

**ARTHUR SEQUEIRA AIKAWA
TED CRISTINO BORGES DE SOUZA**

**Monitoração contínua da qualidade do ar em ambientes internos para controle
inteligente de sistemas de aquecimento, ventilação, condicionamento do ar e
refrigeração (HVAC-R)**

**São Paulo
2015**

**ARTHUR SEQUEIRA AIKAWA
TED CRISTINO BORGES DE SOUZA**

**Monitoração contínua da qualidade do ar em ambientes internos para controle
inteligente de sistemas de aquecimento, ventilação, condicionamento do ar e
refrigeração (HVAC-R)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia,

São Paulo

2015

**ARTHUR SEQUEIRA AIKAWA
TED CRISTINO BORGES DE SOUZA**

**Monitoração contínua da qualidade do ar em ambientes internos para controle
inteligente de sistemas de aquecimento, ventilação, condicionamento do ar e
refrigeração (HVAC-R)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

**Área de Concentração:
Sistemas Eletrônicos**

**Orientador:
Prof. Dr. Leopoldo Ridéki Yoshioka**

**São Paulo
2015**

RESUMO

A qualidade do ar em ambientes internos (IAQ) vai muito além de simplesmente proporcionar bem-estar e conforto. Ela tem efeito direto sobre a saúde, produtividade e qualidade de vida das pessoas. Este trabalho de conclusão de curso visa destacar que a chamada poluição do ar em ambientes internos (IAP) afeta a todos, nos mais variados ambientes: restritos, amplos, com muitas ou poucas circulação de pessoas e a ineficiência dos sistemas comuns de condicionamento de ar. Procedeu-se então com o projeto, prototipação e construção de um sistema de monitoração da IAQ compacto, multissensorial, capaz de gerar séries históricas e permitir o controle automático da concentração de compostos orgânicos voláteis (VOC), sendo de simples integração a um sistema de condicionamento de ar de pequeno ou grande porte. Além disso, visa evidenciar a ineficiência dos atuais sistemas de condicionamento de ar (HVAC), através de passo ou ligado/desligado, consumindo uma quantidade alarmante de energia e, ainda, incapazes de controlar nenhum parâmetro de IAQ e ainda podem causar o agravamento da chamada "síndrome do edifício doente" (SBS) em caso de falta de manutenções periódicas. Estudos de caso mostram que a associação entre um sistema HVAC e uma luz ultravioleta de banda C (UVC), capaz de ionizar VOCs (processo de oxidação fotocatalítica, PCO), é o suficiente para, além de garantir uma elevação na IAQ, promover uma queda de cerca de 20% no consumo de energia e até 40% nos custos. Os resultados obtidos comprovaram pela ineficiência e até agravamento dos níveis de IAQ por parte do sistema HVAC instalado na sala de aula S-23. Além de promover uma queda na umidade relativa do ar, causando retenção de poluentes no ambiente, o sistema é incapaz de garantir a manutenção dos demais parâmetros sob níveis recomendados pelas normas internacionais e nacionais.

Palavras-Chave: Qualidade do ar em ambientes internos. QAI.

ABSTRACT

Indoor Air Quality (IAQ) goes far beyond simply providing well-being and comfort. It has a direct effect on the health, productivity and quality of life. This graduation final paper aims to highlight that the so-called indoor air pollution (IAP) affects everyone in various environments: narrow, wide, with many or few persons circulating and the inefficiency of the common air conditioning systems. Then proceeded with the design, prototyping and construction of a compact IAQ sensing system, multisensory, able to generate historical data and that allow automatic control over the volatile organic compounds (VOC) concentration, and with simple integration to a tiny or large air conditioning system. Moreover, it targets to draw attention to the ineffectiveness of the present air conditioning systems (HVAC), based on stepper motor or on/off, consuming an alarming amount of energy and also unable to control any IAQ's parameter and can still cause the so-called "sick building syndrome" (SBS) in case of periodic maintenance lack. Case studies show that the Association between an HVAC system and an ultraviolet light (UVC, C band), able to ionize VOCs (photocatalytic oxidation process, PCO), is enough to not only ensure a increase in IAQ levels, but promote about 20% drop in energy consumption and 40% in costs. The results obtained verify the inefficiency and even worsening in IAQ levels by the HVAC system installed in the class S-23. In addition to promoting a drop in relative humidity, causing pollutants retention, the system is unable to ensure the maintenance of the other parameters under recommended levels by international and national standards.

Keywords: Indoor Air Quality, IAQ.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Sala S-17 do prédio da Engenharia Civil na EPUSP. Esta sala	17
	tem uma distribuição espacial idêntica à da sala S-23 onde os	
	experimentos foram realizados	
Figura 2	– Estação de monitoração da qualidade do ar exterior da CETESB	18
Figura 3	– Microrganismos antes e após o uso de UVC no sistema de ventilação	29
Figura 4	– Custos com energia elétrica do Hospital Regional de Rio Grande	29
Figura 5	– Lâmpada UVC	30
Figura 6	– Filtros HEPA	35
Figura 7	– Princípio PCO	38
Figura 8	– Exemplo de uma placa cerâmica para produção de gás ozônio (O ₃)	39
Figura 9	– Tecnologia de Purificação de ar aprovada pela FDA	40
Figura 10	– Corte e princípio da parede de gesso que absorve formaldeído	41
Figura 11	– Esquema de Nível 0 do sistema de monitoramento	43
Figura 12	– Esquema de Nível 1 do sistema de monitoramento	44
Figura 13	– Sensor de CO, MQ-7	47
Figura 14	– Sensibilidade do sensor MQ-7. Razão de resistência pela concentração do gás. R _s é a resistência em diferentes gases e R ₀ é a resistência do sensor sob ar puro	47
Figura 15	– Sensor de O ₃ , MQ-131	48
Figura 16	– Sensibilidade do sensor MQ-131. Razão de resistência pela concentração do gás. R _s é a resistência em diferentes gases e R ₀ é a resistência do sensor sob ar puro	48
Figura 17	– Sensor PM – Sharp GP2Y1010AU0F	49
Figura 18	– Tensão de saída do sensor de PM versus concentração de particulado	49

Figura 19	– Sensor de luminosidade, TSL2561	50
Figura 20	– Sensor de movimento, HC-SR501	51
Figura 21	– Projeto 3D da caixa do sistema de monitoração	52
Figura 22a	– Caixa do sistema de monitoração da IAQ produzido em PLA	53
Figura 22b	– Versão que inclui todos sensores para monitoramento da IAQ e também detecção de presença (PIR e microfone)	53
Figura 23	– Configuração do ensaio na sala S-23. Sistema de Monitoração Laranja (Central)	57
Figura 24	– Configuração do ensaio na sala S-23. Sistema de Monitoração Cinza (Lateral 1)	57
Figura 25	– Configuração do ensaio na sala S-23. Sistema de Monitoração Laranja (Lateral 2)	58
Figura 26	– Receita oriunda de tecnologias para IAQ (por região, 2013- 2020)	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação utilizada pelas estações de monitoração da CETESP	19
Tabela 2	– Padrões usados em certificações	27
Tabela 3	– Classificação de filtros de ar	34
Tabela 4	– Classificação de filtros do tipo HEPA	35
Tabela 5	– Requisitos de projeto do sistema	42
Tabela 6	– Comparação com produtos disponíveis no mercado	43
Tabela 7	– Descrição do Esquema de Nível 0	44
Tabela 8	– Descrição do Esquema de Nível 1	45
Tabela 9	– Custos estimados para uma produção de no mínimo 100 unidades do produto final discriminado por itens	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Agência Brasileira de Normas Técnicas
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ALA	American Lung Association
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ASHRAE	The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASSOHQE	Association pour la Haute Qualité Environnementale
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CHA	Canadian Healthcare Association
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPA	Environmental Protection Agency
FDA	Food and Drug Administration
HVAC	Heating, ventilation, and air conditioning
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
IAQ	Indoor Air Quality
IAP	Indoor Air Pollution
ICIEE	International Centre for Indoor Environment and Energy
MAK	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OSHA	The Occupational Safety and Health Administration
PCO	Photocatalytic oxidation
SBS	Sick Building Syndrome
TVOC	Total Volatile Organic Compounds
VOC	Volatile Organic Compounds
WHO	World Health Organization

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação	13
1.2	Contexto	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Sala S-23	16
1.3.2	Sala do Professor	17
1.3.3	CETESB/QUALAR	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	IAQ	20
2.2	Normas	24
2.3	Certificações	26
2.4	Projetos Brasil e Mundo	28
3	REVISÃO TECNOLÓGICA	31
3.1	Parâmetros monitorados	31
3.1.1	Parâmetros físicos	31
3.1.2	Parâmetros químicos	32
3.1.3	Parâmetros biológicos	37
3.2	Tecnologias relevantes	38
3.2.1	Photocatalytic oxidation (PCO)	38
3.2.2	Ozone ceramic plate	38
3.2.3	UV flu air purification technology	39
3.2.4	Parede de gesso que absorve formaldeído do ar interior	40
3.2.5	Ultraviolet germicidal irradiation (UVGI)	41
4	PROJETO	42
4.1	Requisitos para o sistema	42
4.2	Benchmark	43
4.3	Decomposição funcional de nível 0	43
4.4	Decomposição funcional de nível 1	44
4.5	Descrição dos elementos sensitivos	46
4.6	Desenvolvimento da caixa de fixação	51
4.7	Custos	54

5	EXPERIMENTOS	55
5.1	Descrição dos ensaios	55
6	RESULTADOS	60
6.1	Sala Professor	60
6.2	Sala S-23	61
7	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	64
8	REFERÊNCIAS	66
	Anexo A	68
	Anexo B	69
	Anexo C	70
	Anexo D	71
	Anexo E	72
	Anexo F	73
	Anexo G	74
	Anexo H	75
	Anexo I	76
	Anexo J	77
	Anexo K	78
	Anexo L	79
	Anexo M	80
	Anexo N	81
	Anexo O	82
	Anexo P	83
	Anexo Q	84
	Anexo R	85

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (World Health Organization, WHO, em inglês), 4,3 milhões de pessoas morreram em 2012 devido à chamada poluição do ar em ambientes internos (indoor air pollution, IAP, em inglês). Para efeito de comparação, o mesmo estudo atribui à poluição do ambiente externo a morte prematura de 3,7 milhões de pessoas no mesmo ano. Uma pesquisa do International Centre for Indoor Environment and Energy (ICIEE, da Universidade da Dinamarca) demonstrou pela primeira vez, no ano 2000, que a produtividade no trabalho é afetada negativamente com a redução da IAQ (Indoor Air Quality, IAQ, em inglês) – nesse caso, a variação da taxa de ventilação e o aumento da concentração de CO₂.

Contra-intuitivamente, habitantes de grandes centros urbanos passam em média 90% de seu tempo em ambientes internos, seja em seus domicílios, ambientes de trabalho ou se locomovendo. Isso ajuda a explicar o porquê a Associação Americana de Pulmão (American Lung Association, ALA, sigla original) classificar a IAP como o quinto maior fator de risco à saúde pública. A crescente parcela da população mundial que vive em ambientes urbanos corrobora esta atenção dada à qualidade do ar.

A IAQ é um assunto ainda recente no Brasil. Apenas a partir de 1996, quando o Governo Federal proibiu o fumo em ambientes fechados, o tema ganhou destaque e culminou, quatro anos depois, na aprovação da Resolução número 176 (RE/ANVISA nº 176, de 24 de outubro de 2000) que discorre sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior. O tema vai muito além do risco da exposição à fumaça de tabaco, ou apenas garantir o bem-estar e conforto dos indivíduos. Visa-se a preservação da saúde das pessoas através do monitoramento e controle de diversos parâmetros, o que incorre no ganho de produtividade e qualidade de vida destes que ocupam o espaço.

Além disso, o tema se destaca pelo fator econômico. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (US Environmental Protection Agency ou EPA, em inglês) estima que a perda de produtividade, os custos médicos e o absentismo

devido doenças causadas pela IAP causam um custo anual aos empresários e governo da ordem de US\$ 60 bilhões.

Para piorar, os atuais sistemas HVAC são extremamente ineficientes. Segundo Pérez-Lombard (2007), em 2004, o consumo de energia elétrica em prédios comerciais na União Europeia foi de 37% do total da região, maior que o total gasto pela indústria (28%) e por transportes (32%). Apesar do alto consumo energético, estes são sistemas que não necessariamente garantem uma qualidade do ar satisfatória, mesmo quando operando constantemente. O suprimento de ar ideal para um cômodo, ou taxa de renovação, é proporcional ao número de pessoas em seu interior (Wargocki et al., 2000). Estes experimentos mostram que um aumento de 10 L/s/pessoa para 30L/s/pessoa pode elevar a produtividade em 1,8%. Posto em perspectiva, Considerando os 95 milhões de trabalhadores de tempo integral nos EUA, que recebem em média US\$36.000,00/ano (valores correspondentes à data do estudo), tal aumento na renovação de ar causaria um incremento de performance avaliada monetariamente em US\$ 36 bilhões ao ano.

1.2 Contexto

Na década de 70, a crise energética decorrente do "Choque do Petróleo" (episódio no qual o preço dessa commodity disparou mais de 400%), implicou a necessidade de se construirem edifícios mais eficientes do ponto de vista do consumo de energia. Consequentemente, os prédios passaram a ser hermeticamente fechados, como forma de economia de energia usada para o condicionamento do ar interior. No entanto, de forma colateral, a renovação do ar interior foi afetada drasticamente, aumentando a concentração de poluentes biológicos e químicos.

Tais poluentes biológicos (fungos, bactérias, ácaros, bioaerossóis etc.), químicos (monóxido e dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e enxofre, etc.) e Compostos Orgânicos Voláteis (VOC, Volatile Organic Compounds, compostos químicos orgânicos), presentes em ambientes fechados, são alguns dos fatores que implicam a "Síndrome do Edifício Doente" (da sigla em inglês, SBS, Sick Building Syndrome). Um edifício é dito "doente" quando pelo menos 20% de seus ocupantes apresentam sintomas transitórios associados ao tempo de permanência em seu interior, que tendem a desaparecer após curtos períodos de afastamento. Dentre

eles, pode-se citar: irritação no nariz, olhos, garganta, pele, fadiga, dor de cabeça, queda na concentração, náusea etc. [16]

Ainda, com o conceito de *Green Buildings*, existe uma demanda crescente por processos que aproveitem de maneira eficiente os recursos. A cada ano aumenta a participação dos prédios comerciais e residenciais no consumo global de energia de um país, já tendo excedido o que é consumido por setores, como o industrial e o de transportes. Nos países desenvolvidos são responsáveis sozinhos por cerca de 20% a 40% de toda essa energia consumida. Apenas os sistemas de condicionamento do ar (Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC, em inglês) são responsáveis por 20% de toda a energia consumida nos Estados Unidos. Essa tendência tende a aumentar, visto o crescimento populacional, demandas crescentes por serviços em prédios e exigências crescentes nos níveis de conforto.

No que tange a IAQ, além da correta taxa de renovação de ar, muitas vezes outros parâmetros são indevidos, como a concentração de CO₂ (Kosonen, 2004) e de compostos orgânicos voláteis (VOC, em inglês), como: formaldeído, benzeno, acetaldeído e xileno (Wang, Ang, Tade, 2000b).

1.3 Objetivos

O objetivo do projeto consiste em desenvolver, prototipar e realizar experimentos com um sistema de monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos (IAQ).

Um monitoramento eficaz é um componente essencial de um sistema de controle robusto. Logo, julgamos que este é o primeiro passo em direção a um sistema completo de controle da IAQ, que, posteriormente poderá ser desenvolvido com a inclusão de uma parte de atuação. A concretização do objetivo se dá com a concepção de um equipamento de monitoração multissensorial que permite a análise histórica dos dados do ambiente, equipamento este que deve ser simples, compacto e integrável aos sistemas comerciais de HVAC.

Por fim, foram feitos experimentos em ambientes reais e análises dos dados históricos gravados.

Com o intuito de garantir a viabilidade deste projeto as seguintes parcerias foram feitas:

- Empresa *Perfactory Sensorsystems*: suporte com o sistema de monitoração. Possui produtos capazes de medir temperatura, umidade relativa do ar e concentração de VOC;
- Professora Doutora Brenda Chavez Coelho Leite, do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP. Conhecimento de anos de pesquisa com sistemas HVAC. Prestou suporte e disponibilizou uma sala laboratório (S-23) localizada no prédio da Engenharia Civil para realização de experimentos. Nesta localidade poderemos realizar nossos experimentos;
- Professor Doutor Fernando Josepetti Fonseca, do Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Escola Politécnica da USP. Disponibilizou sua sala localizada no segundo andar do Departamento de Engenharia Elétrica para realização de experimentos; e
- CETESB, por meio do sistema online de informação “QUALAR” [22], disponibiliza abertamente ao público, desde 2009, diversos parâmetros com relação à qualidade de ar exterior em pontos espalhados pelo Estado de São Paulo.

1.3.1 Sala S-23

Trata-se de uma sala de aula dedicada ao ensino de geometria, representação gráfica e noções básicas dos softwares Autodesk AutoCAD e Siemens NX, oferecida aos alunos ingressantes de todos os cursos de engenharia da Escola Politécnica da USP (EPUSP). É equipada com workstations de alta capacidade de processamento gráfico e possui capacidade para até 48 alunos. Situa-se no Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP.

Figura 1 – Sala S-17 do prédio da Engenharia Civil na EPUSP. Esta sala tem uma distribuição espacial idêntica à da sala S-23 onde os experimentos foram realizados.



Fonte: www.paceepusp.files.wordpress.com

1.3.2 Sala do Professor

Localizada no segundo andar do departamento de Engenharia Elétrica da EPUSP, na sala do Prof. Dr. Fernando Josepetti Fonseca, foi instalada uma estação de monitoração dos seguintes parâmetros de IAQ: VOC, umidade relativa. Temperatura e luminosidade.

A sala caracteriza-se pela dificuldade de circulação e troca de ar com o ambiente externo quando completamente fechada (porta e janela). Apresenta, ainda, mobília de madeira, impressora e utiliza-se produtos de limpeza com frequência, características que facilitam a deposição de compostos orgânicos voláteis no ambiente, elevando a concentração principalmente quando a mesma se encontra fechada.

1.3.3 CETESB QUALAR

Desenvolvido de forma pioneira entre as grandes agências ambientais do mundo, por meio de uma parceria entre agência pública e terceiro setor, a CETESB e o Instituto de Energia e Meio Ambiente (OSCIP – Organização da Sociedade Civil de Interesse Público) disponibilizaram abertamente ao público, em

2009, o sistema online de informação detalhada sobre a qualidade de ar externo: "QUALAR". [22]

O provimento de informação aberta e gratuita à população interessada é pioneiro, porém, desde 1972 é feita a monitoração da qualidade do ar exterior na Região Metropolitana de São Paulo, quando foi feita a instalação de 14 estações de monitoração da concentração de dióxido de enxofre (SO₂) e fumaça preta.

É importante destacar que tal iniciativa vai muito além do acesso à informação, permitindo acompanhar as tendências e mudanças na qualidade do ar externo em diversas regiões, permitindo o planejamento de ações de controle.

Atualmente, a rede de qualidade do ar externo da CETESB é composta por 27 unidades estações (vide figura 2) na região metropolitana de São Paulo e outras 27 no interior e litoral do estado. A rede funciona de maneira automática, processando na forma de médias horárias diversos parâmetros relevantes. Essas médias são transmitidas para a central de telemetria da agência e armazenadas em um banco de dados, passando antes por um processo de validação técnica, para posteriormente serem disponibilizadas na internet.

Figura 2 – Estação de monitoração da qualidade do ar exterior da CETESB.



Fonte: <http://www.ambiente.sp.gov.br/>

Os parâmetros monitorados pela CETESB são: partículas inaláveis (PM10), partículas inaláveis finas (PM2,5), fumaça, ozônio (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂); além de outros relevantes: umidade relativa, temperatura, velocidade do ar. Entretanto, um ponto negativo reside no fato que algumas estações não são equipadas para o monitoramento de todos os parâmetros, fazendo que algumas regiões sejam monitoradas por apenas alguns destes.

A estrutura do índice de qualidade do ar utilizado pela CETESB, vide tabela a seguir, respeita o Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013.

Tabela 1 – Classificação utilizada pelas estações de monitoração da CETESB.

Qualidade	MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MP _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO (ppm)	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Boa	0 – 50	0 – 25	0 – 100	0 – 9	0 – 200	0 – 20
Moderada	>50 – 100	>25 – 50	>100 – 130	>9 – 11	>200 – 240	>20 – 40
Ruim	>100 – 150	>50 – 75	>130 – 160	>11 – 13	>240 – 320	>40 – 365
Muito Ruim	>150 – 250	>75 – 125	>160 – 200	>13 – 15	>320 – 1130	>365 – 800
Péssima	>250	>125	>200	>15	>1130	>800

Fonte: <http://qualar.cetesb.sp.gov.br/>

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Indoor Air Quality (IAQ)

A questão é tema de estudo a cerca de 40 anos ao redor do mundo. No Brasil, apenas metade disso. Foi guiada, num primeiro momento, devido às crescentes queixas relacionadas à qualidade do ar em edifícios com microclima artificial, àqueles "selados" surgidos pós-década de 70.

O artigo "*Symptoms prevalence among office workers of a sealed versus a non-sealed building: Associations to indoor air quality*" [16] realizou uma investigação detalhada justamente para buscar uma ligação entre sintomas ligados à síndrome do edifício doente (SBS), através de um questionário padrão, em prédios selados (com microclima artificial) em comparação a outros com ventilação natural. Ambos próximos e localizados no centro da cidade do Rio de Janeiro. Tomou-se como parâmetros: TPM, VOC individuais, TVOC, umidade, temperatura. A soma das concentrações dos vários vapores no ar é conhecida como TVOC (total VOC). São ingredientes de produtos como pinturas, tintas, vernizes, adesivos, desengordurantes e solventes para tintas e vernizes. Eles particularmente afetam tecidos ricos em lipídios, o que explica sua neurotoxicidade. Este estudo constatou maior predominância dos seguintes sintomas nos prédios selados: secura ocular e na garganta, rinite e letargia.

Ainda no Rio de Janeiro, o estudo "*Distributions of Indoor and Outdoor Air Pollutants in Rio de Janeiro, Brazil: Implications to Indoor Air Quality in Bayside Offices*" [17] foi conduzido em quatro andares na mesma coluna vertical de um único edifício. Foram coletadas amostras interiores e exteriores de VOC, formaldeído, TSP (total suspended particles), nicotina e UV-RSP (ultraviolet respirable suspended particles). Para todos os poluentes avaliados, a razão I/O foi maior nos escritórios localizados no topo do prédio. É importante ressaltar que os níveis de poluentes podem alterar em períodos muito curtos de tempo. Muitas vezes por situações corriqueiras, como andar sobre um chão encarpetado, usar uma impressora laser, uma copiadora, aspirador de pó e até utilizar materiais de limpeza podem espalhar substâncias nocivas pelo ar. Tudo isso é ainda agravado pela ventilação inadequada.

O artigo destaca que a principal fonte da poluição urbana do ar do RJ são os carros, devido ao transporte público predominante por ônibus movidos à diesel. Porém, um aspecto que faz da poluição do ar urbano no Brasil diferente da de outros países é o uso do etanol hidratado e a mistura de etanol e gasolina ("gasohol") no combustível de veículos leves desde meados dos anos 70. Isso cria não só combustões incompletas (ineficientes) como exala gases não compatíveis com os catalisadores que passaram a ser obrigatórios nos novos veículos desde 1992. Além disso, o uso de álcool para limpeza é muito comum no Brasil e é a principal fonte de acetaldeído em ambientes internos (ele é um dos principais contaminantes do álcool comercial). O 13º andar desse prédio apresentou o maior nível de acetaldeído, justificável por ser exatamente o escritório que passava por mais limpezas frequentes. Já o 9º andar, que não passou por atividade de limpeza, apresentou o menor nível de acetaldeído. A predominância de acetaldeído na atmosfera urbana brasileira também se deve ao uso de etanol como combustível dos automóveis.

A ineficiência na remoção de contaminantes não é o único problema dos sistemas HVAC, eles podem agravar a situação de um SBS em caso de falta de manutenções periódicas. O artigo "Decreased Respiratory Symptoms After Intervention in Artificially Ventilated Offices in São Paulo, Brazil" [18] realizou um estudo epidemiológico feito em um escritório localizado no 35º andar de um edifício no centro de São Paulo, cujos dutos de ventilação possuem mais de 20 anos de uso. Foi feito uma renovação do sistema HVAC: dutos foram trocados e as máquinas de ventilação passaram por manutenção e limpeza. Após isso foi constatada uma redução nos sintomas de prurido e congestão nasal, rinite, tosse persistente, entre outros em 76,5% do subgrupo da população. O mesmo problema fora constatado pelo estudo "Association of air-conditioning with respiratory symptoms in office workers in tropical climate" [19], que avaliou a correlação entre sistemas HVAC com sintomas respiratórios em uma cidade tropical. Comprovou-se, com elevado grau de confiança, que existe associação positiva entre sintomas nasais-oculares, tosse persistente, sinusite, vias respiratórias superiores em geral, e o trabalho em edifícios com ar condicionado em cidades com clima quente e úmido. O estudo foi feito com grupo de indivíduos submetidos a condições de trabalho sob ventilação natural e outro grupo sob um sistema HVAC.

A associação desses dois grandes problemas: tomada de ar externo contaminado, mais contaminantes interiores; que é agravada por uma ventilação falha e sem nenhum controle quanto aos principais parâmetros de IAQ, foi analisada no artigo, "Exposure to High Levels of Volatile Organic Compounds and Other Pollutants in a Printing Facility in Rio de Janeiro, Brazil" [20]. O local de estudo foi em uma gráfica localizada em uma rua de tráfego intenso e rodeada por prédios comerciais e residenciais. É sabido que hidrocarbonetos e outros solventes são amplamente usados pela indústria. Como vapor, eles são chamados VOCs. Os solventes orgânicos usados em gráficas são baseados em destilados de petróleo, alguns contém tolueno, metil-etyl-cetona, hidrocarbonetos clorados ou ciclohexanona. Existem outros estudos, citados neste artigo, que mostram que a exposição a esses tipos de solventes pode causar daltonismo (devido lesão de origem neurológica). E esses produtos não estão presentes só em ambiente industrial, mas, também, em produtos de uso doméstico. Em altas concentrações, VOCs são narcóticos potenciais e podem debilitar o sistema nervoso central. A exposição pode ainda levar a irritação dos olhos, trato respiratório e causar sensibilidade nos olhos, pele e pulmão. Em concentrações extremas, VOCs está associado ao câncer em animais de laboratório e problemas neuronais. Os resultados desse estudo mostram que componente interiores foram identificados numa concentração muito maior que no ar externo, principalmente devido as diversas fontes internas: impressoras, produtos de limpeza e outros. Os locais próximos às máquinas de impressão apresentaram as maiores concentrações em comparação com outros pontos de amostragem, principalmente devido a maior concentração de tintas, solventes nessa área. A razão I/O (indoor/outdoor) mostrou que a fonte de poluição majoritária é interna.

Um estudo de campo "Characterization of Indoor Air Quality in the Cities of São Paulo and Rio de Janeiro, Brazil" [21] coletou amostras internas e externas em doze locais nas cidades de SP e RJ e uma área rural, no verão do ano de 1993, na nacionalmente inovadora SEBIAQS (Southeastern Brazil IAQ Study). Os resultados relevantes obtidos constataram que os níveis externos de PM inalável (diâmetro inferior a 15 micrometros) no sudeste brasileiro é muito superior (212 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no RJ e 283 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em SP) em comparação com os padrões do Estados Unidos da América, e majoritariamente provenientes de fontes primárias: veículos, sal marinho, combustíveis, entre outros. O estudo destaca que o uso de

combustíveis com a mistura etanol-gasolina e etanol-gasolina-metanol são responsáveis pela redução nas emissões de monóxido de carbono (CO) na atmosfera, porém, em contrapartida ocorre uma elevação nos níveis de aldeído. Fato constatado nos ambientes internos, com significante contribuição do ar exterior para contaminação por aldeídos, diferentemente do que se verifica em outros países, onde a contaminação se limita aos materiais domésticos (principalmente materiais de madeira, emissores de formaldeído). Constatou-se também a ineficiência dos sistemas HVAC para redução das emissões de PM inalável.

No Brasil não há legislação que trata de padrões referenciais de IAQ para PM nos intervalos de PM10 e PM2.5. Por isso, muitos estudos, como o "Indoor Air Quality of Libraries in São Paulo, Brazil", se baseiam em legislações de outros países. Neste caso, considerou-se a lei canadense, que recomenda que a concentração de PM2.5 não exceda 100mg/m³ após 1h. Esse artigo buscou monitorar a IAQ de duas bibliotecas públicas na cidade de SP, atentando para PM na fração inalável (PM10) e na fração fina (PM2.5). A importância desse estudo se deve ao local extenso com elevada concentração e trânsito de pessoas, acumulação de papel, sistema de ventilação com ar condicionado, copiadoras e impressoras. Na grande maioria dos casos, a administração das bibliotecas se preocupam apenas com a conservação das coleções (baixa temperatura e umidade), mas um local propício para a preservação bibliográfica pode não ser adequado às pessoas. Os resultados mostraram que em ambas bibliotecas as concentrações internas de PM10 e PM2.5 foram superiores aos exteriores numa razão I/O entre 2 e 3 para ambas. Levando em consideração a lei canadense, todas as medidas ultrapassaram o limite. O período em que foi conduzida a monitoração decorreu durante os meses de agosto a setembro, se assemelhando com o nosso projeto, que também ocorrerá durante o inverno brasileiro. Ocorrência que merece destaque pois caracteriza-se por ser um período com pouco vento e baixa precipitação, dificultando a dispersão dos poluentes em suspensão no ar e, consequentemente, elevando a concentração de particulado nos ambientes internos. Neste estudo constatou-se que a partir do mês de outubro, quando as temperaturas médias alcançam os 24°C, as concentrações de PM10 e PM2.5 passam a cair, comprovando a influência da estação do ano na poluição por esses elementos.

Esses edifícios "vedados termicamente" surgiram prometendo ganhos enormes de eficiência nos aparelhos de refrigeração e aquecimento, minimizando o

consumo de energia. Porém, esses ganhos são extremamente minimizados devido ao impacto da conhecida SBS, comprovada por esses diversos artigos, sobre a saúde e produtividade de milhões de trabalhadores em todo o mundo.

Estudo realizado por Kosonen e Tan ([14]) destaca que apenas com a remoção de contaminantes do ar interior, sem nenhuma modificação na taxa de ventilação, foi possível obter um ganho de produtividade de 0,5 a 2%. Apesar de parecer pouco, o impacto econômico é equivalente ao custo anual de todo o sistema de ventilação. E, também, um ganho de 1% já justificaria uma despesa duas vezes maior na construção ou manutenção desse sistema.

Além disso, segundo um estudo realizado pela Universidade de San Diego ([15]), a elevação na produtividade, principalmente devido à redução no absenteísmo, foi avaliada em US\$ 5.204 dólares por trabalhador (considerando um salário base anual de US\$ 106.644 dólares). O que mostra que investimentos no sentido de melhorar a IAQ resultam, no mínimo, em excelentes retornos ao empresário.

2.2 Normas

Pela primeira vez, em 1982, a Organização Mundial de Saúde admitiu formalmente sobre a existência da SBS, os riscos desta à saúde das pessoas e a necessidade do estabelecimento de normas e direcionadores visando a IAQ. O que levou a isso, infelizmente, foi uma tragédia em um hotel na Filadélfia, estado da Pensilvânia nos Estados Unidos da América, onde comprovou-se que a contaminação do ar interno foi responsável por 182 casos de pneumonia e pela morte de 29 pessoas.

Já no Brasil a preocupação em se combater a SBS surgiu dezenas anos depois do caso da Filadélfia, apenas em abril de 1998, quando o então Ministro das Comunicações, Sérgio Motta, faleceu após ter seu quadro clínico agravado em função de fungos alojados em dutos do sistema de HVAC do hospital em que estava internado.

Em agosto de 1998, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), órgão regulador vinculado ao Ministério da Saúde, publicou a Portaria número 3.523, estabelecendo para todos os ambientes climatizados artificialmente a obrigatoriedade de elaborar e manter um Plano de Manutenção, Operação e

Controle (PMOC) de seus sistemas de HVAC. Porém, os critérios de avaliação se tais procedimentos refletiam em melhora da qualidade do ar interior só foram definidos em outubro do ano 2000, com a Resolução número 176, que definiu parâmetros biológicos, químicos e físicos para qualificar a IAQ.

Brasil:

Do ponto de vista normativo, o estabelecimento detalhado de padrões referenciais, a definição dos valores máximos de contaminação biológica, química e também dos parâmetros físicos do ar interior ocorreu no ano de 2003, com a Resolução ANVISA número 09, atualização da RE número 176/2000. Esta, que está em vigor atualmente, define também a identificação das fontes poluentes de natureza biológica, química e física, e também os métodos analíticos a serem utilizados para avaliações.

Por exemplo, o Valor Máximo Recomendável (VMR) para contaminação química de CO₂ e aerodispersóides são, respectivamente: menor ou igual a 1000 ppm de CO₂ como indicador de renovação de ar externo, recomendado para conforto e bem-estar (ASHRAE 62) e ≤ 80 mg/m³ de aerodispersóides totais no ar, como indicador do grau de pureza e limpeza do ambiente climatizado (CONAMA, RE 3/1990).

Os padrões mínimos à obtenção de qualidade aceitável de ar interior para sistemas de ar-condicionado são definidos pela NBR 16401 (parte 3 – Qualidade do ar interior) da ABNT.

Estados Unidos e outros países:

As regulações americanas sobre IAQ são fragmentadas e se sobrepõem. Nenhuma agência federal norte americana possui autoridade sobre a IAQ em prédios não industriais. Os cinco principais grupos regulatórios sobre esse assunto estão elencados abaixo:

1 - ASHRAE, The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers;

2 - OSHA, The Occupational Safety and Health Administration;

3 - EPA, Environmental Protection Agency, que estabelece a NAAQS, National Ambient Air Quality Standards.

4 - ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists;

5 - NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health;

O ANEXO A é apresentada uma tabela com a compilação das principais regulações e orientações pertinentes ao assunto de IAQ no mundo. Além das entidades já citadas, são abordadas:

1 - MAK, Maximale Arbeitsplatz-Konzentration, da Alemanha.

2 - Orientações canadense, definido pelo Health Canada, departamento nacional responsável pela saúde pública. [12]

3 - Orientações europeia, definido pela WHO.

A norma ASHRAE 55 (Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy) estabelece padrões mínimos para atingir o conforto térmico em interiores, abordando, além da temperatura, a radiação térmica, umidade e velocidade do ar. Uma ferramenta desenvolvida pela Universidade de Berkley, para o cálculo da zona de conforto térmico, pode ser utilizada gratuitamente no endereço <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>.

O padrão ISO 16000 (-9, -10, -10) estabelece testes de laboratório para determinação da emissão de produtos nocivos à IAQ. O padrão "-9" é específico para determinação da emissão de VOC's em determinado ambiente. Além desse, compreendem também: substâncias CMR (Carcinogenic, mutagenic, reprotoxic substances), TVOC (acima de 250 µg/m³), formaldeídos (de 62.5 a 10 µg/m³). Já os padrões ISSO 16000-3 e -6 definem a máxima concentração aceitável de diversos TVOCs, vide Tabela XYZ na próxima página.

2.3 Certificações

1 - Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)

É uma certificação destinada a construções sustentáveis e inovadoras que é concedida pela organização não governamental U.S. Green Building Council (USGBC), de acordo com critérios de racionalização e uso inteligente de seus recursos. Mais de 14 mil projetos em todo o mundo passaram por essa avaliação, que, inclusive, é a certificação sustentável mais conhecida e recorrida no Brasil. O

país está na quarta posição, com 50 edifícios homologados, dentre os países com maior número de empreendimentos certificados, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, Emirados Árabes Unidos e a China.

Dentre os critérios, destaca-se o "Indoor Air Quality Assessment", que é uma avaliação minuciosa da qualidade do ar interior, feita com base em diversas regulamentações, métodos e levando em consideração parâmetros como formaldeído, VOC, ozônio, CO e material particulado, conforme detalhado na Tabela abaixo.

Tabela 2 – Padrões usados em certificações.

Contaminante	Concentração Máxima	Método ASTM e U.S. EPA	Método ISO
Particulado PM10	50 µg/m ³ (ambientes de saúde 20 µg/m ³)	EPA Compendium Method IP-10.	ISO 7708
Particulado PM 2.5	15 µg/m ³		
Ozônio	0.075 ppm	ASTM D5149-02	ISO 13964
CO	9 ppm; máximo 2 ppm acima do nível externo	EPA Compendium Method IP-3	ISO 4224
TVOCs	500 µg/m ³ (saúde: 200 µg/m ³)	EPA TO-1, TO-17 ou EPA Compendium Method IP-1	ISO 16000-6
Formaldeído	27 ppb (saúde: 16.3 ppb)	ASTM D5197, EPA TO-11 ou EPA Compendium Method IP-6	ISO 16000-3

Fonte: <http://www.usgbc.org/node/2614245?return=/credits>

2 - French Démarche HQE certification

HQE (*Haute Qualité Environnementale*, www.eurofins.com/hqe.aspx) é o padrão para ambientes de alta qualidade, controlado pela associação parisiense

ASSOHQE (*Association pour la Haute Qualité Environnementale*). A certificação é concedida a prédios considerados sustentáveis, após aprovação em diversas normas, incluindo a ISO 16000 e outras que vão além da IAQ.

3 – Certificado Brasindoor de qualidade do ar de interiores

Concedido pela Sociedade Brasileira de Meio Ambiente e Controle da Qualidade do Ar de Interiores (Brasindoor) que visa homologar ambientes em conformidade com a Portaria 3.523 de outubro de 1998 do Ministério da Saúde e Resolução Complementar ANVISA Número 9 e normas ABNT NBR 13971, 14679, 15848, que exige padrões qualidade de Ar de Interiores para prevenir a SBS.

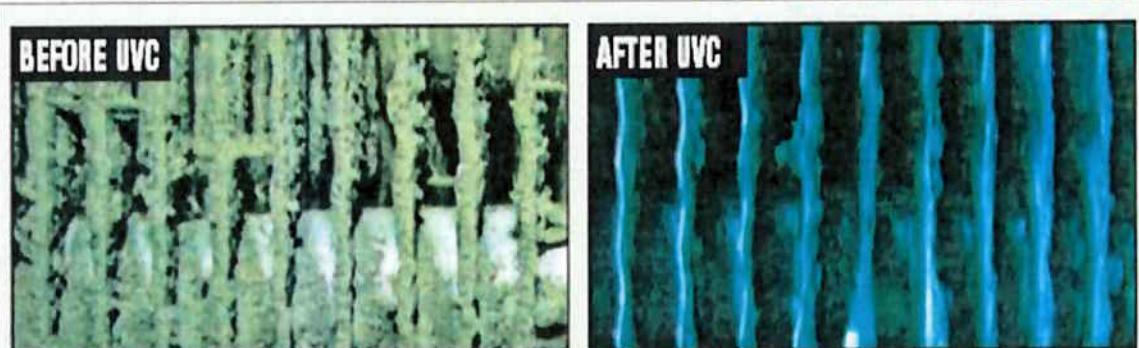
2.4 Projetos Brasil e Mundo

1 – Hospital Regional Rio Grande

Após a incorporação da luz ultravioleta-C (banda C, UVC) nos sistemas de ventilação do Hospital Regional Rio Grande, da cidade de McAllen (Texas, EUA - riohealth.com), os diretores se surpreenderam com uma queda no consumo de energia de cerca de 21%, sem considerar a elevação geral na qualidade do ar dos ambientes, proporcionada por essa tecnologia. De janeiro a maio de 2007, quando o estudo foi realizado (após a instalação das luzes UVC), foi constatada uma economia de US\$ 240.885 mil dólares nas despesas de energia. Fato que projeta uma economia anual da ordem de meio milhão de dólares ao hospital, em uma cidade que chega a atingir picos de 35°C em dias de inverno.

As luzes UVC são projetadas para penetrar até no mais microscópico micrório, todos os tipos de vírus e bactérias, destruindo seu DNA e RNA. Estudos mostram que o acúmulo de mesmo uma microscópica camada orgânica nos sistemas HVAC, além de causar danos à qualidade do ar dos ambientes, causa queda significativa na eficiência desses sistemas. Essas luzes são projetadas para manter esses sistemas sempre limpos, aprimorando a eficiência e reduzindo custos energéticos e de manutenção, vide figura 3 na próxima página.

Figura 3 – Microrganismos antes e após o uso de UVC no sistema de ventilação.

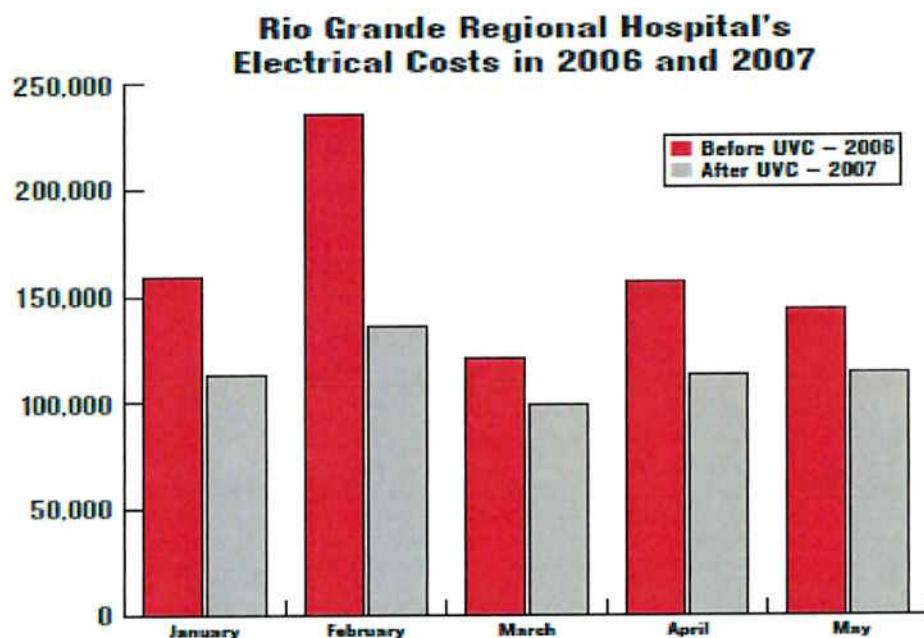


Biosfilms: A complex microbial matrix growing on coils and drain pans.

Fonte: "The NEWS" - THE HVACR CONTRACTOR'S WEEKLY NEWSMAGAZINE SINCE 1926 (10 de setembro, 2007)

Segundo o diretor Oscar Molano, quando a temperatura externa era de 21°C usava-se quatro chillers, agora, mesmo com uma temperatura de 32°C, usa-se apenas dois. A figura 4 abaixo destaca a economia de energia obtida pelo hospital antes e depois da instalação do sistema UVC.

Figura 4 – Custos com energia elétrica do Hospital Regional de Rio Grande.



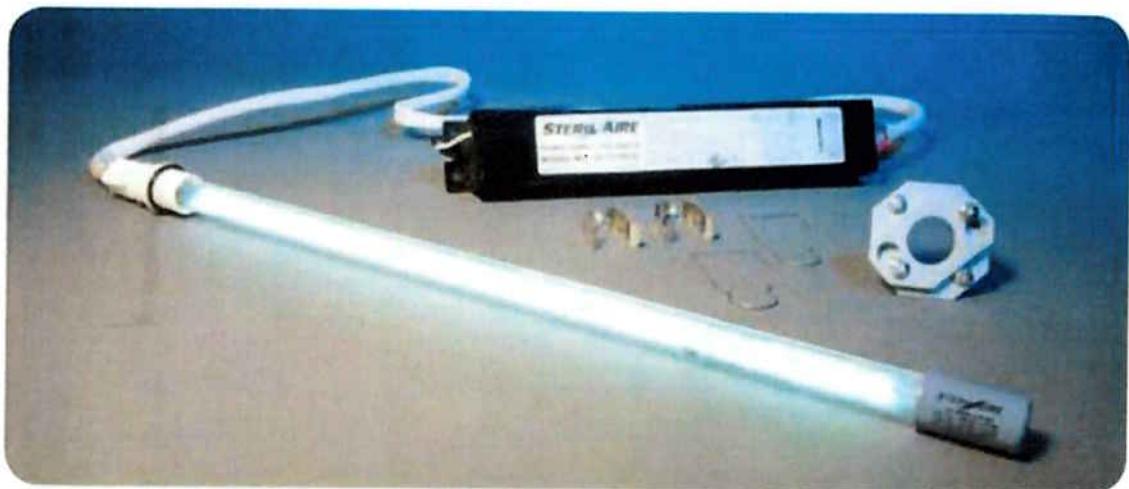
Fonte: "The NEWS" - THE HVACR CONTRACTOR'S WEEKLY NEWSMAGAZINE SINCE 1926 (10 de setembro, 2007)

2 – Biblioteca Ambrosiana

A biblioteca localizada em Milão (Itália), que preserva a coleção de Leonardo da Vinci desde 1637, está trazendo para exibição milhares de desenhos nunca antes abertos ao público graças à tecnologia UVC. "Após pesquisas extensas, determinamos que a tecnologia UVC oferece a melhor opção para preservar esses documentos com mais de 500 anos contra fungos e bactérias que trafegam pelos sistemas de ar", disse Giorgio Ricchibuono, presidente da Fundação Cardeal Federico Borromeo, que visa ajudar a biblioteca a preservar seu acervo.

Os sistemas UVC, vide figura 5, tem um dramático impacto na proliferação de fungos, reduzindo a proliferação em mais de 99%.

Figura 5 – Lâmpada UVC.



Fonte: THE HVACR CONTRACTOR'S WEEKLY NEWSMAGAZINE SINCE 1926 April 19, 2010

3 – Edifício Mohegan Sun

Um dos maiores casinos dos Estados Unidos, localizado em Uncasville, Connecticut, cortou cerca de US\$ 74.000,00 em despesas de condicionamento de ar graças ao conceito DCV (*Demand Control Ventilation*), projeto com ROI (return on investment) de 20 meses, que consiste em determinar o número de pessoas em cada área e ajustar a taxa de ventilação proporcionalmente. O sistema faz isso analisando a concentração de CO₂, particulado e TVOC nos ambientes do edifício de 33.800 m².

Fonte http://www.aircuity.com/wp-content/uploads/Aircuity-Case-Study_Mohegan-Sun_F071612.pdf

3 REVISÃO TECNOLÓGICA

3.1 Parâmetros monitorados

3.1.1 Parâmetros físicos

Dentro das variáveis físicas podemos considerar temperatura, pressão, velocidade e umidade relativa do ar.

A "ASHARE Standard 55-1992, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy" apresenta normas que pretendem alcançar condições térmicas que pelo menos 80% dos ocupantes achariam aceitáveis ou confortáveis.

A umidade relativa inferior a 25% está associada ao aumento do desconforto e a secagem das membranas mucosas e pele, que podem levar a formação de gretas e irritação. Valores de umidade relativa baixos também aumentam a eletricidade estática, que causa desconforto e pode dificultar o uso de computadores e outros equipamentos, fotocopiadores, etc. Níveis de umidade relativa elevados, podem resultar na condensação nas superfícies e o subsequente desenvolvimento de fungos.

Segundo a resolução ANVISA: RE9/2003 3.2, a faixa recomendável de operação da umidade relativa, nas condições internas para verão, deverá variar de 40% a 65%, com exceção de ambientes de arte que deverão operar entre 40% e 55% durante todo o ano. O valor máximo de operação deverá ser de 65%, com exceção das áreas de acesso que poderão operar até 70%. A seleção da faixa depende da finalidade e do local da instalação. Para condições internas para inverno, a faixa recomendável de operação deverá variar de 35% a 65%.

Muito comumente empregados no controle da temperatura, na climatização de ambientes, encontram-se: os Chillers, sistemas de resfriamento de água, na qual é usada para o arrefecimento do ar como agente refrigerante. Volume de Refrigeração Variável (VRV, ou VRF, Variable Refrigerant Flow), que consiste em um sistema de refrigeração para grandes espaços, composto de uma unidade externa conectada a várias unidades internas, que podem operar individualmente em diversos pavimentos. E, também, Volume de Ar Variável (VAV), usada em conjunto com sistemas HVAC a fim de possibilitar o controle de volume de ar a um determinado ambiente.

3.1.2 Parâmetros químicos

- CO₂

O dióxido de carbono (CO₂) é um gás incolor, inodoro e inflamável. Resultado de processos metabólicos e da combustão completa de combustíveis fósseis. Concentrações altas desse gás provocam o chamado “envenenamento por CO₂”, quando surge a sensação de falta de ar e, como forma de compensação, o sistema nervoso central causa uma elevação na frequência respiratória dos indivíduos expostos a essa condição.

Segundo a ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers) os níveis de CO₂ não devem ultrapassar 1000 ppm (700 ppm acima do nível externo) [11]. Níveis entre 2000 e 5000 ppm podem causar dores de cabeça, sonolência, queda na concentração, aumento os batimentos cardíacos e até náusea (pessoas sensíveis a CO₂ já podem começar a apresentarem esses sintomas a partir de 600 ppm, inclusive). Concentrações acima dos 5000 ppm podem causar danos severos à saúde, como: dano cerebral, coma e até chegar a ponto de chegar a uma parada respiratória.

Segundo Kosonen [8], a concentração de CO₂ é um eficaz indicador de IAQ.

- VOC

Compostos que possuem em suas constituições carbono e hidrogênio e, ainda, são capazes de volatilizar em temperatura ambiente. Os principais VOC encontrados em ambientes internos são: benzeno (fumaça de cigarro, escapamento de veículos), tolueno, xileno e etilbenzeno (tintas, adesivos, gasolina, pintura, papel de parede), formaldeído (madeira prensada, “fiberglass”, colas, cosméticos, vidro, chapas de móveis), acetaldeído. O formaldeído é o VOC mais encontrado em ambientes internos, chegando a ser considerado como um dos mais importantes. Concentração de VOCs a partir de 0.3mg/m³ já desencadeiam sintomas de irritação nos olhos e pele, cansaço, dores de cabeça, tonturas e sonolência.

Os formaldeídos (fórmula química HCOH) são incolores e possuem um odor pungente. É extremamente solúvel em água e também altamente reativo. Isso o faz capaz de irritar qualquer parte do corpo humano que contenha umidade e esteja exposto a esse composto, por exemplo: olhos e trato respiratório superior (cavidade nasal e oral, laringe e faringe). A emissão desse gás é diretamente

proporcional ao aumento da temperatura e umidade. Possui alta toxicidade. Concentrações acima de 0,1 ppm (0,03 ppm é considerada normal) já causam lacrimejamento nos olhos e irritação na garganta e nariz. Segundo a EPA, a exposição a concentrações elevadas de formaldeído está diretamente ligada ao aumento de câncer no trato respiratório.

- Material Particulado (PM)

Constituídos de aerodispersóides, partículas sólidas, ou aerossóis, líquidas, de tamanhos ínfimos. Estes últimos são classificados de acordo com sua formação: poeiras (resultantes do fracionamento mecânico de substâncias orgânicas ou inorgânicas), fumaça (combustão incompleta de materiais orgânicos), fumos (da condensação, ressublimação ou reação química de vapores provenientes de metais em fusão; fumos de óxido de zinco, e.g.), névoas (condensação de vapores ou dispersão mecânica de líquidos; névoa de tinta pulverizada, ácido crômico, e.g.). Há também o material biológico transmitido pelo ar (bioaerossóis), dentre os contaminantes biológicos incluem: microrganismos (fungos, bactérias e vírus), ácaros, pólen, pelo, traças e fezes de animais.

O tamanho dessas partículas varia de 0,001 a 100 micrometros. Entretanto, para fins da IAQ e os efeitos dessas partículas à saúde humana, considera-se o intervalo de 0,1-15 micrometros (Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health, Canada). Pois acima de 15 μ m são detidas antes de atingir os pulmões e, abaixo de 0,1 μ m são normalmente exaladas. Segundo esse mesmo comitê, exposição por períodos de vários anos sob níveis considerados moderados (180 μ g/m³ para particulado em suspensão ou 80 μ g/m³ para particulado inalável) estão correlacionados com o aumento de doenças respiratórias. Segundo a EPA, concentrações de particulados inaláveis até abaixo de 80 μ g/m³ têm sido associadas com aumento de risco de bronquite aguda em crianças.

A fim de proteger o ambiente contra essas impurezas provenientes do ar exterior ou do próprio ambiente, são utilizados filtros tanto na tomada de ar externo quanto no interior de dutos de circulação. A eficiência na filtragem é determinada em função da alta capacidade de retenção de particulado, possibilitando redução no fluxo de ar externo, e da vazão de ar externo, cuja

elevação implica na diluição dos contaminantes de modo que atinjam um nível aceitável.

A ABNT (NBR-6401) regulamenta diversos tipos de filtros e respectivas eficiências para utilização em diversos tipos de ambientes. Estes vão da classe Grossos (no mínimo filtros G1 para edificações e escritórios), Finos e Absolutos (exigência para estabelecimentos de saúde), vide tabela abaixo.

Tabela 3 – Classificação de filtros de ar.

Classe de Filtro		Eficiência %
Grossos	G0	30-59
	G1	60-74
	G2	75-84
	G3	85 e acima
Finos	F1	40-69
	F2	70-89
	F3	Acima de 90
Absolutos	A1	85-94,9
	A2	95 – 99,96
	A3	99,97 e acima

Fonte: ABNT NBR-6401

Entretanto, existem os filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air), que possuem eficiência de 99,97% com relação a partícula de $0.3\mu\text{m}$ e retêm pelo menos 99% dos agentes microbiológicos do ambiente, vide tabela abaixo.

Tabela 4 – Classificação de filtros do tipo HEPA.

HEPA class	retention (total)	retention (local)
E10	> 85%	---
E11	> 95%	---
E12	> 99.5%	---
H13	> 99.95%	> 99.75%
H14	> 99.995%	> 99.975%
U15	> 99.9995%	> 99.9975%
U16	> 99.99995%	> 99.99975%
U17	> 99.999995%	> 99.9999%

Fonte: <http://air.cheaa.com/2014/1219/430566.shtml>

Os filtros HEPA são comumente utilizados para barrar a propagação de bactérias e vírus através do ar. Existe, inclusive, sistemas de filtro HEPA que incorporam a utilização de luz ultravioleta de alta energia capaz de eliminar bactérias e vírus aprisionados pelo elemento filtrante. Algumas unidades mais bem classificadas são capazes de reter até 99,995% de impurezas, o que assegura um alto nível de proteção contra a transmissão de doenças pelo ar. Aviões modernos, como o Boeing 787 Dreamliner, inovaram ao adotar filtros HEPA (figura 6) para reduzir a propagação de agentes patógenos no ar que é constantemente recirculado.

Figura 6 – Filtros HEPA.

Fonte: <http://www.aafintl.com/en/browse-products>

Outro tipo de filtro muito utilizado são os que utilizam carvão ativado, material de carbono de elevada porosidade, para adsorção de gases e impurezas (odores, microrganismos etc). É extremamente recomendado a utilização desse tipo de filtro na tomada de ar externo caso este não atenda aos requisitos mínimos de qualidade de ar.

- NH₃

A amônia é um gás incolor, possui odor pungente e sufocante, menos denso que o ar, não inflamável, tóxico, corrosivo e muito solúvel em água (afetando diretamente, assim como os compostos anteriores, o trato respiratório superior). Muito comum em banheiros pelo fato de ser o principal gás proveniente da urina. Utilizado em sistemas de refrigeração (devido sua capacidade de ser facilmente condensado em líquido mediante frio e pressão) e produtos de limpeza.

- NO₂

Dióxido de nitrogênio é um gás extremamente tóxico, possui coloração marrom, odor pungente e baixa solubilidade em água (agindo principalmente no trato respiratório inferior: traqueia, pulmões, brônquios, bronquiolos e alvéolos). É produzido em ambientes interiores a partir da queima de combustíveis orgânicos (fogões a gás e aquecedores de ambientes) além da fumaça do cigarro.

A CHA (Canadian Healthcare Association) recomenda que os níveis desse gás em ambientes interiores não ultrapasse 0,05 ppm. Estudos da EPA demonstraram que exposição mesmo a concentrações baixas podem aumentar a reatividade bronquial em indivíduos asmáticos.

- SO₂

O dióxido de enxofre é um gás incolor e com cheiro característico. É um subproduto da combustão de combustíveis fósseis e compostos a base de enxofre. É altamente solúvel em água e facilmente absorvido pelas membranas do trato respiratório superior, formando ácido sulfúrico e sulfuroso.

Segundo a EPA, concentrações acima de 6 ppm são suficientes para irritar as membranas do sistema respiratório. Segundo estudos clínicos, pessoas asmáticas apresentaram quadro de brônco constrição mesmo em concentrações consideradas baixas (0,4 ppm).

A própria EPA indica que as concentrações interiores são, em geral, metade das exteriores. Isso se deve ao fato que a maioria das fontes desse gás são externas e, além disso, porque o SO₂ é rapidamente absorvido pela mobilha.

- O₃

O ozônio é um composto químico relativamente instável encontrado tanto em elevadas altitudes quanto ao nível do solo. Enquanto o primeiro é útil para evitar que os raios ultravioleta emitidos pelo sol atinjam a superfície terrestre, o segundo é prejudicial aos humanos mesmo em baixas concentrações, podendo causar tosses, dor no peito, irritação nos olhos e vias aéreas superiores, agravamento de quadro asmático, maior susceptibilidade a infecções respiratórias e até danos graves aos pulmões, quando sob exposição prolongada a níveis elevados.

O ozônio de interesse para IAQ é resultante da reação entre a luz solar com VOC's e óxidos de nitrogênio (NO_x). Além disso, o ozônio pode ser emitido no ambiente interno através de equipamentos de escritório como: impressoras a laser e copiadoras.

A WHO estabelece como recomendação a concentração de 0,05 ppm para ambientes confinados. Já a Health Canada, com relação a ambientes residenciais ou de escritório onde as pessoas possam sofrer uma exposição de longo prazo (8 horas ao dia ou mais), recomenda uma máxima concentração de 0,02 ppm (40 μ g/m³). O National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) recomenda que nunca seja excedido um limite superior de 0,10 ppm. A Occupational Safety and Health Administration (OSHA) exige que os trabalhadores não estejam expostos a uma concentração média superior a 0,10 ppm durante 8 horas. E, a Food and Drug Administration (FDA) exige que a saída de ozônio de equipamentos médicos interiores seja inferior a 0,05 ppm.

3.1.3 Parâmetros biológicos

Os contaminantes biológicos são constituídos por: ácaros, bactérias, fungos, leveduras, grão de polém, esporos etc. Apresentam alto grau de toxicidade e são conhecidos por causarem doenças infecciosas (resfriados, tuberculose), hipersensibilidade (ativação específica do sistema imunológico) e toxicidade (efeitos nocivos causados pelas toxinas). A inalação de grandes quantidades de esporos de fungos pode desencadear hipersensibilidade à pneumonia.

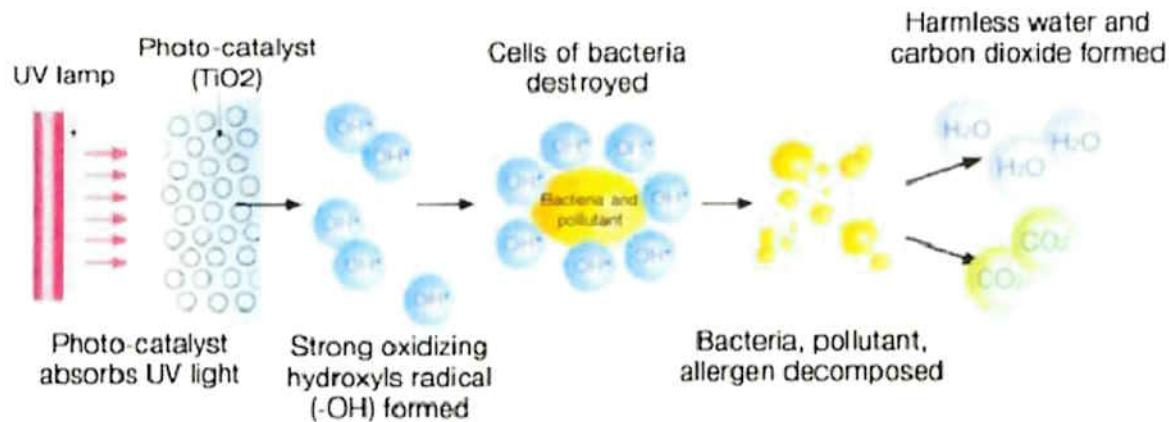
Os principais fatores que favorecem a proliferação de contaminantes biológicos são umidade elevada, temperaturas elevadas e ventilação reduzida. O primeiro é o grande responsável pela proliferação de ácaros e fungos sobre superfícies úmidas, por isso, recomenda-se manter a umidade relativa do ar menor do que 60%.

3.2 TECNOLOGIAS RELEVANTES

3.2.1 Photocatalytic oxidation (PCO)

A oxidação photocatalítica é obtida da combinação de dióxido de titânio (TiO_2) e luz ultravioleta, produzindo elétrons muito reativos que irão combinar com bactérias e VOCs presentes no ar, oxidando-os e tendo como resultado moléculas de CO_2 e H_2O , apenas, conforme figura 7 abaixo. Segundo o Departamento de Energia dos EUA a eficiência é próxima de 95%.

Figura 7 – Princípio PCO.



Fonte: www.air-oasis-uv-pco-sanitizers.com/how-pco-works.htm

3.2.2 Ozone ceramic plate

No caso desta placa cerâmica capaz de produzir ozônio através da ionização do oxigênio do ar, o agente oxidante são os íons de oxônio. Através de um mecanismo semelhante ao demonstrado na figura 7, micro organismos, odores e poluentes são oxidados.

A figura 8 mostra um exemplo de placa deste tipo. Para sua energização é necessário o conversor de alta voltagem que gera um campo elétrico suficientemente grande entre os elementos elétricos para provocar a ionização.

Figura 8 – Exemplo de uma placa cerâmica para produção de gás ozônio (O₃).

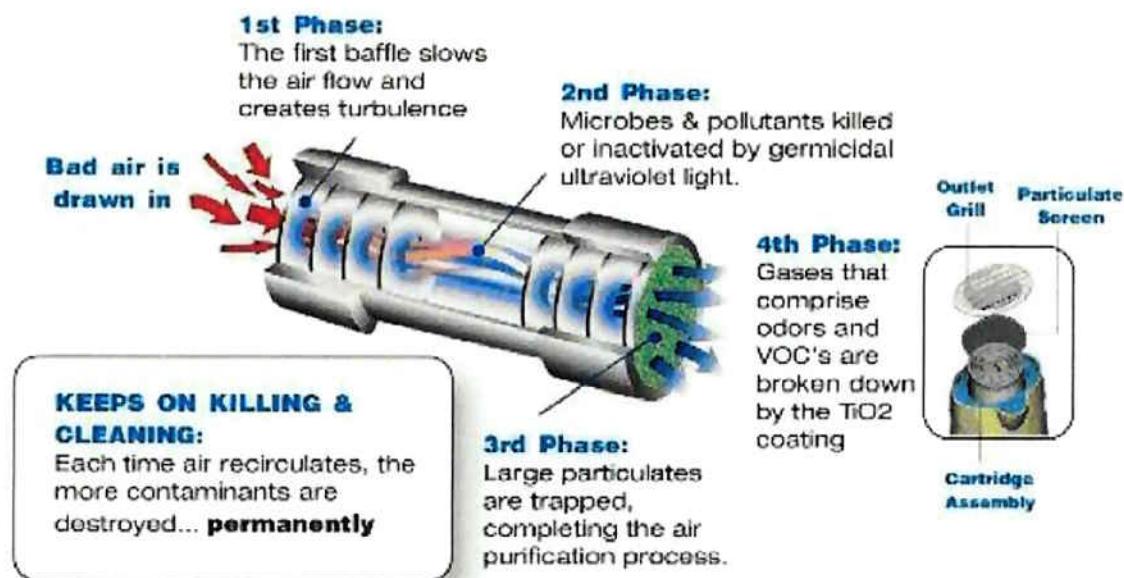


Fonte:http://www.weiku.com/products/11452098/NEW_Products_Ceramic_Plate_Ozone_Generator_KHP_3_5g_for_Air_Purifier_2.html

3.2.3 UV Flu Air Purification Technology

Tecnologia desenvolvida pela empresa UV Flu Technologies que é considerada uma das mais efetivas atualmente para a purificação do ar interior. A tecnologia, vide figura 9, que é aprovada pela agência americana FDA, utiliza a elevada energia proveniente da radiação ultravioleta em uma câmara patenteada responsável por exterminar microrganismos presentes no ar, reduzir odores e VOCs, tais como formaldeídos, acetona, benzeno e outros contaminantes do ar.

Figura 9 – Tecnologia de Purificação de ar aprovada pela FDA.

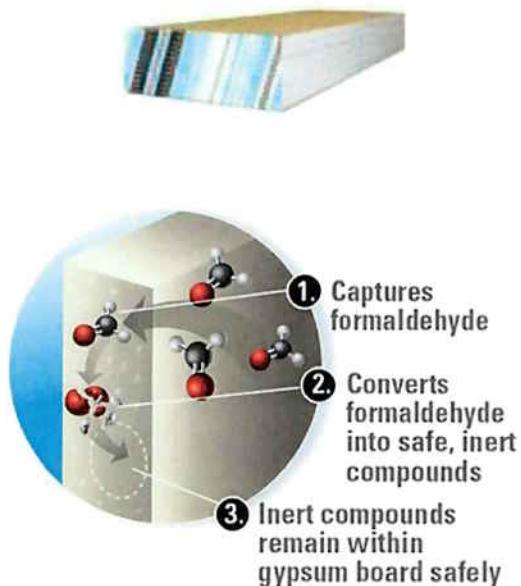


Fonte: www.uvflutech.com

3.2.4 Parede de gesso que absorve formaldeído do ar interior

A empresa CertainTeed desenvolveu o inovador "AirRenew® Gypsum Board", uma parede de gesso capaz de absorver formaldeído do ar interior, convertendo-o em um composto inerte. O princípio está ilustrado na figura 10, na próxima página.

Figura 10 – Corte e princípio da parede de gesso que absorve formaldeído.



Fonte: www.certainteed.com/airrenew

3.2.5 Ultraviolet germicidal irradiation (UVGI)

É um modo de desinfecção inovador por meio da luz ultravioleta banda-C (UVC), capaz de eliminar ou inativar microrganismos (vírus, bactéria, mofo) por meio da ruptura de seus DNA, usado para purificação do ar e água.

Apesar de inovador, atualmente, o método é conhecido desde 1878, quando Arthur Downes e Thomas Blunt publicaram um estudo científico comprovando a esterilização bacteriana exposta à radiação ultravioleta por volta de 250-260 nanômetros (citada como a “frequência mais efetiva”).

O sistema é muito simples, lâmpadas de UVC são instaladas no interior dos sistemas de ventilação e combatem as impurezas do ar antes que o mesmo seja distribuído aos ambientes de um edifício ou residência. O único risco ao ser humano está na possibilidade de exposição direta a esta radiação, capaz de queimar a pele, a córnea ou causar até câncer de pele. Por esse motivo, é extremamente recomendável a instalação de sistemas de segurança que desativem tais lâmpadas assim que alguma pessoa tente acessá-las dentro de um duto de ventilação.

4 PROJETO

4.1 Requisitos para o sistema

Deve-se considerar aqui os requisitos de Engenharia e Marketing, que devem ser atendidos.

Tabela 5 – Requisitos de projeto do sistema.

Requisitos de Marketing	Requisitos de Engenharia	Justificativa
1	Equipamento de monitoramento capaz de sensoriar os seguintes parâmetros relativos à IAQ com as respectivas sensibilidades: VOC (450-2000ppm), umidade relativa (0-100%), PM (0,1-15µm), temperatura (-5-55°C), luminosidade, pressão e ozônio (0.05 ppm).	Principais parâmetros referentes à qualidade do ar interior e com sensibilidade capaz de cobrir as faixas comprometedoras à saúde e bem-estar dos indivíduos.
2, 6	Peso máximo de 1kg, dimensão não deve exceder 100x100x100 mm, porém capaz de prover informações em tempo real sobre a IAQ ao usuário através de LEDs.	Equipamento de monitoração deve ser discreto e de fácil fixação em uma parede, por exemplo. E, ainda, permitir ao usuário saber a qualquer momento qual a qualidade do ar no ambiente em questão.
3, 4	Cabeamento reduzido e deve consumir uma potência máxima de 1 W. O equipamento funcionará 24/7.	Deve consumir baixa energia pois ficará monitorando a qualidade do ar full-time. Objetivo de reduzir o enorme gasto energético dos atuais sistemas HVAC.
4, 5	Unidade de controle capaz de atuar juntamente com o sistema já existente na sala de CAD da Civil e que não demande grandes alterações no sistema e na própria infraestrutura da sala.	Grandes alterações de controle são inviáveis devido a restrições envolvendo o fabricante do sistema HVAC. E deve-se evitar de atrapalhar as atividades que ocorrem diariamente no laboratório de CAD.
7	O equipamento possuirá um datalogger a ser implementado com um Arduino Pro Micro que armazenará em um arquivo .txt a série histórica de cada parâmetro e o horário da medição	Facilitará o armazenamento da série histórica e os disparos de controle por meio de suas interfaces e funcionalidades.

Legenda para os Requisitos de Marketing:

1. Equipamento Multisensorial.
2. Compacto.
3. Baixo consumo energético.
4. Instalação simples.
5. Fácil integração com o Sistema de ventilação.
6. Feedback visual aos usuários.
7. Possibilidade de análise de histórico.

4.2 Benchmark

Tabela 6 – Comparação com produtos disponíveis no mercado.

	Air Quality Egg 2	Smart Citizen System	Nosso Projeto
Potência	5 watts	8 watts	≤1 watt
Peso	5,6 kg (14 oz)	2,3 kg	≤1 kg
Dimensão	16x16x16 cm (6in ³)	15x15x5 cm	≤100x100x100 mm
Parâmetros	CO e NO ₂	CO, NO ₂ , temperatura, umidade, intensidade luminosa e sonora	CO, VOC, Material Particulado (PM), O ₃ , umidade relativa, pressão, temperatura e luminosidade
Custo	US\$240,00	US\$175	≤ US\$100
Diferencial	LCD e dados históricos via Wifi	API web.	Baixo consumo energético e fácil integração a sistemas HVAC-R automatizados

Enquanto outros projetos chegam a consumir uma potência de 8 watts, nosso projeto visa um consumo inferior a 1 watt. Tamanha diferença se deve principalmente ao fato que não utilizaremos módulo Wifi, grande responsável pela elevação do consumo energético dos sistemas.

4.3 Decomposição funcional de nível 0

Figura 11 – Esquema de Nível 0 do sistema de monitoramento

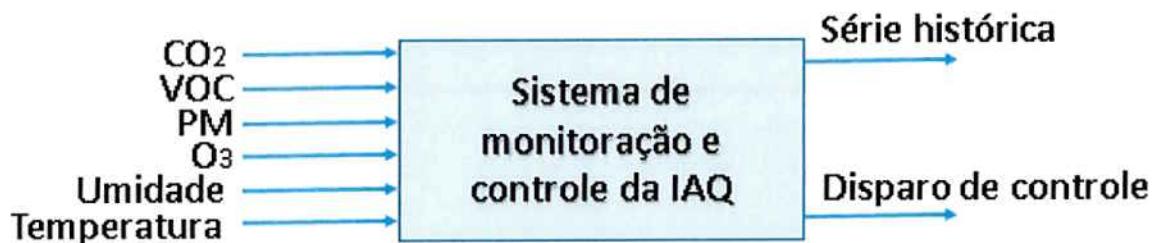


Tabela 7 – Descrição do Esquema de Nível 0.

Módulo	Monitoração e Controle da IAQ
Entradas	CO, VOC, PM, O3, umidade, temperatura
Saídas	Série histórica, disparo de controle.
Funcionalidades	É gerada uma série histórica em .txt de cada parâmetro de entrada que posteriormente pode ser tratada conforme figura 12 abaixo, para posterior estudo. Quando o limiar do parâmetro VOC for extrapolado é acionado o sistema de PCO.

4.4 Decomposição funcional de nível 1

Figura 12 - Esquema de Nível 1 do sistema de monitoramento

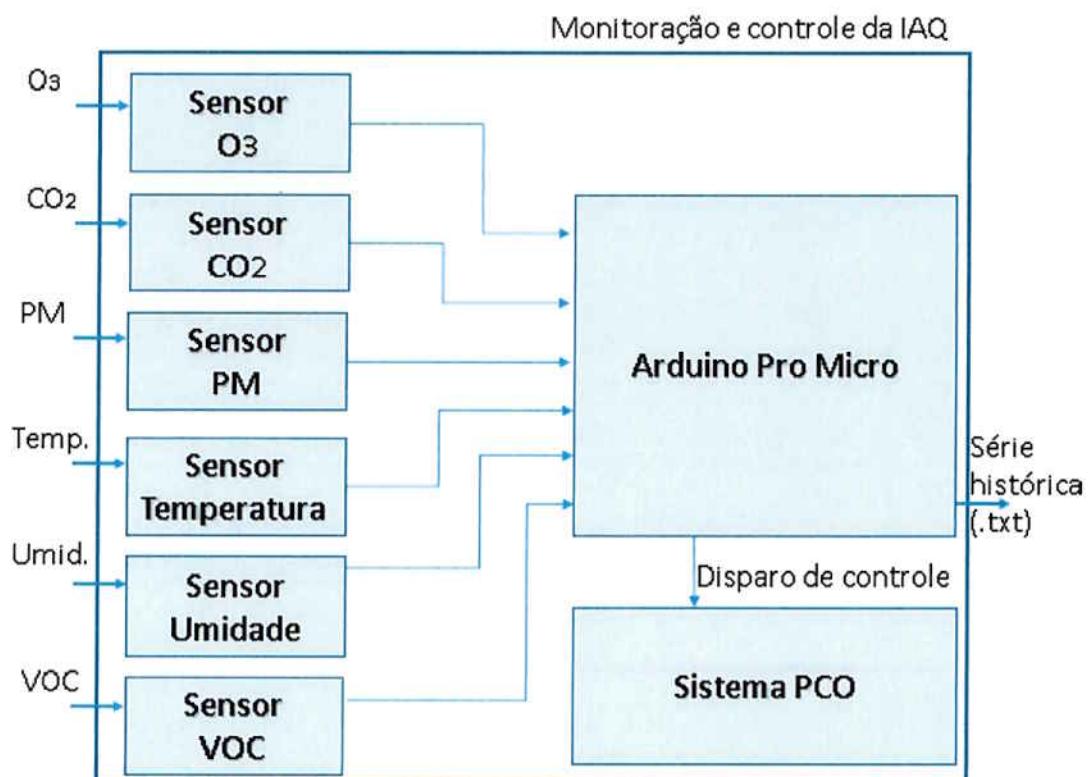


Tabela 8 - Descrição do Esquema de Nível 1.

Módulo 1	Sensor CO
Entradas	Concentração de CO ambiente
Saídas	Saída analógica 0-10V
Funcionalidades	Monitoração
Módulos Invocados	Arduino Pro Micro.

Módulo 2	Sensor O₃
Entradas	Concentração de O ₃ ambiente
Saídas	Saída analógica 0-10V
Funcionalidades	Monitoração. Sensor capaz de detectar concentração da ordem de 0.01 ppm.
Módulos Invocados	Arduino Pro Micro.
Módulo 3	Sensor PM
Entradas	PM ambiente: 0,1-15 μ m.
Saídas	Saída analógica 0-10V
Funcionalidades	Sensor capaz de detectar material particulado da ordem de 0,1 até 15 micrometros.
Módulos Invocados	Arduino Pro Micro.

Módulo 4	Sensor Temperatura
Entradas	Temperatura ambiente: -5 - 55 °C
Saídas	Saída analógica 0-10V
Funcionalidades	Monitoração
Módulos Invocados	Arduino Pro Micro.

Módulo 5	Sensor Umidade
Entradas	Umidade relativa ambiente: 0 - 100%
Saídas	LED de umidade relativa e Saída analógica 0-10V
Funcionalidades	Monitoração
Módulos Invocados	Arduino Pro Micro.

Módulo 6	Sensor VOC
Entradas	Concentração de VOCs ambiente
Saídas	Saída analógica 0-10V
Funcionalidades	Monitoração
Módulos Invocados	Arduino Pro Micro.

Módulo 7	Arduino Pro Micro
Entradas	O ₃ , CO ₂ , PM, VOC, Temperatura, Umidade
Saídas	Série histórica e Disparo de controle
Funcionalidades	Através das interfaces GPIO, USB e UART, implementou-se um datalogger. É gerado um arquivo .txt com os dados históricos de cada parâmetro de entrada e informações de data e hora do momento da coleta. E, também, é feito o acionamento do módulo de PCO, por meio de relé, assim que um limiar pré-configurado de VOC for extrapolado.
Módulos Invocados	Sistema de controle

4.5 Descrição dos elementos sensitivos

1. Placa *Perfactory Sensorsystems*

Um dos elementos do sistema de monitoração é uma placa comercial cedida pela *Perfactory Sensorsystems*. Trata-se de uma placa multisensorial capaz de monitorar a concentração de VOC, temperatura, umidade relativa e luminosidade.

2. Sensor CO – MQ7

MQ-7, vide figura 13, é um sensor de gás do tipo semicondutor baseado em dióxido de estanho (SnO₂). A detecção ocorre por meio de uma reação química, entre ele e o gás (chamado gás redutor ou gás oxidante), reduzindo a resistência elétrica do sensor, que é dada pelo semicondutor do

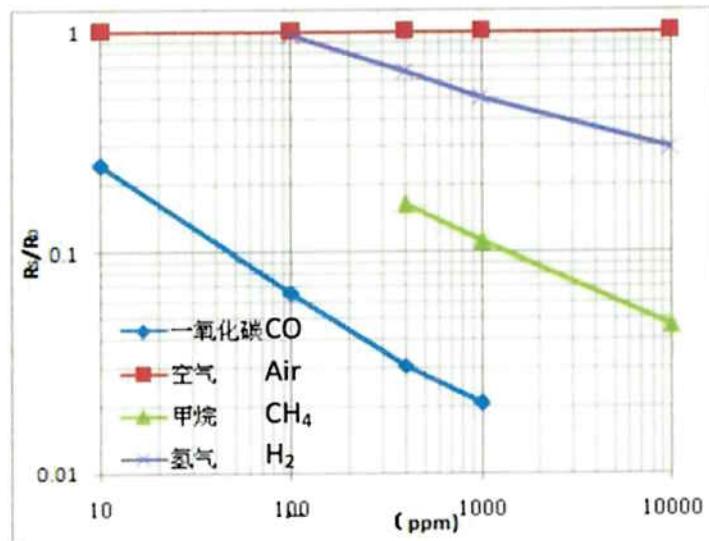
tipo-n de óxido de metal (SnO_2). Por meio dessa variação de resistência, é possível conhecer a concentração do gás presente no ambiente.

Figura 13 – Sensor de CO, MQ-7.



Trabalha sob tensão contínua de 5V e é capaz de detectar numa faixa de concentração de dez até mil partes por milhão de monóxido de carbono, cujas curvas de sensibilidade podem ser analisadas na figura 13.

Figura 14 – Sensibilidade do sensor MQ-7. Razão de resistência pela concentração do gás. R_s é a resistência em diferentes gases e R_0 é a resistência do sensor sob ar puro.



3. Sensor O3 – MQ131

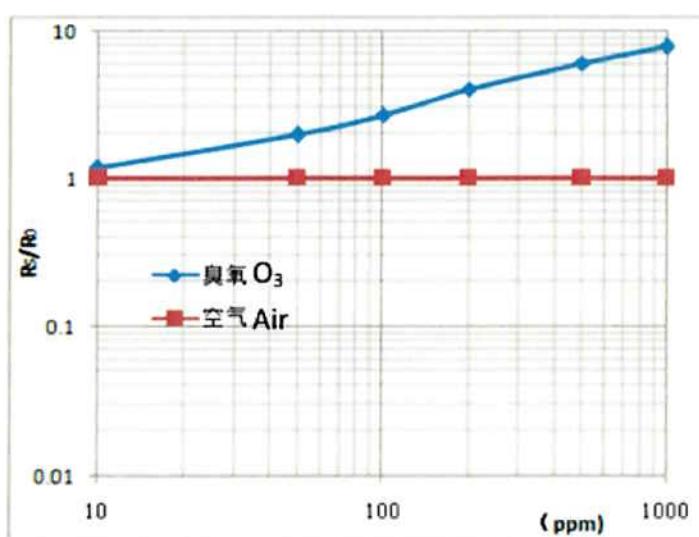
O MQ-131, figura 14, assim como o MQ-7, tem como substrato o óxido SnO_2 . Possui faixa de detecção de dez à mil partes por milhão de ozônio e

resposta inversa ao aumento de concentração do gás, causando elevação na resistência, conforme figura 15.

Figura 15 – Sensor de O₃, MQ-131.



Figura 16 – Sensibilidade do sensor MQ-131. Razão de resistência pela concentração do gás. R_s é a resistência em diferentes gases e R_0 é a resistência do sensor sob ar puro.



4. Sensor PM – Sharp GP2Y1010AU0F

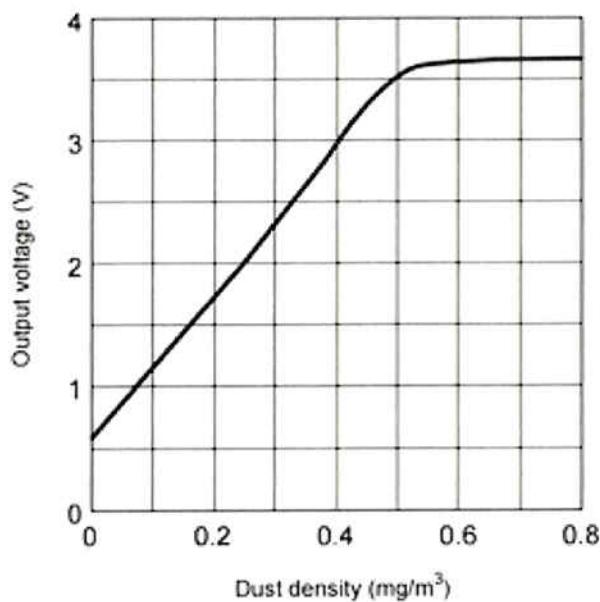
É um sensor ótico, figura 16, capaz de detectar até partículas extremamente finas, como fumaça de cigarro, através de diodo emissor de infravermelho (IRED, *infrared emitting diode*) e foto transistores dispostos diagonalmente, para permitir a detecção da luz refletida no particulado em

suspensão no ar. O consumo de energia é de 20mA máximo e pode ser alimentado com até 7V contínuo. A saída é analógica proporcional à concentração de particulado, com uma sensibilidade de 0,5V/0,1mg/m³, vide figura 17.

Figura 17 – Sensor PM – Sharp GP2Y1010AU0F.



Figura 18 – Tensão de saída do sensor de PM versus concentração de particulado.

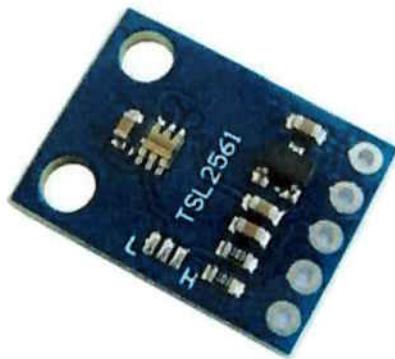


5. Sensor de luminosidade – TSL2561

O TSL2561, figura 18, possui tanto diodo infravermelho quanto diodo de todo o espectro (englobando a luz visível), possibilitando a medição de

qualquer faixa de interesse. Permite a configuração de ganhos e faixas de tempo para detectar espectros de luz que vão desde 0,1 até 40.000 Lux.

Figura 19 – Sensor de luminosidade, TSL2561.



O sensor converte a concentração detectada em um sinal digital de 16 bits (possui dois conversores analógico para digital).

6. Sensor de movimento – HC SR501

Utiliza um sensor de infravermelho passivo (PIR, passive infrared motion sensor), capaz de detectar a variação de luz infravermelha emitida pela radiação do corpo humano, vide figura 19. Qualquer objeto acima do zero absoluto emite energia infravermelha através de radiação de corpo negro, porém este sensor é calibrado para detecção da presença humana. Quando uma pessoa passa em frente ao sensor, a temperatura mais elevada do corpo gera uma variação de carga no material piroelétrico, da mesma forma que ocorre quando a luz visível atinge uma célula solar. O material piroelétrico inclui nitrato de gálio, nitrato de césio e tantalato de lítio.

Figura 20 – Sensor de movimento, HC-SR501.



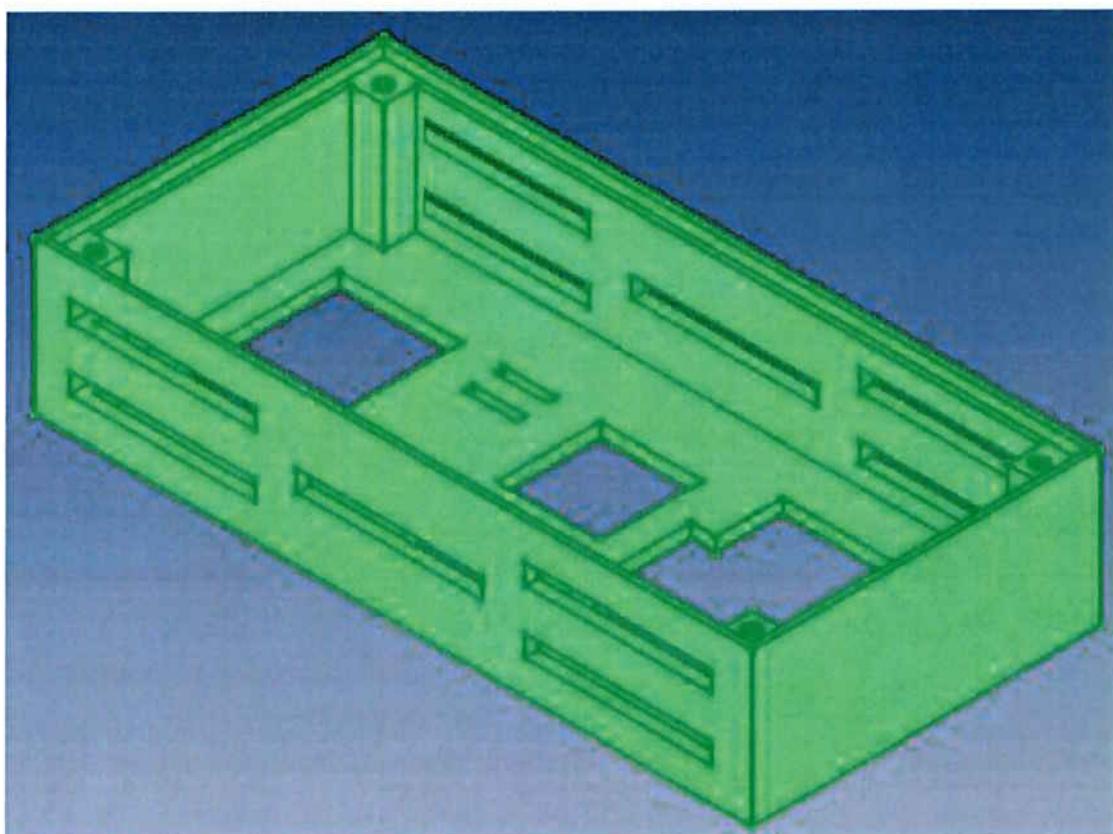
Possui uma área de detecção de até sete metros e ângulo de cone de detecção de cem graus. É alimentado com 5V contínuo (até 20V) e sua saída é 3,3V (TTL, nível alto) e sensibilidade ajustável.

4.6 Desenvolvimento da caixa de fixação

A fim de atingir os requisitos de engenharia e tornar o projeto de fácil replicabilidade, optou-se por construir o case do sistema de monitoração em uma impressora 3D. Todos as caixas utilizadas neste projeto foram desenvolvidos no Laboratório InovaLab@Poli, localizado no Departamento de Engenharia de Produção.

A primeira etapa foi a realização do projeto 3D da caixa, responsável por abrigar e proteger os sensores. Para isso foi utilizado o software de código aberto FreeCAD. O resultado final pode ser visto na figura 20.

Figura 21 – Projeto 3D da caixa do sistema de monitoração.



De posse deste projeto, é possível gerar, através do mesmo software de modelagem 3D, um arquivo “.stl”, que será usado para gerar um segundo arquivo, que será capaz de ser decodificado pela impressora 3D “3DCloner”, usada no laboratório.

O material do case alia reduzida massa (requisito de engenharia importante) e resistência suficiente para proteger os sensores no seu interior. O material consiste no filamento plástico PLA, também conhecido como poliácido lático. Trata-se de um material oriundo do milho e cana de açúcar, ou seja, 100% biodegradável. O resultado final segue na figura 21a e 21b a seguir (sem alguns sensores apenas a fim de demonstração).

Figura 22a – Caixa do sistema de monitoração da IAQ produzido em PLA.

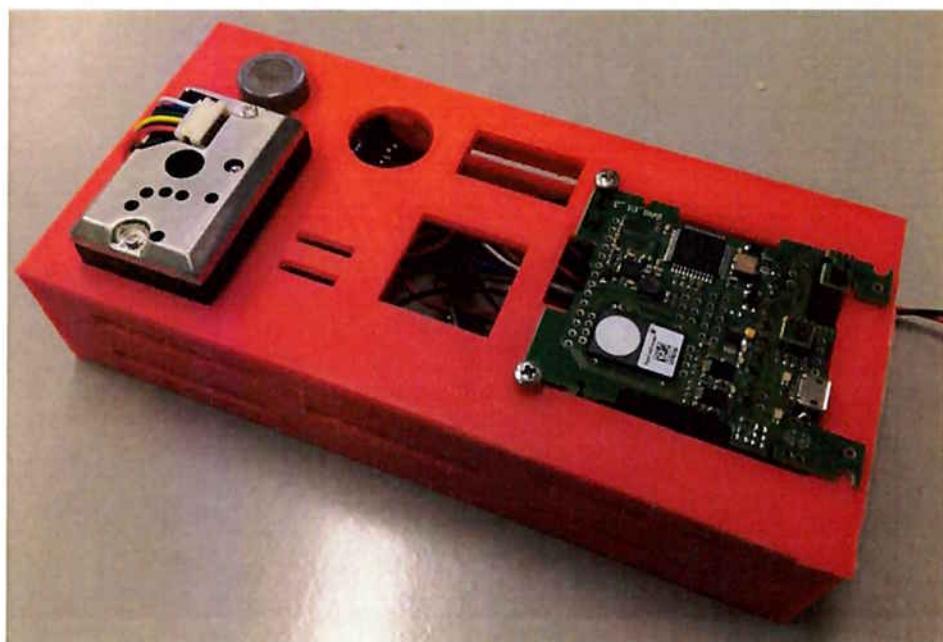
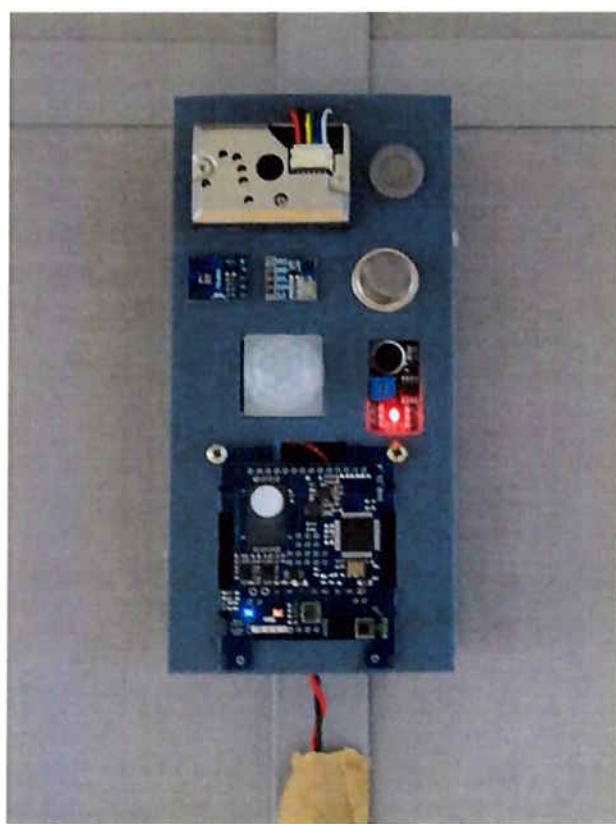


Figura 22b – Versão que inclui todos sensores para monitoramento da IAQ e também detecção de presença (PIR e microfone).



4.7 Custos

O gasto total do projeto, incluindo gastos com serviços e a construção de protótipos, foi de aproximadamente US\$200,00. Com base nestes dados e outros por parte de fornecedores, pudemos então estimar o custo de uma unidade do produto final, caso um lote mínimo de 100 unidades fosse produzido. A seguir, a tabela 9 descreve esta estimativa:

Tabela 9 – Custos estimados para uma produção de no mínimo 100 unidades do produto final discriminado por itens.

Custos para lote 100 unidades	
Item	Valor (US\$)/un.
Sensores	30,00
Componentes eletrônicos	15,00
Caixa	10,00
PCI	5,00
Montagem	10,00
TOTAL	70,00

Assim, observa-se que o objetivo de manter o custo por unidade abaixo dos US\$100,00 foi atingido. Este é um preço, não somente competitivo, mas também que viabiliza a comercialização deste produto e sua implementação como parte da automação de sistemas HVAC-R.

5 EXPERIMENTOS

5.1 Descrições dos Ensaios

Existem normas e diretrizes para o estabelecimento dos locais de monitoração da qualidade do ar interior, o número de pontos mínimos de amostragem, o intervalo de tempo entre medições e especificidades para alguns parâmetros. Todas elas estão apresentadas abaixo, e serão respeitadas durante todo o projeto a fim da obtenção de dados válidos.

1 - Diretrizes gerais para estabelecer os locais de monitoração. Durante a coleta de dados, o equipamento sensorial ficará no local selecionado com base nos seguintes critérios:

- A amostragem deverá ser conduzida num local que representa as atividades ocupacionais;
- Os locais devem ser selecionados de modo a minimizar o impacto nas atividades extra laborais.
- Devem situar a pelo menos 0,5 (meio) metro dos cantos e das janelas;
- Não deverão estar diretamente abaixo ou em frente dos difusores de abastecimento de ar, unidades de difusão, ventoinhas, aquecedores ou similares;
- Não deverão estar a menos de 1 (um) metro de fontes de contaminação, tais como fotocopiadoras, impressoras, fumo de cigarros ou correlatos;
- Não devem ser realizadas junto a janelas e portas sujeitas a radiação solar direta;
- Os locais não deverão obstruir nem interferir as saídas dos ocupantes da área de estudo nas situações normais e de emergência.
- As tomadas de amostragens nos locais interiores, devem ser colocadas a uma altura de $1,5 \pm 0,5$ m acima do chão, para se aproximar ao nível das vias respiratórias dos ocupantes.

2 - Número mínimo de pontos de amostragem por zona:

Para uma estimativa do número mínimo de pontos de amostragem recomenda-se a utilização da expressão, aproximando para a unidade inteira superior, que consiste na multiplicação da raiz quadrada da área total da zona pela constante 0,15.

Entretanto, segundo a resolução ANVISA R9/2003, que normatiza a metodologia de determinação de IAQ adotada no Brasil, o número mínimo de amostras, para uma área construída de até 1000 m², é igual a apenas uma.

3 - Tempo mínimo de amostragem por zona:

Os tempos de medição devem ser representativos do período de funcionamento das atividades.

Entende-se por representatividade, séries discretas de medições, ou monitorização em contínuo, de acordo com os princípios dos métodos de amostragem e medição utilizados, e das seguintes definições:

- Intervalo de tempo de medição, é o intervalo de tempo Δt durante o qual é efetuada uma medição simples;
- Intervalo de tempo de monitorização, é o intervalo de tempo T durante o qual é efetuada uma série de medições simples ou em contínuo.

Neste projeto utilizou-se $\Delta t=10s$ e $T=168$ horas (1 semana) durante as aquisições de dados.

As figuras 22, 23 e 24 de forma convergente ao exposto acima, ilustra a configuração do ensaio realizado na sala S-23.

Além destas diretrizes, a Professora Dra. Brenda Leite contribuiu enormemente na correta distribuição dos sistemas de monitoração para que os dados colhidos pudessem ser considerados como válidos. A seguir descreve-se a configuração adotada na sala S-23.

Figura 23 – Configuração do ensaio na sala S-23. Sistema de Monitoração Laranja (Central).

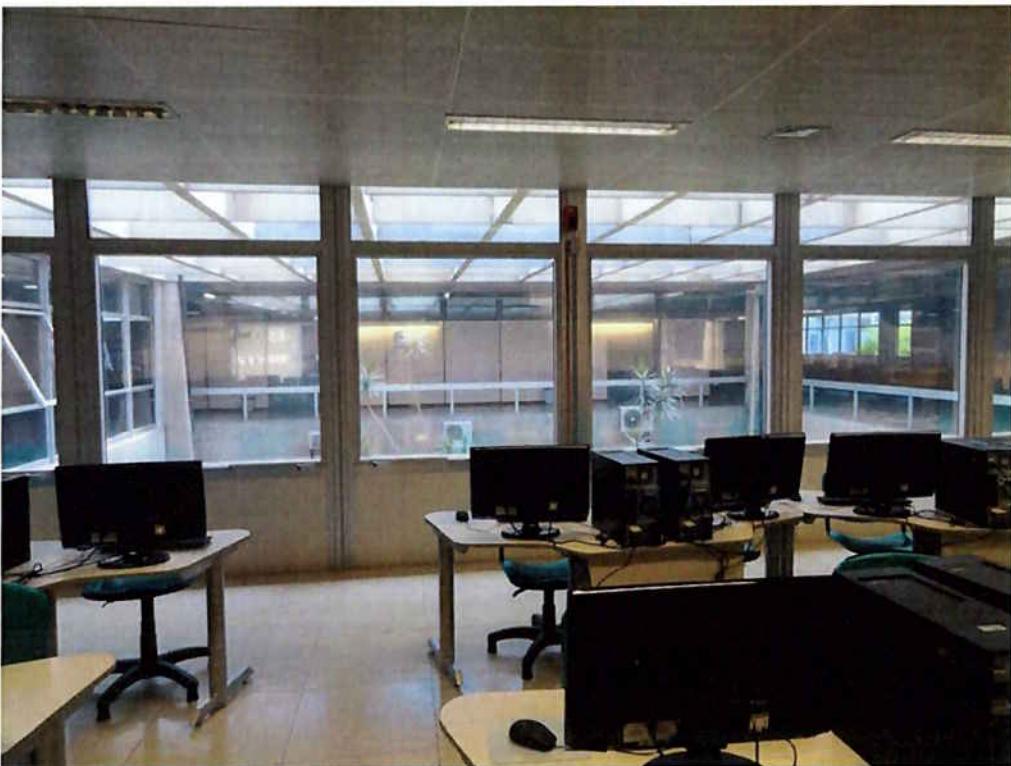


Figura 24 – Configuração do ensaio na sala S-23. Sistema de Monitoração Cinza (Lateral 1).



Figura 25 – Configuração do ensaio na sala S-23. Sistema de Monitoração Laranja (Lateral 2).



Foram utilizados três pontos de monitoração, apesar da resolução ANVISA R9/2003 definir o mínimo de um ponto de amostragem para um ambiente de até mil metros quadrados (caso da sala de aula em questão), a fim de ampliar a confiabilidade dos dados, visto que a sala S-23 é densamente ocupada durante períodos de aulas e este fato eleva o risco de interferência ocupacional sobre os dados coletados por um único ponto de monitoração. Tendo em vista essa questão, buscou-se espalhar estes três pontos de amostragem de modo a minimizar a interferência ocupacional humana frente aos dados (distante no mínimo um metro das estações de trabalho e afastados das rotas de entrada e saída da sala).

A taxa de aquisição dos dados foi mantida constante em dez segundos por amostra de cada parâmetro, suficiente para atingir uma resolução adequada e comparável.

Por outro lado, na sala do professor Fonseca o risco ocupacional é minimizado, visto que visitas de estudantes ocorrem ocasionalmente, e a utilização de mais de um ponto de monitoração se tornaria inviável, também, por conta da área

do local corresponder a um quinto da sala de aula. Por conta disso, utilizou-se um ponto de monitoração.

Por fim, os dados foram correlacionados e analisados frente a uma base de dados de qualidade do ar externo proveniente da CETESB, agência vinculada à Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA), de pontos de monitoração próximos à Cidade Universitária da USP (região de Pinheiros) e inclusive um ponto localizado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da USP, locais próximos aos ambientes de estudo.

6 Resultados

6.1 Sala Professor

Entre os dias 8 e 15 de outubro, durante a primavera de 2015 (sob forte influência do fenômeno El Niño), realizou-se a primeira etapa de monitoração da IAQ, no escritório do Professor Dr. Fernando Josepetti Fonseca, localizada no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da USP.

Primeiramente, é importante destacar que o Fenômeno El Niño em 2015 apresentou forte intensidade sobre a América do Sul como um todo. O Centro Americano de Meteorologia e Oceanografia (NOAA) mensurou a temperatura do oceano Pacífico equatorial central no terceiro trimestre de 2015, e constatou que a água estava 1,5°C mais elevada que o normal para a época do ano. Segundo o mesmo estudo, simulação aponta para último trimestre de 2015 (período dos experimentos deste projeto) que as águas atingirão um ápice de 2,5°C, acentuando os efeitos do fenômeno já presenciados nos meses anteriores: altas temperaturas e chuvas acima da média na região sudeste-sul brasileira (abaixo da média na norte-nordeste).

Fato que altera o que é normalmente observado na cidade de São Paulo: alta correlação da concentração de poluentes durante o inverno e início da primavera, quando a velocidade do vento e a temperatura é baixa, facilitando a ocorrência de inversão térmica durante os dias (camada de ar quente que se forma sobre a cidade devido a rápida elevação de temperatura durante dias frios, ao amanhecer o dia, que bloqueia a dispersão dos poluentes emitidos pela cidade que começa a despertar); visto que a qualidade do ar exterior é fonte primária para a qualidade de ar interior. Por conta deste fenômeno, espera-se níveis externos e internos, da qualidade do ar relativamente superiores aos que são observados em anos considerados "normais", para os mesmos períodos considerados.

Os Anexos B e C correspondem às séries de dados obtidas durante o período das quatro horas da tarde do dia 8 de outubro até as quatro horas da tarde do dia 15 de outubro de 2015, na sala do Prof. Dr. Fonseca.

Fato que primeiramente é destacado, devido ao tipo de ambiente, reside na existência da elevada correlação negativa entre VOC e Luz (Anexo B). A luz corresponde diretamente ao efeito ocupacional, visto que a entrada da luz solar é

limitada, logo, a detecção de luminosidade corresponde a presença de alguém na sala, responsável pela abertura da janela ou o acendimento das lâmpadas.

O grau de correlação, dada pelo coeficiente de Pearson (ρ), entre VOC e a Luz é de -0,58 durante os dias de semana. O grau de -1 representa perfeita correlação negativa entre duas variáveis (isto é, se uma cai, a outra sempre irá subir). Tal fato, como mencionado, é explicado devido às dimensões da sala e fechamento total de janelas e portas ao final dos dias, que basicamente tornam o local em um ambiente "hermeticamente fechado", praticamente impedindo a dispersão de poluentes gerados durante o dia (seja via exterior ou devido ao uso de uma impressora, por exemplo). O que se observa neste gráfico é que ao final dos dias, compostos orgânicos voláteis ficam confinados no ambiente e só no dia seguinte, com a chegada do professor em sua sala, e consequente abertura da porta e janela, que ocorre uma renovação de ar e os níveis de VOC caem consideravelmente. Fato que explica a elevada correlação negativa entre luz (ocupação) e VOC durante os dias da semana.

Além disso, a série no Anexo B, alerta para os níveis extremamente elevados de concentração de VOC durante os dias, chegando a atingir picos de 1600 ppm.

Os Anexos D, E e F correspondem às séries obtidas da CETESB-QUALAR, para a qualidade do ar exterior. Infelizmente, as estações próximas ao local de interesse (Pinheiros e Cidade Universitária) não dispõem ainda de sensores de compostos orgânicos voláteis. Porém, como esperado, devido ao fenômeno El Niño, a estação de Pinheiros marcou uma média de 65,5% de umidade relativa do ar no período considerado no estudo. Muito elevada para o normal de cerca de 30 e 40% no período, faixa que afeta diretamente o impedimento na dispersão de poluentes em períodos "normais". Nos anexos D e F, durante dias de semana, a umidade relativa acima de 50% facilita a dispersão de poluentes como dióxido de nitrogênio da atmosfera, com um coeficiente de correlação negativo de Pearson de -0,68.

6.2 Sala S-23

A etapa de monitoração da IAQ na sala de CAD S-23, situada no Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP, decorreu durante o

mês de novembro de 2015. No dia 6 de novembro, sexta-feira, foi finalizada a instalação do sistema triplo (vide figuras 22, 23 e 24) de monitoração da qualidade do ar interior.

No Anexo G, é possível analisar as séries coletadas entre a tarde e a manhã dos dias 6 e 10 de novembro. Destaca-se, primeiramente, o nível estático de compostos orgânicos voláteis no ambiente durante o final de semana. Explicado pela ausência de pessoas no ambiente e pelo fato da sala ter permanecido com boa circulação de ar, com portas e janelas abertas, anulando qualquer aumento de concentração de VOC no recinto. Na segunda-feira, dia 9, data da semana com aulas previstas durante todo o período do dia, ocorre grande elevação na concentração de compostos orgânicos voláteis, idem material particulado em suspensão (Anexo I), decorrente da acumulação de pessoas, uso de materiais de limpeza e máquinas diversas como impressoras e computadores. O uso do sistema de ar condicionado da sala causa uma agressiva queda na umidade relativa do ar, despencando de uma média de 64% ao meio dia e meia para quase 52% às 14:10 (Anexo H).

Essa queda na umidade relativa é suficiente para facilitar a acumulação de poluentes no ambiente da sala, da mesma forma que ocorre em dias secos no ambiente externo. Fato comprovado pela elevação imediata na concentração de CO (vide Anexo H e K), de origem externa (vide Anexos P e Q referentes ao ar exterior) e proveniente também dos aquecedores do próprio sistema de refrigeração da sala. A caixa cinza, anexos M a P, destaca o comportamento de todos os parâmetros durante a manhã do dia 9 (segunda-feira). O anexo M mostra a elevação nos níveis de VOC logo pela manhã, por volta das 7:20, quando a equipe de limpeza trabalha no local e depois passa a decair lentamente (devido aos produtos que permanecem no ambiente), quando, a partir das 10:20, é detectada presença na sala (início da aula) e os níveis de VOC chegam a até 900 ppm por volta das 11:30, horário de encerramento.

É importante destacar que após o término da aula, o sistema de condicionamento de ar foi mantido ligado, com a presença de menos de cinco pessoas na sala (das 11:30 às 14:00 do dia 9) e o gráfico mostra a brusca queda na umidade relativa da sala devido a ausência de uma grande quantidade de pessoas respirando (o que torna o ar mais úmido num ambiente fechado), caindo de cerca de

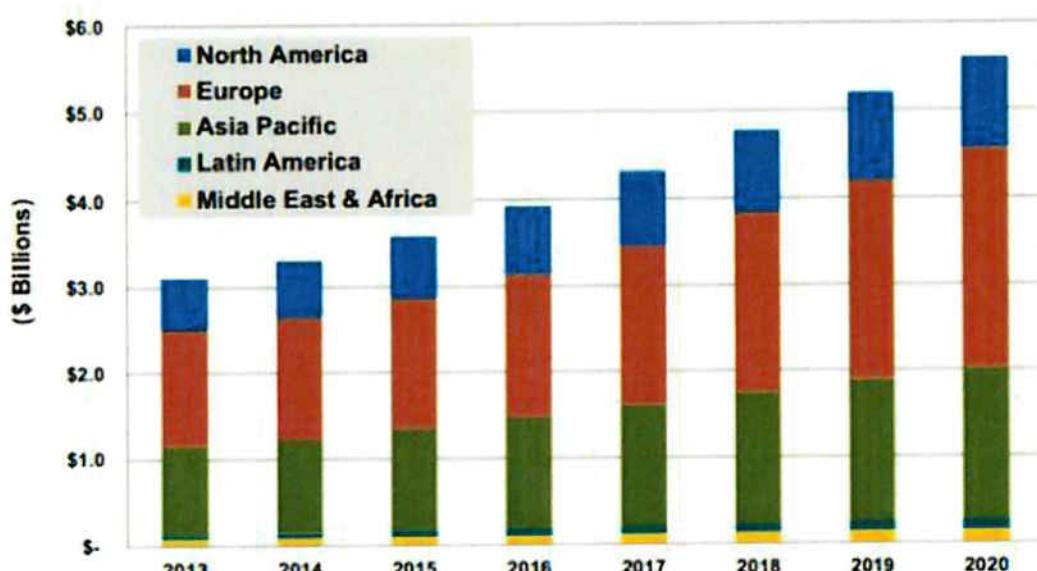
70 para 58%. Este ar seco afeta, mesmo que por um curto espaço de tempo, diretamente a concentração dos poluentes, notadamente a concentração de CO (Anexo K) que estabilizou por volta de 4,5 ppm por todo o tempo que a sala foi mantida sem nenhuma troca de ar eficiente com o ambiente externo (atingindo terça-feira praticamente inalterada, em média). Muito próximo do limite de 9 ppm, máximo recomendado para ambientes internos pela ASHRAE.

Mesmo possuindo um range de umidade previamente configurado no software do sistema HVAC, não permitindo que esse parâmetro extrapole esse intervalo pré-definido, variações entre esses limites são suficientes para causar um efeito de retenção de poluentes em um ambiente confinado, o que só é visto com variações mais acentuadas em um ambiente exterior, por exemplo. Além disso, a ineficiência desse sistema é notada claramente em todos os gráficos de poluentes. Mesmo permanecendo ligado, a troca de ar que é feita com o ambiente externo é insuficiente para manter sob controle níveis de: VOC (chega a atingir 1200 ppm no final da tarde do dia 9/11, vide Anexos G, J e M), CO (Anexo K, onde é visto um incremento de 1 ppm na média do início do dia, a qual é mantida até o dia seguinte sem nenhuma redução), PM (apenas há redução dos níveis com baixa velocidade do ar, ou seja, sem a detecção de presença de pessoas e com o sistema HVAC desligado, notadamente no período noturno, vide Anexo L) e ozônio (Anexo O).

7 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A cada ano o mercado que gira em torno da qualidade do ar de interiores se expande. Projeção realizada pela consultoria *Navigant Research*, vide figura 26, estima que a receita global proveniente de sistemas de monitoramento e gerenciamento da qualidade do ar interno irá saltar de US\$ 3.1 bilhões de dólares em 2013 para cerca de US\$ 5.6 bilhões em 2020. O relatório destaca que conforme novas tecnologias são adotas e seus resultados são comprovados, os padrões do mercado são direcionados a elas, sendo inevitável ignorar tecnologias capazes de reduzir gastos energéticos e ainda promover um ganho na qualidade do ar.

Figura 26 – Receita oriunda de tecnologias para IAQ (por região, 2013-2020).



Fonte: Navigant Research - <https://www.navigantresearch.com/wp-content/uploads/2014/04/IAQ-14-Executive-Summary.pdf>

Em contrapartida ao mercado global pujante, no Brasil e demais países da América Latina a perspectiva ainda é muito exígua. Aliado ao fato do tema ser recente no país, comparado aos demais países, existe uma resistência por parte de empresários e construtoras em investir em sistemas complementares aos convencionais HVACs existentes em grandes ambientes empresariais, comerciais e residenciais. Durante a revisão bibliográfica e estudos de casos reais, foi exemplificado que tal resistência é totalmente incoerente. É bem verdade que o investimento inicial, comparado a um sistema HVAC comum, é superior, porém o ROI (Return on Investment) é muito curto e altamente positivo devido tamanha

quantidade de benefícios. Considerando apenas o ganho em produtividade, um ligeiro aumento de 1% já justificaria uma despesa duas vezes maior na construção ou manutenção desses sistemas. Este trabalho de conclusão de curso, além de ter a finalidade na realização completa de um projeto de engenharia, visa contribuir no sentido de difundir mais esse tema no nosso país, destacando os benefícios em investir em novas tecnologias que, a um primeiro momento, podem parecer apenas um custo extra a um projeto de maior porte.

A primeira conclusão que se nota analisando os dados obtidos nos experimentos de campo é que os sistemas HVAC comuns são, de fato, ineficientes e incapazes de, isoladamente, promover qualquer manutenção da IAQ em um ambiente, seja ele amplo, restrito, exposto a grande concentração de pessoas ou não. O principal parâmetro controlado por eles é a temperatura. E, quando o mesmo atua para mantê-la em certo intervalo determinado pelo usuário, acaba desencadeando uma série de eventos que irão agir negativamente na IAQ. Por exemplo, quando foi observada na sala S-23 uma queda brusca da umidade relativa, impactando numa dificuldade na dispersão de poluentes (como o monóxido de carbono e outros óxidos de nitrogênio). Apesar de funcionar quase que intermitentemente, por meio de passos ou ligando e desligando, causando um elevado gasto energético, os sistemas HVAC comuns chegam a prejudicar a IAQ, principalmente se não passarem por manutenção e limpezas periódicas.

Os resultados obtidos no item anterior eram esperados, visto que o sistema HVAC atua somente sobre os parâmetros de temperatura e umidade. Tendo em vista a grande concentração de VOC no ambiente, chegando a atingir até 1200 ppm, extrapolando por uma grande margem o máximo recomendável, propõe-se a instalação de uma lâmpada UVC no interior da tubulação desse HVAC (próxima ao fornecimento de ar ao ambiente). Por meio de "disparos de controle" (ativando-a com níveis elevados de VOC no ambiente), a mesma atuaria sobre o ar de circulação, àquele que não é trocado com o ambiente externo e permanece confinado circulando nesse ambiente, possuidor de alta concentração de compostos orgânicos.

8 REFERÊNCIAS

- [1] Wyon, P. D. **Enhancing Productivity While Reducing energy use in buildings.** Proceedings of the E-Vision 2000 Conference, Denmark, 2000.
- [2] WHO. **World Health Organization Guidelines for indoor air quality: Selected Pollutants.** Europe, 2010.
- [3] ALA. **American Lung Association: Indoor Air quality.** Link: <http://www.lung.org/associations/charters/mid-atlantic/air-quality/indoor-air-quality.html> - Acessado em 27/03/2015.
- [4] Pérez-Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. **A review on buildings energy consumption information.** Spain, UK, 2007.
- [5] Wang, S.; Ang, H. M.; Tade, M. O. **VOC in Indoor environment and the photocatalytic oxidation: State of the art.** Spain, UK, 2007.
- [6] Wyon, P. W.; Ang, H. M.; Tade, M. O. **Enhancing Productivity While Reducing energy use in buildings.** Denmark, 2000b.
- [7] LBNL. **Lawrence Berkeley National Laboratory: Cost Effectiveness of Improving Indoor Environments to Increase Productivity.** Link: <http://www.iaqscience.lbl.gov/performance-cost.html> - Acessado em 27/03/2015.
- [8] Kosonen, R.; Tan, F. **The effect of perceived indoor air quality on productivity loss.** Denmark, 2004.
- [9] Brasindoor. **Sociedade Brasileira de Meio Ambiente e Controle de Qualidade do Ar de Interiores.** Link: <http://www.brasindoor.com.br/legislacao.php> – Acessado em 27/03/2015.
- [10] Ministério da Saúde. **Portaria No 3.523, de Agosto de 1998.** Link: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1998/prt3523_28_08_1998.html – Acessado em 27/04/2015.
- [11] ASHRAE. **American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.** Link: <https://www.ashrae.org/resources-publications/bookstore/standards-62-1--62-2> – Acessado em 27/04/2015.
- [12] Health Canada. **Exposure Guidelines for Residential Indoor Air Quality: A Report of the Federal-Provincial Advisory Committee on Environmental and Occupational Health.** Link: www.gc.ca/hecsesc/air_quality/pdf/tr-156.pdf – Acessado em 27/04/2015.
- [13] Donald, K. M.; Glencross, P. M.; Walters, M. D. **Risk of Sick Leave Associated with Outdoor Air Supply Rate, Humidification, and Occupant Complaints.** Massachussets, USA, 2000.
- [14] Kosonen, R.; Tan, F. **The effect of perceived indoor air quality on productivity loss.** Denmark, 2004.

- [15] IAQ and Worker Productivity Link:
<https://ohsonline.com/Articles/2010/09/01/IAQ-and-Worker-Productivity.aspx>
University of San Diego, 2009 – Acessado em 25/06/2015.
- [16] Rios; Boechat; Gioda; Santos; Aquino Neto. **Symptoms prevalence among office workers of a sealed versus a non-sealed building: Associations to indoor air quality.** Rio de Janeiro, 2009.
- [17] Brickus, L.; Cardoso, J.; De Aquino Neto, F. **Distributions of Indoor and Outdoor Air Pollutants in Rio de Janeiro, Brazil: Implications to Indoor Air Quality in Bayside Offices.** Rio de Janeiro, 1998.
- [18] Graudenz, G., Kalil, J., Saldiva, P., Latorre, M, Morato-Castro, F. **Decreased Respiratory Symptoms After Intervention in Artificially Ventilated Offices in São Paulo, Brazil.** São Paulo, 2004.
- [19] Graudenz, G., Oliveira, C., Tribess, A., Mendes Jr., Latorre, Kalil, J. **Association of air-conditioning with respiratory symptoms in office workers in tropical climate.** São Paulo, 2005.
- [20] Gioda, A., De Aquino Neto. **Exposure to High Levels of Volatile Organic Compounds and Other Pollutants in a Printing Facility in Rio de Janeiro, Brazil.** Rio de Janeiro, 2002.
- [21] Miguel, A., De Aquino Neto, Cardoso, J., Vasconcellos, P., Pereira, A., Marquez, K. **Characterization of Indoor Air Quality in the Cities of São Paulo and Rio de Janeiro, Brazil.** São Paulo, 1995.
- [22] CETESB QUALAR Link: <http://ar.cetesb.sp.gov.br> – Acessado em 18/10/2015.

ANEXO A

TABLE B-1 Comparison of Regulations and Guidelines Pertinent to Indoor Environments^a
 (The user of any value in this table should take into account the purpose for which it was adopted and the means by which it was developed.)

Enforceable and/or Regulatory Levels		Non-Enforced Guidelines and Reference Levels				
NAQSEPA (Ref. B-4)	OSHA (Ref. B-5)	MAK (Ref. B-2)	Canadian (Ref. B-8)	WHO/Europe (Ref. B-11)	NIOSH (Ref. B-13)	ACGIH (Ref. B-1)
Carbon dioxide	5,000 ppm	2,000 ppm	3,500 ppm [L]	2,000 ppm	2,000 ppm [15 min]	2,000 ppm
Carbon monoxide ^c	9 ppm ^e 35 ppm [1 h] ^f	50 ppm	30 ppm 60 ppm [30 min]	11 ppm [8 h] 25 ppm [1 h]	90 ppm [15 min] 50 ppm [30 min] 25 ppm [1 h]	35 ppm 200 ppm [C]
Formaldehyde ^h		0.75 ppm 2 ppm [15 min]	0.3 ppm 1 ppm ⁱ	0.1 ppm [L] 0.05 ppm [L] ^j	0.1 mg/m ³ 1 mg/m ³ [30 min]	0.1 mg/m ³ (0.081 ppm) [30 min] 10 ppm [8 h]
Lead	1.5 μ g/m ³ [3 months]	0.05 mg/m ³	Minimize exposure	0.016 ppm 0.1 ppm [15 min]	0.016 ppm 0.1 ppm [15 min]	0.3 ppm [C]
Nitrogen dioxide	0.05 ppm [1 yr]	5 ppm [C]	5 ppm 10 ppm [5 min]	0.05 ppm 0.25 ppm [1 h]	0.5 μ g/m ³ [1 yr] 0.1 ppm [1 h] 0.02 ppm [1 yr]	0.050 mg/m ³ 1 ppm [15 min]
Ozone	0.12 ppm [1 h] ^k 0.08 ppm	0.1 ppm	j	0.12 ppm [1 h]	0.064 ppm (120 μ g/m ³) [8 h]	0.1 ppm [C]
Particles ^c <2.5 μ m MMAD ^d	15 μ g/m ³ [1 yr] 154 μ g/m ³ [24 h] ^o	5 mg/m ³	1.5 mg/m ³ for <4 μ m 0.1 mg/m ³ [L]	0.1 mg/m ³ [1 h] 0.040 mg/m ³ [L]	800 Bq/m ³ [1 yr]	3 mg/m ³ [C]
Particles ^c <10 μ m MMAD ^d	50 μ g/m ³ [24 h] ^o 150 μ g/m ³ [24 h] ^o				0.38 ppm [5 min] 0.019 ppm	0.1 ppm ^m 0.2 ppm ⁿ
Radon			4 mg/m ³			10 mg/m ³ [C]
Sulfur dioxide	0.03 ppm [1 yr] 0.14 ppm [24 h] ^k	5 ppm	0.5 ppm 1 ppm ⁱ	0.048 ppm [24 h] 0.019 ppm [1 yr]	2 ppm 5 ppm [15 min]	2 ppm 5 ppm [15 min]
Total Particles ^c		15 mg/m ³				

^a Numbers in brackets [] refer to either a ceiling or to averaging times of less than or greater than eight hours (min = minutes; h = hour; yr = year; C = ceiling; L = long-term). Where no time is specified, the averaging time is eight hours.

^b Target level is 0.05 ppm because of its potential carcinogenic effects. Total aldehydes limited to 1 ppm. Although the epidemiological studies conducted to date provide little convincing evidence that formaldehyde is carcinogenic in human populations, because of this potential, indoor levels should be reduced as much as possible.

^c As one example regarding the use of values in this table, readers should consider the applicability of carbon monoxide concentrations. The concentrations considered acceptable for nonindustrial, as opposed to industrial, exposure are substantially lower. These lower concentrations (in other words, the ambient air quality standards, which are required to protect the most sensitive subpopulation, individuals with pre-existing heart conditions) are set to protect the highest risk.

^d MMAD = mass median aerodynamic diameter in micrometers. Less than 3.0 μ m is considered respirable; less than 10 μ m is considered inhalable.

^e Substance particles not otherwise classified (IPNOC), not known to contain significant amounts of asbestos, lead, crystalline silica, known carcinogens, or other particles known to cause significant adverse health effects.

^f See Table B-2 for the U.S. EPA guideline.

^g Not to be exceeded more than once per year.

^h The U.S. Department of Housing and Urban Development adopted regulations concerning formaldehyde emissions from plywood and particleboard intended to limit the airborne concentration of formaldehyde in manufactured homes to 0.4 ppm. (24 CFR Part 3280, HHD Manufactured Home Construction and Safety Standards). In addition, California Air Resources Board Regulation 931120, entitled "Aldehyde Toxic Control Measures for Particleboard Emissions from Composite Wood Products," has specific formaldehyde-based requirements for composite wood products sold in California.

ⁱ Never to be exceeded.

^j Carcinogen, no maximum values established.

^k TLV₈ for heavy work.

^l TLV₈ for moderate work.

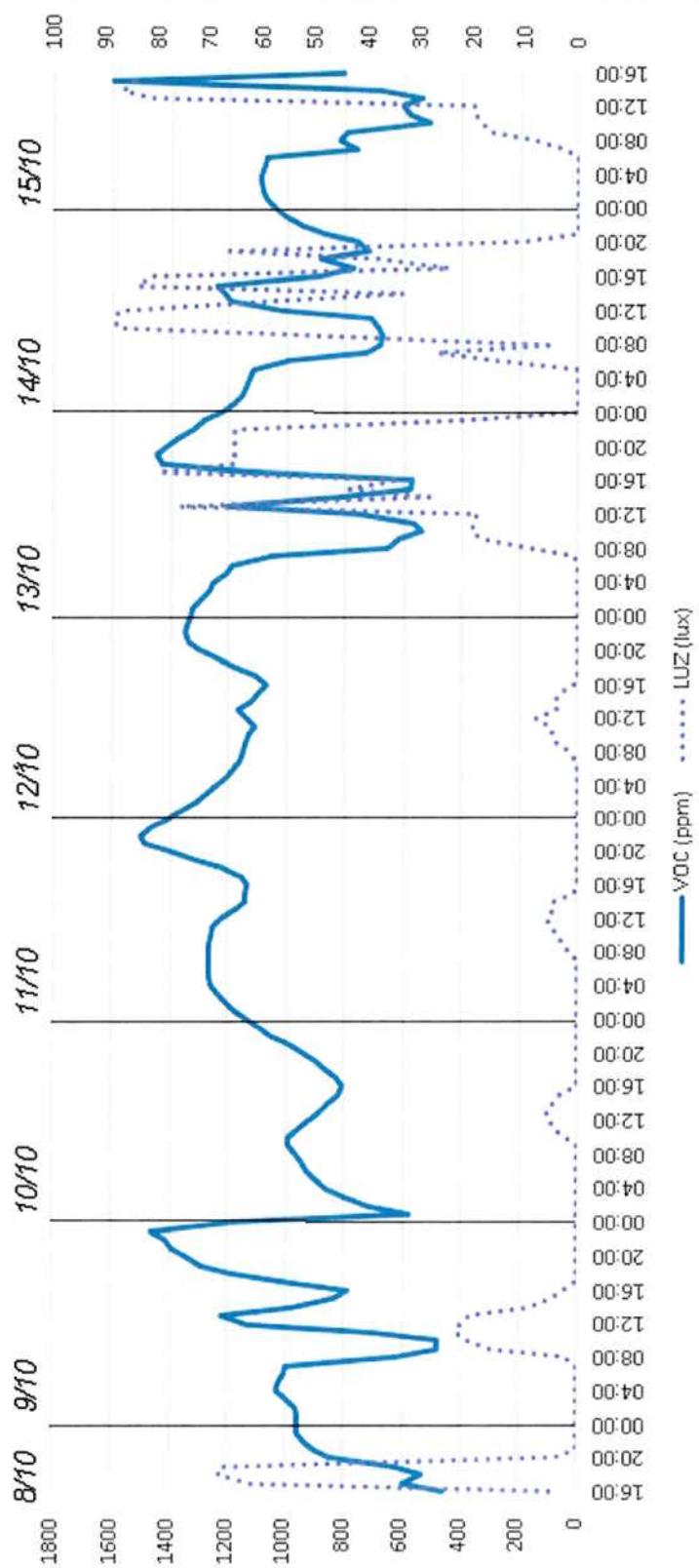
^m TLV₈ for light work.

ⁿ TLV₈ for heavy, moderate, or light workloads (less than or equal to two hours).

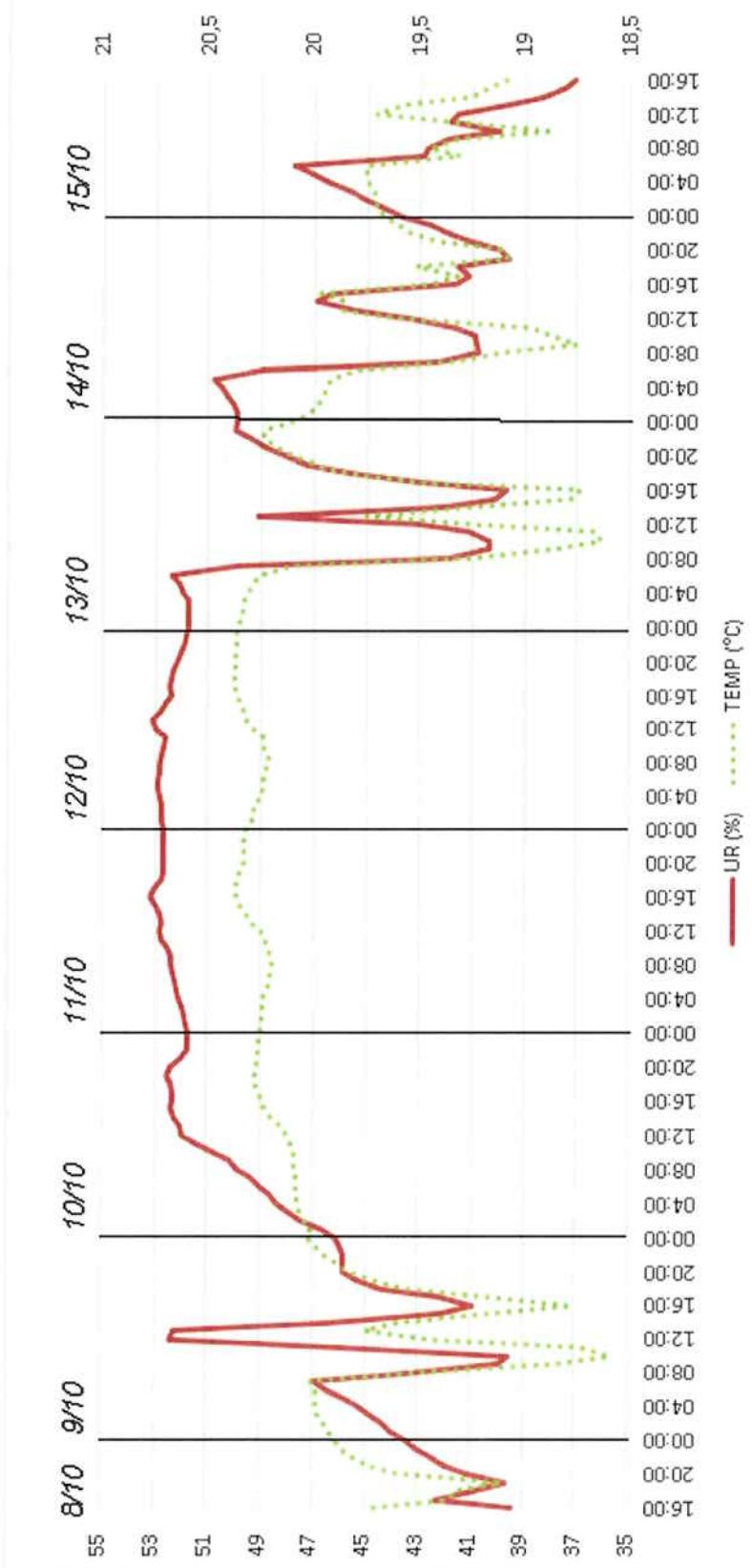
^o Q3TB3652-38760, July 16, 1997.

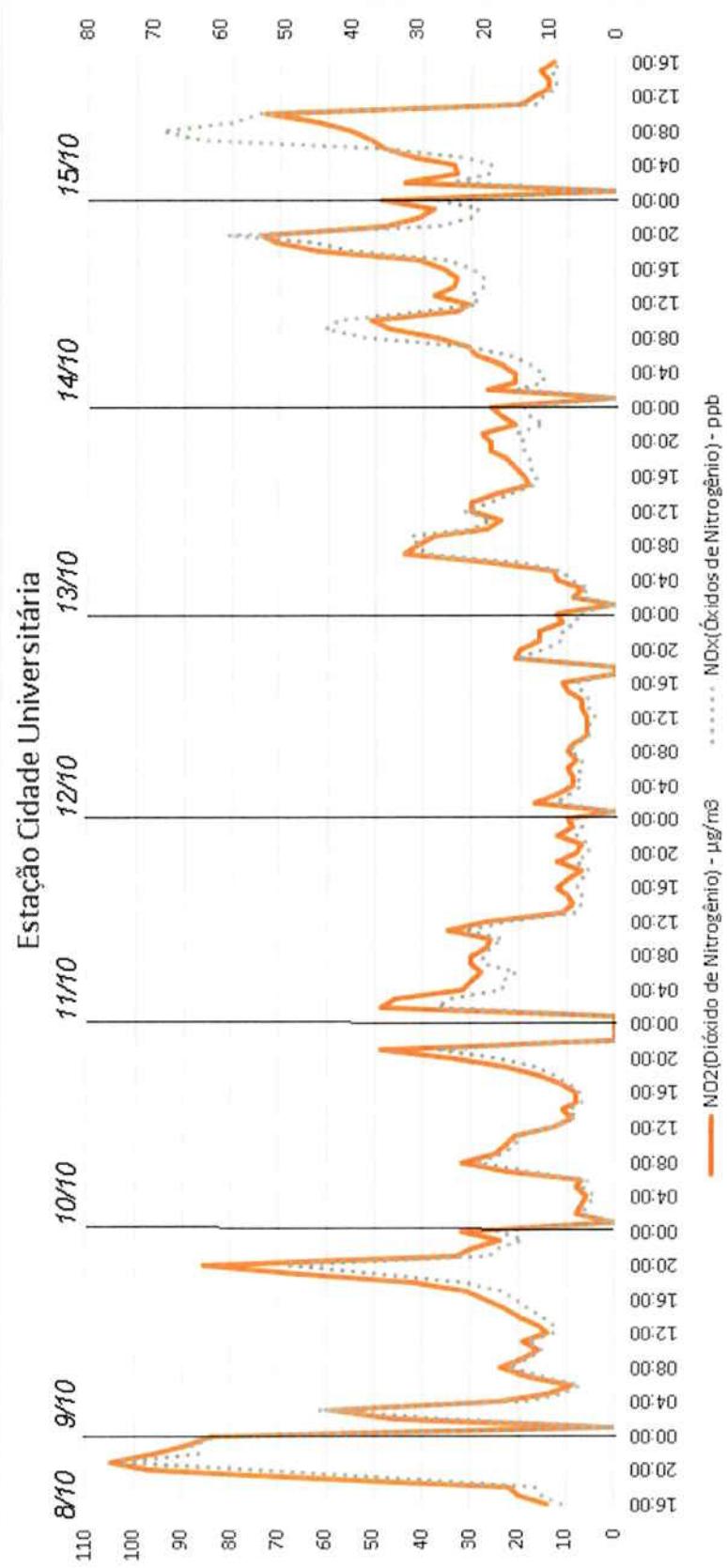
^p Epidemiological studies suggest a causal relationship between exposure to formaldehyde and mesothelioma cancer, although the conclusion is tempered by the small numbers of observed and expected cases. There are also epidemiological observations of an association between relatively high occupational exposures to formaldehyde and stomach cancer.

ANEXO B

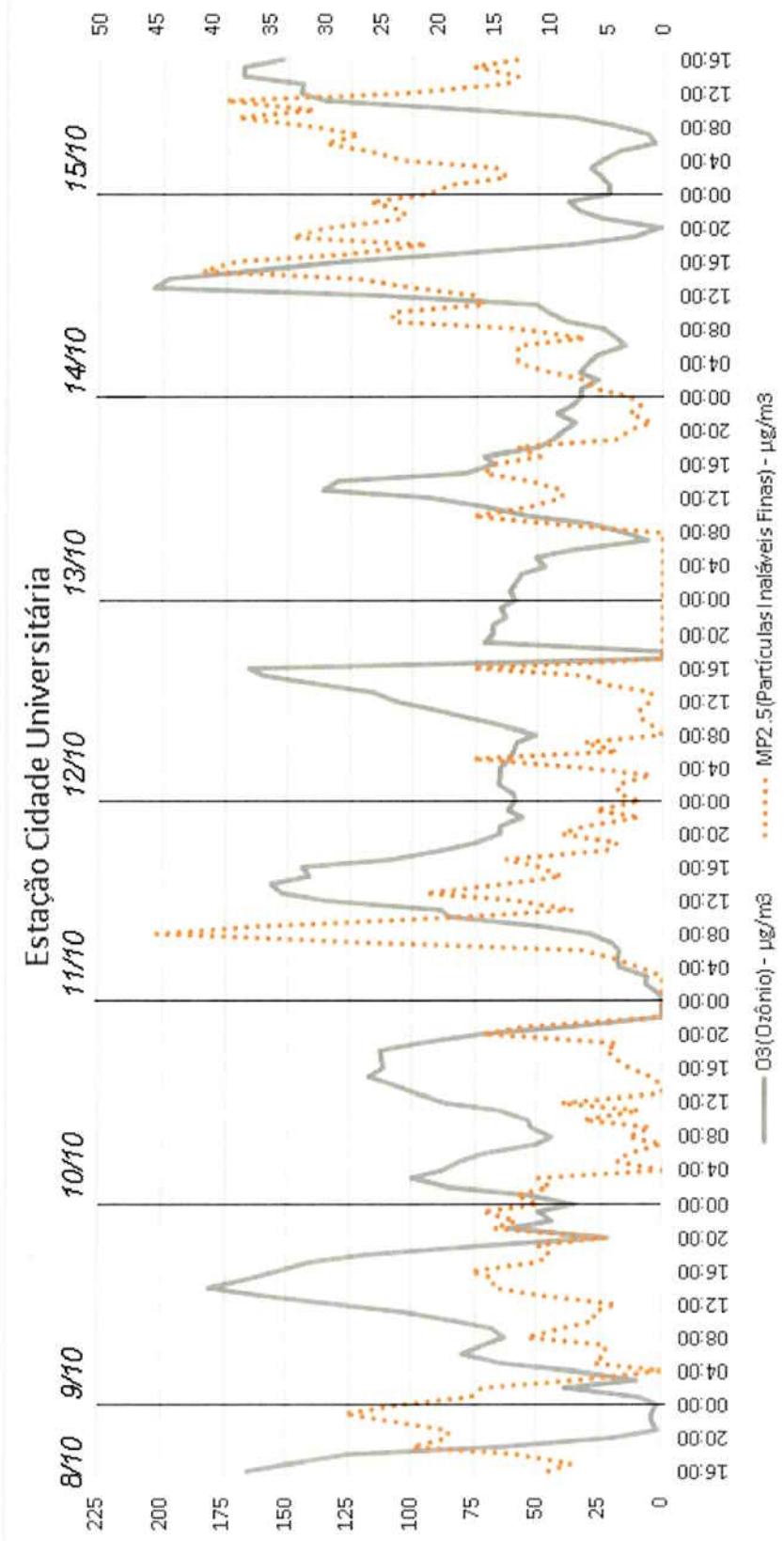


ANEXO C

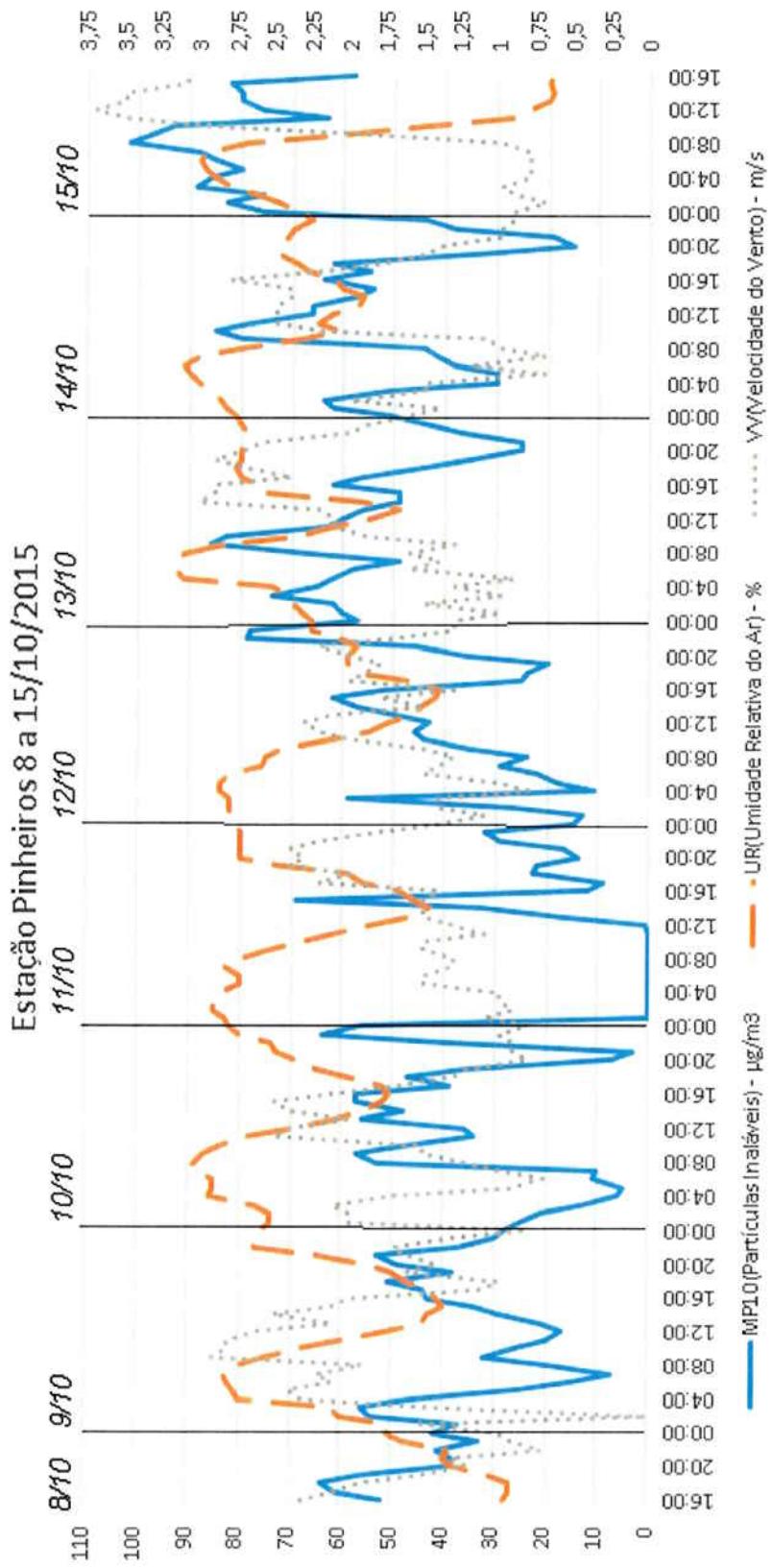


ANEXO D

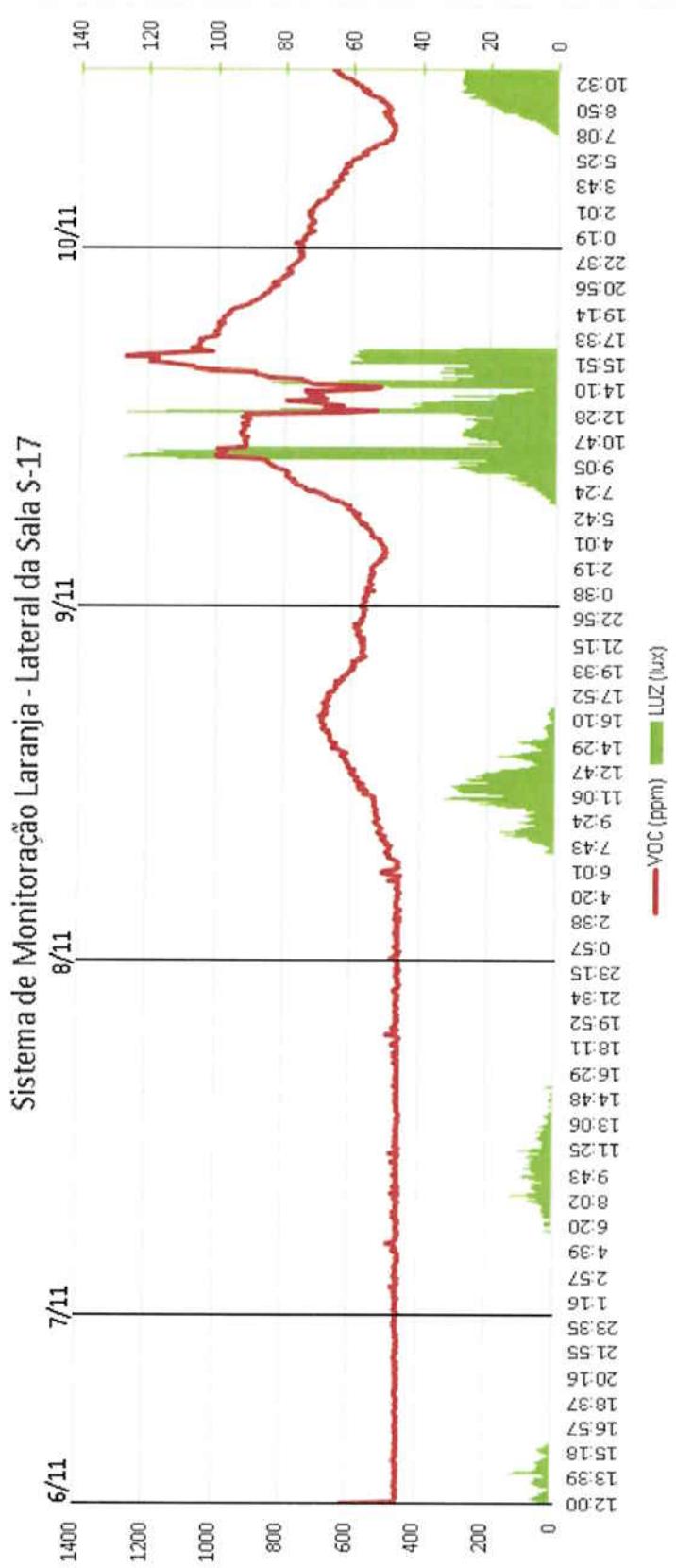
ANEXO E



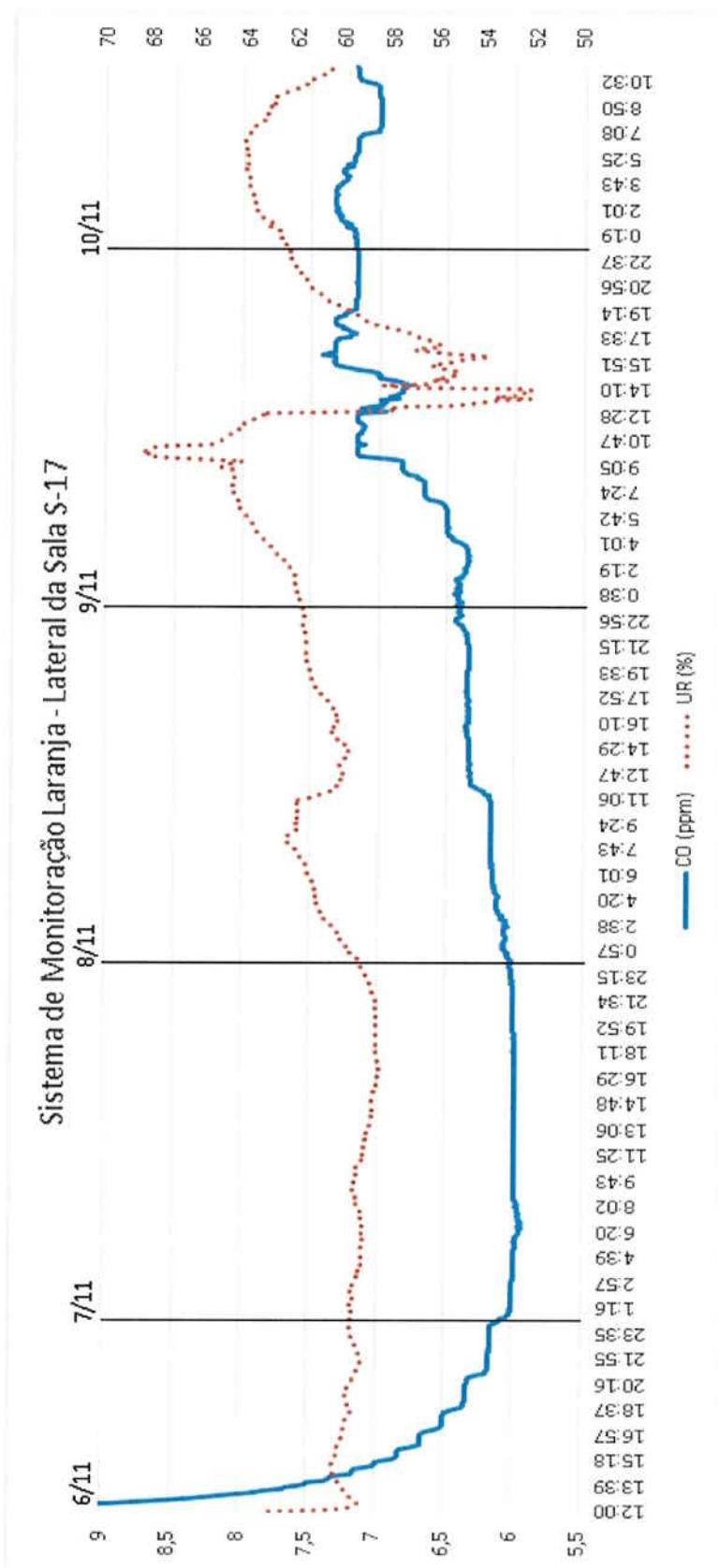
ANEXO F



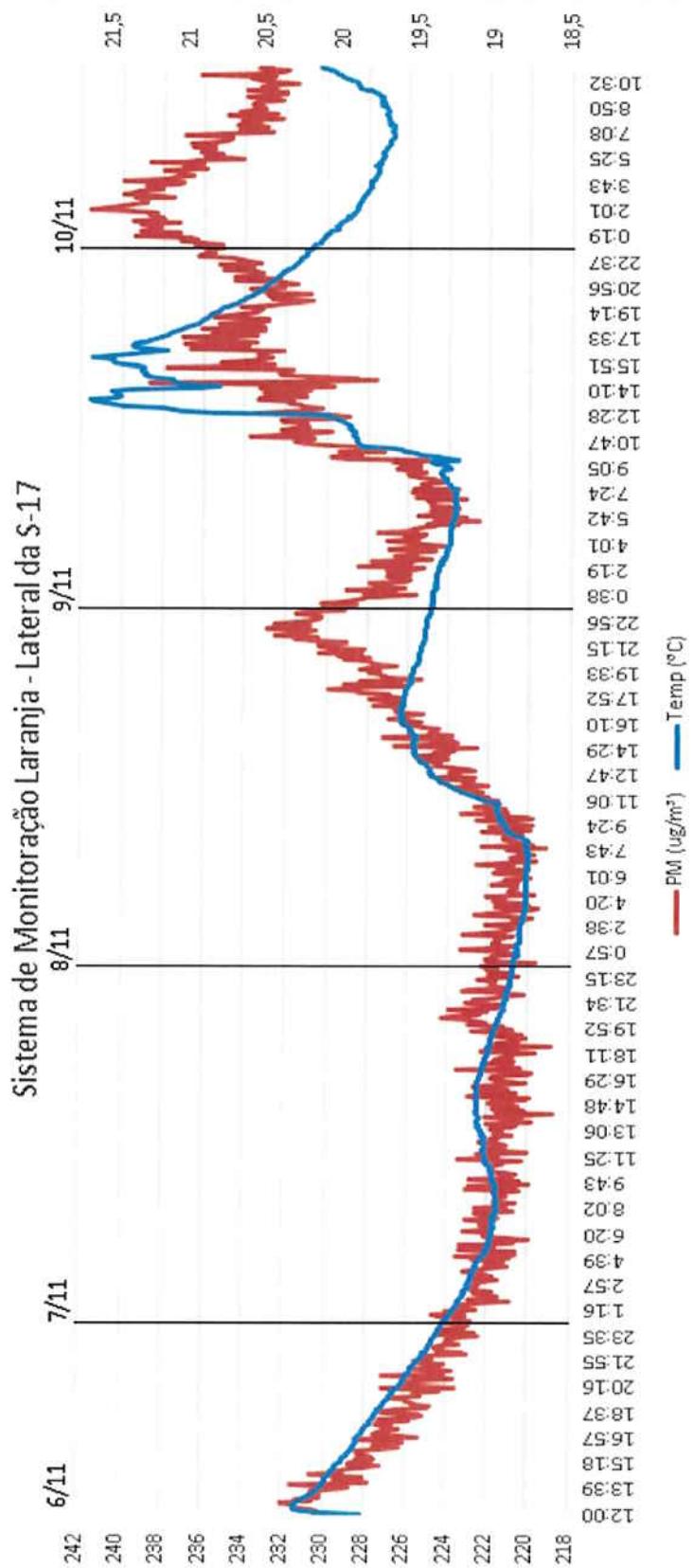
ANEXO G



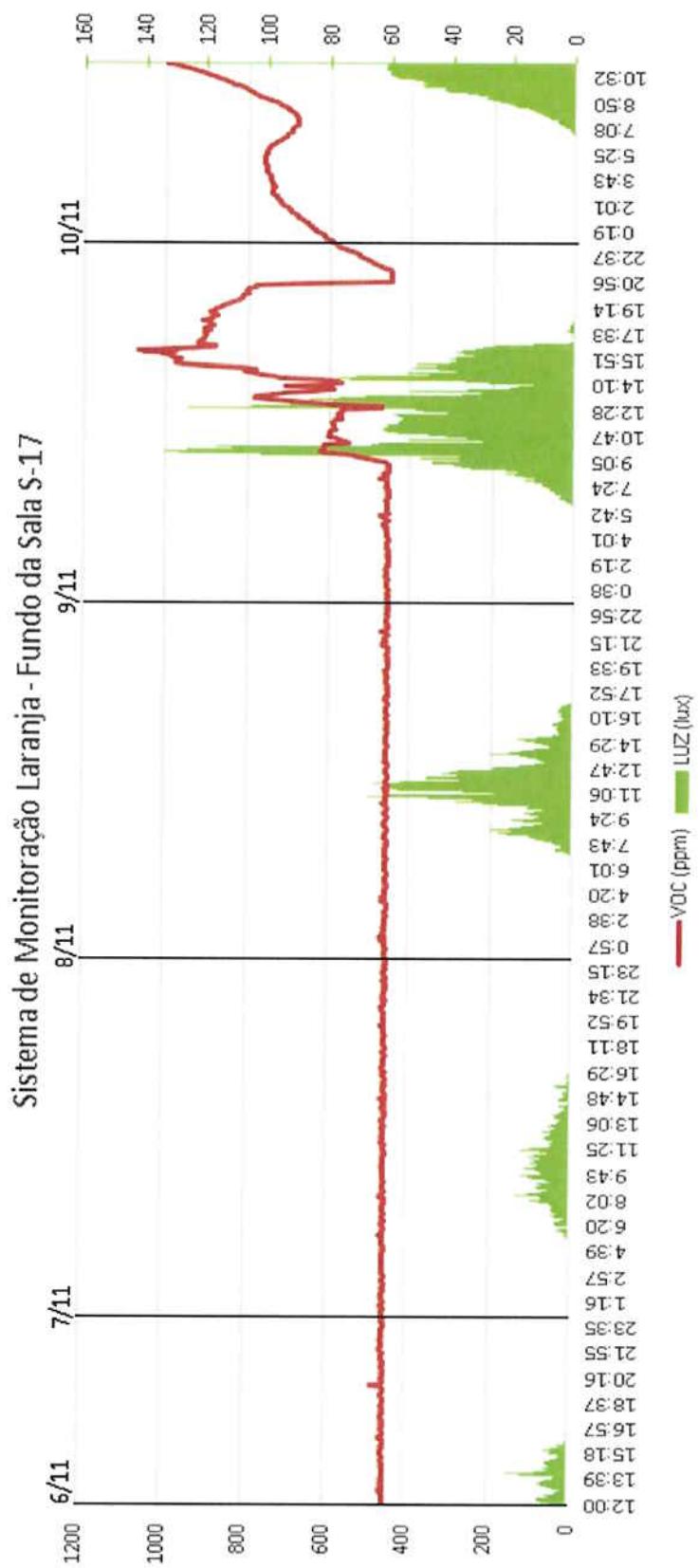
ANEXO H



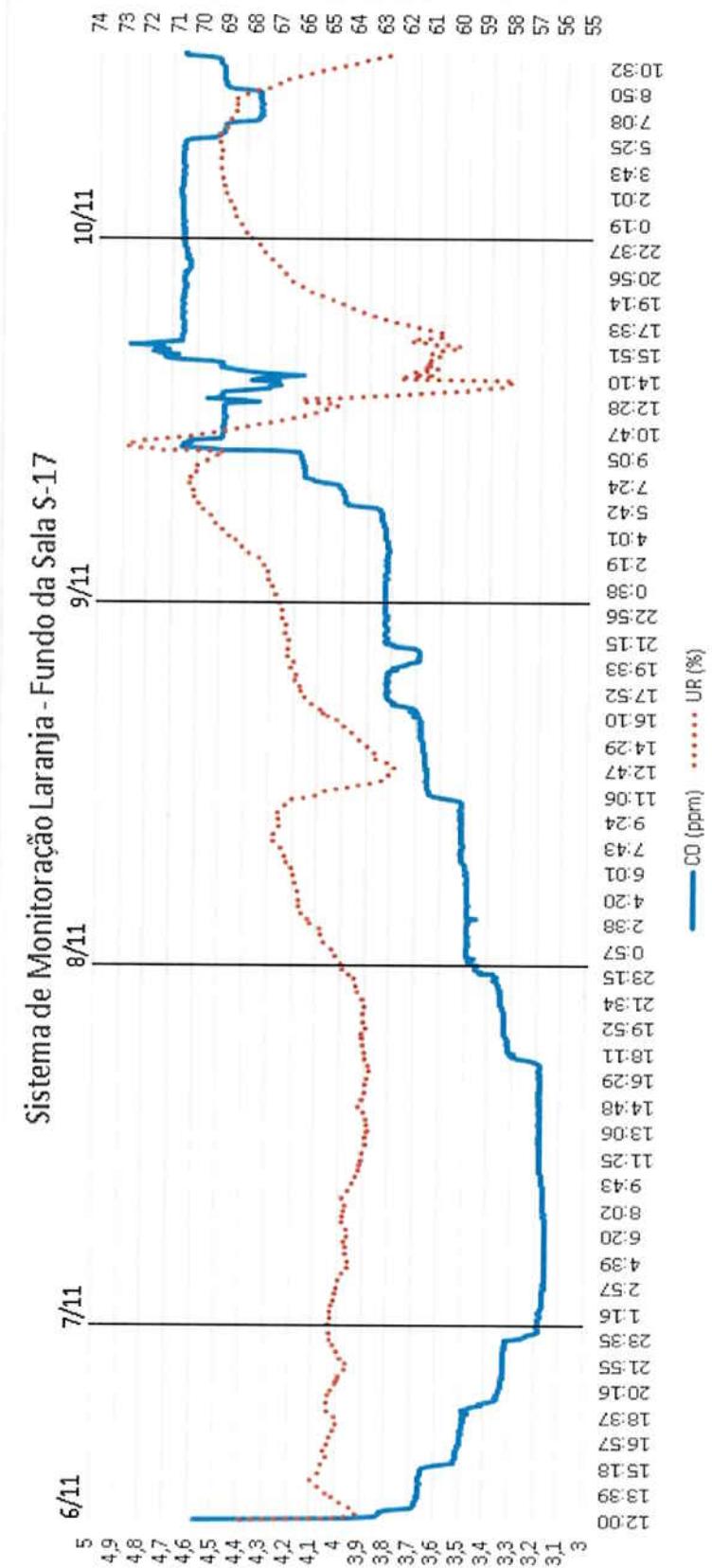
ANEXO I



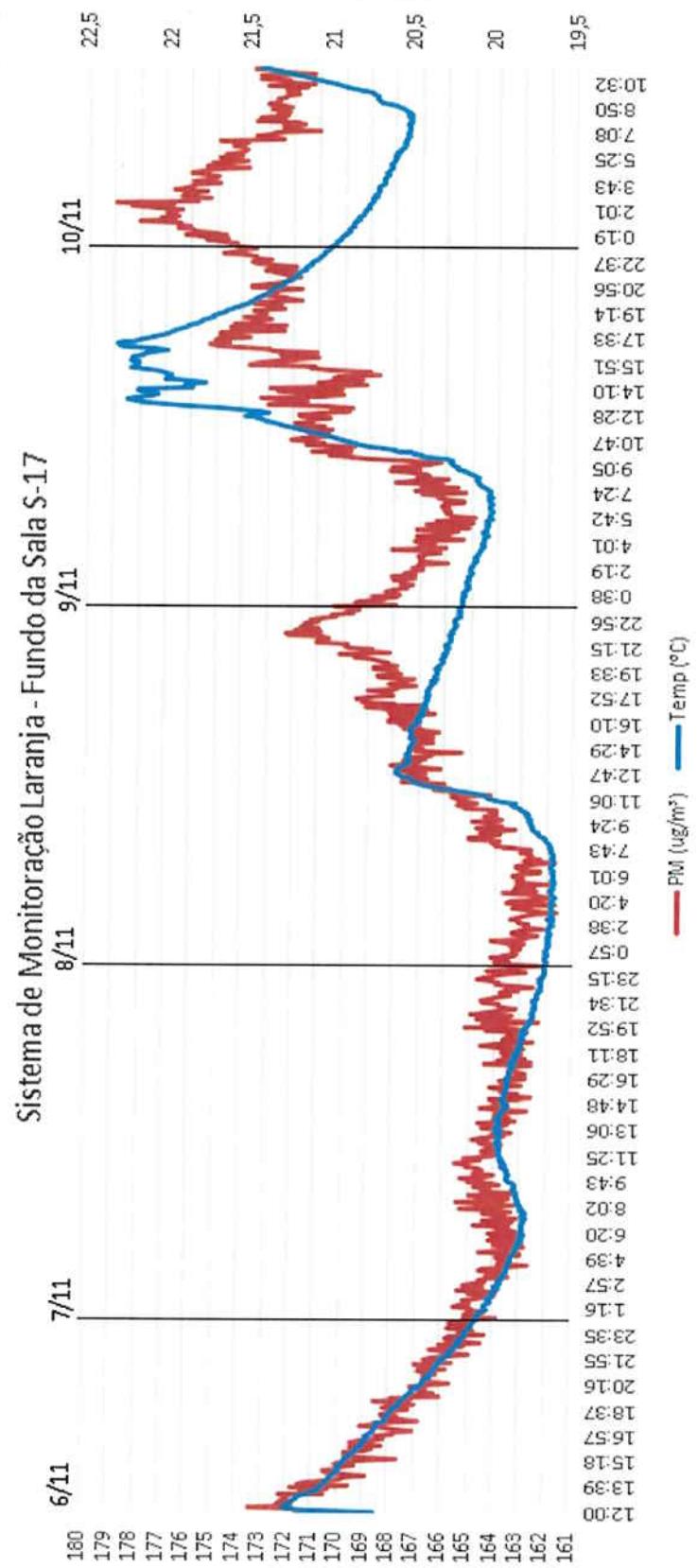
ANEXO J

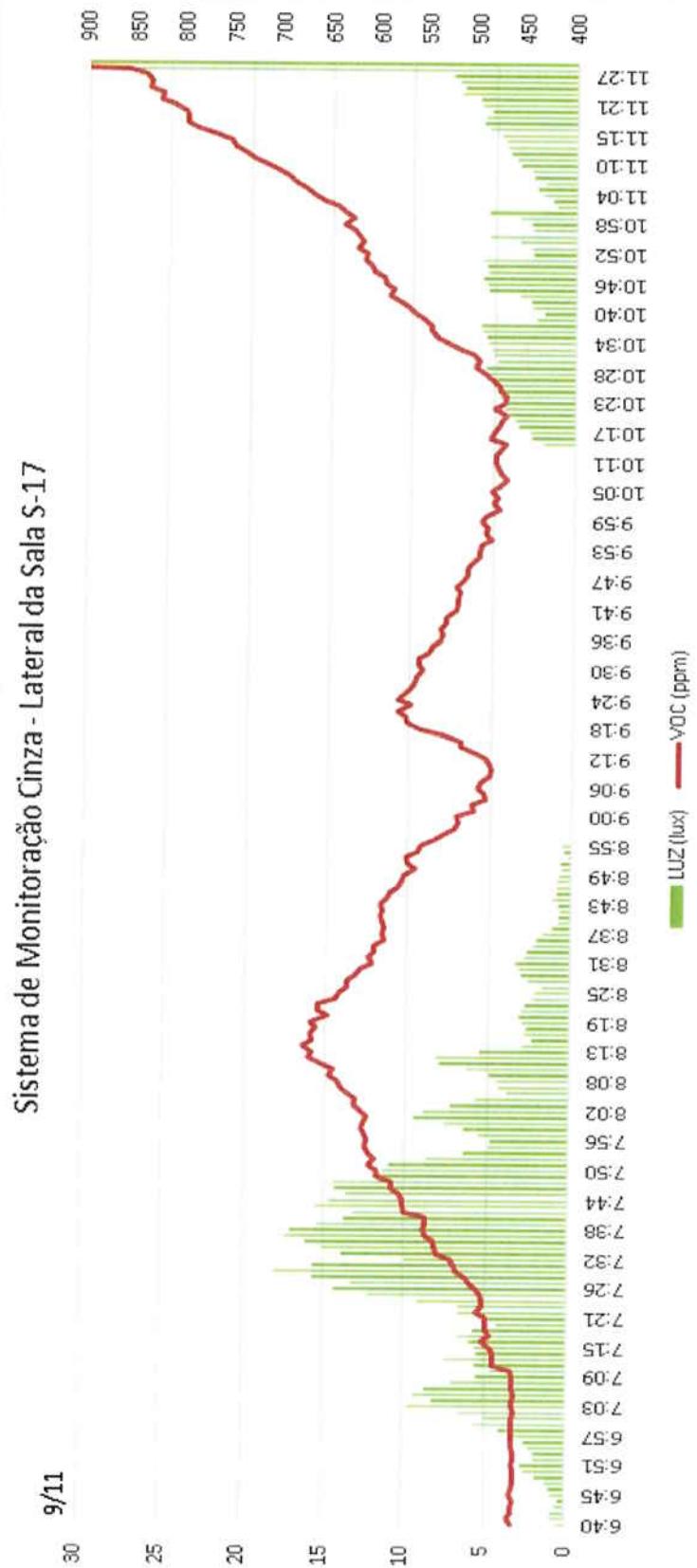


ANEXO K

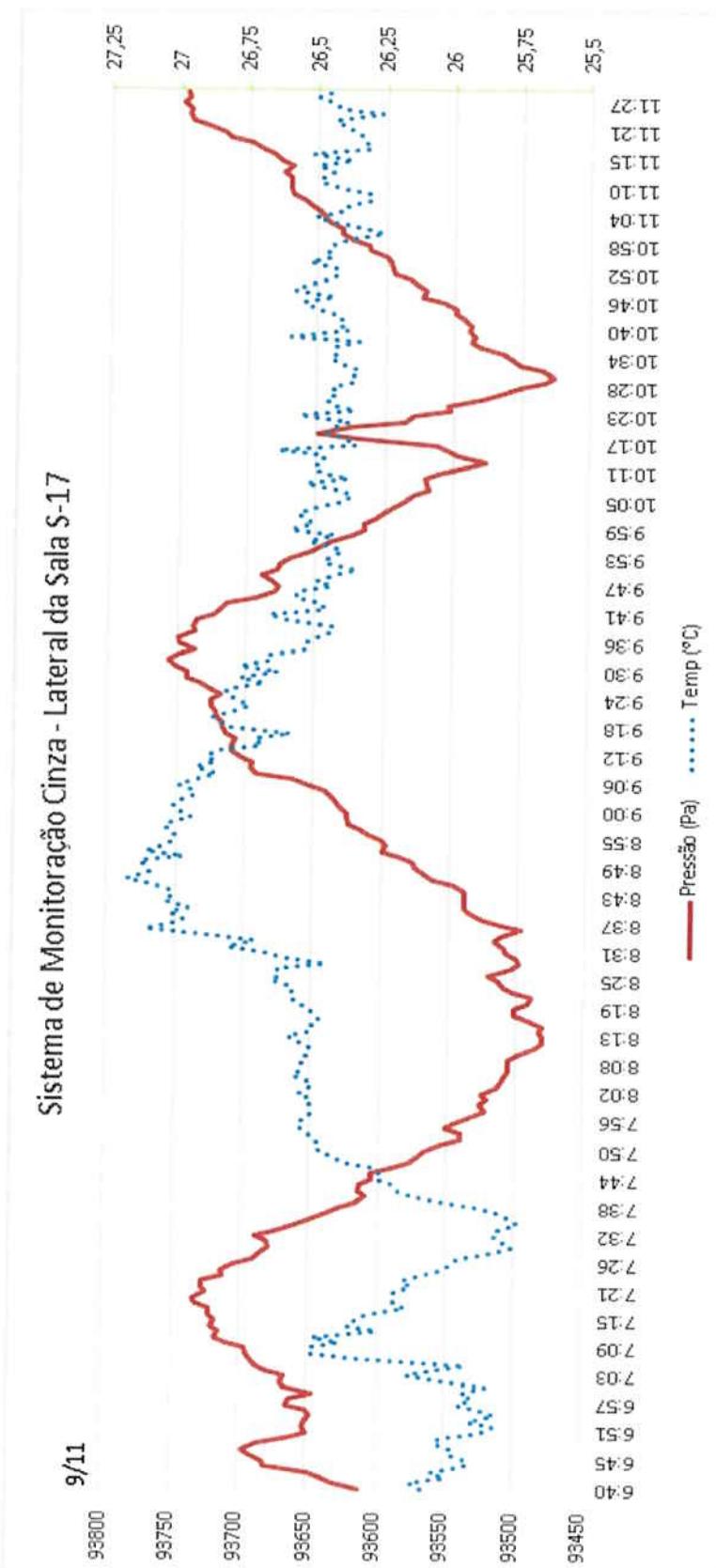


ANEXO L

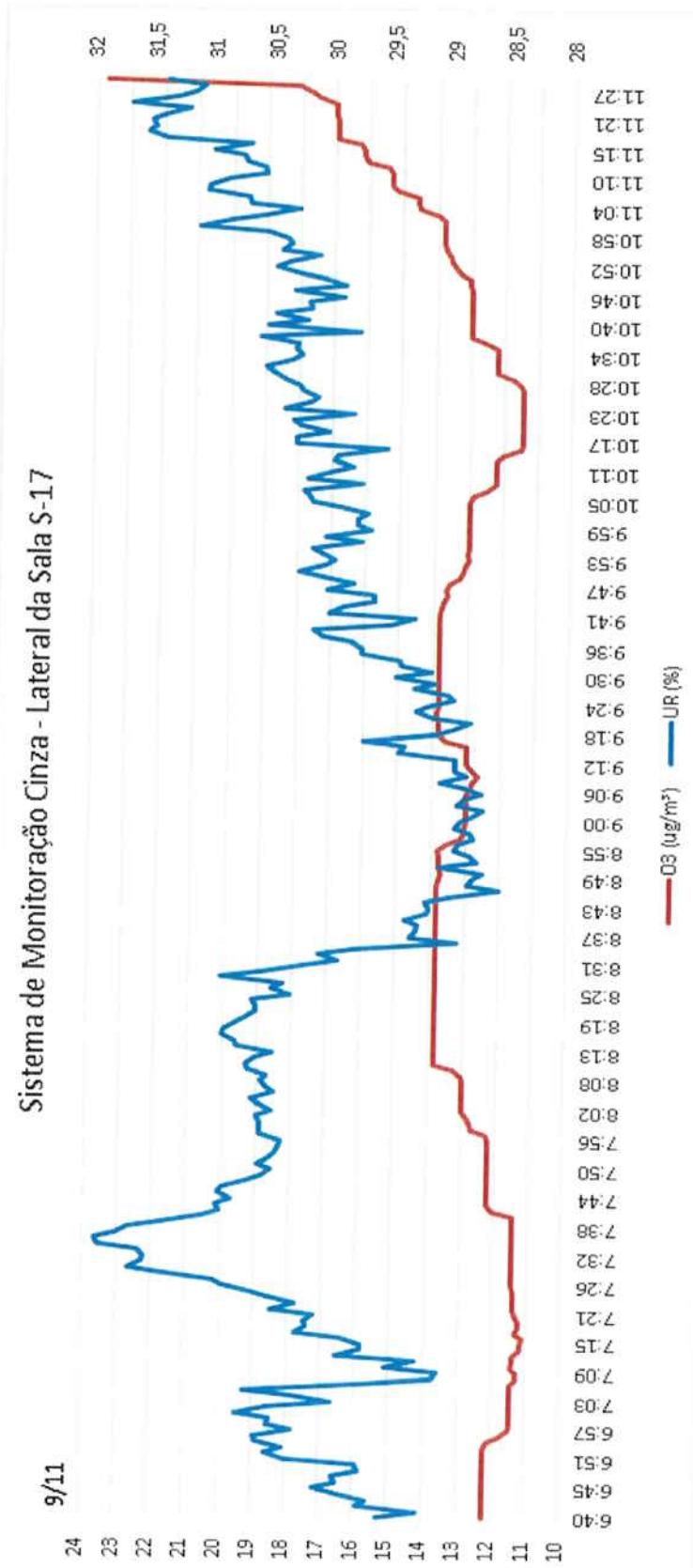


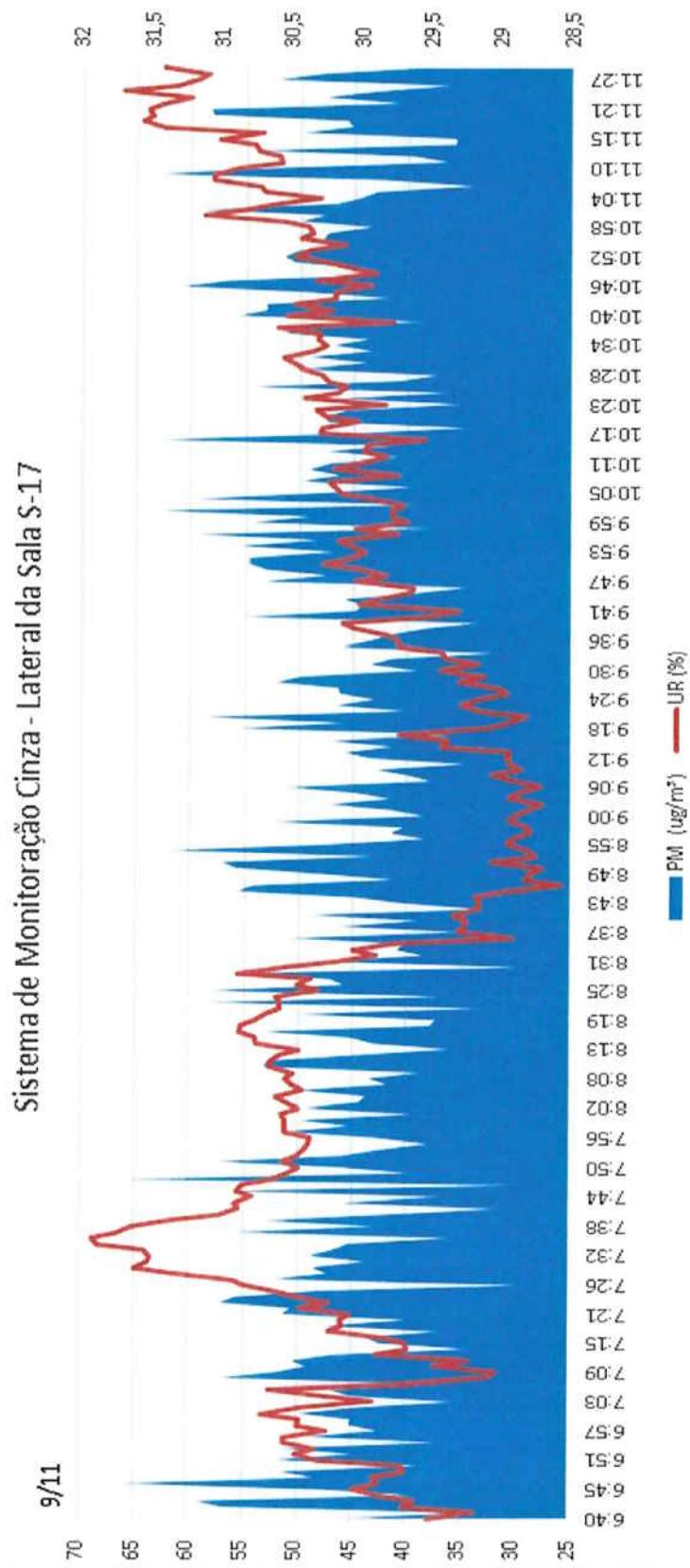
ANEXO M

ANEXO N

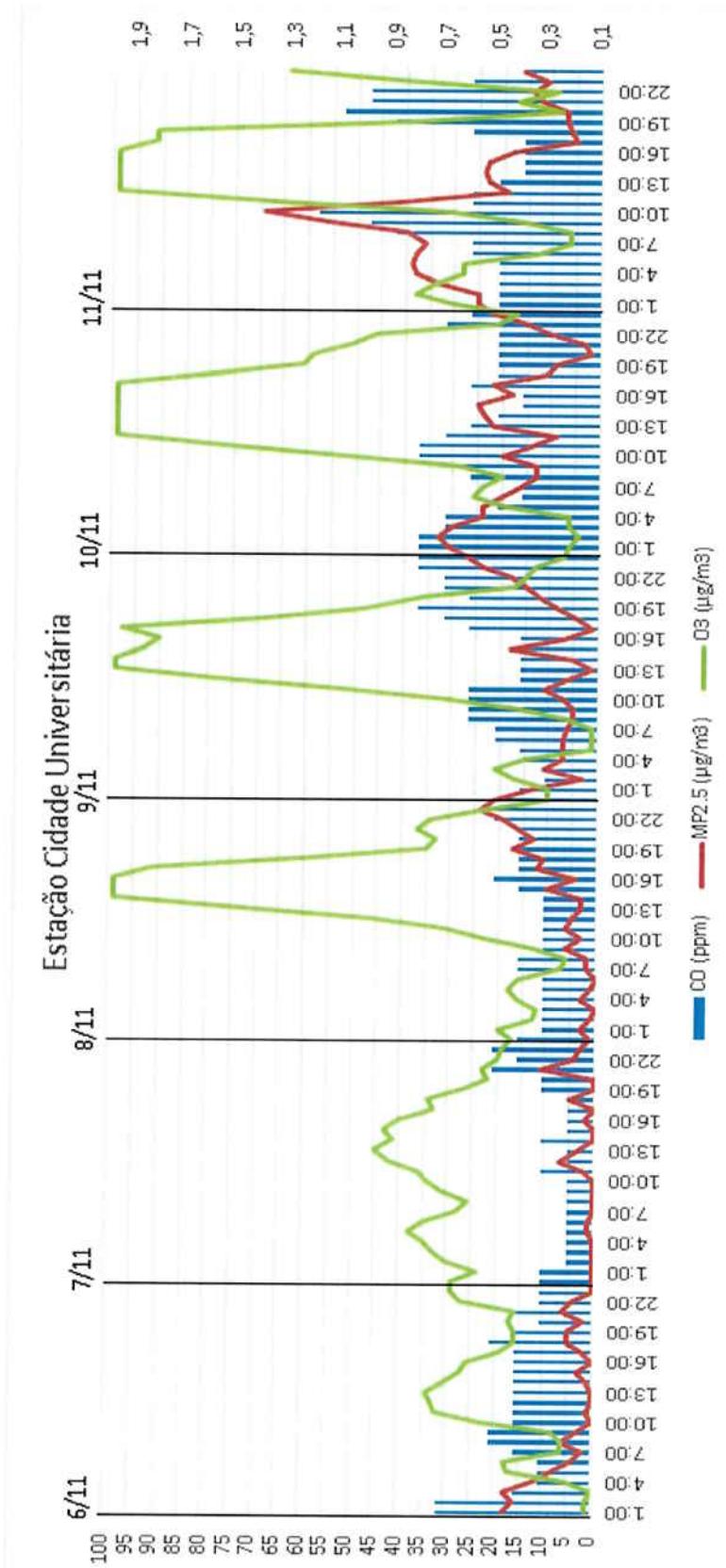


ANEXO O



ANEXO P

ANEXO Q



ANEXO R

