot flight performance on 21 maneuvers in a flight simulator under varying carbon dioxide concentrations. *J Expos Sci Environ Epid* 08:08.
- Apte, M.G., W.J. Fisk, and J.M. Daisey. 2000. Associations between indoor CO₂ concentrations and sick building syndrome symptoms in US office buildings: An analysis of the 1994–1996 BASE study data. *Indoor Air* 10 (4):246–57.
- ASHRAE. 2019a. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019, *Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*. Peachtree Corners, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. 2019b. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019, *Ventilation for acceptable indoor air quality*. Peachtree Corners, GA: ASHRAE.
- ASTM. 2011. ASTM E741-11(2017), *Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM. 2018. ASTM D6245-18, *Standard guide for using indoor carbon dioxide concentrations to evaluate indoor air quality and ventilation*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Balling, R.C. Jr, R.S. Cerveny, and C.D. Idso. 2001. Does the urban CO₂ dome of Phoenix, Arizona contribute to its heat island? *Geophysical Research Letters* 28(24):4599–4601.
- BFG. 2021. Belgian pandemic emergency decree. Belgian Federal Government – Ministry of Internal Affairs. www.ejustice.just.fgov.be/eli/bsluit/2021/10/28/2021042995/justel.
- CDC. 2021. Ventilation in buildings. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention. www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation.html.
- CEN. 2019. CEN 16798-1:19, *Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Cleveland, W.S., A.E. Freeny, and T.E. Graedel. 1983. The seasonal component of atmospheric CO₂: Information from new approaches to the decomposition of seasonal time series. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 88(C15):10934–46.
- Du, B., M.C. Tandoc, M.L. Mack, and J.A. Siegel. 2020. Indoor CO₂ concentrations and cognitive function: A critical review. *Indoor Air* 30(6):1067–82.
- Emmerich, S.J., and A.K. Persily. 1997. Literature review on CO₂-based demand-controlled ventilation. *ASHRAE Transactions* 103(2):229–43.
- EPA. 2021. Climate change indicators: Atmospheric concentrations of greenhouse gases. www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases. Site visited August 2, 2021.
- Fisk, W., P. Wargocki, and X. Zhang. 2019. Do indoor CO₂ levels directly affect perceived air quality, health, or work performance? *ASHRAE Journal* 61(9):70–77.
- Fisk, W.J. 2017. The ventilation problem in schools: Literature review. *Indoor Air* 27: 1039–51.
- Gaihre, S., S. Semple, J. Miller, S. Fielding, and S. Turner. 2014. Classroom carbon dioxide concentration, school attendance, and educational attainment. *Journal of School Health* 84(9):569–74.

- Hu, S.-C., A. Shiue, S.-M. Chang, Y.-T. Chang, C.-H. Tseng, C.-C. Mao, A. Hsieh, and A. Chan. 2017. Removal of carbon dioxide in the indoor environment with sorption-type air filters. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 12(3):330–34. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctw014>.
- ISO. 2017. ISO 12569:2017, *Thermal performance of buildings and materials – Determination of specific airflow rate in buildings – Tracer gas dilution method*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Jacobson, T.A., J.S. Kler, M.T. Hernke, R.K. Braun, K.C. Meyer, and W.E. Funk. 2019. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability* 2:691–701.
- James, J.T., and S.M. Zalesak. 2013. Surprising effects of CO₂ exposure on decision making. 43rd International Conference on Environmental Systems, Vail, Colorado.
- Kabirikopaei, A., and J. Lau. 2020. Uncertainty analysis of various CO₂-based tracer-gas methods for estimating seasonal ventilation rates in classrooms with different mechanical systems. *Building and Environment*, 179.
- Kajtar, L., and L. Herczeg. 2012. Influence of carbon-dioxide concentration on human well-being and intensity of mental work. *Idojaras* 116:145–69.
- Lee, J., T.W. Kim, C. Lee, and C. Koo. 2022. Integrated approach to evaluating the effect of CO₂ concentration on human cognitive performance and neural responses in office environment. *J. Management in Engineering* 38(1).
- Lietzke, B., and R. Vogt. 2013. Variability of CO₂ concentrations and fluxes in and above an urban street canyon. *Atmospheric Environment* 74:60–72.
- Lin, X., and J. Lau. 2015. Demand controlled ventilation for multiple zone HVAC systems: Part 2 – CO₂-based dynamic reset with zone primary airflow minimum setpoint reset (1547-RP). *Science and Technology for the Built Environment* 21(8):1100–1108.
- Liu, M., J. Wu, X. Zhu, H. He, W. Jia, and W. Xiang. 2015. Evolution and variation of atmospheric carbon dioxide concentration over terrestrial ecosystems as derived from eddy covariance measurements. *Atmospheric Environment* 114, 75–82.
- Lowther, S.D., S. Dimitroulopoulou, K. Foxall, C. Shrubsole, E. Cheek, B. Gadeberg, and O. Sepai. 2021. Low level carbon dioxide indoors—A pollution indicator or a pollutant? A health-based perspective. *Environments*, 8.
- NIOSH. 1976. *Criteria for a recommended standard: Occupational exposure to carbon dioxide*. DHHS (NIOSH) Publication Number 76-194. National Institute for Occupational Safety and Health. www.cdc.gov/niosh/docs/76-194.
- NOAA. 2021. Trends in atmospheric carbon dioxide. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Site visited August 2, 2021.
- OSHA. 2017. Limits for air contaminants. Washington, DC: Occupational Safety & Health Administration, U.S. Department of Labor. [www.osha.gov/laws-regs/regulations/standard number/1910/1910.1000TABLEZ1](http://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standard%20number/1910/1910.1000TABLEZ1).
- Peng, Z., and J.L. Jimenez. 2021. Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *Environmental Science & Technology Letters*, 8, 392–97.
- Persily, A. 2015. Challenges in developing ventilation and indoor air quality standards: The story of ASHRAE Standard 62. *Building and Environment* 91, 61–69.
- REHVA. 2021. REHVA COVID-19 Guidance, version 4.1. Brussels, Belgium: Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations. www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V4.1_15042021.pdf.
- Rudnick, S.N., and D.K. Milton. 2003. Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air* 13(3):237–45.
- EMG/SPI-B. 2021. Application of CO₂ monitoring as an approach to managing ventilation to mitigate SARS-CoV-2 transmission. www.gov.uk/government/publications/emg

and- spi-b-application-of-co2-monitoring-as-an-approach-to-managing-ventilation-to-mitigate-sars-cov-2-transmission-27-may-2021.

- Satish, U., M.J. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi, D. Sullivan, S. Streufert, et al. 2012. Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Envir Health Persp* 120:1671–77.
- Scully, R.R., M. Basner, J. Nasrini, C.W. Lam, E. Hermosillo, R.C. Gur, T. Moore, D.J. Alexander, U. Satish, and V.E. Ryder. 2019. Effects of acute exposures to carbon dioxide on decision making and cognition in astronaut-like subjects. *NPJ Microgravity*, 5, 17.
- Shendell, D.G., R. Prill, W.J. Fisk, M.G. Apte, D. Blake, and D. Faulkner. 2004. Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air* 14(5):333–41.
- Thom, S.R., V.M. Bhopale, J.P. Hu, and M. Yang. 2017a. Inflammatory responses to acute elevations of carbon dioxide in mice. *J Appl Physiol* 123: 297–307.
- Thom, S.R., V.M. Bhopale, J.P. Hu, and M. Yang. 2017b. Increased carbon dioxide levels stimulate neutrophils to produce microparticles and activate the nucleotide-binding domain-like receptor 3 inflammasome. *Free Radical Biology and Medicine* 106:406–16.
- Wargocki, P. 2021. What we know and should know about ventilation. *REHVA Journal* 58(2):5–13.
- Wei, W., O. Ramalho, and C. Mandin. 2015. Indoor air quality requirements in green building certifications. *Building and Environment* 92:10–19.
- Wei, W., P. Wargocki, J. Zirngibl, J. Bendžalová, and C. Mandin. 2020. Review of parameters used to assess the quality of the indoor environment in Green Building certification schemes for offices and hotels. *Energy and Buildings*, 209:109683.
- Zhang, X., P. Wargocki, Z. Lian, and C. Thyegod. 2016a. effects of exposure to carbon dioxide and bioeffluents on perceived air quality, self-assessed acute health symptoms and cognitive performance. *Indoor Air* 27, 47–64.
- Zhang, X., P. Wargocki, and Z. Lian. 2016b. Human responses to carbon dioxide, a follow-up study at recommended exposure limits in non-industrial environments. *Building and Environment* 100, 162–71.