

**RADIOMETRIA DO AR REVELA O DESAFIO ÀS TECNOLOGIAS DE DEPURAÇÃO FÍSICO - QUÍMICO
- BIOLÓGICO DO AR INTERNO.**

Capulli, Domenico – domenicocapulli@gmail.com

Veltha Despoluição Atmosférica, www.veltha.com.br

Regazzi, Rogério – rogregazzi@3rbrasil.com.br

3R Brasil, www.3RBrasil.com.br

F2 – Qualidade Ambiental Interna

Resumo. Sensores com a tecnologia de contagem por espalhamento a laser dos monitores contínuos da qualidade do ar interno (QAI) mostram as concentrações de $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$, PM_{10} , CO_2 e VOC em ambientes modernos, de grande porte e climatizados como um centro de eventos. Em 2021 a OMS emitiu o Air Quality Guidelines com valores como $PM_{2,5} = 5 \mu g/m^3$ como média anual e $15 \mu g/m^3$ como exposição de curto prazo (24h). Agora os projetistas de sistemas de AVAC-R devem estar mais ciosos de suas responsabilidades em mudar esse cenário com emprego de tecnologias mais abrangentes na garantia da qualidade físico-química-biológica do ar em ambientes internos, como a filtragem líquida típica de tecnologias industriais de controle de poluentes, promovida por lavadores de gases por aspersão, Venturis e precipitadores hidrodinâmicos. O ensaio de campo em 2023, numa instalação de Shopping Center, comprovou que a filtragem líquida tem eficiência F9 para material particulado $PM_{2,5}$ e mais de 98% de redução para dióxido de carbono em estágio único e sem elementos descartáveis. A operação com líquido alcalino refrigerado assegura a dissolução da capa de LPS dos microrganismos que são neutralizados e a conversão do CO_2 em produto reacional sólido; tratam-se de tecnologias CCT (“Carbon Capture Transform”), onde o ácido carbônico H_2CO_3 é transformado em um sólido solúvel.

Nossa perspectiva agora é de desenvolver um protocolo que correlacione as taxas de infecção hospitalar com contaminação aérea e a sua redução pelo emprego de tecnologias de rota úmida capaz de inertizar ativos biológicos circulantes em sistemas de climatização hospitalar.

Palavras-chave: IAQ, Material particulado, CO_2 , Filtragem do ar, descarbonização

1. INTRODUÇÃO

A qualidade do ar interno (QAI) sempre esteve em xeque nos meios acadêmicos como mostra artigo de Fonseca, A., et al. (2022), que analisou 171 publicações de avaliação e gestão adequadas da qualidade do ar interior em instalações de saúde, no período 2015-2020, para verificar as tendências de abordagem, já que a questão é de extrema importância para fins de segurança do paciente e saúde ocupacional. Os resultados mostram quatro tópicos centrais: poluentes físico-químicos, contaminação microbiológica, projeto e gestão de infraestruturas e medidas de controle ambiental. Os parâmetros de umidade, temperatura, material particulado, CO_2 e carga microbiológica constam em mais de 85% dos estudos com foco no registro de dados de campo que frequentemente relatam resultados fora dos padrões estabelecidos pela OMS. Citado artigo consegue integrar focos de pesquisa mundial da QAI com as conclusões assemelhadas por tema investigado e trazendo informações importantes para futuros temas de pesquisa do QAI. Figura 1 tem os tópicos chave no controle ambiental das unidades de saúde, com prevalência das palavras chave: infecção, controle, paciente, ventilação, sistema e hospital são citados com percentuais acima de 40%, ou seja, esses estudos revelam grande preocupação com a qualidade dos fluxos de ar no ambiente das salas cirúrgicas. Já no tópico de sistemas adequados de filtragem de partículas também é destacada, em vários estudos gerais, a influência da ventilação na prevalência de hospitalização com infecções, quando foram abordados estudos sobre SARS-CoV-2. Os temas de procedimentos de limpeza e monitoramento do QAI também desempenham um papel importante no controle de cargas microbiológicas. E quando o foco é contaminação microbiológica as palavras chave amostragem, UFC, isolamento, aspergillus, penicillium e estafilococos assumem relevância na identificação dos microrganismos com resistência a antibióticos, haja vista a presença detectada de micotoxinas em filtros AVAC-R. Outras temáticas com percentuais elevados de estudos, destacam o controle de partículas transportadas pelo ar em unidades de terapia intensiva, devido a pacientes com sistema imunológico comprometido, assim como o ambiente externo influencia o perfil da contaminação microbiológica interna, além da importância da temperatura. Quando o ambiente monitorado são escolas as normas ASHRAE 62.1 e 62.2 (2022), especifica taxas mínimas de ventilação e outras medidas destinadas a fornecer uma qualidade do ar interior (QAI) que seja aceitável para os ocupantes humanos, e que minimize os efeitos adversos à saúde. A norma fornece procedimentos e métodos para atender aos requisitos mínimos de ventilação e QAI para engenheiros, profissionais de projeto, proprietários e autoridades jurisdicionais onde os códigos de modelo foram adotados. Esta última revisão tornou-a uma norma de tratamento do ar e ventilação, ou seja qualidade do ar e muito mais do que simples taxas de ventilação, e sim, deve abordar tecnologias de tratamento e automações de monitoramento e controle.

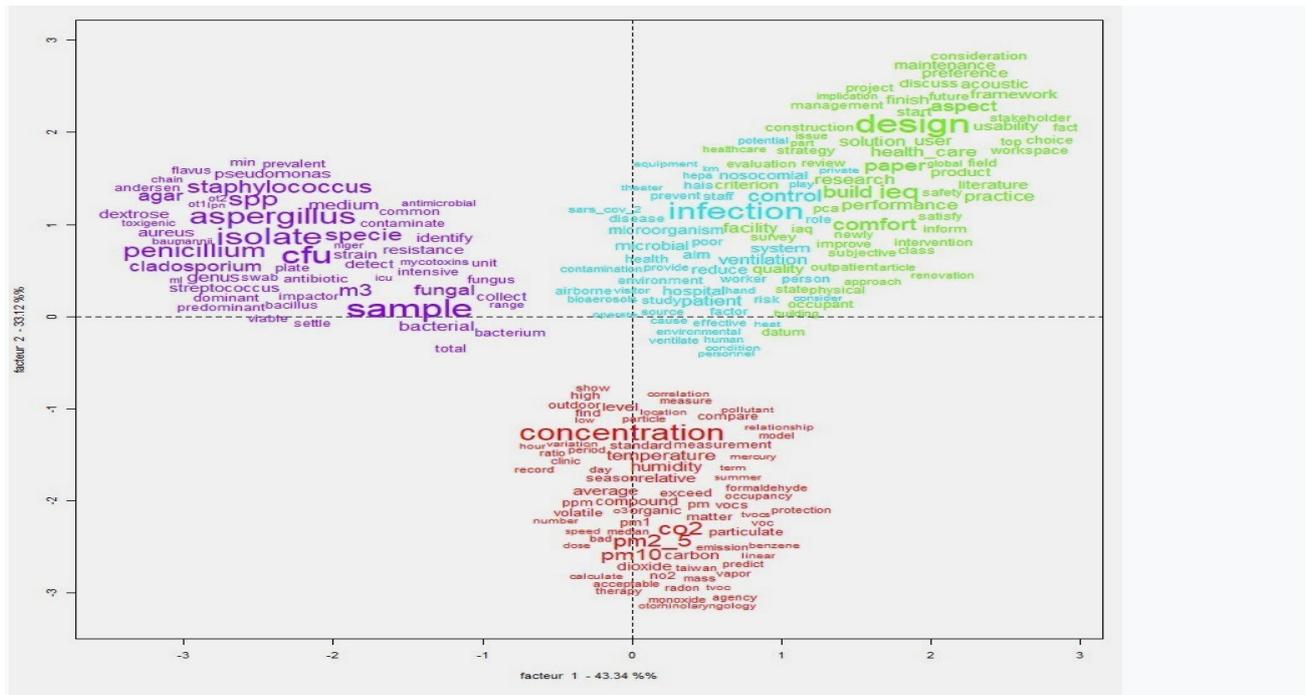


Figura 1. Palavras chaves prevalentes nos estudos e pesquisas mundiais de QAI

A EPA, em fevereiro de 2024, estabeleceu padrão primário médio anual $PM_{2.5} = 9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ material particulado para qualidade do ar interno (PM NAAQS-National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter) um dos mais restritivos (OMS $PM_{2.5} = 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), e em consonância com as mais atuais evidências científicas da correlação de ataques cardíacos e mortes prematuras. Em outra publicação, enfatiza a importância de manter QAI através de programas de manutenção preventiva e uso de kits de ação específicos para escolas num ambiente favorável aos alunos, desempenho de professores e funcionários, com a sensação de conforto, saúde e bem-estar. Estes elementos combinam-se para ajudar uma escola na sua missão principal de educar, refletindo uma preocupação crescente com os impactos da poluição por partículas na saúde.

A maioria das pessoas está ciente de que a poluição do ar exterior pode afetar a sua saúde, mas a poluição do ar interno também pode ter efeitos significativos e prejudiciais para a saúde. Estudos da EPA sobre a exposição humana a poluentes atmosféricos indicam que os níveis internos de poluentes podem ser duas a cinco vezes - e ocasionalmente mais de 100 vezes - superiores aos níveis externos. Fato preocupante pois passamos mais de um terço de nossas vidas em ambientes internos, portanto as fontes externas devem ser consideradas, uma vez que o ar exterior entra nos edifícios e afetam os níveis de poluentes interno nas dependências escolares.

A pandemia da COVID-19 com certeza evidenciou a fragilidade e inflexibilidade dos sistemas de AVAC-R e também elevou a questão do QAI a nível global, universalizando temas como contaminação cruzada, rota de expurgo do ar, aerodispersóides, $PM_{2.5}$ e níveis de CO_2 ; outrossim popularizou os monitores de parâmetros da qualidade do ar que hoje podem ser adquiridos em diversas opções por valores até muito econômicos e com dashboards amigáveis. A difusão da tecnologia de leitura do espalhamento a laser permitiu resolução e exatidão dos amostradores de material particulado.

A metodologia de medição da qualidade do ar interno com sensores envolve diversos aspectos, incluindo a escolha do sensor, a calibração, a operação dinâmica e a análise de dados. Para quantificar compostos orgânicos voláteis (COVs), por exemplo, os sensores tipo resistores químicos são uma solução econômica, mas requerem métodos avançados de calibração e operação para lidar com a complexidade e a dinâmica das misturas de COVs. Técnicas modernas, como o uso de redes neurais profundas, têm mostrado eficácia na melhoria da precisão desses sensores que se tornam mais confiáveis à partir dos próprios dados acumulados (“machine learning for AI”).

Nesse mesmo sentido de capilaridade das informações da qualidade do ar para $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , CO_2 temos pela microsoft climate na Fig. 2 informações em tempo real da QAI por todo planeta, onde é possível avaliar as cidades com índices ruins de qualidade do ar por diferentes contaminantes. Constatações espantosas mostram que o problema é global pois regiões remotas podem apresentar qualidade ruim do ar, além da sazonalidade em função das estações climáticas do ano. Os dados a seguir são uma radiografia global do ar onde podemos concluir que a região da Eurásia esta com condições bastante adversas de material particulado em suspensão por conta da densidade populacional e o uso intensivo de energia e o ar seco que promove a suspensão por longos períodos de partículas $< 20\mu$, menos sujeitas à ação gravitacional; já na Cidade do Mexico a questão da qualidade do ar insalubre em decorrentes do adensamento urbano com intensa queima de combustíveis fósseis, ambas regiões recomendando o uso de purificadores de ar, assim como em São Paulo, Santos e Rio de Janeiro enquanto que, no mesmo momento, temos Porto Alegre com boa qualidade do ar recomendando atividades externas.

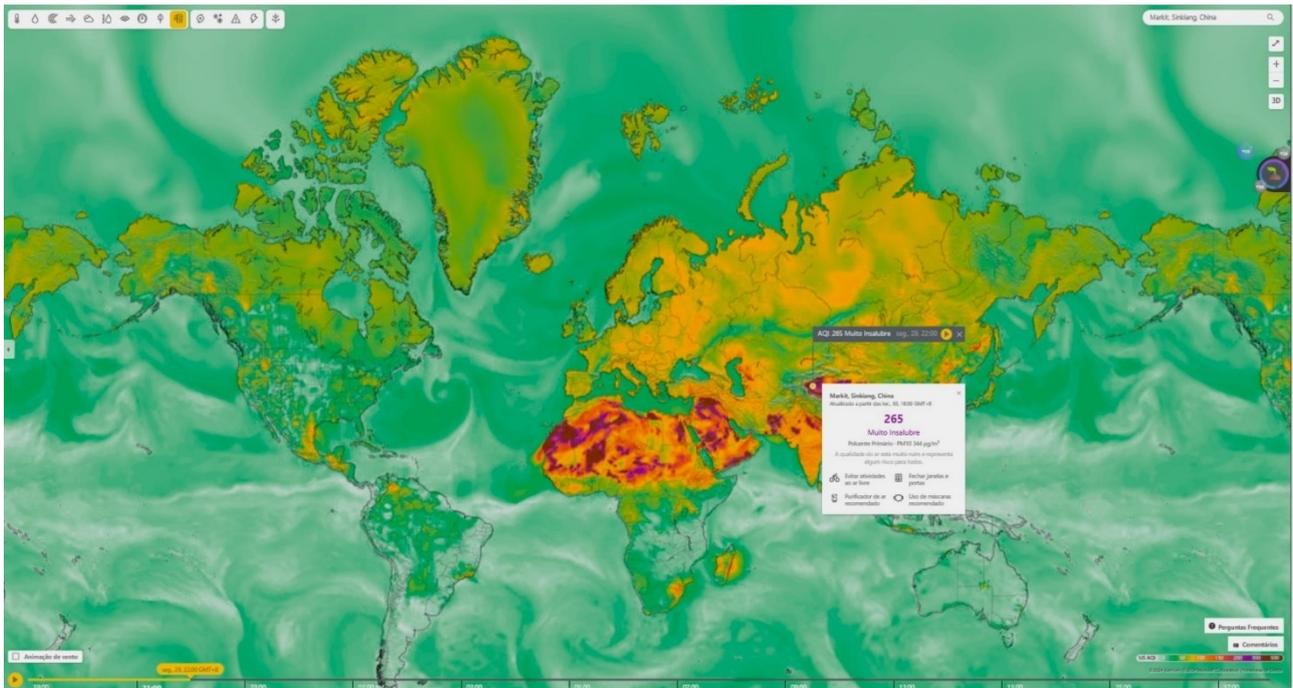


Figura 2a. Radiografia mundial instantânea, com a região setentrional do planeta com prevalência de condições muito adversas de qualidade do ar insalubre (Sinkiang- China $PM_{10}=344 \mu\text{g}/\text{m}^3$) com grandes concentrações de material particulado misto silicoso e carbonáceo. (www.msm.com 2024.)

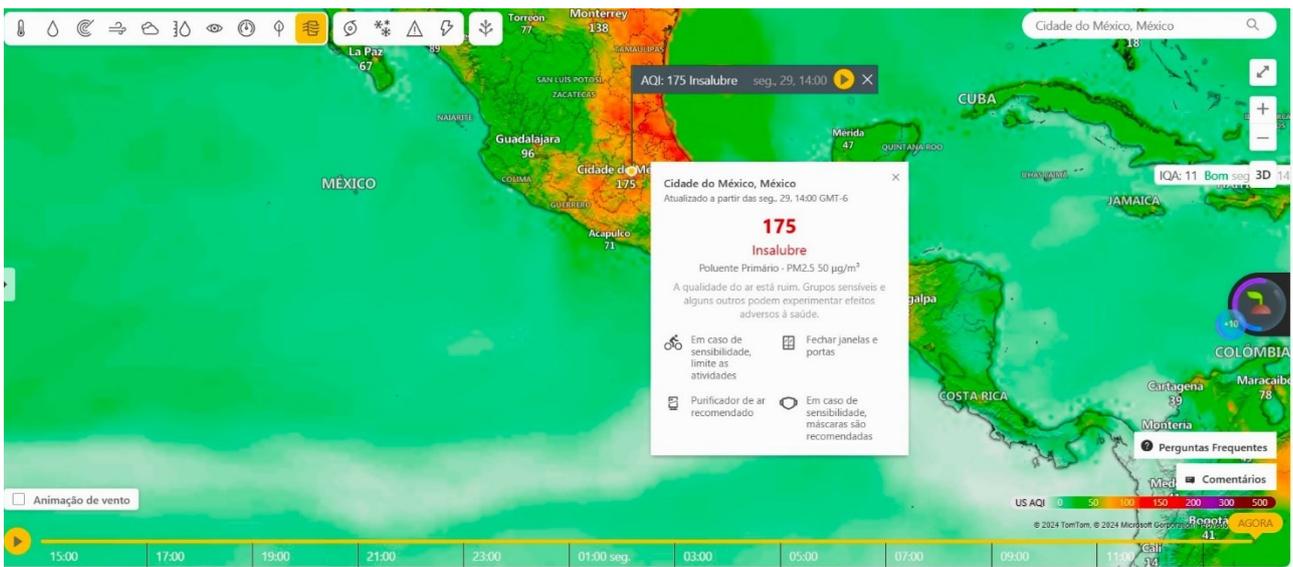


Figura 2b. Radiografia região da Cidade do México com prevalência de condições muito adversas de qualidade do ar insalubre ($PM_{2,5}=50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) com grandes concentrações de material particulado carbonáceo de processos de combustão. (www.msm.com 2024.)

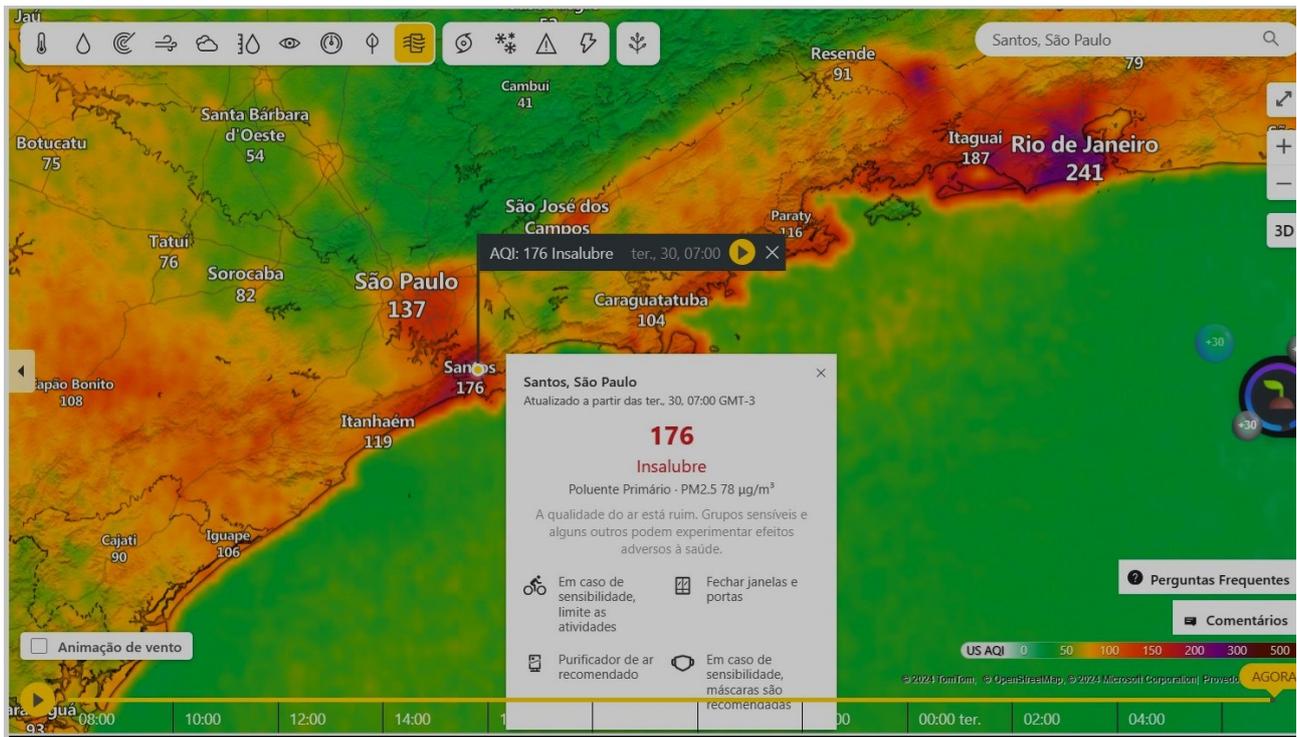


Figura 2c. Radiografia região Sudeste do com prevalência de condições muito adversas de qualidade do ar insalubre (Santos – SP $PM_{2.5}=78 \mu g/m^3$) com grandes concentrações de material particulado carbonáceo de processos de combustão de parque petroquímico e de fertilizantes impactando na bacia aérea. (www.msm.com 2024.)



Figura 2d. Radiografia região do sul do Brasil, com ênfase em Porto Alegre com a prevalência de condições entre os limites da OMS e EPA de 15 e 9 $\mu g/m^3$ respectivamente, recebendo a classificação de boa qualidade do ar. (www.msm.com 2024.).

Até aqui abordamos os contaminantes mais visíveis do QAI, entretanto os dióxidos de carbono e nitrogênio são as frações gasosas invisíveis presentes na atmosfera em valores totalmente descompensados das séries históricas, e especificamente o CO_2 apesar de não ser considerado maléfico extremo, é o principal poluente da atualidade. Existem estudos (Prada, Didier 2017) que demonstram, inclusive, o potencial de desmineralização dos ossos, como cita Cathryn Tonne do Instituto de Saúde Global de Barcelona, “O que vemos em geral é um padrão bastante consistente de menor conteúdo mineral ósseo com níveis crescentes de poluição atmosférica”. A acidulação do sangue pelo ácido carbônico (H_2CO_3) demonstra-se na constatação de que o dióxido de carbono influencia o pH do sangue ao reagir com a água para formar

ácido carbônico (H_2CO_3) que ao se dissociar para formar um íon hidrogênio (H^+) e um íon hidrogenocarbonato (HCO_3^-), portanto aumentar a concentração de dióxido de carbono no sangue (hipercapnia) resulta em mais íons H^+ e em um pH mais ácido. No entanto, ambas as reações são reversíveis, e respirar pesadamente, em ambiente salubre, para remover o dióxido de carbono do corpo levará a uma redução na concentração dos íons H^+ e HCO_3^- , e, portanto, a um aumento no pH, como publicou Hawkins, V. (2017).

De qualquer forma os sistemas de AVAC-R são aplicados numa realidade em que a curva da concentração de CO_2 na atmosfera mudou de tangente, na Fig. 3, reduzindo ainda mais o ciclo de uso do ar climatizado às custas de energia, ou seja 99,9% da massa do ar será descartada pela presença de 0,12% (1200 ppm) CO_2 , mesmo que outros marcadores estejam em patamares inferiores aos preconizados pelo projeto de AVAC-R.

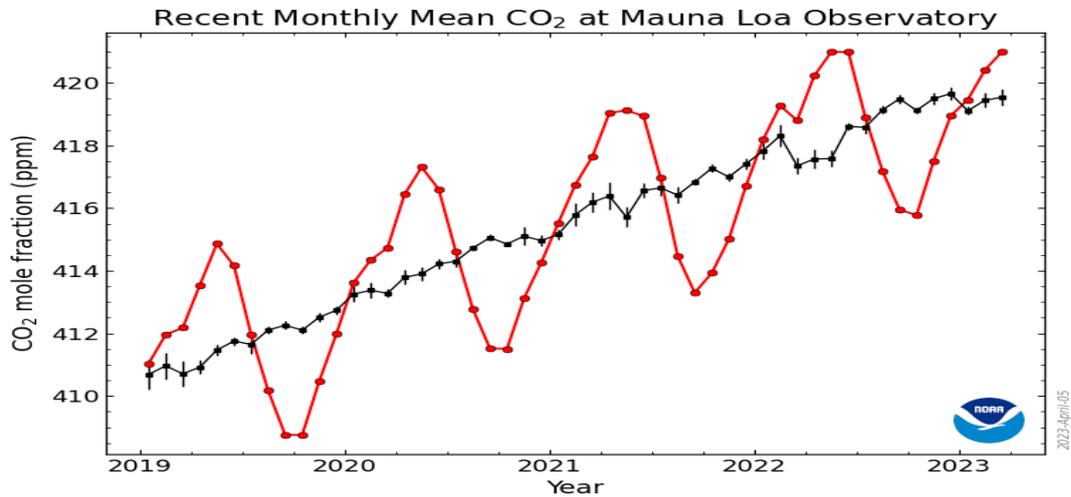


Figura 3. O dente de serra do gráfico mostra a ascensão da concentração mundial do dióxido de carbono na atmosfera em Mauna Loa HW, localidade erma que se presta como media atmosférica mundial.

Já na Fig. 4 apresentamos a constatação de que a população do mundo foi controlada a custas de fome, pestes, invasões, guerras que dizimavam até 200 milhões de pessoas em alguns desses eventos; e que a partir do século XXI com a maior expectativa de vida, evolução da medicina, abundância de alimentos e a paz relativa dos últimos 50 anos explica a explosão demográfica com a projeção de 9 bilhões de seres humanos em 2050 que “funcionam” 24 h/dia emitindo um carga carbônica (“carbonic load”) à razão de cerca de 300g CO_2 /8h/pessoa, em nível de atividade laboral moderado, ou seja 9 milhões de toneladas de CO_2 por dia que com certeza diante do perfil da curva podemos inferir que a população do planeta também tem forte contribuição nos níveis desse gás na atmosfera.

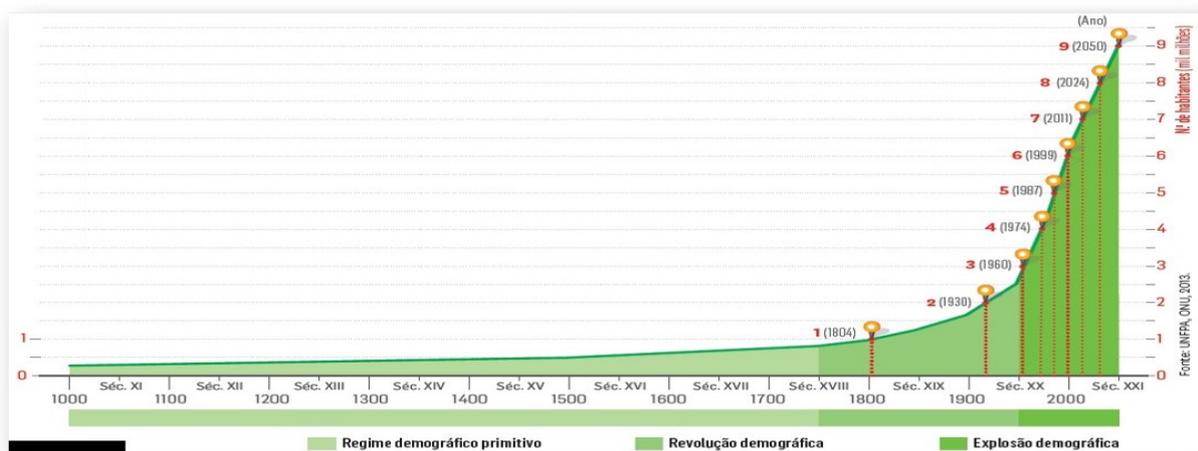


Figura 4. A explosão demográfica no século XXI coincide também com a curva de acessão do dióxido de carbono, pois todos respiram emitindo 1 kg CO_2 /dia e também utilizam os meios de transporte base queima combustível sólido.

Atualmente pode-se estabelecer, de forma customizada, a qualidade do ar interno nos aspectos de concentração de CO_2 , VOC, $PM_{2,5}$ e O_3 em adicional as variáveis tradicionais de temperatura, umidade e velocidade do ar, estas vinculadas a sensação de conforto e bem estar.

2. Tecnologias de tratamento do ar

Agora os projetistas de sistemas de AVAC-R devem estar mais ciosos de suas responsabilidades em se adaptar a essa radiometria do ar que revela a necessidade de se lançar mão de tecnologias BADCT (“Best Available Demonstrated Control Technology”) na garantia da qualidade físico-química-biológica do ar em ambientes internos. Para tal podem contar com a migração de tecnologias industriais de controle de poluentes, como a filtração líquida promovida por lavadores de gases, scrubbers e precipitadores hidrodinâmicos como uma opção de primeira seleção em função da elevada eficiência alcançada nas três naturezas de poluentes a controlar, ou seja material particulado micrométrico como os antropogênicos $PM_{1,0}$ capazes de alcançar os alvéolos pulmonares, químicos como o dióxido de carbono e de nitrogênio, e ativos biológicos como vírus e bactérias que mostraram a vulnerabilidade dos sistemas AVAC-R durante a pandemia do COVID que tornou inservíveis as edificações corporativas sem janelas.

As recentes publicações na ANSI/ASHRAE standard 62.1(2022), Position Document on Filtration and Air Cleaning (2015), e Positions on Infectious Aerosols (2022), assim como nas EN13779:2012, sobre a qualidade do ar, nos causa perplexidade o fato de sequer existir uma única citação acerca de tecnologias de tratamento de particulados, gases e aerossóis por rota úmida. As publicações mais recentes, numa resposta ao combate de ativos biológicos pós-COVID, citam tecnologias ativas como ozonólise, emissão UVc, foto catálise, filtros eletrostáticos e adsorção como o carvão ativado.

Na revisão da NBR16401 existe a previsão de uso de tecnologias por rota úmida para filtração líquida do ar, inclusive em arranjos sem filtros mecânicos que apesar de universalmente difundidos, tem eficiência inicial de apenas 60% da eficiência nominal na partida de seu ciclo de uso, elevando-se até a nominal; a Fig. 5 mostra a campanha de uso como se forma o bolo de parede (“wall cake”) pelo material particulado retido. Os filtros mecânicos evoluíram muito nas últimas décadas com melhorias estruturais de suas molduras que impedem fugas de ar, matérias tipo TNT Tecido não tecido (“no woven”) poliméricos mais eficientes e montagem plissadas que aumentam área de filtração.

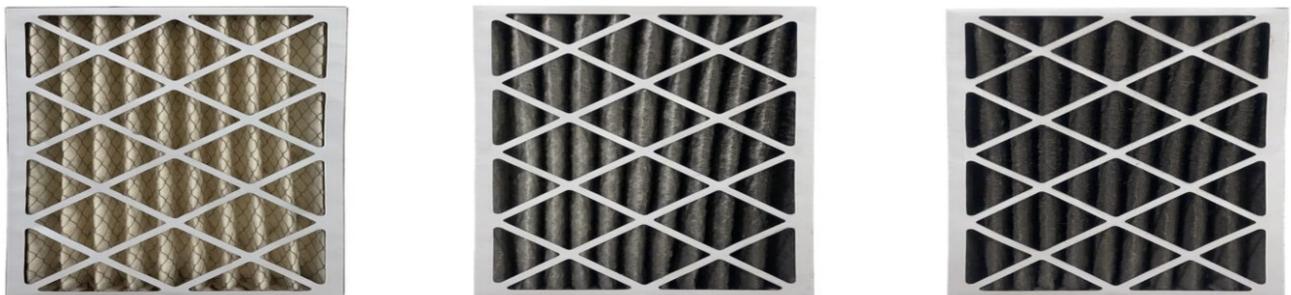


Figura 5. Filtro novo início de campanha ($\eta \geq 60\%$), com 30 dias de uso e com 90 dias de uso, onde η é a eficiência nominal do filtro.

Adicionalmente, constata-se que a contaminação é multimodal com poluentes em estados físicos distintos e dependendo do tipo de contaminantes a serem removidos seleciona-se o princípio tecnológico para remoção de contaminantes. A publicação da ASHRAE- Position Document on Filtration and Air Cleaning (2021), cita no sumário da última revisão do documento:

- “Os filtros mecânicos demonstraram reduzir significativamente as concentrações internas de partículas transportadas pelo ar. Evidências empíricas modestas mostram que seu uso terá efeitos positivos sobre saúde.
- Foi demonstrado que os filtros eletrônicos variam de relativamente ineficazes a muito eficazes na remoção de partículas transportadas pelo ar em ambientes internos. Estudos de ionizadores mostraram resultados que variam de nenhum benefício para algum benefício para sintomas agudos de saúde.
- Existem alguns purificadores de ar absorventes que demonstraram reduzir substancialmente as concentrações de contaminantes gasosos. Existem dados empíricos mínimos que indicam os efeitos dos purificadores de ar por adsorção na saúde.
- Foi demonstrado que as tecnologias de oxidação fotocatalítica removem contaminantes nocivos, ser ineficaz na remoção de contaminantes e/ou gerar contaminantes nocivos durante o processo de purificação do ar. Não há dados sobre como seu uso afeta a saúde.
- Foi demonstrado que a energia germicida ultravioleta (UV-c) inativa vírus, bactérias e fungos. Alguns estudos mostraram que as tecnologias de limpeza do ar usando desinfecção UV-c (também denominada irradiação germicida ultravioleta [UVGI]) produzem efeitos benéficos à saúde. Há também estudos que falharam em detectar benefícios para a saúde.
- Muitos tipos de purificadores de ar autônomos embalados usando combinações de tecnologias de purificação de ar estão disponíveis. Dados científicos abordando os efeitos desses purificadores de ar em saúde são escassos e inconclusivos.
- Os efeitos negativos para a saúde surgem da exposição ao ozônio e seus produtos de reação. Conseqüentemente, os dispositivos que usam a reatividade do ozônio para limpar o ar não devem ser usados em espaços ocupados. Extrema

cautela é necessária ao usar dispositivos nos quais o ozônio não é usado para fins de limpeza do ar, mas é emitido involuntariamente durante a limpeza do ar processo como um subproduto de sua operação.”

Apesar das recomendações sobre desenvolvimentos futuros de dispositivos de filtragem e limpeza de ar serem enfaticamente detalhadas e recomendadas, mais uma vez o uso da rota úmida não é sequer vislumbradas ou citada em quaisquer um dos fóruns técnicos americanos ou europeus, apesar do consenso de todos que após uma precipitação pluviométrica o ar fica limpo; por outro lado o emprego de tecnologias do campo industrial, consagradas pela literatura, como a lavagem do ar por aspersão líquida, fluxo turbulento ou centrifugação são amplamente empregadas no controle dos mesmos poluentes em condições muito mais adversas de temperatura e concentração. Cabe aqui o registro histórico da definição de ar condicionado por Willis Carrier que incluía a lavagem do ar como método de purificação,

“Air conditioning is the control of the humidity of the air by either increasing or decreasing its moisture content. Added to the control of the humidity are the control of temperature either by heating or cooling the air, the purification of the air by *washing* or filtering the air, and the control of air motion and ventilation.
Dr. Willis Carrier”

Como o título do trabalho sugere, a radiometria do ar mostra que a matéria prima do AVAC-R está modificada e, portanto, faz-se necessário maior rigor na qualificação físico-química-biológica do ar. Os parâmetros de projeto devem obrigatoriamente incluir os padrões de fungos e bactérias, material particulado, dióxido de carbono e ozônio estabelecidos de acordo com os valores normatizados pela NBR17037.

Temos a convicção de que o tratamento do ar por via úmida refrigerada irá assegurar a qualidade do ar e permitir a redução nas taxas de ventilação do ar externo, devido à redução drástica do teor de CO₂, responsável em grande parte pela necessidade de taxas elevadas de ar externo nos sistemas de climatização das edificações.

Quando falamos da eficiência e efetividade das tecnologias de rota úmida, temos que ter em mente o conceito fundamental que está baseado na necessidade de convergência da entropia para maximizar as transferências de massa e o uso de água alcalina refrigerada para minimizar o impacto na entalpia do sistema. Portanto a eficácia dos depuradores de ar via úmida está diretamente vinculada ao meio mecânico de contato entre os fluidos em fases distintas, e para alcançar este efeito sinérgico temos os lavadores de gases (“scrubbers”) por aspersão em contracorrente, lavadores tipo Venturi com elevada sinergia de contato em garganta constrita e precipitadores hidrodinâmicos, equipamentos autoaspirantes que consorciaram o efeito Venturi com a força centrífuga. Todos objetivam elevada sinergia de contato para favorecer as transferências de massa e energia; tratam-se de reatores dinâmicos que promovem eficientes reações de neutralização e arraste hidráulico de partículas, principalmente quando operados com líquido alcalino refrigerado.

Ensaio comprovam a capacidade da rota úmida em extrair do fluxo de ar os agentes biológicos aerotransportados, como fungos, bolores, vírus e bactérias em níveis muito relevantes e a operação com líquido alcalino (pH=7,5) assegura a dissolução da capa protetora de LPS (lipopolissacarídeos) dos microrganismos que assim são neutralizados, atuando, portanto, como barreira biológica eficaz no controle e redução das taxas de contaminação respiratória por esses microrganismos. Já com o contaminante ou marcador químico da qualidade do ar, dióxido de carbono CO₂, promove-se sua maior solubilização no mesmo líquido alcalino refrigerado, alcançando assim sua conversão em um sal solúvel pela lavagem do ar; trata-se de tecnologia CCT (“Carbon Capture Transform”), onde o gás CO₂ é transformado em um sólido solúvel de bicarbonato de sódio, ou seja atuamos na composição do ar a ser insuflado na edificação de maneira a estender o ciclo de uso do ar pois a carga carbônica foi reduzida juntamente com demais contaminantes, promovendo a consequente redução do consumo de energia pela menor tomada de ar externo requerida.

O grande diferencial da rota úmida é o fato de atuar em todas as tipologias de contaminantes inclusive para sais dissolvidos na umidade típica de zonas costeiras onde a tomada de ar externo torna elegível apenas estes tipos de equipamentos e dispositivos, visando a confiabilidade operacional e a preservação patrimonial.

3. Metodologia e amostragem de campo

O amostrador 3RBrasil é composto por sensores de medição que foram desenvolvidos em projeto de pesquisa apoiado pela FAPERJ, e utiliza três módulos dedicados, um para medição da concentração de particulados (PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM_{4.0} e PM₁₀), outro para medição de concentração de CO₂ e um último para medição de temperatura, umidade, pressão atmosférica. A medição de particulados através da contagem óptica de partículas é baseado em espalhamento de laser, sendo as grandezas PM_{4.0} e PM₁₀ estimadas e as grandezas PM_{1.0} e PM_{2.5} efetivamente medidas.

A medição de concentração de dióxido de carbono é baseada no método de espectroscopia não dispersiva em infravermelho de alta exatidão, sendo compensado automaticamente por variações lentas de calor e umidade. O sensor de CO₂ opera na faixa de 0 a 40.000ppm com uma incerteza expandida de medição de ±50 ppm.

O sensor integrado para medição de temperatura, umidade e pressão atmosférica é um sensor que tem sua melhor capacidade de medição estimada de ±0,12 hPa para pressão atmosférica absoluta, ±3 % U.R. e ±1 °C para temperatura.

Durante quatro dias de evento, com cerca de 25000 visitantes, temos a radiometria da Fig. 6 que demonstra a partida inaugural das medições com índices dentro dos padrões de qualidade do ar no período pré-evento e na sequência a oscilação senoidal conforme o horário de afluxo dos visitantes alcançando valores muito superiores aos recomendados à nível de material particulado e dióxido de carbono com característica de pico as 18:00 horas e amplitude máxima crescente principalmente para PM em função de um efeito cumulativo de suspensão da poeira dos tapetes dos corredores de trânsito

dos visitantes. Ao final da exposição coletamos amostras do líquido circulante no precipitador hidrodinâmico nos quatro dias do evento que foram analisadas e comprovaram a transformação do dióxido de carbono CO₂ pela formação de carbonatos com concentração de 2424 mg/l, foi ainda certificado a inatividade biológica com índices de bactérias como 450UFC/ml e fungos na faixa de 390 UFC/ml, ambos típicos de água potável.



Figura 6. Senoide típica de exposição SP-2023 com horário abertura/fechamento picos de CO₂, em cenário real

O Air Quality Guidelines da OMS (2021) alterou drasticamente os padrões vigentes desde 2005, e tornaram muito mais restritivos os padrões de Qualidade do Ar em Interiores para valores como PM_{2,5} = 5 µg/m³ como média anual e 15 µg/m³ como exposição de curto prazo(24h). Ficamos perplexos com todos os valores dos indicadores de qualidade do ar nos gráficos do monitoramento contínuo, onde a concentração de PM_{2,5}=44,8 µg/m³ foi alcançada no terceiro dia, com o CO₂ atingindo 1302 ppm, mesmo tratando-se de uma instalação de grande porte (850.000 m³) com 17 m de altura e com climatização moderna. Constata-se que todos os estágios de filtragem mecânica foram insuficientes para assegurar um ar dentro dos parâmetros de qualidade preconizados pela sociedade atual tão traumatizada pela pandemia de COVID 19, quando muitas soluções foram ensaiadas e as edificações mostraram-se incapazes de receber seus usuários.

Desde 2009 estamos desenvolvendo e acompanhando implantações em tomadas de ar externo para climatização em locais com contaminantes quer sejam negro de fumo e poeira urbana, como também odores e atmosfera salina típica de zona costeira. Ensaio efetivo de campo, em 2023, numa instalação implantada em 2017 num Shopping Center com o objetivo de extrair a névoa salina do ar que provocou corrosão de todos os instrumentos elétricos de medição do empreendimento, culminando com um apagão em pleno horário comercial. A instalação além de qualificar nos aspectos físico-químico tem controle termo higrométrico, sendo aplicado um banco de resistências e um evaporador secundário na linha de forma a garantir, ao longo de todo ano e sob quaisquer condição climatológica, o set up de projeto: 24°C@55% U.R. Conforme a Fig. 7 instalamos, de forma sincronizada, dois amostradores contínuos, um na tomada de ar e outro no ambiente beneficiado, e após alguns dias de extrema estabilidade dos dados, face à reduzida incidência de poluentes na região, optamos por gerar na última hora de medição, a simulação de cenários extremos com vista a caracterizar o abatimento de material particulado e dióxido de carbono. Para tal foi empregado um cilindro de dióxido de carbono de 10 kg descarregado na entrada do ambiente da casa de máquinas, local que não recebe limpeza regular contendo elevadas quantidades de poeira; formou-se instantaneamente uma nuvem concentrada de material particulado suspenso pelo CO₂ aspergido sob pressão que foi processado em fluxo pelo precipitador hidrodinâmico que capta o ar do local.



Figura 7. Cenário TAE-

precipitador hidrodinâmico refrigerado

ambiente interno.

A Fig. 8 demonstra a estabilidade e a perturbação provocada, quando se alcançou valores de 6852 ppm de CO₂ no sensor de entrada e simultaneamente 1204 ppm no ambiente interno, comprovando redução de 82,4% depois confirmada

por laudo da GHS que mostrou a elevação de 166 % no teor de carbonatos no líquido circulante. Cabe registrar que o dióxido de carbono é mais solúvel no líquido alcalino refrigerado empregado no equipamento. A umidade restou estável, como confirma o histórico de controle de 6 anos dos sensores de temperatura e umidade fixos locais.

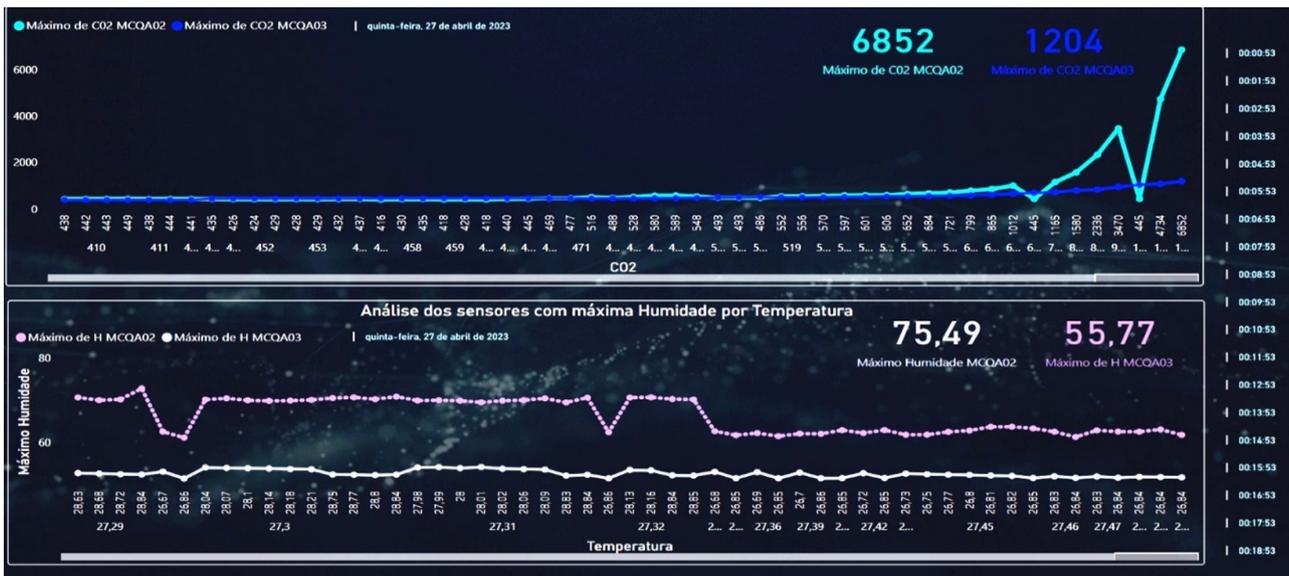


Figura 8. Solubilização e absorção química de CO₂, cenário simulado, temperatura e umidade mantidas estáveis

Já na Fig. 9 temos o comportamento do material particulado extraído hidraulicamente com resultados impressionantes de 98,41% de redução para PM₁₀, e os resultados de pico para PM_{2,5} alcançou 97,7% e para PM_{1,0} significativos 94,8% valor que eleva a tecnologia de tratamento do ar pela rota líquida ao nível equivalente mínimo de uma filtragem mecânica F9(85-95% PM_{2,5}). A análise dos líquidos inicial e final do precipitador hidrodinâmico demonstra um incremento do teor inicial de carbonatos de 14,9 mg/l que alcançou 39,7 mg/l, como CaCO₃, enquanto o pH passou de 7 para 7,99 e a condutividade elétrica de 132,5 para 153 μS/cm demonstrando incremento de íons salinos no período.



Figura 9. Filtragem Líquida PM_{1,0} e PM_{2,5}, picos em Cenário simulado

4 CONCLUSÃO

A evolução dos sensores de monitoramento da qualidade do ar que saíram dos arcaicos amostradores gravitacionais para tecnologia ótica à laser permitiu rápidas avaliações, com geração de series históricas em tempo real e contínuo para cenários distintos, colaborando de sobremaneira na validação da tecnologia de filtragem líquida dos depuradores por rota úmida. Ensaios reais com os monitores da 3RBRASIL caracterizaram a eficiência em nível elevado para PM_{2,5}, CO₂ e o laudo da GHS os demais alergênicos e ativos biológicos como atestado pela análise do líquido circulante após 4 dias de evento em uso contínuo, sem gerar descartáveis e mantendo performance constante.

Nossa perspectiva agora a partir do patamar alcançado em ambientes públicos de porte associado ao desafio global d e descarbonização da atmosfera é de aplicar a tecnologia da filtragem líquida tratando uma fração do ar de retorno do sistema de climatização de forma a interagir na depuração do ar “usado” removendo os contaminantes internos gerados pelos ocupantes de forma a demonstrar a redução do consumo de energia e a melhora significativa da qualidade do ar interno com uma menor necessidade de vazão de ar externo, pois como demonstramos 1200 ppm de concentração de

CO₂ impõe atualmente no expurgo de 99,88% da vazão do ar que contem mais de 20,88% de oxigênio utilizável, ou seja em breve iremos gerenciar o QAI pelo monitoramento do CO₂ presente e do O₂ disponível na atmosfera interna do ambiente. Outra desafio que estabelecemos é o de desenvolver um protocolo que correlacione as taxas de infecção hospitalar que pode alcançar o alarmante percentual de 4,5% até 14% dos internados, com incidência significativa da contaminação aérea, e que a sua redução pelo emprego de tecnologias de rota úmida capaz de inertizar ativos biológicos circulantes em sistemas de climatização hospitalar poderá trazer um alento a todos os atores paciente- hospitais e planos de saúde, pois todos perdem com os custos de antibióticos injetáveis específicos e internações prolongadas. Essas frentes de pesquisa contribuem para viabilizar numa análise de amplo espectro que o argumento da elevação umidade da rota líquida inviabiliza seu emprego haja vista que o espectro de umidade relativa foi alargado e até as mudanças climáticas tem obrigado em certos períodos a umidificarmos o ar para alcançar o conforto, e o objetivo primaz que passou a ser a qualidade do ar com conforto termo higrométrico.

5 REFERÊNCIAS

- ANSI/ASHRAE Standard 62.1, 2022-Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality.
- ANSI/ASHRAE Standard 62.2-, 2022-Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings.
- ASHRAE. ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning, 2015. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols, 2022. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning, 2021. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- CEN. EN 13779:2012. Ventilation for non-residential buildings, 2012 - Performance requirements for ventilation and room- conditioning systems. Brussels: European Committee for Standardization.
- EPA. <https://www.epa.gov/iaq-schools/why-indoor-air-quality-important-schools>
- EPA. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for PM .2024. <https://www.epa.gov/pm-pollution/national-ambient-air-quality-standards-naaqs-pm>
- Fonseca, A.; Abreu, I.; Guerreiro, M.J.; Barros, N. Indoor Air Quality in Healthcare Units—A Systematic Literature Review Focusing Recent Research. *Sustainability* **2022**, *14*, 967. <https://doi.org/10.3390/su14020967>
- Microsoft climate (<https://www.msn.com/pt-br/clima/mapas/airquality>, 2024)
- Prada, Diddier et al, *Association of air particulate pollution with bone loss over time and bone fracture risk: analysis of data from two independent studies. Lancet Planet Health* 2017; *1*: e337–47 Available at [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(17\)30136-5/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(17)30136-5/fulltext)
- Virginia E Hawkins, et al. 2017. Purinergic regulation of vascular tone in the retrotrapezoid nucleus is specialized to support the drive to breathe Hawkins. *eLife* 2017;6: e25232. DOI: 10.7554/eLife.25232.

AIR RADIOMETRY REVEALS THE CHALLENGE TO TECHNOLOGIES FOR PHYSICAL, CHEMICAL, AND BIOLOGICAL PURIFICATION OF INDOOR AIR.

Abstract. Sensors with laser scattering counting technology from continuous indoor air quality monitors (IAQ) show concentrations of PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂ and VOC in modern, large, air-conditioned environments such as a center of events. In 2021, the WHO issued the Air Quality Guidelines with values such as PM_{2.5} = 5 µg/m³ as an annual average and 15 µg/m³ as short-term exposure (24h). Now designers of HVAC-R systems must be more aware of their responsibilities in changing this scenario by employing more comprehensive technologies to guarantee the physical-chemical-biological quality of air in indoor environments, such as liquid filtration typical of technologies industrial pollutant control, promoted by spray gas scrubbers, Venturis and hydrodynamic precipitators. The field test in 2023, in a Shopping Center installation, proved that liquid filtration has F9 efficiency for PM_{2.5} particulate matter and more than 98% reduction for carbon dioxide in a single stage and without disposable elements. The operation with refrigerated alkaline liquid ensures the dissolution of the LPS layer of the microorganisms that are neutralized and the conversion of CO₂ into a solid reaction product; This is CCT technology (“Carbon Capture Transform”), where the carbonic acid H₂CO₃ is transformed into a soluble solid.

Our perspective now is to develop a protocol that correlates hospital infection rates with airborne contamination and its reduction by the use of wet route technologies capable of inerting circulating biological assets in hospital air conditioning systems.

Keywords: IAQ, Particulate matter, CO₂, air filtration, decarbonization