

ROBERTO BOZZA NAMUR

Análise das condições ambientais em setores com diferentes estratégias de ventilação e climatização e propostas de intervenções para a melhoria da qualidade do ar interior e do conforto térmico no Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU-USP)

São Paulo

2022

ROBERTO BOZZA NAMUR

Análise das condições ambientais em setores com diferentes estratégias de ventilação e climatização e propostas de intervenções para a melhoria da qualidade do ar interior e do conforto térmico no Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU-USP)

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Inovação na Engenharia de Construção Civil

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Brenda Chaves Coelho Leite

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 26 de Agosto de 2022

Assinatura do autor: 

Assinatura do orientador: 

Catálogo-na-publicação

Namur, Roberto Bozza

Análise das condições ambientais em setores com diferentes estratégias de ventilação e climatização e propostas de intervenções para a melhoria da qualidade do ar interior e do conforto térmico no Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU-USP) / R. B. Namur -- versão corr. -- São Paulo, 2022.

182 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Qualidade do Ar Interior 2.Conforto Térmico 3.Ambientes Hospitalares
4.Avaliação Pós Ocupação 5.Simulação Computacional Fluidodinâmica (CFD)
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

*Dedico este trabalho aos meus pais:
Omar Namur e Thelma Martini Bozza Namur*

*Agradeço-lhes:
...por sempre me apoiarem
...por me incentivarem na busca dos meus sonhos
...por toda a paciência que tiveram
durante este processo
...pelas inúmeras discussões que
contribuíram para este trabalho
...por todos os sacrifícios que fizeram
...por terem feito tudo isso com muito carinho
tornando esta jornada muito mais prazerosa*

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof^a Dr^a Brenda Chaves Coelho Leite, por todo o apoio para a realização deste trabalho e por sua amizade, incentivo e orientação não apenas durante esta pesquisa, mas de todo o meu ciclo na Escola Politécnica, desde a Graduação, na Iniciação Científica, no Trabalho de Formatura e no Pré-Mestrado. Espero que possamos perseguir juntos novos desafios.

A todos os profissionais do Hospital Universitário da USP que muito colaboraram para a viabilização desta pesquisa, às equipes do Centro Cirúrgico, Centro Obstétrico, Radiologia, Ambulatório, Hospital Dia, Engenharia e Manutenção e da CEP. Um agradecimento a todos as pessoas que voluntariamente se disponibilizaram a responder aos questionários aplicados.

Ao Dr. Murilo Carmona, por seu incentivo e contribuição na viabilização desta pesquisa.

Às empresas Conforlab e Armec, nas figuras do Leonardo Cozac e Eduardo Brunacci, pela disponibilização de equipamentos.

Ao Lucas Uchida, ao Tom Van de Voort e ao Arthur Aikawa por suas inestimáveis contribuições para a realização das medições.

À Eliane Suzuki pelas inúmeras discussões que tanto contribuíram para este trabalho.

Por fim, um especial agradecimento à Rachel Carvalho Carmona, por estar ao meu lado ao longo de todo este processo, sempre me apoiando e me incentivando com muito amor e carinho. Por me fazer persistir, mesmo nos momentos mais difíceis.

RESUMO

NAMUR, R. B. **Análise das condições ambientais em setores com diferentes estratégias de ventilação e climatização e propostas de intervenções para a melhoria da qualidade do ar interior e do conforto térmico no Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU-USP)**. 2022. Dissertação (Mestrado em Inovação na Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Com o objetivo de analisar as condições de qualidade do ar interior e de conforto térmico em setores do segundo pavimento do Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU) e propor intervenções simples visando a melhoria dessas condições, foram realizadas medições das variáveis de qualidade do ar interior e conforto térmico em cinco setores do segundo pavimento do HU (Centro Cirúrgico, Centro Obstétrico, Radiologia, Ambulatório e Hospital Dia) e aplicados questionários aos colaboradores destas áreas, usando técnicas de avaliação pós-ocupação. Com os resultados experimentais foram apontadas propostas de intervenção para melhoria dos problemas encontrados. Adicionalmente, para Sala de Cirurgia A, foram elaboradas propostas de intervenção estudadas por meio de simulações computacionais fluidodinâmicas (CFD). Em relação à qualidade do ar, os resultados experimentais mostraram que em todos os sistemas de distribuição de ar dutados havia deficiências na limpeza de dutos e manutenção de filtros, bem como problemas na localização do ponto de captação de ar externo. No Hospital Dia (sistema split) e no Ambulatório (ventilação natural), foi constatada ventilação insuficiente. Em alguns sistemas foram observadas deficiências de manutenção e de soluções de projeto. No Centro Cirúrgico, foram percebidas inadequações na forma de utilização do sistema de ar-condicionado, mantido desligado pelos usuários (devido ao seu desconforto) durante 73% do tempo de observação, propiciando altas concentrações de CO₂. Nos demais setores, apenas os climatizados artificialmente apresentaram condições de conforto térmico satisfatórias. As intervenções propostas consistem desde recomendações de utilização e manutenção dos sistemas instalados, até intervenções na distribuição de ar nas salas e criação de sistemas auxiliares de ventilação mecânica. Simulou-se em CFD alternativas para o retorno do ar, insuflamento e layout da Sala de Cirurgia A. Os resultados mostraram

impactos positivos na qualidade do ar com a implementação de um retorno adicional em paralelo com a pressurização do atual (e do adicional). A adoção da solução de insuflamento por difusores de quatro vias espalhados pelo teto trouxe benefícios tanto para o conforto térmico quanto para a redução das partículas em suspensão, a configuração com oito difusores foi a que apresentou os melhores resultados. Em resumo, os resultados mostraram que grande parte dos problemas de qualidade do ar encontrados podem ser mitigados com a adoção de medidas simples.

Palavras-chave: Qualidade do ar interior. Conforto térmico. Ambientes hospitalares. Avaliação pós ocupação. Simulação computacional fluidodinâmica (CFD).

ABSTRACT

NAMUR, R. B. **Environmental conditions analysis in sectors with different ventilation and air conditioning strategies and intervention propositions to improve indoor air quality and thermal comfort at the University Hospital of the University of São Paulo (HU-USP)**. 2022. Dissertation (Master's in Science – Civil engineering innovation) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

This research aims to assess the indoor air quality and thermal comfort conditions in departments of the second floor of the University Hospital of Sao Paulo University (HU-USP) and to suggest simple interventions to improve those conditions. Thus, field measurements were conducted in five sectors of HU-USP (Surgical Center, Obstetric Center, Radiology, Ambulatory and Day-Hospital), and questionnaires were applied to the staff, using Post Occupancy Evaluation techniques. Interventions were suggested to mitigate the main problems found in the experimental results. Additionally, for Operating Room A, interventions were simulated using computational fluid dynamics (CFD) techniques. Regarding the indoor air quality, all ducted distribution systems presented duct cleaning issues, filters inefficiencies and problems in the external air intake position. At the Day-Hospital (split-system) and Ambulatory (natural ventilation), air renewal was insufficient. Some systems were found to be poorly maintained, lacking some air diffusers; others presented inadequate design solutions caused by a refurbishment prior to data collection. At the operating theatres, users turned off the air conditioning system several times during surgeries (73% of observation time), because of their thermal discomfort. These induced high concentrations of carbon dioxide in those rooms. Besides the surgical center, only the artificially climatized sectors presented satisfactory conditions for thermal comfort. The interventions proposed contemplated from system operations and maintenance guidelines to new mechanical ventilations, and also adaptations on the air distribution systems. At the Operation Theatre A alternatives of air inlets and outlets, and room layout were simulated. Results showed that indoor air quality were improved with an additional pressured outlet. The inlet solutions using four-way diffusers spread throughout the ceiling has brought benefits both to thermal comfort conditions and to the reduction of suspended particles. The configuration using eight

four-ways diffusers was the most efficient. Summarizing, results showed that most of indoor air quality problems may be mitigated by simple solutions.

Keywords: Indoor air quality. Thermal Comfort. Healthcare buildings. Post occupancy evaluation. Computational fluid dynamics (CFD).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escala psicofísica de sensação térmica	35
Figura 2 - Relação entre PPD e PMV	35
Figura 3 - Trato Respiratório	37
Figura 4 - Estrutura da pesquisa	46
Figura 5 - Estrutura da Pesquisa Experimental	48
Figura 6 - Foto aérea do HU, destacando o segundo pavimento (seta larga), o jardim do terceiro pavimento (seta aberta) e o corpo em forma de "H" (seta preenchida) ..	49
Figura 7 - Croqui do segundo pavimento, delimitando seus setores	49
Figura 8 - Planta do Centro Obstétrico com salas de parto estudadas destacadas .	56
Figura 9 - Croqui da Sala de Partos 3, indicando a projeção dos difusores de insuflamento e das grelhas de retorno, localizadas no forro – sem escala	57
Figura 10 - Esquema representativo da proposta de intervenção na sala 1, em planta	65
Figura 11 - Esquema representativo da proposta de intervenção na sala 1, em corte	65
Figura 12 - Planta da Radiologia com os ambientes estudados destacados	66
Figura 13 - Planta do Hospital Dia, indicando seus acessos e principais áreas.	71
Figura 14 - Vista lateral do edifício do HU, destacando projeção do Hospital Dia, do Pavimento Técnico e a Casa de Máquinas e croqui de encaminhamento de duto de insuflamento.	74
Figura 15 - Planta do Ambulatório com consultórios estudados destacados	75
Figura 16 – Esquema representativo da proposta de intervenção nos consultórios sem janela – em corte, sem escala	78
Figura 17 - Planta do Centro Cirúrgico com ambientes estudados destacados	79
Figura 18 - Esquema da sala A, indicando o fluxo principal de ar, o ponto de medição do insuflamento (em verde), do ambiente (em azul) e do retorno (em vermelho)	80
Figura 19 - Esquema da sala F, indicando o fluxo principal de ar, o ponto de medição do insuflamento (em verde), do ambiente (em azul) e do retorno (em vermelho)	80
Figura 20 - Esquema da sala J, indicando o ponto de medição do insuflamento (em verde), do ambiente (em azul) e do retorno (em vermelho)	81
Figura 21 - Av. Prof. Lineu Prestes, ponto de ônibus Biomédicas III	110
Figura 22 - Esquema da proposta de intervenção para reposicionamento do ponto de ônibus Biomédicas III	118
Figura 23 - Comparativo entre os layouts das salas A e F	121
Figura 24 - Sala A, não modernizada	122
Figura 25 - Sala J, modernizada	122
Figura 26 - Comparativo dos layouts das salas A (esquerda) e F (direita). Insuflamento destacado em azul, retorno e frestas em vermelho	126
Figura 27 – Comparativo das opções de layout dos difusores de insuflamento. Difusores de insuflamento destacados em azul; retorno e frestas em vermelho	127
Figura 28 – Vista isométrica do modelo da sala com o retorno adicional destacado. Difusor de insuflamento em azul; retornos e frestas em vermelho	128
Figura 29 – Esquema representativo da proposta de intervenção de retorno adicional	129
Figura 30 - Fluxograma resumido das propostas de intervenção simuladas	130

Figura 31 - Vista isométrica do modelo da Sala A original. Paredes e teto foram retirados da vista para melhor visualização. Insuflamento destacado em verde; retorno e frestas em vermelho; mobiliário em cinza; luminárias e foco cirúrgico em amarelo; paciente em ciano; usuários do Grupo I em vermelho claro; usuários do Grupo II em azul.....	131
Figura 32 - Esquema representativo dos pontos de medição na grelha de insuflamento.....	136
Figura 33 - Modelo da Sala A, com os cinco planos básicos de análise destacados em amarelo.....	138
Figura 34 - Mapa de temperatura do ar, a 1,1m do piso, na Sala A original.....	141
Figura 35 - Mapa de velocidade do ar, a 1,1m do piso, na Sala A original.....	141
Figura 36 - Mapa de temperatura do ar, no plano transversal à mesa de cirurgia, na Sala A original.....	141
Figura 37 - Mapa de velocidade do ar, no plano transversal à mesa de cirurgia, na Sala A original.....	141
Figura 38 - Linhas de fluxo, coloridas pela velocidade do ar, na Sala A original. Setas de 1 a 6 indicam o fenômeno observado.....	142
Figura 39 - Mapa de velocidade do ar a 0,5m do piso na PI-1-A. Seta indicando o passo 3 do fenômeno descrito na figura 38.....	143
Figura 40 - Mapa de velocidade do ar a 0,5m do piso na PI-1-B. Seta indicando o passo 3 do fenômeno descrito na figura 38.....	143
Figura 41 - Mapa de velocidade do ar a 0,5m do piso na PI-1-C. Seta indicando o passo 3 do fenômeno descrito na figura 38.....	144
Figura 42 - Mapa de velocidade do ar a 0,5m do piso na PI-1-D. Seta indicando o passo 3 do fenômeno descrito na figura 38.....	144
Figura 43 - Linhas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-1-A. Setas de 3 a 5 conforme figura 38.....	144
Figura 44 - Linhas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-1-B. Setas de 3 a 5 conforme figura 38.....	144
Figura 45 - Linhas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-1-C. Setas de 3 a 5 conforme figura 38.....	145
Figura 46 - Linhas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-1-D. Setas de 3 a 5 conforme figura 38.....	145
Figura 47 - Mapa de temperatura do ar, a 1,1m do piso, na PI-1-A.....	145
Figura 48 - Mapa de temperatura do ar, a 1,1m do piso, na PI-1-B.....	145
Figura 49 - Mapa de temperatura do ar, a 1,1m do piso, na PI-1-C.....	146
Figura 50 - Mapa de temperatura do ar, a 1,1m do piso, na PI-1-D.....	146
Figura 51 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-2-A.....	147
Figura 52 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-2-A.....	147
Figura 53 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar, na PI-2-A.....	148
Figura 54 - Vetores de velocidade do ar no plano transversal à mesa na PI-2-A ...	148
Figura 55 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar, na PI-2-A.....	149
Figura 56 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar, na PI-2-B.....	149
Figura 57 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar, na PI-2-C.....	149
Figura 58 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar, na PI-2-D.....	149
Figura 59 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-A.....	151
Figura 60 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-B.....	151

Figura 61 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-C	151
Figura 62 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-D	151
Figura 63 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-E.....	151
Figura 64 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-F.....	151
Figura 65 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-G	151
Figura 66 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-H	151
Figura 67 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-A.....	152
Figura 68 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-B.....	152
Figura 69 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-C.....	152
Figura 70 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-D.....	152
Figura 71 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-E.....	152
Figura 72 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-F	152
Figura 73 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-G	153
Figura 74 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-H.....	153
Figura 75 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-3-E.....	153
Figura 76 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-3-F	153
Figura 77 - Linhas reversas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-3-B.....	154
Figura 78 - Linhas reversas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-3-D.....	154
Figura 79 - Linhas reversas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-3-F	154
Figura 80 - Linhas reversas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-3-H.....	154
Figura 81 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar na PI-4-E	155
Figura 82 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar na PI-4-F	155
Figura 83 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-4-E.....	156
Figura 84 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-4-F	156
Figura 85 - Vetores de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-5-A ..	157
Figura 86 - Vetores de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-5-C ..	157
Figura 87 - Mapa de velocidade do ar no plano transversal à mesa na PI-5-B	158
Figura 88 - Mapa de velocidade do ar no plano transversal à mesa na PI-5-D	158
Figura 89 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-5-B.....	158
Figura 90 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-5-D	158
Figura 91 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na Sala A original.....	159
Figura 92 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-5-D	159
Figura 93 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na Sala A original.....	159
Figura 94 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-5-D.....	159
Figura 95 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-5-E.....	160
Figura 96 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-5-E.....	160
Figura 97 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-6-A.....	161
Figura 98 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-6-B.....	161
Figura 99 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-6-G	161
Figura 100 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-6-H	161
Figura 101 - Mapa de temperatura do ar no plano transversal na PI-6-C.....	162
Figura 102 - Mapa de temperatura do ar no plano transversal na PI-6-D.....	162
Figura 103 - Mapa de temperatura do ar no plano transversal na PI-6-E.....	162
Figura 104 - Mapa de temperatura do ar no plano transversal na PI-6-F	162
Figura 105 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar na Sala A original	164
Figura 106 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar na PI-1-D.....	164

Figura 107 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na Sala A original.....	164
Figura 108 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-3-E	164
Figura 109 - Planta da interligação entre o Centro Cirúrgico e o Hospital Dia	170

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperatura de bulbo seco na sala 1 do Centro Obstétrico, nas medições de inverno.....	59
Gráfico 2 - Temperatura de bulbo seco na sala 1 do Centro Obstétrico, nas medições de verão.....	59
Gráfico 3 - Umidades relativas nas medições de inverno da sala 1 do Centro Obstétrico	60
Gráfico 4 - Velocidade do ar nas medições de verão da sala 1 do Centro Obstétrico	60
Gráfico 5 - Concentração de dióxido de carbono na sala 1 do Centro Obstétrico no verão.....	61
Gráfico 6 - Concentrações de COV nas medições de inverno na sala 1 do Centro Obstétrico	61
Gráfico 7 - Concentrações de particulados 2,5µm durante as medições de inverno na sala 1 do Centro Obstétrico	62
Gráfico 8 - Indicadores IERP e IEF nas medições de inverno e verão das salas do Centro Obstétrico.....	62
Gráfico 9 - Temperaturas de bulbo seco na sala 3 do Centro Obstétrico no inverno	63
Gráfico 10 - Umidades relativas na sala 3 do Centro Obstétrico, nas medições de verão.....	63
Gráfico 11 - Concentração de dióxido de carbono ao longo das medições de inverno da sala 3 do Centro Obstétrico	64
Gráfico 12 - Concentração de particulado 2.5µm ao longo das medições de inverno da sala 3 do Centro Obstétrico	64
Gráfico 13 - Temperatura de bulbo seco na sala de espera 1 da Radiologia, no inverno.....	67
Gráfico 14 - Temperatura de bulbo seco na sala de espera 2 da Radiologia, no verão	67
Gráfico 15 - Velocidade do ar ao longo das medições de verão da Sala de Espera 2 da Radiologia.....	68
Gráfico 16 - Distribuição do tempo de observação por faixas de umidade relativa ..	68
Gráfico 17 - Concentração de CO ₂ na Sala de Espera 2 da Radiologia, em dia de inverno	69
Gráfico 18 - Concentração de COV na Sala de Espera 1 da Radiologia, em dia de verão.....	69
Gráfico 19 - Particulado na Sala de Espera 1 da Radiologia, em dia de inverno.....	70
Gráfico 20 - IERP e IEF na Radiologia, por ambiente e por estação.....	70
Gráfico 21 - Temperaturas de Bulbo Seco no Hospital-Dia	72
Gráfico 22 - Velocidade do Ar no Hospital-Dia no Verão	72
Gráfico 23 - Concentração de dióxido de carbono no Hospital-Dia no Verão.....	73
Gráfico 24 - Concentração de Particulado 2,5µm no Hospital-Dia no Verão	73
Gráfico 25 - Temperatura de Bulbo Seco nas salas do Ambulatório no Inverno	76
Gráfico 26 - Temperatura de Bulbo Seco nas salas do Ambulatório no Verão.....	76
Gráfico 27 - Concentração de CO ₂ nas salas 49 e 54 do Ambulatório no inverno ...	77
Gráfico 28 - Concentração de Particulado 2,5µm nas salas 49 e 54 do ambulatório no inverno.....	77

Gráfico 29 - Temperaturas do Ar no primeiro dia da medição de inverno na Sala A.	84
Gráfico 30 - Temperaturas do Ar no segundo dia da medição de inverno na Sala A	84
Gráfico 31 - Temperaturas do Ar no terceiro dia da medição de inverno na Sala A.	85
Gráfico 32 - Umidades absolutas médias nas medições de inverno na Sala A, no Ambiente	86
Gráfico 33 - Umidade relativa no primeiro dia de medição de inverno na Sala A.	86
Gráfico 34 - Umidade Relativa no segundo dia de medição de inverno na Sala A	86
Gráfico 35 - Umidade Relativa no terceiro dia de medição de inverno na Sala A	86
Gráfico 36 - Concentrações de CO ₂ no primeiro dia de medição de inverno na Sala A	87
Gráfico 37 - Concentrações de CO ₂ no segundo dia de medição de inverno na Sala A	87
Gráfico 38 - Concentrações de CO ₂ no terceiro dia de medição de inverno na Sala A	87
Gráfico 39 - Concentrações de CO no primeiro dia de medição de inverno na Sala A	88
Gráfico 40 - Concentrações de COV no primeiro dia de medição de inverno na Sala A	88
Gráfico 41 - Concentrações de CO no segundo dia de medição de inverno na Sala A	88
Gráfico 42 - Concentrações de COV no segundo dia de medição de inverno na Sala A	88
Gráfico 43 - Concentrações de CO no terceiro dia de medição de inverno na Sala A	88
Gráfico 44 - Concentrações de COV no terceiro dia de medição de inverno na Sala A	88
Gráfico 45 - Particulados no primeiro dia de medição de inverno da Sala A.	89
Gráfico 46 - Particulados no segundo dia de medição de inverno da Sala A.	89
Gráfico 47 - Particulados no terceiro dia de medição de inverno da Sala A.	89
Gráfico 48 - Indicador IERP para as medições de inverno da Sala A	89
Gráfico 49 - Percepções dos usuários acerca da Qualidade do Ar Interior nas medições de inverno da Sala A.	90
Gráfico 50 - Percepção dos usuários acerca da Qualidade do Ar Interior, relativamente ao ambiente externo nas medições de inverno da Sala A	90
Gráfico 51 - Temperatura de bulbo seco no primeiro dia de medição de verão da Sala A.	91
Gráfico 52 - Temperatura de bulbo seco no segundo dia de medição de verão da Sala A.	91
Gráfico 53 - Temperatura de bulbo seco no terceiro dia de medição de verão da Sala A.	91
Gráfico 54 - Sensação térmica por grupo de usuário nas medições da Sala A	91
Gráfico 55 - Velocidade do ar no primeiro dia de medição de verão na sala A.	92
Gráfico 56 - Velocidade do ar no segundo dia de medição de verão na Sala A	92
Gráfico 57 - Velocidade do ar no terceiro dia de medição de verão da Sala A	92
Gráfico 58 - Desconforto por movimentação de ar e parte do corpo onde é sentido, na Sala A.	92
Gráfico 59 - Umidade relativa no primeiro dia de medição de verão na Sala A	93

Gráfico 60 - Umidade relativa no segundo dia de medição de verão na Sala A.....	93
Gráfico 61 - Umidade relativa no terceiro dia de medição de verão na Sala A.....	93
Gráfico 62 - Umidade absoluta nas medições de verão na Sala A.....	93
Gráfico 63 - Concentração de dióxido de carbono no primeiro dia de medição de verão da Sala A	94
Gráfico 64 - Concentração de dióxido de carbono no segundo dia de medição de verão na Sala A	94
Gráfico 65 - Concentração de dióxido de carbono no terceiro dia de medição de verão na Sala A	94
Gráfico 66 - Particulados 2.5µm no primeiro dia de medição de verão na Sala A....	95
Gráfico 67 - Particulado 2.5µm no segundo dia de medição de verão na Sala A....	95
Gráfico 68 - Particulado 2.5µm no terceiro dia de medição de verão na Sala A.....	95
Gráfico 69 - Indicadores IERP e IEF para as medições de verão da Sala A.....	95
Gráfico 70 - Temperaturas de bulbo seco no primeiro dia de medição de inverno da Sala F	97
Gráfico 71 - Temperaturas de bulbo seco no segundo dia de medição de inverno da Sala F	97
Gráfico 72 - Temperaturas de bulbo seco no terceiro dia de medição de inverno da Sala F	97
Gráfico 73 - Sensação Térmica relatada pelos usuários nas medições de inverno da Sala F	97
Gráfico 74 - Umidades Relativas no primeiro dia de medição de inverno da Sala F	98
Gráfico 75 - Umidades Relativas no segundo dia de medição de inverno da Sala F	98
Gráfico 76 - Umidades Relativas no terceiro dia de medição de inverno da Sala F .	98
Gráfico 77 - Umidade absoluta média, nas medições de inverno da Sala F, no Ambiente.....	98
Gráfico 78 - Concentração de CO ₂ no primeiro dia de medição de inverno da Sala F	99
Gráfico 79 - Concentração de CO no primeiro dia de medição de inverno da Sala F	99
Gráfico 80 - Concentração de CO ₂ no segundo dia de medição de inverno da Sala F	99
Gráfico 81 - Concentração de CO no segundo dia de medição de inverno da Sala F	99
Gráfico 82 - Concentração de CO ₂ no terceiro dia de medição de inverno da Sala F	99
Gráfico 83 - Concentração de CO no terceiro dia de medição de inverno da Sala F	99
Gráfico 84 - Concentração de particulado 2,5µm no primeiro dia de medição de inverno da Sala F.....	100
Gráfico 85 - Concentração de particulado 2,5µm no segundo dia de medição de inverno da Sala F.....	100
Gráfico 86 - Concentração de particulado 2,5µm no terceiro dia de medição de inverno da Sala F.....	100
Gráfico 87 - Indicadores IERP e IEF para as medições de inverno da Sala F.....	100
Gráfico 88 - Temperaturas de bulbo seco no primeiro dia de medição de verão na Sala F	101

Gráfico 89 - Temperaturas de bulbo seco no segundo dia de medição de verão na Sala F	101
Gráfico 90 - Temperaturas de bulbo seco no terceiro dia de medição de verão na Sala F	102
Gráfico 91 - Sensação Térmica dos usuários nas medições de verão da Sala F ...	102
Gráfico 92 - Umidades relativas no primeiro dia de medição de verão na Sala F ...	102
Gráfico 93 - Umidades relativas no segundo dia de medição de verão na Sala F ..	102
Gráfico 94 - Umidades relativas no terceiro dia de medição de verão na Sala F	103
Gráfico 95 - Umidades absolutas nas medições de verão na Sala F	103
Gráfico 96 - Velocidades do ar no primeiro dia de medição de verão da Sala F.....	103
Gráfico 97 - Velocidades do ar no segundo dia de medição de verão da Sala F....	103
Gráfico 98 - Velocidades do ar no terceiro dia de medição de verão da Sala F.....	104
Gráfico 99 - Relatos de desconforto por movimentação de ar e parte do corpo onde é sentido nas medições de verão da Sala F	104
Gráfico 100 - Concentrações de CO ₂ no primeiro dia de medição de verão na Sala F	105
Gráfico 101 - Concentrações de CO ₂ no segundo dia de medição de verão na Sala F	105
Gráfico 102 - Concentrações de CO ₂ no terceiro dia de medição de verão na Sala F	105
Gráfico 103 - Percepção dos usuários acerca da qualidade do ar interior, relativamente ao ambiente externo nas medições da Sala F	105
Gráfico 104 - Concentração de particulado 2.5µm no primeiro dia de verão na Sala F	106
Gráfico 105 - Concentração de particulado 2.5µm no segundo dia de verão na Sala F	106
Gráfico 106 - Concentração de particulado 2.5µm no terceiro dia de verão na Sala F	106
Gráfico 107 - Indicador IERP para as medições de inverno da Sala F	106
Gráfico 108 - Temperaturas de bulbo seco no primeiro dia de medição de inverno na Sala J	107
Gráfico 109 - Temperaturas de bulbo seco no segundo dia de medição de inverno na Sala J	107
Gráfico 110 - Temperaturas de bulbo seco no terceiro dia de medição de inverno na Sala J	107
Gráfico 111 - Sensação térmica relatada pelos usuários nas medições de inverno na Sala J	107
Gráfico 112 - Umidades relativas no primeiro dia de medição de inverno na Sala J	108
Gráfico 113 - Umidades relativas no segundo dia de medição de inverno na Sala J	108
Gráfico 114 - Umidades relativas no terceiro dia de medição de inverno na Sala J	108
Gráfico 115 - Umidades absolutas nas medições de inverno na Sala J.....	108
Gráfico 116 - Concentrações de CO ₂ no primeiro dia de medição de inverno na Sala J	109
Gráfico 117 - Concentrações de CO ₂ no segundo dia de medição de inverno na Sala J	109

Gráfico 118 - Concentrações de CO no primeiro dia de medição de inverno na Sala J	110
Gráfico 119 - Indicadores IERP e IEF para as medições de inverno da Sala J	111
Gráfico 120 - Concentração de particulado 2,5µm no primeiro dia de medição de inverno na Sala J	111
Gráfico 121 - Concentração de particulado 2,5µm no segundo dia de medição de inverno na Sala J	111
Gráfico 122 - Concentração de particulado 2,5µm no terceiro dia de medição de inverno na Sala J	111
Gráfico 123 - Temperaturas de bulbo seco no primeiro dia de medição de verão da Sala J	112
Gráfico 124 - Temperaturas de bulbo seco no segundo dia de medição de verão da Sala J	112
Gráfico 125 - Temperaturas de bulbo seco no terceiro dia de medição de verão da Sala J	112
Gráfico 126 - Velocidades do ar no primeiro dia de medição de verão da Sala J...	113
Gráfico 127 - Velocidades do ar no segundo dia de medição de verão da Sala J..	113
Gráfico 128 - Velocidades do ar no terceiro dia de medição de verão da Sala J....	113
Gráfico 129 - Relatos de percepção por movimentação de ar e parte do corpo onde é sentido, nas medições da Sala J	113
Gráfico 130 - Umidades relativas no primeiro dia de medição de verão da Sala J.	114
Gráfico 131 - Umidades relativas no segundo dia de medição de verão da Sala J	114
Gráfico 132 - Umidades relativas no terceiro dia de medição de verão da Sala J..	114
Gráfico 133 - Umidades absolutas nas medições de verão da Sala J.....	114
Gráfico 134 - Concentrações de CO ₂ no primeiro dia de medição de verão da Sala J	115
Gráfico 135 - Concentrações de CO ₂ no segundo dia de medição de verão da Sala J	115
Gráfico 136 - Concentrações de CO ₂ no terceiro dia de medição de verão da Sala J	115
Gráfico 137 - Percepção dos usuários acerca da qualidade do ar interior, relativamente ao ambiente externo nas medições da Sala J.....	115
Gráfico 138 - Concentração de particulado 2,5µm no primeiro dia de medição de verão da Sala J.....	116
Gráfico 139 - Concentração de particulado 2,5µm no segundo dia de medição de verão da Sala J.....	116
Gráfico 140 - Concentração de particulado 2,5µm no terceiro dia de medição de verão da Sala J.....	116
Gráfico 141 - Indicadores IERP e IEF para as medições de verão da Sala F	116
Gráfico 142 - Indicador IEF médio nas salas do Centro Cirúrgico, por estação	119
Gráfico 143 - Utilização do sistema de ar-condicionado (AC) durante as cirurgias, por estação do ano e sala.....	120
Gráfico 144 - Frequência acumulada da concentração de CO ₂ com o sistema de ar-condicionado (AC) ligado ou desligado.....	120
Gráfico 145 - Frequência acumulada de velocidade do ar nas salas A e F.....	122
Gráfico 146 - Frequência acumulada de velocidade do ar nas salas modernizada e não modernizadas	123

Gráfico 147 - Análise de sensibilidade assimetria da malha de elementos finitos...	133
Gráfico 148 - Análise de sensibilidade da qualidade ortogonal da malha de elementos finitos	133
Gráfico 149 - Ganho de qualidade perante crescimento do custo computacional pelo refinamento da malha de elementos finitos	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeitos reportados por pessoas expostas à diferentes concentrações de formaldeídos	36
Tabela 2 - Variáveis e equipamentos de medição (continua)	51
Tabela 3 - Intervalos de referência para as variáveis analisadas	55
Tabela 4 - Classes de atividade metabólica (continua)	58
Tabela 5 - Classes de vestimentas típicas para o Centro Obstétrico	58
Tabela 6 - Classificação dos usuários por atividade, vestimenta e localização na sala	58
Tabela 7 - Grupos de usuários nas salas de cirurgia.....	82
Tabela 8 - Comparação entre os grupos de ocupantes nos diferentes tipos de sala	123
Tabela 9 - Análise de sensibilidade do modelo de turbulência - Indicador CV(RMSE)	135
Tabela 10 - Análise de sensibilidade do modelo de turbulência - Indicador MBE... ..	135
Tabela 11 - Critérios para seleção dos períodos equivalentes	139
Tabela 12 - Indicadores CV(RMSE) e MBE, na comparação horária	139
Tabela 13 - Indicadores CV(RMSE) e MBE, com uma comparação por minuto.....	140
Tabela 14 - Variações da Proposta de Intervenção 1	143
Tabela 15 - Variações da Proposta de Intervenção 2	147
Tabela 16 - Caracterização das variações da terceira proposta de intervenção	150
Tabela 17 - Variações da proposta de intervenção 4	155
Tabela 18 - Variações da proposta de intervenção 5	157
Tabela 19 - Variações da proposta de intervenção 7	160

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	26
1.1.	O Hospital Universitário da Universidade de São Paulo.....	27
1.2.	Desenvolvimento da Dissertação	28
1.3.	Revisão da Literatura.....	28
1.3.1.	Qualidade do Ar Interior e Conforto Térmico em Ambientes Hospitalares.....	29
1.3.2.	Sistemas de distribuição de ar em salas de cirurgia.....	30
1.3.3.	Transmissão de doenças pelo ar e a Pandemia da COVID-19.....	31
1.4.	Justificativa	32
2.	OBJETIVOS	33
2.1.	Objetivo Geral.....	33
2.2.	Objetivos Específicos	33
3.	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	34
3.1.	Conforto Térmico	34
3.2.	Qualidade do Ar Interior.....	35
3.3.	Ambientes Hospitalares.....	39
3.3.1.	Infecções Hospitalares.....	39
3.3.2.	Sistemas de Climatização e Tratamento de Ar em Ambientes Hospitalares.....	40
3.4.	Avaliação Pós-Ocupação	41
3.5.	Simulação Computacional Fluidodinâmica (CFD)	41
3.5.1.	Equações Governantes.....	42
3.5.2.	Modelos de Turbulência.....	43
3.6.	Tratamentos Estatísticos	44
4.	ESTRUTURA DA PESQUISA.....	46
5.	PESQUISA EXPERIMENTAL	48
5.1.	Método de Trabalho.....	48
5.1.1.	Planejamento da Pesquisa	48
5.1.2.	Preparação das Medições.....	52
5.1.3.	Execução das Medições	52
5.1.4.	Tabulação e Tratamento dos Dados	53
5.1.5.	Análises de Resultados e Requisitos Normativos.....	54

5.2.	Centro Obstétrico	56
5.2.1.	Caracterização da Ocupação	57
5.2.2.	Resultados.....	59
5.2.3.	Proposições para Melhorias	64
5.3.	Radiologia	65
5.3.1.	Resultados.....	66
5.3.2.	Proposições para Melhorias	70
5.4.	Hospital Dia.....	70
5.4.1.	Resultados.....	71
5.4.2.	Proposições para Melhorias	73
5.5.	Ambulatório	74
5.5.1.	Resultados.....	75
5.5.2.	Proposições para Melhorias	77
5.6.	Centro Cirúrgico	78
5.6.1.	Ambientes de Estudo	79
5.6.2.	Caracterização da Ocupação	81
5.6.3.	Resultados.....	82
5.6.3.1.	Sala A – Inverno.....	83
5.6.3.2.	Sala A – Verão	90
5.6.3.3.	Sala F – Inverno.....	96
5.6.3.4.	Sala F – Verão	101
5.6.3.5.	Sala J – Inverno	106
5.6.3.6.	Sala J – Verão.....	111
5.6.4.	Discussões e Propostas de Intervenção	117
5.6.4.1.	Ponto de Captação de Ar Externo.....	117
5.6.4.2.	Conservação e Manutenção	118
5.6.4.3.	Utilização, Operação e Controle do Sistema de Ar-Condicionado.....	119
5.6.4.4.	Layout das Salas de Cirurgia Não Modernizadas	120
5.6.4.5.	Efeitos da Modernização do Sistema de Distribuição de Ar.....	122
6.	SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD).....	124
6.1.	Método de Trabalho	124
6.1.1.	Definição das Propostas de Intervenção	124
6.1.2.	Modelagem	130
6.1.2.1.	Regime Temporal.....	130
6.1.2.2.	Modelagem Geométrica	131

6.1.2.3. Malha de Elementos Finitos	132
6.1.2.4. Modelo de Turbulência	134
6.1.2.5. Condições de Contorno	135
6.1.2.6. Análises das Simulações e das Propostas de Intervenção	137
6.2. Validação do Modelo	138
6.3. Resultados.....	140
6.3.1. Sala Original.....	140
6.3.2. Proposta de Intervenção 1	142
6.3.3. Proposta de Intervenção 2.....	146
6.3.4. Proposta de Intervenção 3.....	150
6.3.5. Proposta de Intervenção 4.....	154
6.3.6. Proposta de Intervenção 5.....	156
6.3.7. Proposta de Intervenção 6.....	160
6.4. Discussões e Propostas de Intervenção Finais	162
6.4.1. Conforto Térmico dos Usuários dos Grupos I e II	162
6.4.2. Redução do Material Particulado em Suspensão	163
6.5. Propostas de Intervenção Finais	165
7. CONCLUSÕES	166
8. TRABALHOS FUTUROS.....	169
8.1. Soluções passivas para o Ambulatório.....	169
8.2. Interligação entre Hospital Dia e Centro Cirúrgico.....	169
8.3. Investigações sobre o ponto de captação de ar	170
8.4. Simulações transientes e refino da modelagem da ocupação.....	171
8.5. Simulações paramétricas e análises quantitativas	171
8.6. Expansão da análise para novos setores.....	171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	172
APÊNDICE A – Questionário Aplicado	179

1. INTRODUÇÃO

Os hospitais são instituições de extrema importância para a sociedade, uma vez que são fundamentais para a manutenção da saúde e preservação da vida das populações por eles assistidas. Para tanto é essencial que estejam em condições adequadas para o pleno exercício de seu papel, das quais se destacam neste trabalho a qualidade do ar interior e o conforto térmico.

Em um ambiente hospitalar há muitas pessoas em situações de baixa imunidade expostas a vários agentes infecciosos, fato que torna o risco de infecção muito alto. Portanto, é crucial se atentar à qualidade do ar interior, já que a atmosfera local, em especial o particulado em suspensão, é um dos principais veículos de transmissão destes patógenos. O sistema de ar-condicionado tem influência direta na quantidade de particulados, logo na qualidade do ar do local (PEREIRA, 2008) e, portanto, na prevenção de infecções hospitalares. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS – WHO) (2002), dentre os principais fatores que influenciam no risco de infecções hospitalares constam: qualidade do ar fornecido ao ambiente; taxa de renovação de ar; número de ocupantes; fluxo de pessoas e qualidade da limpeza. A organização contabiliza que 2,7% dos casos de doenças no mundo têm como causa a poluição de ambientes internos. (WHO, 2008¹ apud QUADROS et. al., 2009).

A utilização da climatização artificial de ambientes vem crescendo continua e intensamente nas últimas décadas e, por consequência, a atenção com os parâmetros de conforto térmico e qualidade do ar aumentou na mesma intensidade, principalmente em hospitais, onde podem contribuir na prevenção de infecções. Vários trabalhos brasileiros (SANTANA, 2013; PEREIRA et. al., 2010; FILHO et. al., 2000; AFONSO et. al., 2006; MOBIN, SALMITO, 2006; PEREIRA, 2008) reforçam a influência direta dos sistemas de climatização hospitalar na qualidade do ar e na incidência de infecções nosocomiais. Em 2005, Nunes cita a necessidade de se criar uma legislação brasileira específica para sistemas de climatização hospitalar. No Brasil, os sistemas de ar-condicionado em salas de cirurgia, em geral, são

¹ WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Programmes and projects: indoor air pollution.** 2008. Disponível em: <http://www.who.int/indoorair/en>. Acessado em 17 jan. 2008.

ineficientes na remoção de particulado (PEREIRA, 2008; VON DOLINGER, 2008² apud VILAIN, 2016), o que mostra claramente a necessidade de estudos sobre qualidade do ar em hospitais e centros de cirurgia.

A pandemia da COVID-19 evidenciou a importância do controle da qualidade do ar interior, especialmente em ambientes assistenciais à saúde, uma vez que o atendimento presencial é inevitável e a segurança de pacientes e profissionais, fundamental.

1.1. O Hospital Universitário da Universidade de São Paulo

O Hospital Universitário da Universidade de São Paulo (HU), hospital objeto desta pesquisa, foi criado em 1969 e iniciou suas atividades em 1981, com o propósito de ser um hospital escola que atende à comunidade USP e aos moradores das regiões próximas. Ele dá suporte direto às faculdades da área de saúde e indireto a toda USP, recebendo cerca de 2500 alunos todos os anos (HOSPITAL UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2022³). O centro médico possui 258 leitos, centro cirúrgico com 10 salas, centro obstétrico com 4 salas, UTI adulto e pediátrica e um ambulatório com 57 consultórios, o que o torna essencial para o atendimento das comunidades no seu entorno.

Na parte de climatização artificial, o hospital tem uma infraestrutura muito restrita. Grande parte dele não tem nenhum tipo de ar-condicionado, sendo que os sistemas existentes consistem apenas em aparelhos de janela e *Splits*, à exceção dos Centros Cirúrgico e Obstétrico e da Radiologia. Pode-se observar em visitas do autor ao hospital que os sistemas instalados sofrem com falta de manutenção preventiva e, muitas vezes, falta de manutenção corretiva. Ainda durante as visitas iniciais, foi frequente o relato, por parte dos funcionários do Hospital, da sensação de calor intenso durante grande parte do ano.

O Hospital vem passando ao longo dos últimos anos por uma crise financeira que reduziu severamente sua capacidade de investimento e até operacional. Devido à falta de recursos, o atendimento de algumas especialidades, como pediatria,

² VON DOLINGER, E. J. O. **Infecções ortopédicas em pacientes submetidos a artoplastias total de quadril e joelho, hemiartoplastias e osteossínteses: incidência, fatores de risco e influência do ar do centro cirúrgico de um hospital universitário brasileiro**. 2008. 55p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2008.

³ Data referente à consulta da informação no site do Hospital.

oftalmologia e obstetrícia, foram reduzidos ao longo da última década (VEJA, 2016). Desta forma, é importante que o Hospital disponha de soluções simples, porém eficientes em manter as condições de qualidade do ar e conforto térmico adequadas.

1.2. Desenvolvimento da Dissertação

A apresentação desta dissertação segue a ordem de realização da pesquisa. Inicialmente, no presente capítulo, faz-se uma revisão da bibliografia específica do tema; em seguida, no capítulo 2, é apresentado o propósito pelo qual se determinou o objetivo geral da pesquisa, bem como o próprio objetivo geral e os objetivos específicos; no capítulo 3 é desenvolvida uma fundamentação teórica a respeito dos principais assuntos da pesquisa; a seguir, no capítulo 4, é exposta a estruturação e a metodologia geral da pesquisa.

O capítulo 5 é dedicado à pesquisa experimental como um todo. Nele apresenta-se a metodologia da parte experimental (Cap. 5.1) e seus resultados e discussões, separados de acordo com o setor (Caps. 5.2 a 5.6).

O capítulo 6 dedica-se exclusivamente à etapa de simulação computacional, apresentando as propostas de intervenção simuladas (Cap. 6.1.1); a modelagem (Cap. 6.1.2); a validação do modelo (Cap. 6.2); os resultados de simulação (Cap. 6.3); as discussões sobre estes resultados (Cap. 6.4) e as propostas de intervenção selecionadas (Cap. 6.5).

Os capítulos finais, isto é, capítulos 7 ao 9, contemplam, respectivamente, as principais conclusões da pesquisa, as propostas de trabalhos futuros e a relação do material bibliográfico de referência.

1.3. Revisão da Literatura

Nesta seção faz-se uma revisão dos estudos sobre os principais temas pertinentes à pesquisa. São eles a qualidade do ar interior e o conforto térmico em edifícios assistenciais à saúde e seus sistemas de climatização e ventilação, bem como os sistemas de distribuição de ar em salas de cirurgia. Por fim, dado o momento atual da pandemia da Covid-19, que deu evidência ao tema, muitos estudos foram conduzidos sobre o assunto ao longo dos últimos dois anos;

reservou-se, então, uma seção para abordar as implicações da pandemia nos assuntos destacados.

1.3.1. Qualidade do Ar Interior e Conforto Térmico em Ambientes Hospitalares

O controle da qualidade do ar interior e do conforto térmico em ambientes hospitalares é um tema recorrente na literatura, o que reafirma a sua relevância. São observados estudos realizados em todo o mundo na busca do melhor entendimento das condições ambientais nessas edificações e seu aprimoramento. Na Grécia, Balaras (*et. al.*, 2007) avaliaram salas cirúrgicas de dez hospitais, Baurès (*et. al.*, 2018) analisaram a presença de poluentes internos em dois hospitais franceses. No Irã, Kenarkoohi (*et. al.*, 2020) verificaram a presença do coronavírus no ar de uma unidade de tratamento intensivo e VEYSI (*et. al.*, 2019) relacionaram sintomas respiratórios apresentados pelo corpo de funcionários de um hospital com as condições de qualidade do ar interior. Em Portugal, Fonseca (*et. al.*, 2018) avaliaram a qualidade do ar em dois hospitais e uma unidade primária de saúde. No Brasil o tema também foi abordado por diversas pesquisas como Silva (2016), Santana (2013), Felix (2008), Pereira (2008) e Mobin e Salmito (2006).

As principais referências normativas e regulatórias brasileiras acerca dos requisitos de conforto térmico e qualidade do ar interior em ambientes hospitalares são a NBR7256 (ABNT, 2021), que dispõe sobre tratamento de ar em edificações assistenciais à saúde e a RDC50 (ANVISA, 2002), que estabelece requisitos para projetos deste tipo de edificação. Além das específicas para ambientes de cuidado à saúde, tem-se para edificações em geral a NBR16401 (ABNT, 2008), que versa sobre requisitos para sistemas de ar-condicionado e a resolução RE09 (ANVISA, 2003), sobre requisitos de qualidade do ar interior.

Para garantir o atendimento aos requisitos para ambientes hospitalares a RDC50 (ANVISA, 2002) recomenda fortemente a utilização de climatização artificial nestes locais; porém é comum haver hospitais com alguns setores que não são atendidos por estes sistemas, contando apenas com a ventilação natural, como é o caso do Ambulatório do HU, um dos setores contemplados nesta pesquisa. Neste sentido, há estudos focados na análise de desempenho da ventilação natural em ambientes assistenciais à saúde de menor criticidade em relação ao risco de

infecção hospitalar, nos quais não há pacientes com feridas expostas. Quian (*et. al.*, 2010), em estudo de caso em enfermaria de um hospital em Hong Kong verificou que a ventilação natural pode ser suficiente para prevenção de infecção entre pacientes e que pode ser complementada com exaustão mecânica em caso de necessidade de se isolar pacientes, como nas situações da epidemia da SARS, em 2003 ou da pandemia da COVID-19. Adamu *et. al.* (2012) e Quadros e Misgier (2020) estudaram diferentes estratégias para que o uso da ventilação natural em ambientes hospitalares, focando em enfermarias, propiciasse renovação de ar adequada. Escombe *et. al.* (2019), simulando diversas estratégias de ventilação natural, obtiveram reduções entre 51% e 82% no risco de transmissão de tuberculose em ambulatórios.

1.3.2. Sistemas de distribuição de ar em salas de cirurgia

Nas salas de cirurgia uma das principais preocupações são as infecções causadas no campo cirúrgico (surgical site infections – SSI), as quais correspondem a 36% das infecções nosocomiais em hospitais modernos (HORAN *et. al.*, 1992⁴ apud CAO *et. al.*, 2018; KLEVENS *et. al.*, 2002⁵ apud CAO *et. al.*, 2018; POGGIO, 2013⁶ apud CAO *et. al.*, 2018). Assim, diversas estratégias vêm sendo estudadas para minimizar este problema.

Woloszyn (*et. al.*, 2004) analisou, a partir de medições em campo e simulações CFD, os efeitos da distribuição de ar diagonal em salas cirúrgicas, isto é, com insuflamento em uma parede, próximo ao teto, e retorno na oposta, próximo ao piso. Seus resultados mostraram que a eficiência da solução é altamente dependente do layout e obstáculos na sala.

Fan (*et. al.*, 2021), Andersson (*et. al.*, 2014) e Alsved (*et. al.*, 2018) observaram que os sistemas de distribuição de ar de “fluxo laminar” nas salas de cirurgias oferecem maior segurança contra as SSIs em comparação com os de fluxo turbulento. Whyte e Mackintosh (2021) criticam o uso da terminologia “sistemas de

⁴ Horan C, Gaynes P, Martone J, Jarvis R, Emori G. **CDC definitions of nosocomial surgical site infections, 1992: a modification of CDC definitions of surgical wound infections.** Infect Control Hosp Epidemiol 1992;13:606-8.

⁵ Klevens M, Edwards R, Richards L, Horan C, Gaynes P, Pollock A, et al. **Estimating health care-associated infections and deaths in U.S. hospitals, 2002.** Public Health Rep 2007;122:160-6.

⁶ Poggio JL. **Perioperative strategies to prevent surgical-site infection.** Clin Colon Rectal Surg 2013;26:168-73.

fluxo laminar”, uma vez que o insuflamento ocorre a velocidades muito elevadas para que o escoamento possa ser considerado laminar, preferindo o termo “sistemas de fluxo unidirecional”. Cao (*et. al.*, 2018) e Andersson (*et. al.*, 2014), porém, verificaram que mesmo nas salas com sistema de fluxo unidirecional, há forte influência da equipe cirúrgica nas SSIs.

Por fim, Asveld (*et. al.*, 2018) estudou um sistema de distribuição por controle de temperatura. Seus resultados mostraram uma redução no consumo energético e uma melhora na sensação de conforto térmico dos ocupantes das áreas periféricas da sala em relação ao sistema de fluxo unidirecional, sem prejuízos ao controle da dispersão de material particulado pelo ambiente.

1.3.3. Transmissão de doenças pelo ar e a Pandemia da COVID-19

Com o surgimento e avanço da pandemia da COVID-19 no início de 2020, o controle dos parâmetros ambientais, especialmente relacionados à qualidade do ar interior, ganhou ainda mais relevância na literatura. Diversos estudos foram conduzidos no intuito de elucidar os modos de transmissão e as condições para a viabilidade do vírus no ambiente.

Morawska e Cao (2020) e Noorimotlagh (*et. al.*, 2021) sustentaram a hipótese de que a doença seria transmitida pelo ar e não apenas por gotículas de saliva, de forma que o avanço da contaminação não ocorreria somente através do distanciamento social, mas sim pela adequada renovação de ar nos ambientes. Feng (*et. al.*, 2020) e Sun e Zhai (2020), por meio de simulações CFD, obtiveram que o distanciamento social proposto, de 1,83m seria insuficiente considerando movimentações de ar.

Lowen (*et. al.*, 2007) e Tang (2009), mostraram a influência de parâmetros ambientais, como umidade relativa e temperatura do ar, na transmissão do vírus Influenza; Feng (*et. al.*, 2020) e Ahlawat (*et. al.*, 2020), para o coronavírus-2; Chan (*et. al.*, 2011) para a viabilidade do coronavírus relacionado à epidemia de 2003. Em todos os casos, umidades relativas e temperaturas mais elevadas favoreceram o controle dos respectivos vírus.

1.4. Justificativa

Com base no exposto, tem-se que a garantia das condições adequadas de qualidade do ar interior e conforto térmico em edifícios hospitalares é importante para que estas instituições possam cumprir seu papel na sociedade. Adicionalmente, tem-se que o HU é fundamental para o atendimento da população da região, bem como para a formação de profissionais de saúde. Porém, pela crise financeira enfrentada na última década, o Hospital necessita de soluções simples para a melhoria e adequação de sua infraestrutura. Para tanto, e no contexto de um programa de mestrado profissional, acredita-se que o desenvolvimento de uma pesquisa no HU baseada tanto no método de avaliação pós ocupacional, ou seja, que se analise tais condições em um hospital em funcionamento, busque identificar as deficiências das soluções ali adotadas, bem como suas causas e origens e proponha intervenções para melhoria destas condições, quanto em simulações computacionais fluidodinâmicas para estudo destas soluções, possa contribuir para a melhoria das condições ali encontradas e permitir a extrapolação para casos similares.

2. OBJETIVOS

O propósito deste trabalho é trazer soluções de viável aplicação, tanto no aspecto técnico quanto no operacional e financeiro, para garantir as condições adequadas de qualidade do ar interior e conforto térmico no Hospital Universitário da Universidade de São Paulo. Para tanto, foram perseguidos os seguintes objetivos:

2.1. Objetivo Geral

Analisar as condições de qualidade do ar interior e de conforto térmico em setores do segundo pavimento do HU e propor intervenções simples, visando a melhoria dessas condições.

2.2. Objetivos Específicos

- Fazer um levantamento dos tipos de sistemas de ar-condicionado existentes em todo o HU e das suas condições de funcionamento para elaborar um diagnóstico da atual situação da infraestrutura destes sistemas nos setores de estudo;
- Determinar as condições de qualidade do ar interior e de conforto térmico por meio de medições em campo de suas respectivas variáveis, contemplando uma amostra representativa dos setores do segundo pavimento do HU, relativamente às suas estratégias de ventilação e climatização e seu tipo de ocupação;
- Quantificar os níveis de satisfação dos usuários do Hospital em relação à qualidade do ar interior e ao conforto térmico por meio de questionários;
- Propor intervenções baseadas nos resultados experimentais e de questionários para melhoria das condições de qualidade do ar interior e conforto térmico dessas dependências do Hospital;
- Construir e calibrar um modelo para simulação computacional fluidodinâmica (CFD) de uma das salas de cirurgia;
- Elaborar e estudar por meio análises qualitativas dos resultados de simulação CFD, um conjunto de propostas de intervenção incrementais para melhoria das condições da sala cirúrgica modelada;

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para se fazer as análises almejadas neste trabalho é necessário se fazer uma abordagem às condições e requisitos de conforto térmico e qualidade do ar e como esses aspectos se relacionam em ambientes hospitalares, tópicos abordados no início deste capítulo. Além disso, fazer uma revisão sobre o método de avaliação pós-ocupação e a fundamentação teórica da simulação computacional fluidodinâmica. Por fim abordar os tratamentos estatísticos de particular interesse e aplicação neste projeto.

3.1. Conforto Térmico

As Normas atuais sobre conforto térmico, definido como “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” (ASHRAE 55, 2013) foram baseadas na pesquisa realizada por Fanger (1972), a qual elenca uma série de variáveis influentes, que podem ser divididas em duas categorias: (1) variáveis pessoais, sendo elas o metabolismo e a resistência térmica da roupa e (2) variáveis ambientais, que são a temperatura do ar (temperatura de bulbo seco), a temperatura radiante média, a pressão de vapor de água no local e a velocidade relativa do ar.

Para que haja a sensação de conforto térmico é preciso que o indivíduo analisado não sinta “frio” ou “calor”. Para adequado funcionamento dos órgãos vitais, a temperatura corporal deve ser mantida constante em aproximadamente 37°C. O controle dessa temperatura é feito pelo sistema nervoso central, que através de impulsos nervosos emitidos pelos receptores térmicos de temperatura, localizados em grandes extensões da pele e no próprio hipotálamo, induz ou inibe o processo metabólico, o qual, através de reações de oxidação, produz energia térmica. As sensações de “frio” e “calor” são provenientes de intensas variações na temperatura apurada pelos receptores térmicos espalhados pelo corpo, $-0,004^{\circ}\text{C/s}$ e $0,001^{\circ}\text{C/s}$, respectivamente (OLESEN, 1982⁷ apud LEITE, 2003). Desta forma, para que se atinja o conforto térmico é necessário reduzir a intensidade das trocas de calor do corpo com o ambiente.

⁷ OLESEN, B. W. **Thermal Comfort**. Bruel & Kjaer Technical Review, nº2. 1982.

Apesar de a neutralidade térmica ser essencial para o conforto, ela não é condição suficiente, sendo necessário também garantir que não haja desconforto localizado. Este pode ser definido como a insatisfação por aquecimento ou resfriamento indesejado em uma determinada parte do corpo, podendo ser causado por corrente de ar, diferença vertical de temperatura, piso quente ou frio ou, ainda, por assimetria na temperatura radiante (ISO 7730, 2005). Estudos, como Barna e Bánhidi (2012), analisam os efeitos combinados de dois fatores de desconforto localizado.

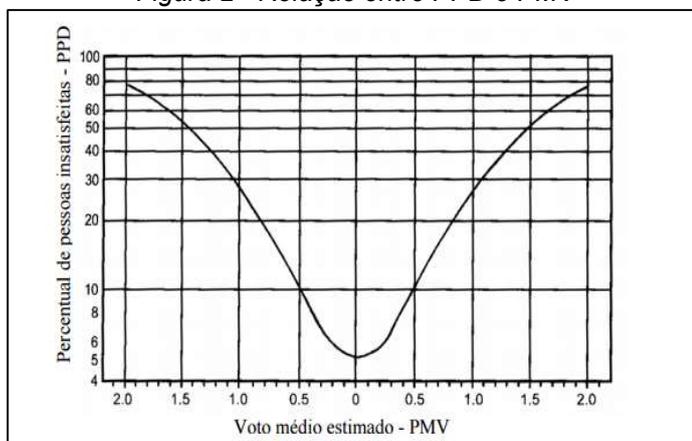
Fanger (1972) descreveu um índice que prevê o voto da maioria dos ocupantes de um ambiente térmico, o PMV (*Predicted Mean Vote* – Previsão de Voto Médio). Para classificar a sensação de conforto térmico, a ASHRAE 55 (2013) utiliza uma escala psicofísica de sete pontos (Figura 1). A partir do PMV, definiu-se o PPD (*Predicted percentage dissatisfied* – Previsão da Porcentagem de Insatisfeitos), que estima a porcentagem de ocupantes insatisfeitos com o conforto térmico em um ambiente. A relação entre o PPD e o PMV é descrita pelo gráfico a seguir (Figura 2).

Figura 1 - Escala psicofísica de sensação térmica

Predicted Mean Vote (PMV)	
-3	Muito Frio
-2	Frio
-1	Levemente Frio
0	Neutro
1	Levemente Quente
2	Quente
3	Muito Quente

Fonte: ASHRAE 55 (2013).
Adaptado pelo Autor.

Figura 2 - Relação entre PPD e PMV



Fonte: ASHRAE 55 (2013). Traduzido pelo Autor.

3.2. Qualidade do Ar Interior

A análise da Qualidade do Ar Interior parte da avaliação das concentrações de poluentes no ambiente interno, bem como da sua comparação com o externo. Para o seu controle deve-se atentar principalmente aos seguintes parâmetros: a renovação de ar, os fluxos de ar, a fonte do ar externo, a utilização do ambiente e aos seus tipos de contaminantes. Alguns dos principais poluentes em ambientes

internos são o formaldeído, os particulados, os produtos de combustão e os compostos orgânicos voláteis (COV), descritos a seguir.

O Formaldeído é um composto químico orgânico da família dos aldeídos (HCHO) muito reativo e solúvel em água, de forma a causar irritação em partes úmidas do corpo (MECKLER, 1991). Uma de suas principais fontes é a UFFI (*urea-formaldehyde-foam-insulation* – espuma de isolamento de ureia-formaldeído), muito utilizada em divisórias móveis ou paredes de drywall. Vários estudos realizados para a Environmental Protection Agency (EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EUA)) indicam que pode haver um aumento significativo no risco de câncer no trato respiratório em ambientes com alta concentração de formaldeído, que foi classificado pela EPA como “provavelmente cancerígeno”. Além disso, pode causar quebras de cadeias de DNA, mutações e alteração cromossômica. (MECKLER, 1991). A tabela 1 mostra a manifestação de sintomas em pessoas expostas a faixas de concentração de formaldeídos.

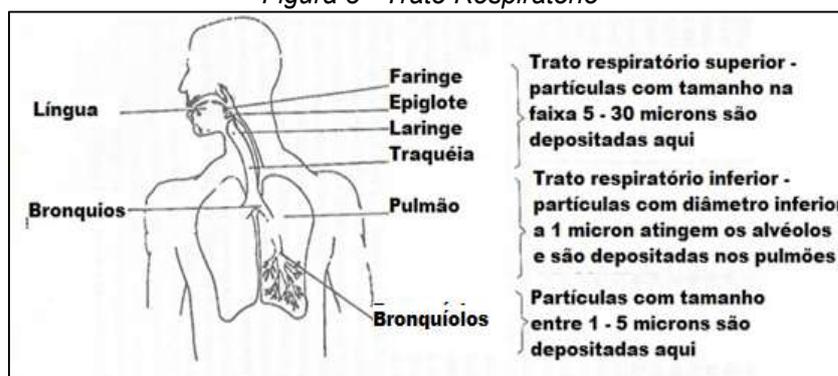
Tabela 1 - Efeitos reportados por pessoas expostas à diferentes concentrações de formaldeídos

Concentração (ppm)	Efeito Reportado	Concentração (ppm)	Efeito Reportado
0,0 a 0,05	Nenhum	5,0 a 30,0	Efeitos pulmonares
0,05 a 1,00	Odor pouco intenso	50,0 a 100	Edema pulmonar
0,01 a 2,00	Irritação nos olhos	Acima de 100	Morte
0,1 a 25,0	Irritação das vias aéreas superiores		

Fonte: MECKLER, 1991. Traduzido pelo autor

Os materiais particulados, se pequenos o suficiente, podem adentrar o sistema respiratório até alcançar os pulmões, podendo causar sérios danos à saúde. Este perigo depende do tamanho e da densidade da partícula, ou seja, o quanto ela penetra no sistema respiratório, e de sua capacidade infecciosa. Os principais particulados são vírus, bactérias, agentes alergênicos, fibras de vidro e lã de rocha (MECKLER, 1991), com destaque, no caso, aos três primeiros. Na figura 3 são relacionados o tamanho da partícula e a profundidade de sua penetração no trato respiratório.

Figura 3 - Trato Respiratório



Fonte: MECKLER, 1991. Traduzido pelo autor

Birgand (*et. al.*, 2015), a partir da observação de 60 procedimentos cirúrgicos em dez estabelecimentos assistenciais à saúde, encontraram forte correlação entre a quantidade de partículas em suspensão na sala de cirurgia e a ocorrências de infecções. Maré e Leite (2013) utilizaram-se do Índice de Efetividade na Remoção de Particulado (IERP) para verificar a eficiência do sistema de ar-condicionado com distribuição pelo piso na remoção de particulado. Este índice consiste na relação entre a concentração de particulados nas imediações do retorno ($PM_{2.5Ret}$) e nas imediações do insuflamento ($PM_{2.5Ins}$), descrita na equação 1. De forma análoga, se tratando de sistemas de renovação total de ar, pode-se obter um Índice de Efetividade da Filtragem (IEF) através da relação entre as concentrações de particulado no ponto de captação de ar externo ($PM_{2.5Ext}$) e no ponto de insuflamento ($PM_{2.5Ins}$), descrita na equação 2. Este indicador permite verificar as condições de conservação do sistema, uma vez que é influenciado tanto pelos filtros, como pela limpeza dos dutos. É desejável que os dois índices apresentem valores superiores a um.

$$IERP = \frac{PM_{2.5Ret}}{PM_{2.5Ins}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$IEF_{PM_{2.5}} = \frac{PM_{2.5Ext}}{PM_{2.5Ins}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Os vírus, as bactérias e os agentes alergênicos podem ser transmitidos ao ocupante de um ambiente por três formas: via aérea, por um intermediário ou por transmissão direta, destacando-se, para o estudo da qualidade do ar interior, a primeira. Este tipo de transmissão depende, principalmente da quantidade de

infectados no ambiente, do tempo de exposição do usuário ao ambiente com o agente infeccioso, do tempo de resistência do agente infeccioso no ar, da taxa de umidade e a taxa de ventilação, e renovação de ar (MECKLER, 1991).

A combustão emite como produtos alguns gases, que em ambientes internos podem chegar a ter altas concentrações, sendo prejudiciais à saúde. Estes são o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂), o dióxido de nitrogênio (NO₂) e o dióxido de enxofre (SO₂). (TRAVAIL ET AFFAIRES SOCIALES, 1996)

O monóxido de carbono é produto da combustão incompleta de um combustível carbônico. O principal risco do CO é a sua reatividade com a hemoglobina (Hb) do sangue, formando COHb, reação que faz com que as moléculas de hemoglobina que se uniram ao CO não consigam carregar O₂, reduzindo a capacidade respiratória do indivíduo, afetando, principalmente, as partes do corpo com alta demanda por oxigênio, como o cérebro e o coração, dois órgãos vitais. A aspiração de ar rico em CO pode causar desde simples dores de cabeça até a morte. Segundo Meckler, (1991), a concentração de CO no sangue depende diretamente desta no ar inalado.

Embora o dióxido de carbono seja considerado um gás não tóxico, ele é muito interessante para a análise da qualidade do ar, já que a sua concentração serve de indicativo para a de outros gases no mesmo ambiente e para a suficiência da ventilação e renovação de ar. São admitidos 1000ppm de CO₂ em um ambiente interno (ANVISA, 2003).

Muito comum em cidades poluídas como São Paulo, o dióxido de enxofre, que é altamente solúvel em água, é facilmente absorvido em superfícies mucosas do corpo, tais quais a boca e o trato respiratório. O SO₂ dissolvido produz os ácidos sulfuroso e sulfúrico. Apenas uma taxa entre 1% e 5% do SO₂ inalado atinge as partes inferiores do trato respiratório, em pessoas saudáveis e em repouso. Porém, em casos de infecções respiratórias ou durante práticas de exercício físico, quantidades muito superiores podem alcançá-la. (MECKLER, 1991).

Por último, os compostos orgânicos voláteis (COV) são substâncias que evaporam à temperatura ambiente e, em locais fechados, podem atingir altas concentrações. A exposição a alguns COVs comuns em ambientes internos pode aumentar o risco de câncer em até 3% (MECKLER, 1991).

3.3. Ambientes Hospitalares

Os hospitais são edifícios complexos, que atendem a diversos pacientes e áreas da saúde. Há ali setores com características de ocupação e requisitos de desempenho muito distintos. Enquanto em salas de cirurgia a principal preocupação é com a assepsia e segurança do paciente, nos laboratórios de análises clínicas o foco está no material coletado. Nas salas da Radiologia, os requisitos ambientais dos equipamentos são preponderantes, já nas enfermarias e ambulatórios o principal ponto de atenção é a prevenção da transmissão de doenças entre os pacientes e equipe. Há também áreas de escritórios administrativos, cozinhas e restaurantes, almoxarifado, salas de aula, auditórios e áreas de repouso, dentre outros.

A poluição em um ambiente hospitalar é principalmente composta por poluentes de origem biológica, química e particulados. Os contaminantes biológicos podem ser bactérias, vírus e fungos. Dentre os químicos há CO₂, esterilizantes e gases anestésicos. Os contaminantes particulados são fios de cabelo, escamações da pele, entre outros (SANTANA, 2013), como o látex proveniente das luvas.

3.3.1. Infecções Hospitalares

Uma das principais preocupações do setor atualmente são as infecções hospitalares. A World Health Organization (WHO, 2002) define infecção hospitalar como aquela adquirida no hospital pelo paciente que foi admitido por outro motivo que não a infecção, inclusive aquelas que apareceram após a alta médica. Também são consideradas as infecções ocupacionais entre os profissionais da instituição (SANTANA, 2013).

Os microrganismos, agentes patológicos, não se deslocam sozinhos pelo ar, são transportados através do material particulado, que circula na atmosfera local, ou sobre objetos da sala. São carregados por partículas em suspensão e podem se depositar sobre as feridas do paciente, instrumentos cirúrgicos, ou outras superfícies que podem entrar em contato com a abertura no paciente. Sua inalação também pode causar ou agravar doenças. (FELIX, 2008)

3.3.2. Sistemas de Climatização e Tratamento de Ar em Ambientes Hospitalares

De acordo com a ASHRAE (2011), o sistema de ar condicionado instalado em um edifício de saúde difere-se de um sistema comum por basicamente quatro fatores: necessidade de se restringir os fluxos de ar entre diferentes departamentos e internamente a eles; exigências específicas sobre filtragem e ventilação, para atenuar ou eliminar a presença de contaminantes; necessidade de diferentes temperaturas e taxas de umidade, dependendo da área analisada; necessidade de um controle mais refinado das condições ambientais.

A maior parte dos agentes patológicos presentes em um hospital é proveniente dele próprio, por meio de pacientes infectados. Assim, a renovação de ar, caso feita com os cuidados necessários, tende a reduzir a concentração destes agentes no ambiente. Para garantir a eficácia da renovação de ar, deve-se atentar para: fonte de ar externo e seu entorno, qualidade e manutenção do sistema de admissão de ar e exaustão do ar interno.

As movimentações de ar em um ambiente hospitalar podem levar agentes patológicos de uma área para outra, por isso merecem um cuidado especial. É difícil controlar o fluxo de ar entre ambientes do hospital devido, entre outros fatores, à movimentação intensa de pessoas e diferenças de temperatura. A movimentação de ar entre pavimentos se dá, principalmente, por torres de escada, poços de elevador e poços técnicos, muito comuns nestas edificações. Os sistemas de ventilação do hospital devem sempre manter o fluxo de ar dos ambientes mais limpos para os mais sujos. A ASHRAE (2011) define que em locais críticos deve-se utilizar sistemas de volume constante, garantindo a manutenção da pressão e circulação de ar adequada.

Embora seja de difícil controle, é possível reduzir a movimentação de ar pelo hospital criando pressões diferenciais e antecâmaras em ambientes de maior risco ou de fluxo de ar mais intenso. Salas cirúrgicas, por exemplo, devem ter uma pressão diferencial positiva para evitar a entrada de contaminantes. Recomenda-se a utilização de filtros HEPA (*High efficiency Particulate Air*), capazes de coletar 99,97% das partículas de até 0,3 μ m (NBR 7256/2021) e ULPA (*Ultra Low*

Penetration Air), com até 99,999% de eficiência na retenção de partículas de até 0,12µm (BICALHO, 2010⁸ apud SANTANA, 2013).

3.4. Avaliação Pós-Ocupação

A avaliação pós-ocupação é uma prática de retroalimentação de projetos, pela qual se identificam ineficiências de soluções adotadas em obras já executadas, cujos efeitos incidem diretamente nos usuários, causando-lhes desconforto. O preceito da avaliação pós-ocupação, proposto por Blachère (1969⁹ apud ONO et. al., 2018) e, atualmente, na ISO 19.208 (ISO, 2016¹⁰ apud ONO et. al., 2018) consiste no fato de que todo ambiente construído deve atender aos requisitos de seus usuários, dentre os quais, aqui se destacam o conforto térmico e a qualidade do ar interior.

É um método qualiquantitativo baseado tanto na coleta de dados que independem da percepção dos usuários, como medições físicas e vistorias técnicas, quanto na aplicação de instrumentos de coleta de dados que permitam aferir a opinião dos usuários, sendo o questionário o mais frequentemente utilizado (ONO et. al., 2018). A sua aplicação em estudos em edifícios assistenciais à saúde é frequente na literatura (CAVALCANTI et. al., 2019; THOMAZONI e ORNSTEIN, 2015; MELLO, 2011; CARVALHO et. al., 2004), trabalhos que reforçam a sua contribuição na retroalimentação de projetos e, assim, no aperfeiçoamento das soluções adotadas especialmente para edifícios complexos, como hospitais.

3.5. Simulação Computacional Fluidodinâmica (CFD)

Dedica-se nessa seção a apresentar a fundamentação teórica para a realização de uma simulação computacional fluidodinâmica. Para tanto serão abordadas a formulação matemática para o escoamento de ar e os modelos de turbulência.

⁸ BICALHO, F. C. **A arquitetura e a engenharia no controle de infecções**. Rio de Janeiro: Rio Books, 2010.

⁹ BLACHÈRE, G. **Savoir Bâtir: habitabilité, durabilité, économie des bâtiments**. Paris, 1969.

¹⁰ ISO – International Organization For Standardization. **ISO19208:2016, Framework for specifying performance in buildings**. ISO, 2016.

3.5.1. Equações Governantes

A modelagem de escoamentos de fluidos segue as leis de conservação de massa (continuidade), de quantidade de movimento (segunda lei de Newton) e de energia (primeira lei da termodinâmica). A análise do escoamento se dá de forma macroscópica, podendo se desprezar as propriedades moleculares, de modo que o fluido pode ser considerado como contínuo (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007). As propriedades de um fluido são funções do espaço e tempo e, desta forma, ele pode ser descrito por sua densidade, pressão, temperatura e vetores de velocidade nas componentes de espaço e tempo, respectivamente, $\rho(x, y, z, t)$, $p(x, y, z, t)$, $T(x, y, z, t)$ e $\vec{u}(x, y, z, t)$. Assim tem-se a equação da continuidade (Eq. 3) para um fluido:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

Assumindo a hipótese de o escoamento de ar ser incompressível, a densidade se torna constante, de forma que se pode simplificar a equação da continuidade para a equação 4, ou em notação compacta, equação 5:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\text{div}(\mathbf{u}) = 0 \quad (\text{Eq. 5})$$

Atuam sobre um fluido as forças de pressão, de viscosidade, gravitacional, centrífuga, eletromagnética e de Coriolis (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007). Considerando que os gases são isotrópicos, obtém-se a equação de conservação da quantidade de movimento (Eq. 6).

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\text{div}(p) + \text{div}(\mu \text{grad}(\mathbf{u})) + S_m \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde S_m é o termo associado às fontes de momento e μ a viscosidade.

Para se atingir a conservação de energia, tem-se que a variação da energia de um fluido é composta pela variação do calor a ele adicionado e o trabalho nele exercido. Assim, pode-se obter a equação que rege a primeira lei da termodinâmica em um escoamento de fluido newtoniano (Eq. 7).

$$\frac{\partial \rho i}{\partial t} + \text{div}(\rho i \mathbf{u}) = -\rho \text{div}(\mathbf{u}) + \text{div}(k \text{ grad } T) + \varphi + S_t \quad (\text{Eq. 7})$$

3.5.2. Modelos de Turbulência

A turbulência se manifesta no escoamento de um fluido através de oscilações aleatórias de sua velocidade (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007). Assim, a velocidade do fluido pode ser descrita pela equação 8, onde o primeiro termo representa a média da velocidade e o segundo as oscilações em torno dela. Por definição, tem-se que a média das oscilações aleatórias em torno da média é nula (Eq. 9).

$$U(t) = \int_0^{\Delta t} u(t) dt + u'(t) \quad (\text{Eq. 8})$$

$$\bar{u}' = \int_0^{\Delta t} u'(t) dt \equiv 0 \quad (\text{Eq. 9})$$

O escoamento de ar em ambientes internos é, em geral, turbulento. A turbulência se dá de forma macroscópica, sendo assim um fenômeno contínuo, portanto pode ser descrita através das equações de conservação acima mencionadas e de Navier-Stokes. Sua solução numérica, porém, é extremamente custosa computacionalmente, o que poderia tornar inconveniente a aplicação de simulações de escoamentos turbulentos na engenharia. Para se contornar este problema, utilizam-se modelos de turbulência (WILCOX, 2001). Existem vários modelos de turbulência e, como todo modelo, cada um traz consigo simplificações que podem ser aplicadas sem importantes prejuízos em determinados casos, mas que podem ocasionar diferenças expressivas para o fenômeno modelado se não

respeitadas suas limitações. Assim, a escolha do modelo de turbulência adequado é fundamental para o sucesso da simulação computacional fluidodinâmica.

Um dos modelos de turbulência mais utilizados é o k- ϵ padrão, o qual foca nos mecanismos que afetam a energia cinética. É um modelo de duas equações de transporte independentes que permitem calcular a velocidade e distância características da turbulência. A sua larga aplicação decorre de um menor custo computacional, robustez e flexibilidade de utilização. O modelo k- ϵ padrão pressupõe um escoamento totalmente turbulento (SOUSA, 2011).

O modelo k- ω foi proposto por Wilcox (1988¹¹, 1993a^{12,b}¹³, 1994¹⁴ apud VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007). Diferentemente do modelo k- ϵ padrão, ele apresenta bons resultados para escoamentos próximos às paredes, com baixo número Reynolds. Menter (1992a¹⁵ apud VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007) propôs um modelo híbrido (SST) entre os modelos k- ϵ padrão e k- ω , que apresenta o comportamento do primeiro nas regiões mais turbulentas, e do segundo nas proximidades das paredes.

Dentre os modelos clássicos de turbulência, o mais complexo é o Reynolds Stress Equation Model (RSM), sendo o de aplicação mais genérica. Por outro lado, para a sua utilização é necessária a solução de sete equações, de modo a aumentar significativamente o custo computacional da simulação (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007).

3.6. Tratamentos Estatísticos

Um dos principais tratamentos de dados para pesquisas experimentais realizadas *in loco*, as quais implicam em baixo controle das condições em que são realizadas, é a eliminação de dados suspeitos e atenuação de ruídos da amostra. Existem diversas técnicas para a realização deste tratamento, dentre as quais foram

¹¹ Wilcox, D. C. (1988). **Reassessment of the Scale-determining Equation for Advanced Turbulence Models**, AIAA J., Vol. 26, No. 11, pp. 1299–1310.

¹² Wilcox, D. C. (1993a). **Comparison of Two-equation Turbulence Models for Boundary Layers with Pressure Gradients**, AIAA J., Vol. 31, No. 8, pp. 1414–1421.

¹³ Wilcox, D. C. (1993b). **Turbulence Modelling for CFD**, DCW Industries Inc., La Canada, CA.

¹⁴ Wilcox, D. C. (1994). **Simulating Transition with a Two-equation Turbulence Model**, AIAA J., Vol. 32, pp. 247–255.

¹⁵ Menter, F. R. (1992a). **Performance of Popular Turbulence Models for Attached and Separated Adverse Pressure Gradient Flow**, AIAA J., Vol. 30, pp. 2066–2072.

utilizadas neste trabalho os critérios de Chauvenet, do intervalo interquartil e a média móvel, apresentados a seguir.

O critério de Chauvenet baseia-se na hipótese de que um dado pode ser considerado suspeito se a sua probabilidade de obtenção for inferior ao inverso do dobro do número de elementos da amostra (TAYLOR, 2012¹⁶ apud CALLERAGO, 2014). Assumindo distribuição normal de probabilidade, têm-se que o critério avalia a distância do dado para a média amostral, medida em desvios padrão.

O critério do intervalo interquartil, por sua vez, é baseado na hipótese de que um valor pode ser considerado suspeito se sua distância à média da amostra for superior a uma vez e meia a distância entre os primeiro e terceiro quartis. Para atenuação dos ruídos da amostra, uma técnica de simples aplicação é a Média Móvel. Ela consiste no cálculo da média para janelas móveis de dados dentro da amostra.

Além do tratamento dos dados experimentais, foram utilizados dois tratamentos estatísticos para validação do modelo de simulação, o Coeficiente de Variação da Raiz do Erro Quadrático Médio (Coefficient of Variation of Root Mean Square Error - CV(RMSE)) e o Erro Médio de Viés (Mean Bias Error – MBE). O CV(RMSE), descrito pela equação 10, é um indicador de precisão frequentemente utilizado na calibração e validação de modelos computacionais. O MBE (Eq. 11) é um indicador de acurácia, portanto sensível ao erro de viés e complementar ao CV(RMSE).

$$CV(RMSE) = \frac{1}{T_{m,av}} \times \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (T_{s,i} - T_{m,i})^2} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{s,i} - T_{m,i})}{T_{m,av} \times n} \quad (\text{Eq. 11})$$

Nas quais:

$T_{m,av}$ é o valor médio de medição; $T_{m,i}$ é o valor de medição na observação i ;

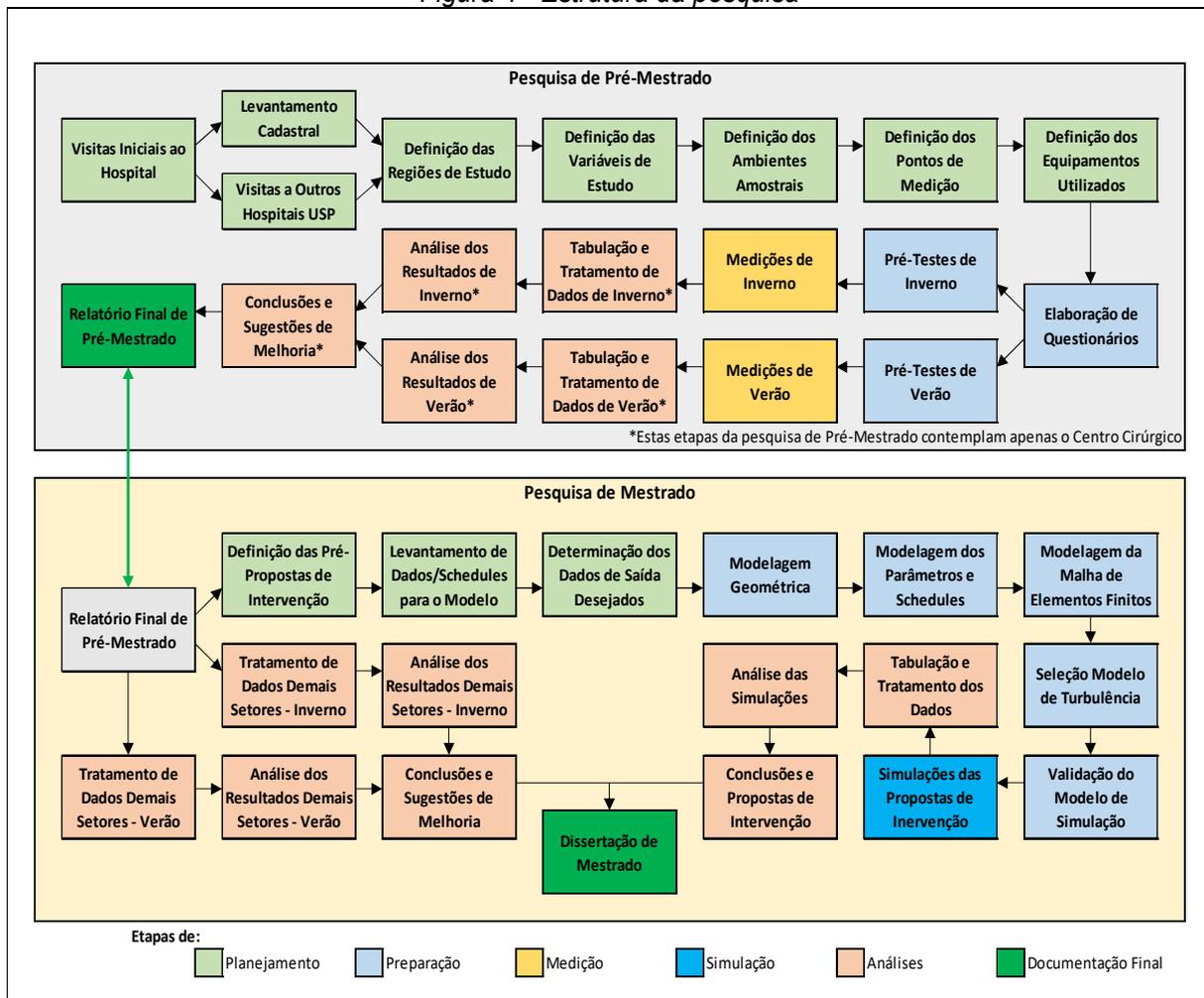
$T_{s,i}$ é o valor de simulação na observação i ; n é o número de observações;

¹⁶ TAYLOR, J. R. Introdução à Análise de Erros: **O Estudo de Incertezas em Medições Físicas**. University of Colorado: Bookman, 2012. 329 ISBN 8540701367.

4. ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa foi desenvolvida em duas grandes etapas sequenciais, sendo a primeira experimental e a segunda baseada em simulações CFD. Este trabalho fez parte dos programas de Pré-Mestrado em Inovação na Construção Civil – Construlnova, quando realizou-se a etapa experimental, e de Mestrado em Inovação na Construção Civil – Construlnova, no qual se desenvolveu a etapa de simulações. A estruturação da pesquisa pode ser encontrada no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 - Estrutura da pesquisa



A pesquisa experimental, cujo método será detalhado no respectivo capítulo (5.1), foi realizada ao longo de duas estações do ano, em cinco setores do HU e contou com medições de variáveis de qualidade do ar interior e de conforto térmico, bem como com questionários aplicados ao corpo de funcionários de cada um destes setores do hospital. Os dados coletados em campos foram tratados e analisados

buscando compreender as potenciais deficiências na qualidade do ar e no conforto térmico e suas origens, para que se pudesse apontar propostas de intervenção para suas melhorias.

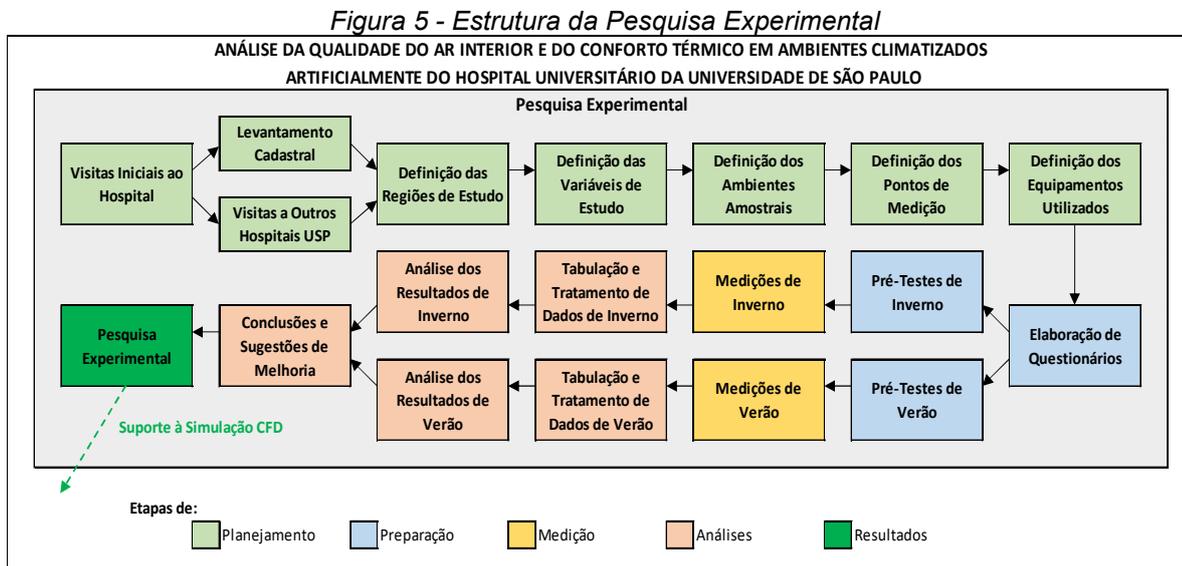
Já na etapa de simulação, restrita ao Centro Cirúrgico, as sugestões de melhoria apontadas na etapa experimental foram estudadas com o apoio de simulações CFD para que pudessem ser complementadas e validadas. Assim foi obtido um conjunto de propostas de intervenção para a melhoria das condições encontradas. O método da modelagem será abordado à frente, em seu respectivo capítulo (6.1). Vale ressaltar que a elaboração das propostas de intervenção levou em conta a baixa capacidade de investimentos em adequação do Hospital observada ao longo da última década, de forma que foram privilegiadas as propostas com menores intervenções de obras civis e no sistema de climatização.

5. PESQUISA EXPERIMENTAL

A fase experimental foi a mais extensa e abrangente da pesquisa, contemplando cinco setores do segundo pavimento do HU. São eles o Centro Obstétrico, a Radiologia, o Ambulatório, o Hospital Dia e o Centro Cirúrgico, este último o foco principal da pesquisa. Nesta etapa foram feitas medições em campo de variáveis de conforto térmico e de qualidade do ar, além da aplicação de questionários ao corpo de funcionários dos setores estudados e observações de campo para subsídio da modelagem computacional.

5.1. Método de Trabalho

Conforme adiantado no capítulo de Estrutura da Pesquisa (Cap. 4), nesta seção serão apresentados os procedimentos da pesquisa experimental, que podem ser divididos em etapas de planejamento, preparação, medição e análises, conforme o fluxograma da figura 5, detalhados a seguir.



5.1.1. Planejamento da Pesquisa

A primeira etapa experimental foi o planejamento da pesquisa, a qual contemplou a definição dos setores e ambientes a serem estudados, a seleção das variáveis a serem medidas, dos equipamentos a serem utilizados e suas respectivas

posições dentro dos ambientes, além da obtenção das aprovações e registros necessários para a condução da pesquisa.

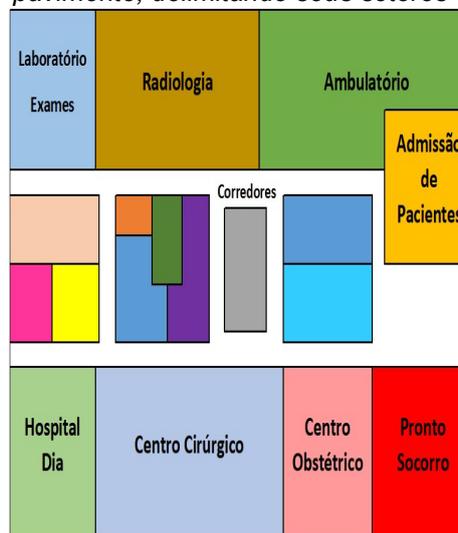
Uma vez que os projetos de arquitetura e sistemas de climatização fornecidos pelo HU encontravam-se desatualizados, para que se pudesse efetivamente delimitar o escopo da pesquisa em relação aos setores e ambientes a serem estudados, foi necessária a execução de um levantamento cadastral. Neste levantamento foram identificadas as modificações executadas, mas não representadas em projeto, e cadastrados os sistemas de condicionamento de ar presentes em todo o HU, localizando-os e tipificando-os.

O edifício que abriga o HU, localizado na Cidade Universitária da USP, é composto por seis pavimentos, sendo os dois inferiores retangulares e os quatro superiores em forma de “H” (Figura 6) e possui 36.000m² de área construída. O segundo pavimento do HU é o maior da edificação e mostrou-se como o mais interessante para este projeto, já que nele estão localizadas algumas das áreas mais críticas do hospital em relação à qualidade do ar, apresentadas na figura 7.

Figura 6 - Foto aérea do HU, destacando o segundo pavimento (seta larga), o jardim do terceiro pavimento (seta aberta) e o corpo em forma de “H” (seta preenchida)



Figura 7 - Croqui do segundo pavimento, delimitando seus setores



Uma vez delimitado o escopo no segundo pavimento, prosseguiu-se para a seleção dos setores a serem estudados. A escolha se deu a partir de dois principais critérios: a criticidade em relação à qualidade do ar interior e volume de pacientes. Neste sentido foram selecionados o Centro Cirúrgico e o Centro Obstétrico pelo primeiro critério e a Radiologia e o Ambulatório pelo segundo. Por sua interligação

com o Centro Cirúrgico, o Hospital Dia também foi contemplado. A determinação dos ambientes representativos em cada um dos setores seguiu critérios específicos, explorados em suas respectivas seções.

Nos ambientes estudados que possuíam climatização artificial foram realizadas medições em três pontos internos e em um ponto externo ao edifício. O ponto externo foi posicionado em local próximo à captação de ar externo dos sistemas de climatização que atendem o Centro Cirúrgico e Centro Obstétrico de modo a ser possível caracterizar as condições com que o ar de renovação é admitido no sistema.

Em relação aos pontos internos, tem-se o ponto denominado “Insuflamento”, o qual busca caracterizar as condições do ar insuflado no ambiente nos momentos em que os sistemas de ventilação e climatização permanecem ligados. Este ponto se localiza a aproximadamente 2,5m do piso. O segundo ponto interno, doravante denominado “Ambiente”, busca caracterizar as condições percebidas pelos ocupantes do ambiente, sendo posicionado a 1,1m do piso, conforme dispõe a NBR 16.401 (2008). Já o terceiro ponto interno, “Retorno”, busca caracterizar o ar retirado da sala pelo sistema de ventilação. Na maior parte dos ambientes este ponto está localizado próximo ao piso.

A localização destes pontos dentro de cada um dos ambientes foi definida durante a fase de pré-testes, de modo a conciliar as restrições da operação do Hospital à representatividade da medição.

No ponto “Ambiente” foram utilizados dois equipamentos de medição, o Multifuncional Testo 435, que possui sondas de temperatura de bulbo seco, temperatura de globo, umidade relativa, velocidade do ar e concentração de CO₂. Já nos pontos de insuflamento, retorno e externo foram utilizados equipamentos Omni-Eletrônica dotados de sensores de temperatura de bulbo seco, umidade, luminosidade e concentrações de CO₂, CO, compostos orgânicos voláteis e particulados 2,5µm. Na tabela 2 tem-se os sensores utilizados e suas características.

Adicionalmente foram conduzidas medições pontuais de outras variáveis. Nos pontos “Ambiente” e “Externo” foram feitas coletas de material microbiológico, a qual foi executada conjuntamente com a empresa Conforlab. Nos pontos de insuflamento e retorno foram coletados os perfis de velocidades nas grelhas de modo a ser possível compor suas respectivas vazões.

Tabela 2 - Variáveis e equipamentos de medição

Variável	Intervalo de Medição	Incertezas	Resolução
Temperatura de Bulbo Seco	-20°C a 100°C	± 0,3°C	0,01°C
Umidade Relativa	0% a 100%	± 2%	0,1%
Velocidade do Ar	0m/s a 20m/s	±0.03m/s ± 4%	0.01m/s
Temperatura de Globo	0°C a 120°C	± 1.5°C ±0.4%	0,01°C
Dióxido de carbono	0 a 10.000ppm	±75ppm ±3% de 0ppm a 5000ppm; ±150ppm ±5% acima de 5000ppm	0,1ppm
Compostos Orgânicos Voláteis	450 a 2.000ppb	±15ppb ±3%	1ppb
Particulado 2.5µm	0 a 500µg/m ³	±10 µg/m ³ de 0 a 100 µg/m ³ ±10% de 100 a 500 µg/m ³	1µg/m ³

Além das variáveis ambientais, foram coletados dados acerca de variáveis pessoais, essenciais para a análise do conforto térmico. Os dados relativos a estas variáveis foram coletados a partir da aplicação de questionários ao corpo de colaboradores do HU, complementados com informações coletadas em campo.

Além das variáveis pessoais, nos questionários foi perguntado sobre a percepção e satisfação dos ocupantes em relação às condições do ambiente. Neste sentido foi perguntado sobre sensação de conforto térmico, desconforto por movimentação de ar, desconfortos locais, ressecamento de mucosas e percepção de odores, por exemplo. Outras informações relevantes para as análises foram observadas em campo, dentre as quais destacam-se o porte dos procedimentos, taxa de ocupação do ambiente e fluxo de pessoas. Os questionários foram elaborados de forma a propiciarem um fácil preenchimento, uma vez que os ocupantes iriam responder aos questionários desassistidos. O questionário aplicado está apresentado no apêndice A.

Por fim, uma vez delimitado o escopo do estudo de caso, para que a pesquisa pudesse efetivamente ser realizada no HU, se fez necessário aprová-la na Comissão de Ética em Pesquisa do Hospital e na Plataforma Brasil, vinculada ao Ministério da Saúde. O projeto está registrado na Plataforma Brasil sob o número de registro CAAE 57808516.0.0000.0076.

5.1.2. Preparação das Medições

Com os objetivos de definir a localização dos pontos de medição nos ambientes, antecipar possíveis problemas, compatibilizar a rotina do Hospital com o desenvolvimento do projeto e familiarização com os equipamentos a serem utilizados, foram conduzidas etapas preparatórias das medições, os pré-testes. Como o projeto se desenvolveu com medições *in loco* com o hospital em operação regular, as atividades da pesquisa não poderiam perturbar a homeostase do HU, fazendo com que a condução destas medições preparatórias se tornasse ainda mais importante.

Foram conduzidos pré-testes anteriormente aos dois períodos de medição no Hospital, inverno e verão. No inverno foram simulados três dias de medição na Sala A do Centro Cirúrgico, contemplando a montagem e desmontagem dos equipamentos, um dos pontos críticos do processo, e outros três dias de medição na sala de cirurgia F. Estas salas foram selecionadas para os pré-testes por serem, respectivamente, a utilizada para as cirurgias de maior porte e a mais utilizada do Centro Cirúrgico. Já no verão, ensaiou-se três dias de medição na Sala A. Apesar de não terem sido conduzidos dias completos de pré-testes nos outros ambientes, nesta etapa foram caracterizados os fluxos de ar, com o auxílio de anemômetros, e acordado com o Hospital as localizações dos pontos de medição. Os questionários também foram testados e ajustados neste período.

5.1.3. Execução das Medições

As medições foram realizadas em duas estações do ano, inverno e verão, nesta ordem. Conforme já mencionado, os procedimentos de medições seguiram o que determina a ISO7726 (1998) no que diz respeito aos pontos, modo e períodos de medição, bem como às características dos instrumentos. Para as medições de algumas das variáveis, contou-se com o apoio das empresas Conforlab e Armec e da ABRAVA/Qualindoor.

As medições ocorreram ao final das estações do ano e em dias úteis, uma vez que aos finais de semana e feriados não há operação regular do Hospital, apenas atendimento à emergências. As medições foram realizadas antes do início

da pandemia da COVID-19. Como já adiantado, as variáveis medidas podem ser divididas em dois grupos, sendo o primeiro composto por aquelas de medição pontual, executadas entre uma e quatro vezes ao dia, e o segundo pelas variáveis de medição “contínua”, medidas com frequência de 240 vezes por hora, ou seja, uma medida a cada 15 segundos, durante 24 horas nos setores de acesso restrito e durante o horário de funcionamento do setor nos demais.

As variáveis de temperatura de bulbo seco, temperatura de globo, velocidade do ar, umidade relativa, concentrações de monóxido e dióxido de carbono, de compostos orgânicos voláteis e de particulado 2.5 μ m, em todos os pontos de medição, foram medidas pelo autor, enquanto as coletas de material microbiológico, determinação dos perfis de velocidade de insuflamento e retorno e concentração de particulados de diversos diâmetros foram realizadas com o apoio das empresas parceiras. Desta forma, para esta dissertação foram considerados apenas os resultados das variáveis medidas sem a contribuição das empresas. Os demais resultados experimentais, porém, foram admitidos como dados de entrada da simulação e integram o relatório a ser entregue ao Hospital.

5.1.4. Tabulação e Tratamento dos Dados

Tendo sido coletados aproximadamente cinquenta milhões de dados, a tabulação e o tratamento desta base de dados se tornaram uma etapa de extrema importância, bem como uma das de maior duração no projeto. O fato das medições terem sido conduzidas *in loco*, com o Hospital em normal funcionamento, fez com que o controle sobre as condições da medição fosse reduzido. Desta forma, tem-se mais espaço para distorções nos dados coletados, de modo que o tratamento adequado destes dados se tornasse ainda mais relevante.

Pelo fato de as medições terem sido conduzidas com o auxílio de diferentes equipamentos medindo uma mesma variável em diferentes pontos do ambiente (ou externo), foram realizados testes comparativos entre os equipamentos utilizados e um de referência, de forma a se obter a relação entre eles. Os testes foram conduzidos em recipiente isolado, em três condições distintas. Tomando como exemplo os testes para a temperatura de bulbo seco, os oito sensores utilizados durante a pesquisa foram posicionados em recipiente isolado termicamente em

conjunto com um termômetro de mercúrio calibrado. Foram feitas medições para três faixas de temperatura, cada uma com quatro amostras.

O tratamento estatístico dos dados coletados foi realizado em duas etapas, a saber: inicialmente foi feita a análise dos dados suspeitos, avaliando sua integridade e seus efeitos na amostra coletada; em seguida, os dados foram submetidos a tratamentos para reduzir o efeito das instabilidades de medição.

Para a identificação dos dados suspeitos foram analisados três indicadores: o critério de Chauvenet, que se baseia na probabilidade de ocorrência de um determinado valor, dada a sua distância da média da amostra, medida em desvios-padrão; a análise da distância do dado ao quartil mais próximo, medida em múltiplos da distância entre o primeiro e o terceiro quartil da amostra (estes dois critérios foram aplicados para a série completa e para janelas móveis de 36 dados, correspondente a 9 minutos); a análise comparativa da distância entre cada um dos dados e a medida anterior e posterior, com o nível de precisão do equipamento. A respeito deste último indicador, uma vez que o intervalo de 15 segundos entre dois dados consecutivos é muito pequeno para a ocorrência de uma mudança muito significativa nas condições do ambiente, o ponto que diferir do ponto imediatamente anterior e do imediatamente posterior além do erro esperado para o equipamento, no mesmo sentido, pode ser considerado suspeito. Na segunda etapa, para amenizar os efeitos de instabilidades de medição, foram aplicadas médias móveis sucessivas ao conjunto de dados, sendo verificada a cada aplicação a correlação entre a nova amostra e a original (já excluídos os dados suspeitos).

5.1.5. Análises de Resultados e Requisitos Normativos

A análise dos resultados das medições foi conduzida buscando identificar se as condições de qualidade do ar interior e de conforto térmico dos ambientes estudados atendem aos requisitos normativos e, ao mesmo tempo, se propiciam aos usuários a sensação de conforto.

Uma vez que alguns dos parâmetros analisados não são contemplados pela Norma específica para o tipo de ambiente assistencial à saúde, a NBR7256-2021, foram consideradas como referência, adicionalmente, a NBR 16.401-2008, a qual versa sobre os sistemas de climatização em geral e o Standard 170-2008 da ASHRAE, específico para ambientes hospitalares. Foram também consideradas

portarias e regulamentações do Ministério da Saúde (1998), da ANVISA (2002, 2003) e do CONAMA (1990), que regulamentam aspectos específicos. Para todos os ambientes analisados, a NBR7256/2021 estabelece os mesmos intervalos de referência para a temperatura do ar, umidade relativa e umidade absoluta. A tabela 3 sintetiza os requisitos normativos para as diferentes variáveis e ambientes para os ambientes estudados.

Tabela 3 - Intervalos de referência para as variáveis analisadas

Variável	Normativo de Referência	Valor Mínimo	Valor Máximo
Temperatura do ar	NBR7256/2021	20°C	24°C
Umidade relativa	NBR7256/2021	60%	-
Umidade absoluta	NBR7256/2021	4g/kg _{ar seco}	10,6g/ kg _{ar seco}
Velocidade do ar	NBR16.401/2008	-	0,15m/s ¹⁷
Concentração de CO ₂	RE09/2002 ANVISA	-	1000ppm
Concentração de CO	RE03/90 CONAMA	-	15ppm ¹⁸
Concentração de PM 2,5µm	RE09/2002 ANVISA	-	80µg/m ³

Foi analisada a temperatura do ar em detrimento da temperatura operativa, como seria previsto na NBR16.401 (ABNT, 2008). Isso se deu por três fatores, o primeiro deles é a compatibilidade com a NBR7256 (ABNT, 2021), referência normativa preferencial para este artigo, dado o tipo de ambiente analisado, que utiliza a temperatura do ar como parâmetro. Além disso, os ambientes climatizados artificialmente poderiam ser categorizados como “ambientes moderados”, isto é, “onde as condições ambientais se aproximam dos padrões de conforto adotados pela ISO 7730 (1994)” (ISO 7726, 1998). Por fim, ao se calcular a temperatura operativa observou-se um desvio máximo de 0,75°C em relação à temperatura do ar, valor muito baixo dadas as incertezas dos equipamentos e, principalmente, do processo de medição em um hospital em funcionamento regular.

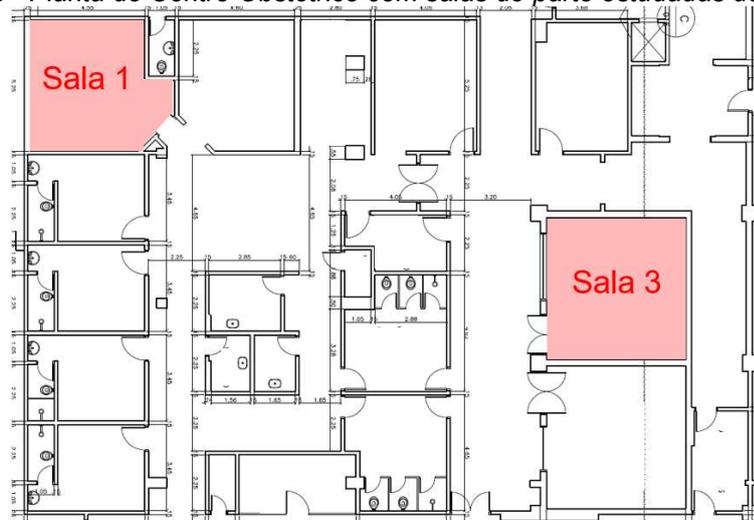
¹⁷ A velocidade máxima do ar é estabelecida em 0,15m/s se a roupa típica for de inverno (0,9clo) e em 0,2m/s se for de verão (0,5clo).

¹⁸ Considerado como referência o nível de atenção.

5.2. Centro Obstétrico

No Centro Obstétrico do Hospital Universitário da USP há quatro salas de parto, sendo as duas menores preferencialmente utilizadas para partos normais (salas 1 e 2) e as demais para cesarianas (salas 3 e 4). Para este estudo foram analisadas as salas 1 e 3, destacadas na figura 8, de modo a contemplar os dois tipos existentes no hospital. Ambas as salas foram estudadas ao longo de dois dias de operação, sendo um no inverno e outro no verão. Há restrição de acesso ao setor e padronização das vestimentas. O Centro Obstétrico é atendido por um sistema de climatização central que pode ser acionado em duas zonas, respeitando a mesma divisão relatada anteriormente (salas 1 e 2 em uma zona e salas 3 e 4 na outra). Não há ali qualquer tipo de controle do sistema. O ar-condicionado permanece em funcionamento durante todo o horário de operação regular do hospital.

Figura 8 - Planta do Centro Obstétrico com salas de parto estudadas destacadas



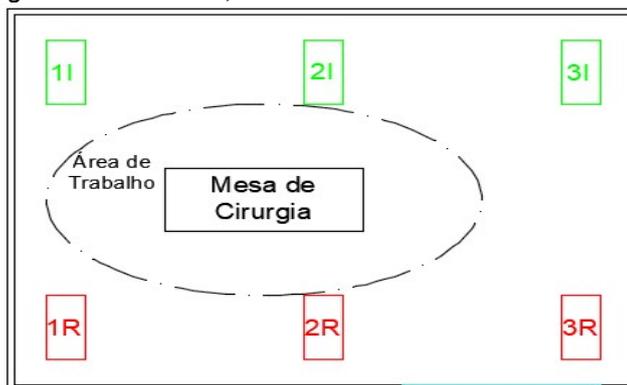
Fonte: Acervo da Universidade de São Paulo. Adaptada pelo autor.

Na Sala de Parto 1 há um difusor de insuflamento e duas grelhas de retorno, todos no teto. Há um segundo difusor de insuflamento em um banheiro anexo à sala, o que induz a formação de um fluxo de ar de um ambiente sujo para um ambiente limpo e de risco ambiental à saúde nível 2 pelos critérios da NBR7256/2021 (ABNT, 2021).

A Sala 3, dedicada às cesarianas, possui em seu forro seis aberturas para o sistema de ventilação, sendo três para difusores de insuflamento e as demais para grelhas de retorno, aqui respectivamente denominadas 1I, 2I e 3I e 1R, 2R e 3R,

conforme figura 9. Observou-se, porém, a ausência de um dos difusores de insuflamento (2I) e de uma das grelhas de retorno (2R), havendo apenas a abertura aos dutos do sistema. Adicionalmente não foi constatado fluxo de ar no difusor 1I, de modo que o insuflamento ocorria apenas pelo difusor 3I e pela abertura (2I).

Figura 9 - Croqui da Sala de Partos 3, indicando a projeção dos difusores de insuflamento e das grelhas de retorno, localizadas no forro – sem escala



Os equipamentos de medição foram posicionados na sala de modo que os sensores de insuflamento estivessem expostos ao fluxo de ar proveniente do difusor 3I e os sensores de retorno expostos ao fluxo direcionado à grelha 3R. Como o equipamento utilizado deve ser instalado na posição vertical, eles foram fixados na parede a aproximadamente 2,5m do piso. Os sensores do ambiente, por sua vez, foram alocados no perímetro da área de trabalho destacada na figura 9, no ponto mais próximo aos outros sensores instalados.

5.2.1. Caracterização da Ocupação

Os ocupantes das salas de parto podem ser classificados em três grupos a depender de atividade metabólica (Tabela 4), e vestimenta (Tabela 5). O primeiro grupo é composto pelos profissionais de alta taxa metabólica, com vestimentas pesadas e posicionamento mais próximo ao centro da sala. Já no segundo são contemplados os profissionais com atividade metabólica baixa e vestimentas leves. Por fim, a parturiente forma o terceiro grupo. A tabela 6 resume a caracterização destes grupos. Apesar da caracterização dos dois primeiros grupos e suas proporções no total de ocupantes serem semelhantes entre os dois tipos de sala, a

atividade metabólica e a densidade de ocupação são mais elevadas na sala de parto normal.

Tabela 4 - Classes de atividade metabólica

Classe	Taxa metabólica por área de pele (W/m²)	Exemplos de atividade
Descanso	Menor que 65	Descanso ou Repouso
Baixa	De 65 a 130	Sentado ou caminhando levemente
Média	De 130 a 200	De pé com trabalho moderado de mãos, braços ou pernas
Alta	De 200 a 260	Trabalho intenso de braços e tronco. Caminhar de 5,5km/h a 7km/h. Puxar ou empurrar cargas.
Muito Alta	Maior que 260	Atividade muito intensa, correr ou caminhar a mais de 7km/h.

Fonte: ISO7243/89 – Adaptado pelo Autor

Tabela 5 - Classes de vestimentas típicas para o Centro Obstétrico

Classe	Índice de Isolamento (clo)	Exemplos de Peças de Roupa Características	Exemplos de Usuário Típico
Muito Leve	Menor que 0,25	Bata leve ou camisola curta	Parturiente
Leve	De 0,25 a 0,75	Conjunto privativo, máscara e sapato fechado.	Anestesiastas e Circulantes
Pesada	Maior que 0,75	Conjunto privativo, luvas, toucas, máscaras, avental e sapato fechado.	Obstetras, Residentes e Internos

Tabela 6 - Classificação dos usuários por atividade, vestimenta e localização na sala

Grupo	Grupo I		Grupo II		Grupo III	
Tipo de Parto	Normal e Cirúrgico		Normal e Cirúrgico		Normal	Cirúrgico
Classe de Taxa Metabólica	Alta		Baixa		Muito Alta	Descanso
Classe de Vestimenta	Pesada		Leve		Muito Leve	Muito Leve
Exemplos de Usuários Típicos	Obstetra ou Residente		Anestesiasta ou Circulante		Parturiente	Parturiente
Posição na Sala	Centro, próximo à mesa/cama		No entorno da sala		Na mesa	Na mesa
Sob influência direta do foco cirúrgico	Sim		Não		Sim	Sim
Número de usuários	2 a 4		3 a 4		1	1

5.2.2. Resultados

Ao longo das medições de inverno na sala 1 do Centro Obstétrico pode-se observar que, com o sistema de climatização acionado, a temperatura de bulbo seco foi mantida relativamente estável próxima a 23°C (Gráfico 1), levando a maior parte dos ocupantes (66,7%) relatar perceber as condições térmicas do ambiente como confortáveis. Apesar disso, ao se discricionar a amostra pelo tipo de atividade, obtém-se que 100% dos ocupantes do Grupo I relataram sentir calor ou desconforto local por calor na região da cabeça, onde utilizam máscaras e toucas.

Por se tratar de um ambiente com climatização artificial, localizado no centro do edifício e entre dois pavimentos técnicos, a temperatura observada na medição de verão foi similar à do inverno, oscilando entre 22°C e 24°C (Gráfico 2). No dia de verão, porém, pode-se observar um parto normal com uma ocupação maior do que a habitual, havendo nove pessoas na sala. Neste procedimento, realizado entre 12:00 e 13:00, se percebeu uma elevação pontual da temperatura, mas ainda dentro do intervalo de referência.

Gráfico 1 - Temperatura de bulbo seco na sala 1 do Centro Obstétrico, nas medições de inverno

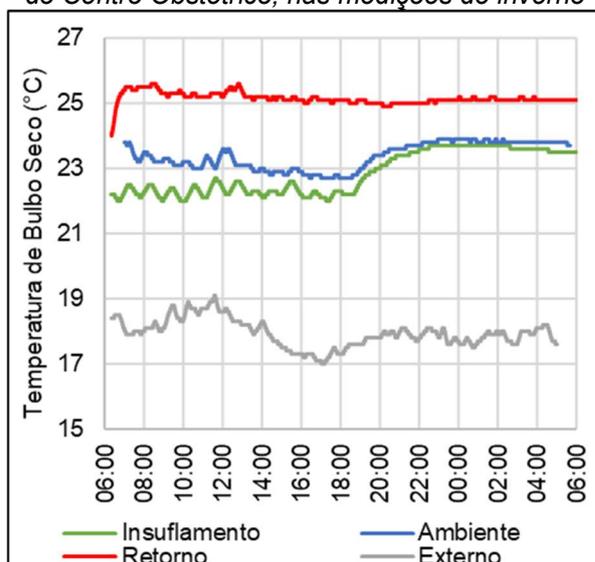
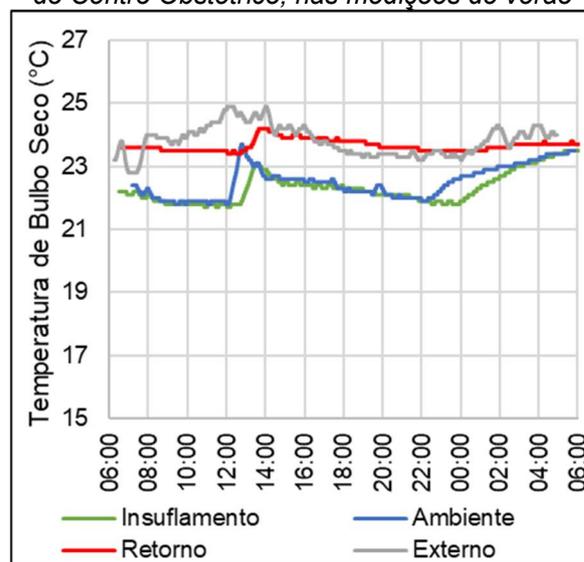


Gráfico 2 - Temperatura de bulbo seco na sala 1 do Centro Obstétrico, nas medições de verão



No inverno, a umidade relativa foi mantida em níveis próximos ao intervalo recomendado ao longo de todo o período em que o ar-condicionado esteve em operação (55% a 60%), independentemente de haver ocupação na sala (Gráfico 3). Como reflexo disso apenas 33% dos usuários queixaram-se de ressecamento de

mucosas nos questionários. No verão a umidade relativa foi mantida em níveis um pouco superiores, oscilando em torno de 75%. Foram, também, observadas baixas velocidades do ar em todo o período, de forma que não houve nos questionários nenhuma queixa de desconforto por movimentação de ar. Apesar do sistema de ar-condicionado ali instalado não possuir controle de *set-point*, podem ser observados no gráfico 4 aumentos na velocidade do ar nos momentos de ocupação, como por exemplo durante o procedimento ocorrido entre 12:00 e 13:00. Isso decorre dos deslocamentos de ar causados pela movimentação de pessoas e equipamentos durante os partos, uma vez que, por causa do tamanho reduzido da sala, os sensores do ponto do ambiente ficaram posicionados em uma área de circulação.

Gráfico 3 - Umidades relativas nas medições de inverno da sala 1 do Centro Obstétrico

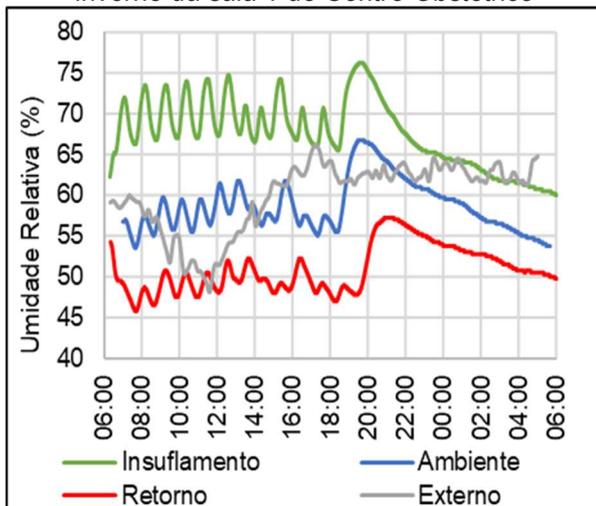
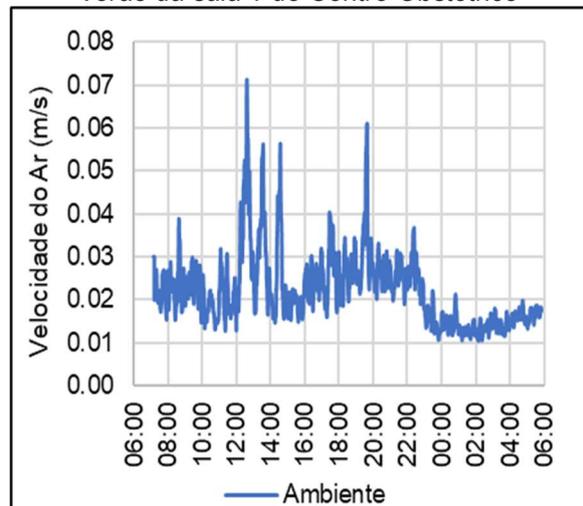


Gráfico 4 - Velocidade do ar nas medições de verão da sala 1 do Centro Obstétrico



Quanto à qualidade do ar, a renovação de ar promovida na sala foi, na maior parte dos partos, suficiente para manter a concentração de CO₂ abaixo de 1000ppm, mesmo se tratando de uma sala utilizada preferencialmente para partos normais, durante o qual a parturiente pode aumentar em 200% sua ventilação, em relação à níveis pré-gestacionais (CHESTNUT, 2016). Apenas na ocasião do já mencionado parto ocorrido no dia de verão foi observada concentração do gás superior aos níveis recomendados. O pico, atingido às 13:00, foi de 1115ppm (Gráfico 5). Após o término deste procedimento foi realizada a limpeza da sala, atividade realizada por duas pessoas com taxa metabólica média. Com a redução da ocupação foram necessários 20 minutos para que a concentração do gás retornasse aos níveis anteriores ao procedimento. No inverno a concentração de compostos orgânicos

voláteis manteve-se correlacionada à observada no ambiente externo, indicando eficiente renovação de ar no ambiente (Gráfico 6). Apesar disso, os altos valores observados tanto na sala quanto no ambiente externo, em conjunto com o fato de todos os ocupantes relatarem perceber odores frequentes no ambiente, indicam possíveis problemas na localização do ponto de captação de ar do sistema. Para este caso indica-se futura investigação da fonte destes compostos orgânicos voláteis. A percepção destes odores pode, em paralelo, estar relacionada ao fato de parte do insuflamento da sala ser realizado no sanitário anexo.

Gráfico 5 - Concentração de dióxido de carbono na sala 1 do Centro Obstétrico no verão

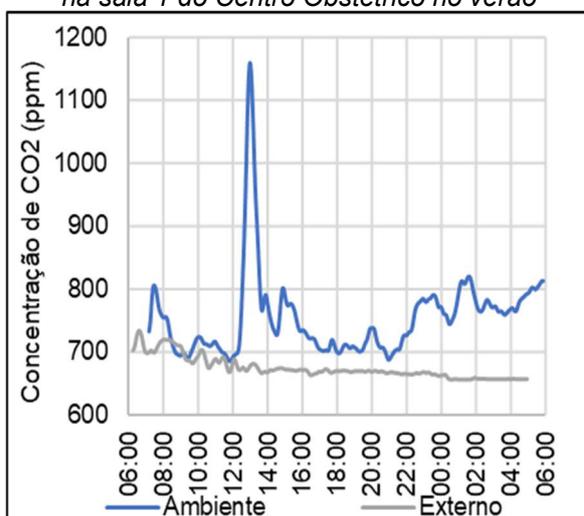
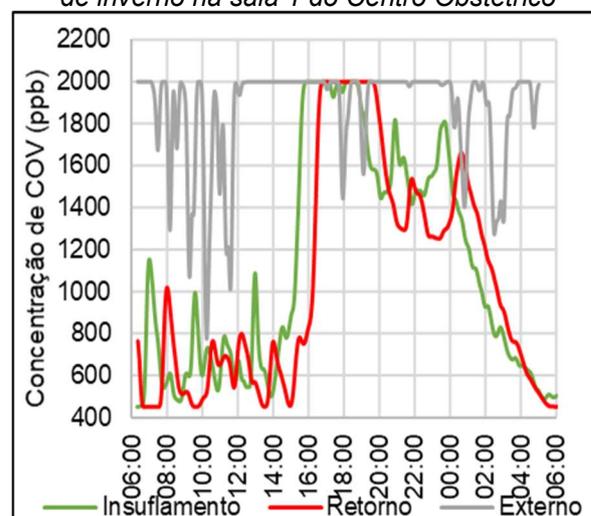


Gráfico 6 - Concentrações de COV nas medições de inverno na sala 1 do Centro Obstétrico



A concentração de particulados, tanto no inverno (Gráfico 7) quanto no verão, manteve-se significativamente mais elevada do que a externa, inclusive no ponto de insuflamento, indicando deficiências em filtros e limpeza de dutos. Por outro lado, há uma concentração maior de particulados no retorno do que no insuflamento, indicando retirada de particulados pelo sistema. Ao se calcular os índices médios IERP e IEF têm-se para o inverno, respectivamente, 107% e 77% (Gráfico 8).

Gráfico 7 - Concentrações de particulados 2,5 μ m durante as medições de inverno na sala 1 do Centro Obstétrico

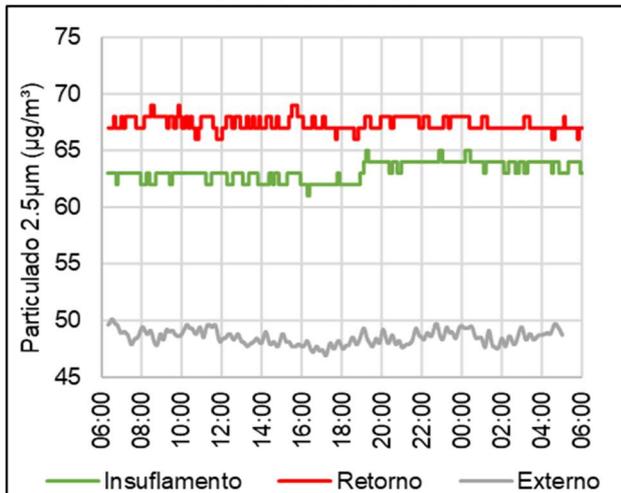
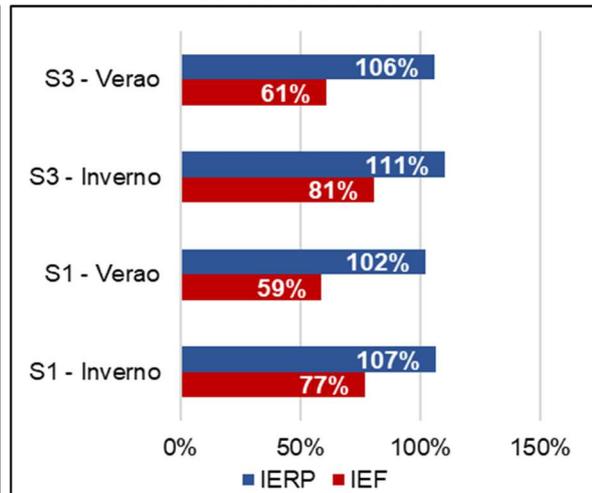


Gráfico 8 - Indicadores IERP e IEF nas medições de inverno e verão das salas do Centro Obstétrico



Na sala 3, de partos cirúrgicos, são percebidas elevações na temperatura durante as ocupações na sala, mesmo com o sistema de climatização operante, sendo atingidas temperaturas de 25,5°C nas medições de inverno, superior ao intervalo de referência (Gráfico 9). As temperaturas mais elevadas se refletiram nas respostas aos questionários, nos quais 60% dos usuários indicaram sensação de calor na ocasião. Diferentemente do observado na sala 1, esta sensação de desconforto não se limitou aos profissionais o Grupo I.

Ressalta-se ainda que o posto de trabalho dos dois profissionais que relataram não sentir calor é localizado sob a saída de insuflamento com o difusor faltante, sendo relatado conjuntamente desconforto por movimentação de ar e sensação de frio localizada, especialmente no nível da cabeça. A falta do difusor altera as pressões do ar dentro do duto e gera um desbalanceamento das vazões de insuflamento, induzindo vazões mais elevadas na abertura em detrimento do difusor à jusante no duto. A umidade relativa foi mantida entre 60% e 80% ao longo do período com o ar-condicionado ligado (Gráfico 10). Ainda assim 40% dos usuários queixaram-se de ressecamento de mucosas.

Gráfico 9 - Temperaturas de bulbo seco na sala 3 do Centro Obstétrico no inverno

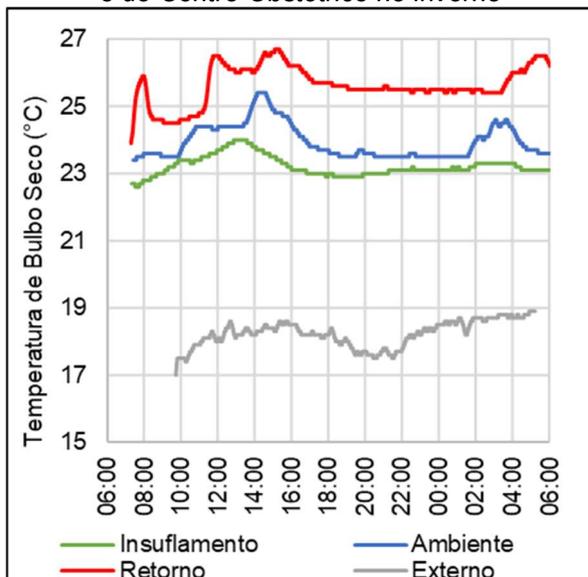
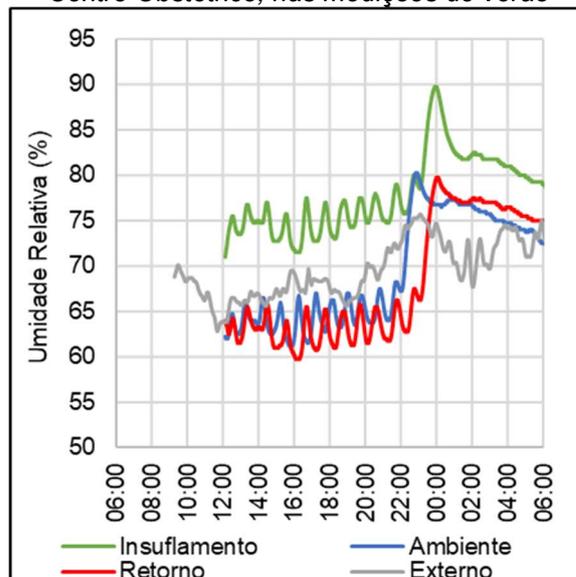


Gráfico 10 - Umidades relativas na sala 3 do Centro Obstétrico, nas medições de verão



Quanto a garantir o conforto térmico no ambiente, o sistema de climatização e distribuição de ar se mostrou deficiente, não sendo capaz de manter a temperatura na faixa adequada e induzindo o desconforto por movimentação de ar nos ocupantes próximos à saída de insuflamento sem o difusor.

Em relação à qualidade do ar, a concentração de CO₂ na sala não ultrapassa o limite recomendado de 1000ppm (Gráfico 11). Ressalva-se, porém, que o tipo de procedimento ali realizado não envolve atividade metabólica tão elevada da paciente quanto no caso do parto normal, de modo que a produção do gás é menos intensa. Pelo comportamento da concentração do gás, crescente até o final dos procedimentos monitorados, sem sinais de estabilização da concentração do poluente, em conjunto com os relatos dos ocupantes de “ar viciado”, não há evidências suficientes para afirmar que em um procedimento com complicações, em que a cirurgia pode ser mais longa, ou no caso da realização de um parto normal, a ventilação seja suficiente para manter a concentração de CO₂ nos níveis adequados. A concentração de particulados indica, assim como na sala 1, uma deficiência dos filtros e da limpeza de dutos, uma vez que a concentração do ponto de insuflamento é significativamente superior à do ambiente externo (Gráfico 12). Os indicadores IERP e IEF médios para o inverno foram, respectivamente 111% e 81%, e para o dia de verão, 106% e 61%, respectivamente.

Gráfico 11 - Concentração de dióxido de carbono ao longo das medições de inverno da sala 3 do Centro Obstétrico

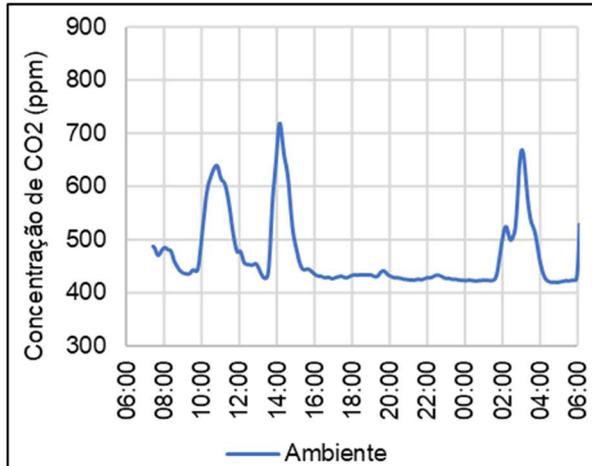
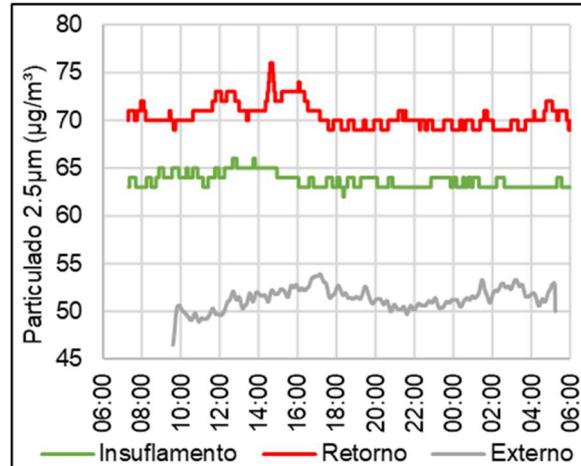


Gráfico 12 - Concentração de particulado 2.5µm ao longo das medições de inverno da sala 3 do Centro Obstétrico



5.2.3. Proposições para Melhorias

Os principais problemas constatados no Centro Obstétrico referem-se ao sistema de distribuição de ar, ao layout da sala de parto 1, no tocante ao banheiro anexo, e ao estado de conservação do sistema tanto em relação aos difusores faltantes quanto à limpeza de dutos e manutenção de filtros. Desta forma as propostas de intervenção sugeridas procuram a resolução ou, ao menos, a mitigação destas deficiências.

O problema no layout da sala de parto 1 é ocasionado pelo banheiro anexo à sala, no qual está localizado um dos difusores de insuflamento da sala, de modo a induzir um fluxo de ar do banheiro para a sala. Propõe-se para este caso o rebaixamento do forro no banheiro de modo a permitir a colocação de um duto a partir do ponto do atual difusor de insuflamento (I1), de forma a criar um novo ponto de insuflamento dentro da sala, na parede divisória com o banheiro. Além disso recomenda-se a instalação de uma ventilação mecânica no banheiro (E1) para a exaustão do ar. Assim se induz o fluxo de ar a partir da sala de parto para o banheiro, não o oposto, como ocorre atualmente. Nas figuras 10 e 11 estão apresentados um esquema da solução proposta, em planta e em corte. Optou-se pela solução com rebaixamento do forro do banheiro e difusor de parede para o insuflamento na sala em detrimento da colocação de um difusor no teto da sala pelo seu menor nível de intervenção, ao evitar a execução de furos na laje da sala.

Figura 10 - Esquema representativo da proposta de intervenção na sala 1, em planta

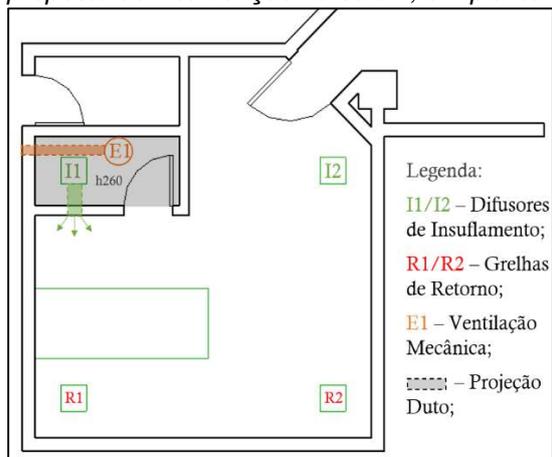
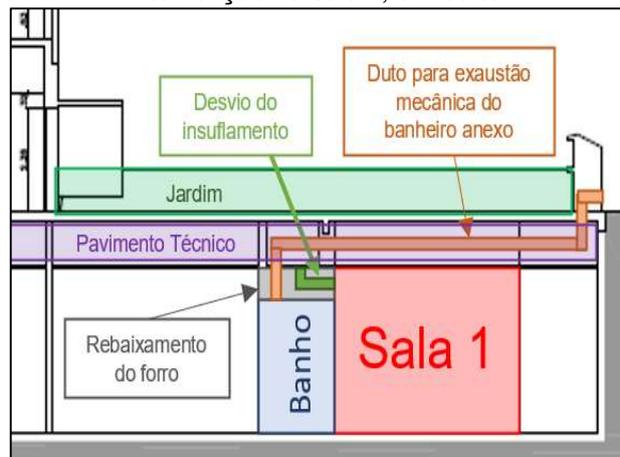


Figura 11 - Esquema representativo da proposta de intervenção na sala 1, em corte



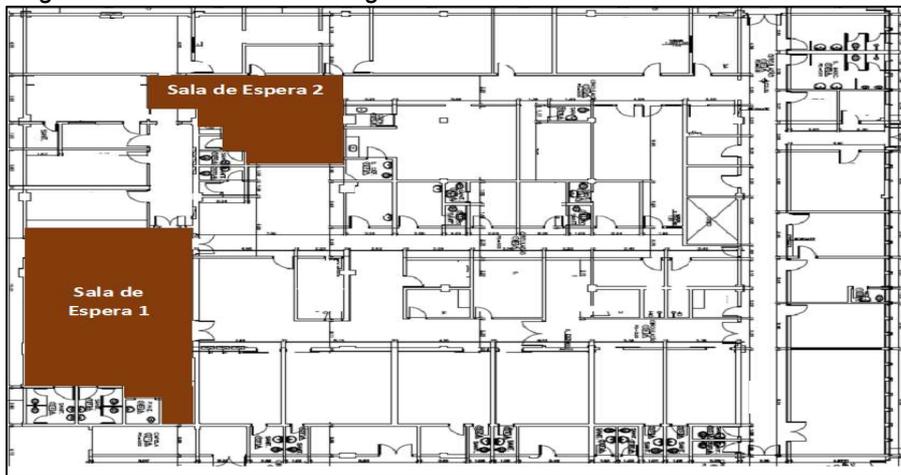
Em relação às deficiências de manutenção, há a falta de um dos três difusores de insuflamento na sala 3, prejudicando a distribuição de ar. Além do difusor faltante, observou-se, a partir das altas concentrações de particulado no insuflamento, deficiências em filtros e na limpeza de dutos. Sugere-se, portanto, a realização de manutenção no sistema conforme disposto na NBR15.848/2010, contemplando a instalação dos difusores faltantes, troca de filtros e limpeza de dutos.

5.3. Radiologia

A Radiologia do HU é um setor aberto ao público, havendo livre circulação de pacientes. Ali são realizados exames de imagem, como radiografias e tomografias, cujos aparelhos possuem restritivos requisitos de temperatura e umidade do ar para correto funcionamento. Como boa parte destes equipamentos de exames são emissores de radiação, a Radiologia é bastante compartimentada e as portas ficam constantemente fechadas, dificultando a circulação de ar pelo setor. Embora esteja localizada na parte do segundo pavimento que é exposta ao ambiente externo, não há janelas ou portas para o exterior do edifício, de modo que toda a circulação e renovação de ar depende dos sistemas de climatização e ventilação. Dentre os sistemas de ar-condicionado observados no Hospital, o instalado na Radiologia é o mais recente e moderno. Trata-se de um sistema central com expansão indireta, cuja distribuição de ar nos ambientes é realizada por dutos e difusores de quatro vias distribuídos pelo forro. O retorno é realizado por grelhas também localizadas no

forro. A climatização é mantida em constante operação ao longo do período de funcionamento do setor e há controle de temperatura baseado em *set point*. Apesar de inicialmente intencionar-se estudar as salas de exames, isso não foi possível, já que, devido à emissão de radiação pelos equipamentos ali instalados, a equipe de pesquisa não poderia acompanhar presencialmente a medição nas salas, o que havia sido uma solicitação do Hospital para locais de livre acesso ao público. Deste modo optou-se por realizar as medições em duas salas de espera da Radiologia, a primeira contígua à recepção e a segunda às salas de exames, destacadas na figura 12.

Figura 12 - Planta da Radiologia com os ambientes estudados destacados



Fonte: Acervo da Universidade de São Paulo. Adaptada pelo autor.

As duas salas estudadas (Figura 12) são muito similares em questão de ocupação, equipamentos, distribuição de ar e características construtivas, além das medições nelas realizadas serem em dias sequenciais, com condições climáticas próximas, de modo que seus resultados também foram bastante alinhados. Desta forma optou-se por apresentá-las aqui de forma conjunta.

5.3.1. Resultados

A Radiologia, como já mencionado, é atendida por um sistema de climatização com controle de *set-point*. Dessa forma, como pode ser observado nos gráficos 13 e 14, tanto no inverno quanto no verão, a amplitude térmica das duas salas é pequena, com a temperatura mantida em aproximadamente 22,5°C no inverno e 23,5°C no verão, adequadas para conforto térmico de acordo com a

NBR7256 (ABNT, 2021). Apesar das salas de espera, por sua natureza, apresentarem expressivas variações no número de ocupantes, sua temperatura não apresentou oscilações importantes, mas é possível perceber ligeiros aumentos na velocidade do ar (Gráfico 15) nos períodos de maior ocupação, como por exemplo das 11:00 às 12:30, como reflexo de um aumento na vazão de insuflamento para manter a temperatura da sala no *set-point* estipulado. O mesmo fenômeno pode ser percebido nas primeiras horas do dia, quando o ar-condicionado é ligado. Ressalta-se, no entanto que os valores medidos não ultrapassaram a 0,15m/s, o que está em conformidade com a norma referida

Gráfico 13 - Temperatura de bulbo seco na sala de espera 1 da Radiologia, no inverno

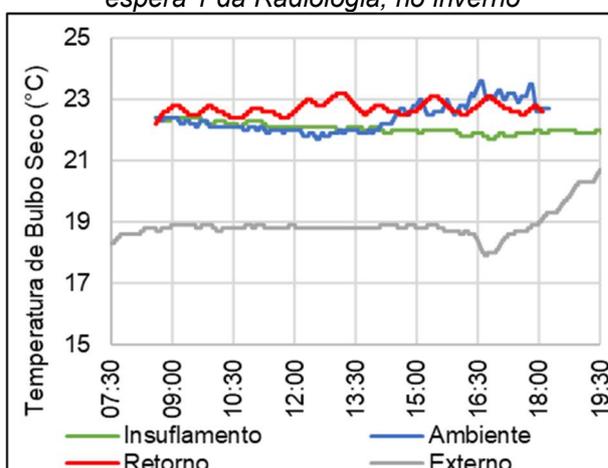
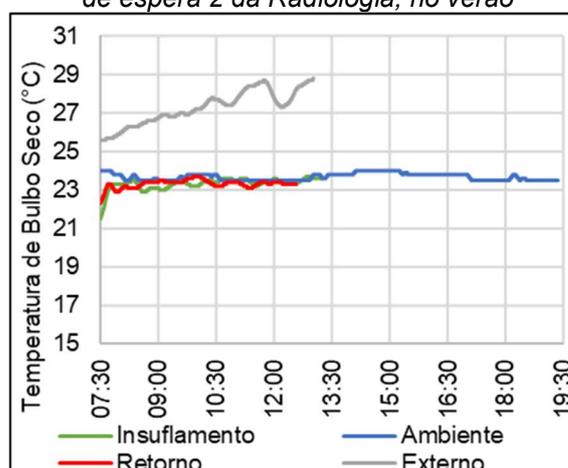


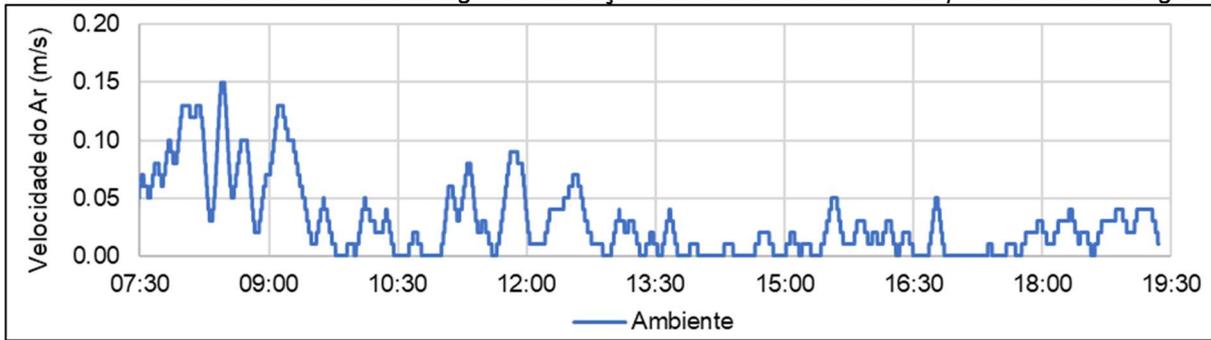
Gráfico 14 - Temperatura de bulbo seco na sala de espera 2 da Radiologia, no verão



As respostas dos questionários também permitem observar que a condição térmica é adequada, uma vez que apenas 9,1% dos usuários relataram situação de desconforto; 63,6% dos ocupantes indicaram sentir movimentação de ar, dos quais 57,1% a classificaram como agradável e os 42,9% restantes como ligeiramente desagradável, corroborando o observado nas medições de velocidade do ar.

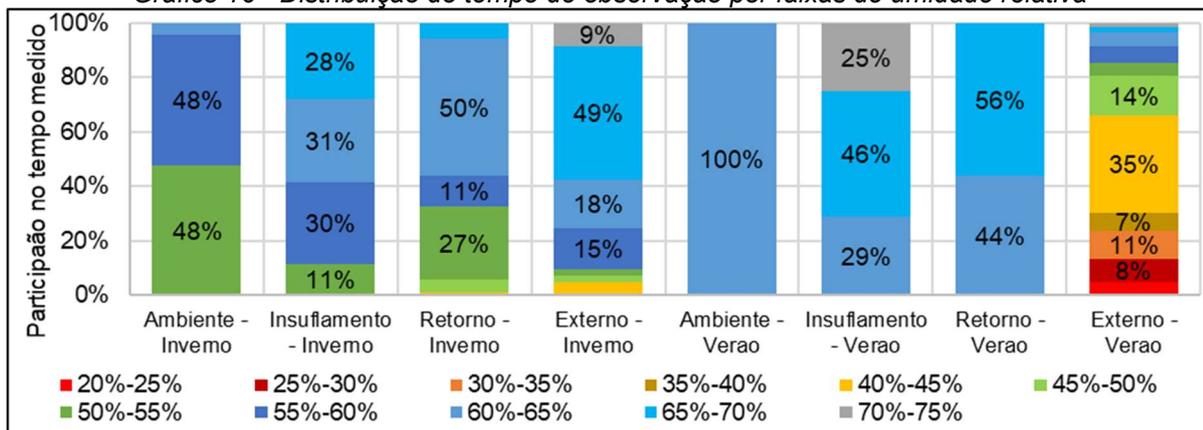
As oscilações na velocidade do ar fazem com que a movimentação de ar seja percebida pelos usuários, porém dadas as baixas velocidades observadas, sempre abaixo de 0,15m/s, não há a sensação de desconforto.

Gráfico 15 - Velocidade do ar ao longo das medições de verão da Sala de Espera 2 da Radiologia



A umidade relativa do ar no ambiente, cujos resultados das medições se encontram no Gráfico 16, ao longo do verão foi mantida entre 60% e 65% durante de todo o tempo de observação e, no inverno, ela foi mantida entre 50% e 60% em 96% do tempo observado. Nos questionários apenas 36,3% dos ocupantes relataram queixas de ressecamento de mucosas.

Gráfico 16 - Distribuição do tempo de observação por faixas de umidade relativa



Pode-se dizer, portanto, que as condições de conforto térmico na Radiologia se mostraram, em geral, adequadas. Isso pode ser atribuído tanto a um sistema de climatização com controle de *set point* e a um sistema de distribuição de ar eficiente, com difusores de quatro vias homogeneamente distribuídos pelo forro, quanto a uma ocupação de baixa complexidade, em que todos os colaboradores possuem atividades similares, relativamente à taxa metabólica. Além disso, as pessoas podem escolher suas vestimentas, havendo mais espaço para adaptação individual às condições térmicas do ambiente, o que não é possível em outros setores do hospital.

Em relação à qualidade do ar, pode-se perceber que a renovação de ar é adequada, resultando em baixas concentrações de CO₂, a qual não ultrapassa

700ppm, valores próximos ao observados no ponto externo ao edifício (Gráfico 17). Outro resultado que corrobora com tal percepção é a concentração de compostos orgânicos voláteis. Apesar desta apresentar valores elevados e estar acompanhada de queixas de frequentes odores no ambiente, é possível observar no gráfico 18 que os valores no ambiente interno estão relacionados com as concentrações no ar externo. Por outro lado, assim como identificado no Centro Obstétrico, estas altas concentrações de compostos orgânicos voláteis presentes no ar externo e carregadas ao ambiente interno indicam problemas no posicionamento do ponto de captação de ar do sistema, fazendo-se necessária posterior investigação das possíveis fontes destes poluentes.

Gráfico 17 - Concentração de CO₂ na Sala de Espera 2 da Radiologia, em dia de inverno

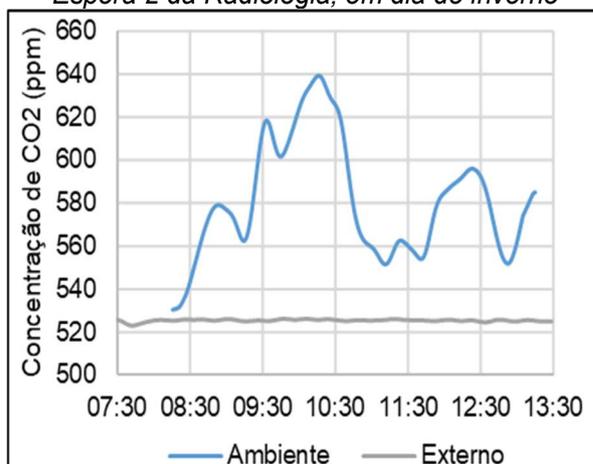
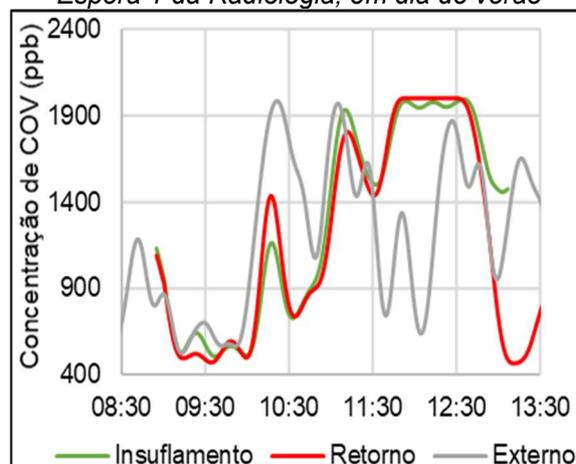


Gráfico 18 - Concentração de COV na Sala de Espera 1 da Radiologia, em dia de verão



As concentrações de particulado 2,5 μ m observadas indicam problemas similares aos identificados nas salas de parto: deficiência nos filtros e na limpeza de dutos. A concentração do particulado no ponto próximo ao insuflamento é bastante superior àquela observada no ponto de captação de ar (Gráfico 19), indicando que está sendo carregado para o ambiente material particulado que fica depositado nos dutos do sistema de ventilação resultando em um IEF médio para a Sala de Espera 1 de 71% no inverno e 78% no verão. Por outro lado, o fato das concentrações no retorno serem superiores às no insuflamento indicam haver retirada de particulado do ambiente pelo sistema, com um IERP médio de 118% no inverno e 117% no verão, para a primeira sala. O gráfico 20 apresenta os IERP e IEF médios, por ambiente e estação do ano. Nele é possível observar no verão uma efetividade da

filtragem menos deficiente do que no inverno, apesar de ainda haver o carregamento de particulado para o ambiente interno.

Gráfico 19 - Particulado na Sala de Espera 1 da Radiologia, em dia de inverno

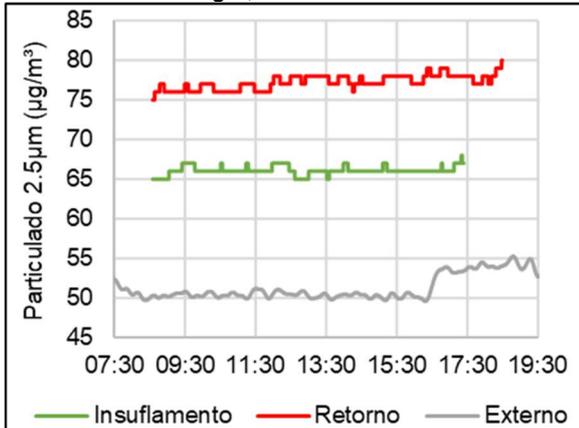
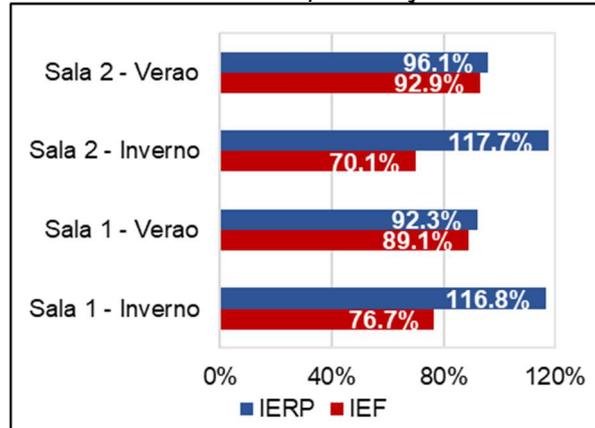


Gráfico 20 - IERP e IEF na Radiologia, por ambiente e por estação



5.3.2. Proposições para Melhorias

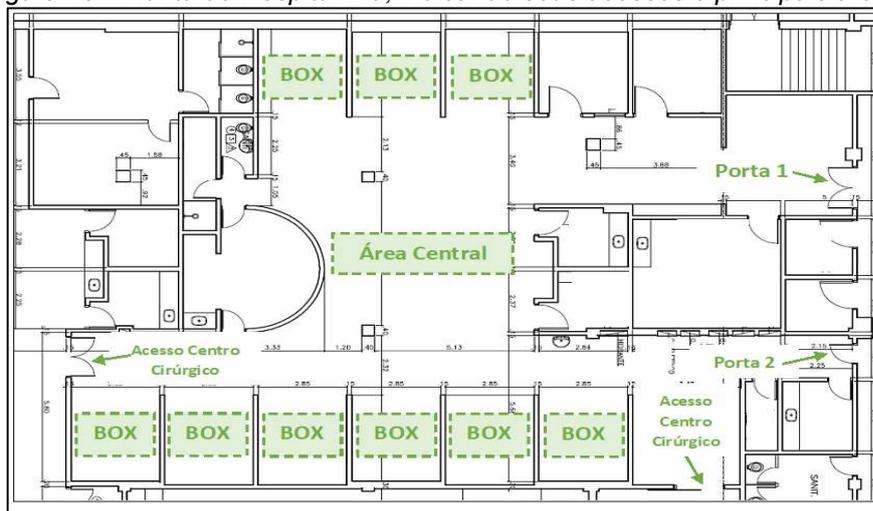
As principais deficiências encontradas na Radiologia são a alta concentração de particulados, indício de deficiências na limpeza de dutos e filtragem do ar captado e as altas concentrações de COV trazidas do ambiente externo pelo sistema de ar condicionado. Sendo assim, indica-se a realização de manutenção do sistema conforme definido na NBR15.848/2010, contemplando a limpeza de dutos e filtros e a condução de uma investigação para averiguar a fonte dos compostos orgânicos voláteis.

5.4. Hospital Dia

O Hospital Dia do HU é um setor de rápidas internações para a realização de procedimentos cirúrgicos de pequeno porte e baixa complexidade. O local permite a circulação de pacientes e acompanhantes, mas com controle de acesso e sem padronização de vestimenta. Como pode ser visto na figura 13, o Hospital Dia é composto apenas por um grande ambiente, dividido em boxes para a preparação ou recuperação dos pacientes, separados apenas por cortinas. Há duas ligações diretas à área restrita do Centro Cirúrgico, destacadas na figura 13. O setor é climatizado por equipamentos do tipo *split* e *cassete*, que não promovem a

renovação de ar, apenas a recirculação. A área está localizada na parte subterrânea do segundo pavimento, não havendo janelas, portas ou qualquer tipo de abertura para o meio externo.

Figura 13 - Planta do Hospital Dia, indicando seus acessos e principais áreas.



Fonte: Acervo da Universidade de São Paulo. Adaptado pelo autor.

Foram conduzidos ali dois dias de medição, um no inverno e outro no verão. Os pontos de medição foram posicionados na parte central do ambiente, fora de todos os boxes, de modo a não causar incômodo aos pacientes em convalescência.

5.4.1. Resultados

No Hospital-Dia foram observadas condições adequadas de conforto térmico tanto no inverno quanto no verão. Como pode-se perceber no gráfico 21, a temperatura de bulbo seco foi mantida, na maior parte do tempo, a 23,5°C tanto no inverno quanto no verão, o que corrobora a classificação unânime da temperatura como confortável pelos colaboradores do setor que responderam aos questionários. Observa-se no dia de verão uma redução na temperatura a partir das 15:00h, ocasionada por uma diminuição na ocupação, a qual também pode ser percebida através da redução da concentração de CO₂ (Gráfico 23). Também contribuindo para o conforto dos ocupantes, as velocidades do ar observadas foram baixas, não ultrapassando 0,09m/s (Gráfico 22), não tendo sido, também, relatadas nos questionários queixas de desconforto por movimentação de ar. A umidade relativa foi mantida, no dia de inverno, abaixo do intervalo recomendado pela NBR7256

(ABNT, 2021), oscilando entre 47% e 57%. Assim, 75% dos ocupantes queixaram-se de ressecamento de mucosas. No verão, porém, foram observadas umidades relativas mais altas, na faixa dos 70%. Desta forma, pode-se dizer que os resultados de conforto térmico no Hospital-Dia indicam que os sistemas de climatização e distribuição de ar são satisfatórios em manter as condições adequadas no ambiente na maior parte do tempo, fato refletido na percepção de conforto relatada pelos usuários nos questionários.

Gráfico 21 - Temperaturas de Bulbo Seco no Hospital-Dia

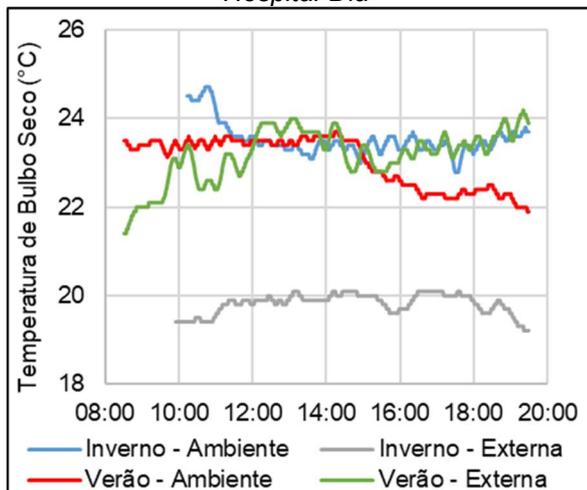
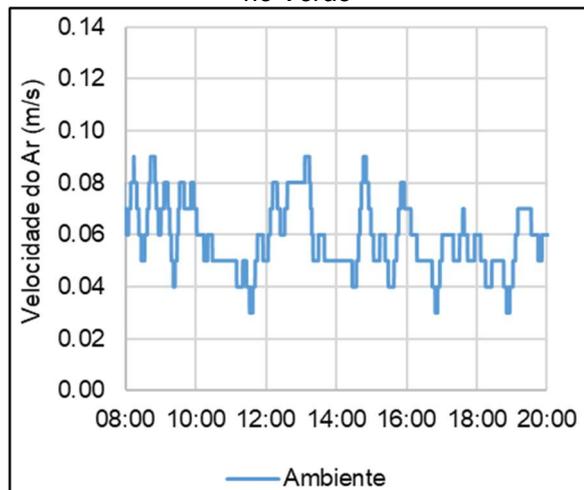


Gráfico 22 - Velocidade do Ar no Hospital-Dia no Verão



Em relação à qualidade do ar, a falta de renovação provocada pela inexistência de aberturas permanentes e pelo tipo de sistema de ar-condicionado ali presente foi notada pelos usuários que responderam aos questionários, dos quais 83,3% relataram perceber em seu dia a dia o ar “viciado” e “abafado”. Ainda que nas datas medidas não tenham sido identificadas concentrações elevadas de CO₂ no ambiente, é possível perceber no gráfico 23 que a redução da ocupação mencionada acima apenas se reflete em menor concentração de CO₂ às 16:00. Pode-se entender este atraso de aproximadamente uma hora como decorrência da baixa renovação de ar, promovida apenas pela abertura de duas portas localizadas na mesma parede e pela interligação com o Centro Cirúrgico, onde há uma antecâmara, não havendo ventilação cruzada. Nota-se, também, que quando o setor fecha, às 19:30, há significativa redução na concentração do poluente. Acrescenta-se a isso o fato de que nas datas de medição havia diversos boxes desocupados, de modo que a ocupação observada estava aquém da capacidade do setor. Levando

em consideração todos estes fatores, é possível inferir que as baixas concentrações observadas não seriam fruto de uma ventilação adequada, mas provavelmente da ocupação reduzida. Ao se observar o particulado, pode-se notar no gráfico 24 que a concentração no retorno é aderente à no insuflamento, indicando baixa eficiência do sistema de ventilação em sua remoção. Apesar disso não foram observadas altas concentrações de particulados no ambiente, as quais permaneceram, inclusive, próximas aos níveis do exterior do edifício.

Gráfico 23 - Concentração de dióxido de carbono no Hospital-Dia no Verão

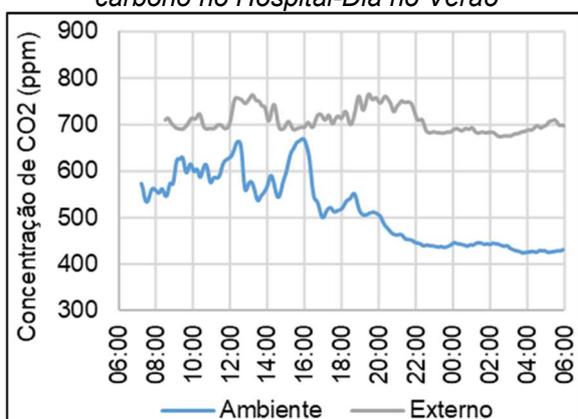
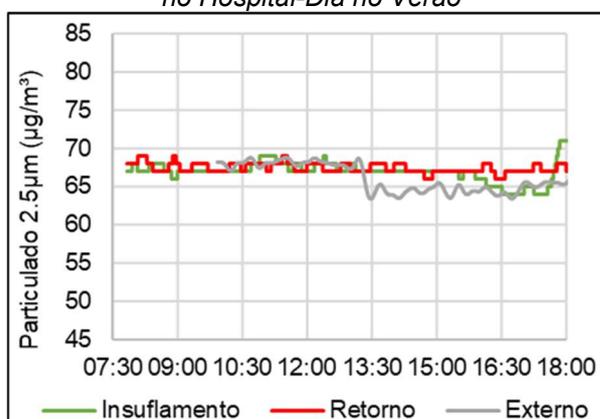


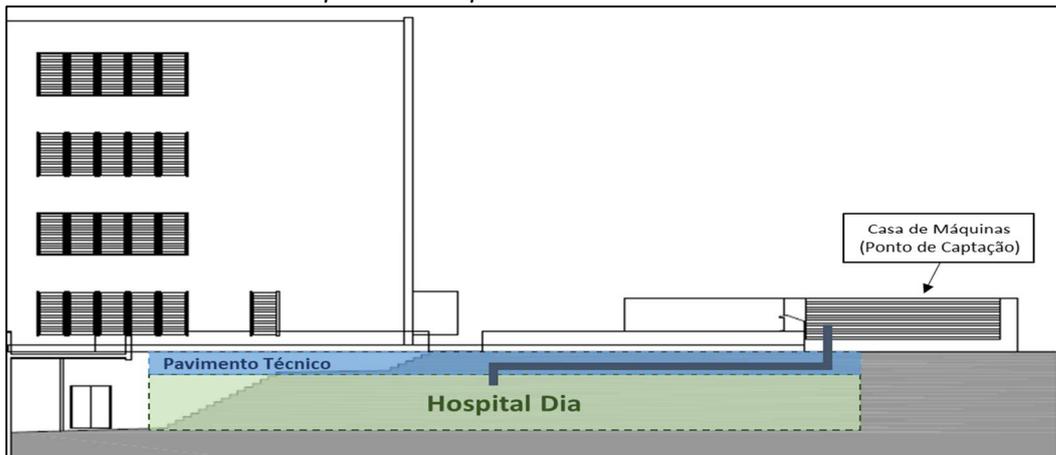
Gráfico 24 - Concentração de Particulado 2,5 μ m no Hospital-Dia no Verão



5.4.2. Proposições para Melhorias

A principal deficiência encontrada no Hospital Dia se refere à renovação de ar insuficiente; portanto propõe-se a instalação de um sistema de ventilação mecânica para promovê-la. Apesar de estar localizado na parte subterrânea do segundo pavimento, o piso técnico existente entre os segundo e terceiro pavimentos e a proximidade do Hospital Dia com a casa de máquinas permitem o encaminhamento de dutos sem grandes intervenções no edifício, conforme croqui da figura 14.

Figura 14 - Vista lateral do edifício do HU, destacando projeção do Hospital Dia, do Pavimento Técnico e a Casa de Máquinas e croqui de encaminhamento de duto de insuflamento.



Fonte: Acervo da Universidade de São Paulo. Adaptada pelo autor.

5.5. Ambulatório

O Ambulatório é um setor aberto ao público, no qual há grande circulação de pacientes. Ali não há restrições para as vestimentas ou de acesso ao setor. No Ambulatório são realizadas consultas médicas e procedimentos de baixa complexidade. O setor não é atendido por nenhum sistema de climatização ou ventilação mecânica, contando apenas com a ventilação natural. Como pode ser visto na figura 15, este é um setor extremamente compartimentado em consultórios, os quais podem ser divididos em dois principais grupos, os que estão no perímetro do edifício e possuem janelas e aqueles localizados no interior do prédio, sendo ventilados apenas pela porta de entrada, a qual permanece fechada durante as consultas. Há ainda áreas de espera e salas para pequenos procedimentos. Foram selecionados dois consultórios para o estudo, sendo um na região periférica (S49) e outro na área mais interna (S54). Os consultórios da região periférica, cujas fachadas estão voltadas para o sudoeste e noroeste, possuem janelas com abertura do tipo guilhotina, permitindo uma abertura máxima de 50%. Existem *brise-soleil* em todas as janelas. Foram conduzidas medições ao longo de quatro dias, sendo um de inverno e um de verão em cada um dos consultórios. As coletas de dados foram realizadas durante o funcionamento regular do Ambulatório, em horário comercial.

Figura 15 - Planta do Ambulatório com consultórios estudados destacados



Fonte: Acervo da Universidade de São Paulo. Adaptada pelo autor

5.5.1. Resultados

Em relação às condições térmicas dos ambientes, que são naturalmente ventilados e por isso são analisadas aqui em função da temperatura de bulbo seco, é possível notar que as temperaturas na sala com janela (S49) foram mais adequadas ao conforto térmico do que as observadas no consultório sem janela (S54) em ambas as estações. No inverno, enquanto a temperatura na sala 49 permanece no intervalo recomendado pela NBR16.401 (ABNT, 2008), ou seja, de 21°C a 23°C, o segundo consultório (sala 54) apresenta temperaturas mais elevadas, oscilando em torno de 24,5°C (Gráfico 25). Enquanto na sala com janela a maior parte dos ocupantes relatou estar em situação de conforto (66%), no consultório S54 a percepção de todos os usuários (100%) foi de ligeiro desconforto, por sentirem calor. No verão, pelo gráfico 26 nota-se que, na sala sem janela, a temperatura aumenta ao longo de toda a manhã, até que às 13:15 a temperatura é rapidamente reduzida como reflexo da desocupação da sala no horário de almoço. Às 14:15, volta do almoço, observa-se um novo aumento na temperatura, a qual

passa a diminuir com a redução da temperatura externa. No consultório com janela, porém, a condição externa mostra-se mais influente do que a ocupação, sendo observados aumentos sucessivos na temperatura interna desde o início da apuração até às 15:00, momento em que a temperatura externa começa a diminuir. Ressalta-se que apesar de se tratar de período de verão, as vestimentas características da equipe do ambulatório possuem índice de isolamento superiores aos das roupas típicas de verão previstas na norma supracitada. No consultório sem janela a umidade relativa permaneceu, tanto no inverno quanto no verão, acima do mínimo recomendado pela NBR7256 (ABNT, 2021). Já na sala com janela, a umidade relativa permaneceu no intervalo recomendado apenas no dia de verão. Em nenhuma das salas houve relato de ressecamento de mucosas por parte dos usuários, em nenhuma das estações. Apenas na sala com janela foram observadas velocidades do ar acima de 0,15m/s, a qual chega a atingir 0,8m/s, o que levou 66% dos usuários relatarem desconforto por movimentação de ar.

Gráfico 25 - Temperatura de Bulbo Seco nas salas do Ambulatório no Inverno

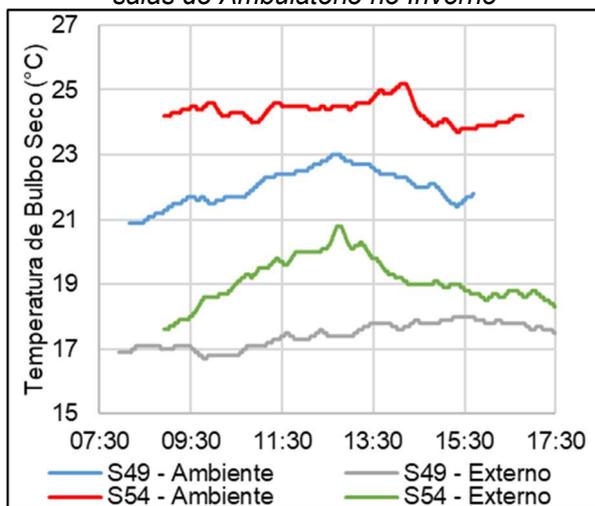
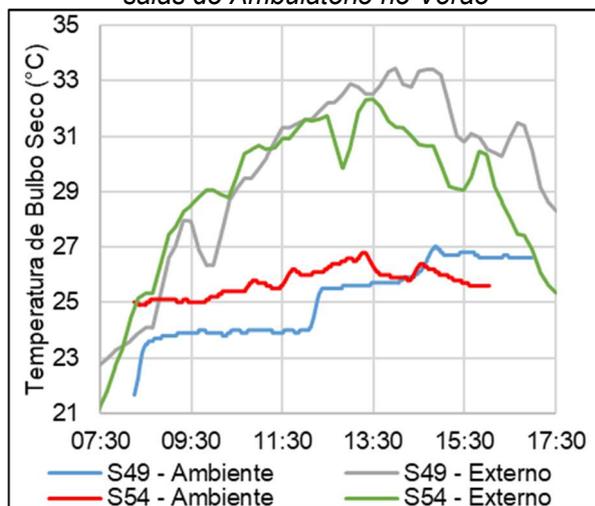


Gráfico 26 - Temperatura de Bulbo Seco nas salas do Ambulatório no Verão



Quanto à qualidade do ar interno, apesar de as concentrações de CO₂ em nenhuma das duas salas ter superado os limites recomendados pela NBR16.401 (ABNT, 2008) e NR09 (ANVISA, 2003), é possível perceber uma importante diferença no comportamento observado na sala 49, que possui janela, e na sala 54. Como se pode observar no gráfico 27, na primeira sala a concentração do gás oscila próximo a 475ppm, sem variações expressivas. No consultório sem janela, entretanto, há três picos (às 09:00, às 10:30 e às 13:45 horas) no período de

observação, nos momentos de utilização da sala, levando aproximadamente uma hora para que os níveis do poluente retornassem aos patamares vistos nos momentos de desocupação. Observaram-se concentrações de particulado nas duas salas (Gráfico 28), tais que, embora apresentassem valores próximos aos $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ sugeridos pela NR09 (ANVISA, 2003) como limite máximo, esses valores foram superiores aos medidos no exterior do edifício, com concentrações próximas a $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ nas mesmas datas, o que pode indicar que há geração interna de particulados.

Gráfico 27 - Concentração de CO_2 nas salas 49 e 54 do Ambulatório no inverno

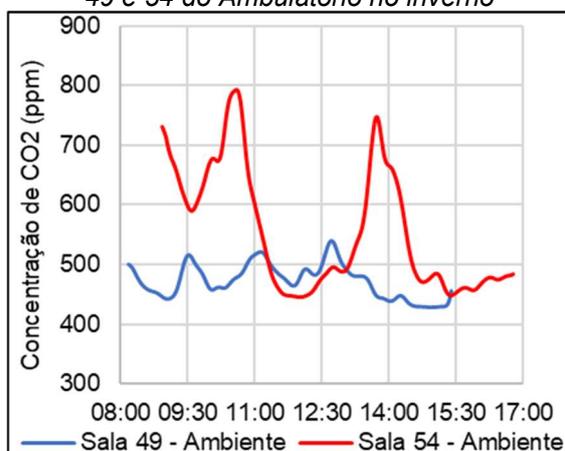
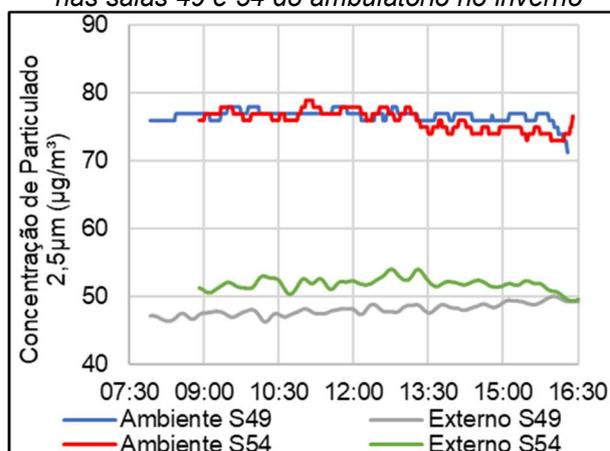


Gráfico 28 - Concentração de Particulado $2,5\mu\text{m}$ nas salas 49 e 54 do ambulatório no inverno



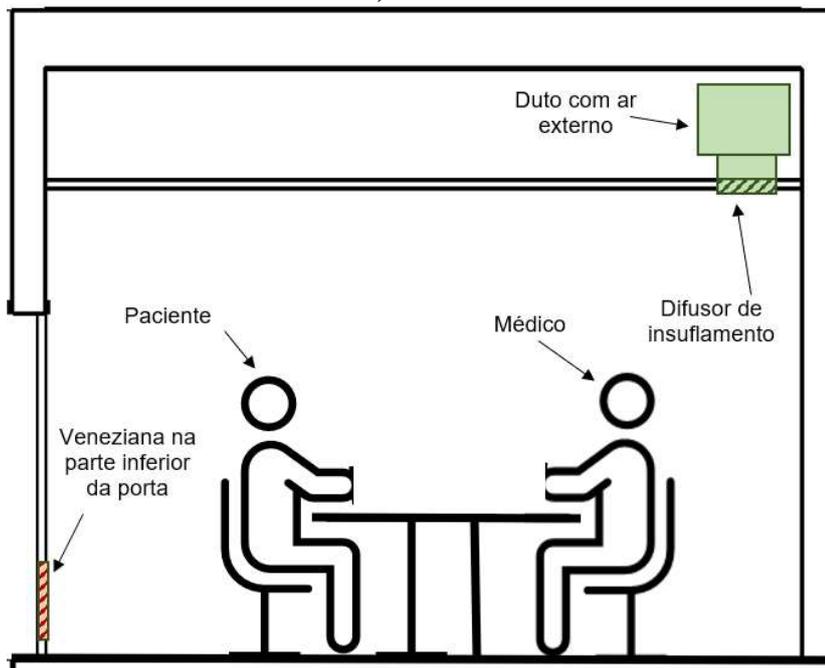
5.5.2. Proposições para Melhorias

A partir dos resultados das medições em campo pode-se verificar que o principal problema do Ambulatório, relativo à qualidade do ar e conforto térmico refere-se à insuficiência da ventilação nos consultórios sem janela, que representam a maior parte das salas do setor. Pelo layout extremamente compartimentado em consultórios, a proposição de soluções passivas para a melhoria da ventilação demandaria estudos mais aprofundados, fora do escopo deste trabalho. Desta forma sugere-se aqui a instalação de um sistema de ventilação forçada, aproveitando-se do espaço técnico no entreforro para a passagem de dutos.

Motamedi et. al. (2022) analisaram diferentes estratégias de ventilação para a prevenção da contaminação de doenças transmissíveis pelo ar, a partir do caso da COVID-19, para um ambiente bastante similar aos consultórios do Ambulatório do HU, tanto em características físicas quanto em ocupação. Ali demonstrou-se a

eficiência de uma solução de ventilação mecânica composta por um insuflamento pelo alto de uma parede com o retorno próximo ao piso em parede oposta. Buscando emular a solução proposta, adaptando-a ao caso do HU e objetivando minimizar a intervenção necessária, propõe-se a colocação do insuflamento no forro, no fundo da sala, e uma veneziana na parte inferior da porta de acesso, conforme figura 16.

Figura 16 – Esquema representativo da proposta de intervenção nos consultórios sem janela – em corte, sem escala



5.6. Centro Cirúrgico

O Centro Cirúrgico do HU é composto por dez salas de cirurgia, sendo duas modernizadas (salas I e J) e as outras oito não-modernizadas (salas A a H). As salas não-modernizadas podem ser divididas em dois grupos, de acordo com o seu layout, sendo as salas A, D, E e H de um tipo e as demais do outro. Cada sala de cirurgia pode ser acessada por dois corredores, o corredor “Limpo”, por onde entram os materiais esterilizados e a equipe cirúrgica, e o corredor “Sujo”, pelo qual saem os resíduos das cirurgias e circulam as macas com os pacientes. Há ainda um corredor de interligação entre os dois corredores, três halls do lado limpo e dois do lado sujo, além de áreas fora do interesse deste estudo especificamente, como farmácia, recuperação anestésica, conforto médico, vestiários, dentre outros. Na figura 17

luminoso sobre a mesa cirúrgica possui lâmpadas halógenas, sendo uma importante fonte de calor.

Na sala A, o ponto de medição do insuflamento ficou localizado imediatamente adjacente à grelha de insuflamento, a 2,5m do piso. O equipamento de medição do retorno foi posicionado acima da grelha de retorno, a 0,6m do piso, fora da projeção de abertura da porta ao corredor limpo. O ponto do ambiente ficou na lateral da sala, nas imediações do fluxo principal de ar, o mais próximo possível da mesa de cirurgia, a 1,2m da parede lateral e a 1,1m do piso. Os pontos de medição também estão destacados na Figura 18.

A Sala F, uma das mais utilizada do Centro Cirúrgico por sua localização central, também é do tipo não-modernizada. Ela se diferencia da sala A pelo seu layout, uma vez que a posição da mesa cirúrgica, relativamente à parede onde localizam-se o insuflamento e o retorno, é distinta (Figura 19). A posição relativa da porta de acesso ao corredor limpo também é um ponto de diferenciação entre as salas. A disposição da sala F faz com que o fluxo principal de ar, indicado na figura 19, se dissipe antes de atingir o retorno, conforme apurado durante os pré-testes. O posicionamento dos pontos de medição na Sala F é similar ao da Sala A.

Figura 18 - Esquema da sala A, indicando o fluxo principal de ar, o ponto de medição do insuflamento (em verde), do ambiente (em azul) e do retorno (em vermelho)

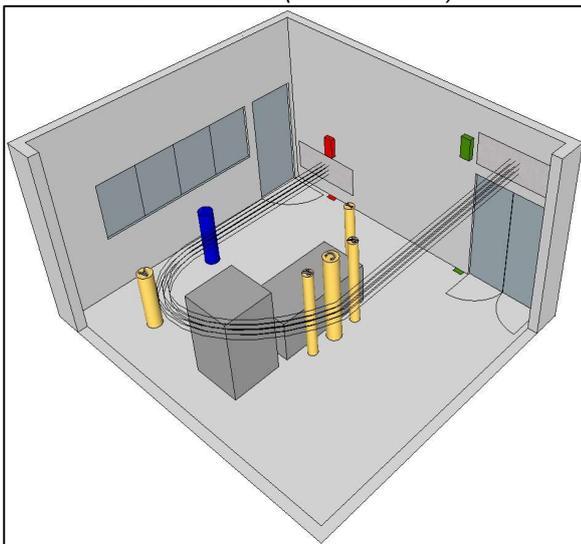
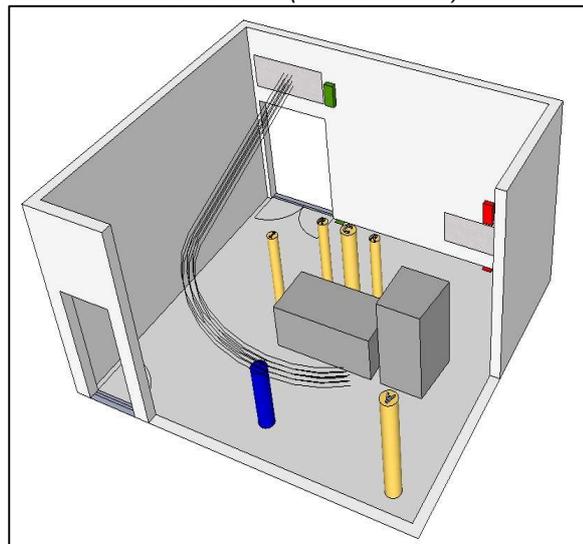


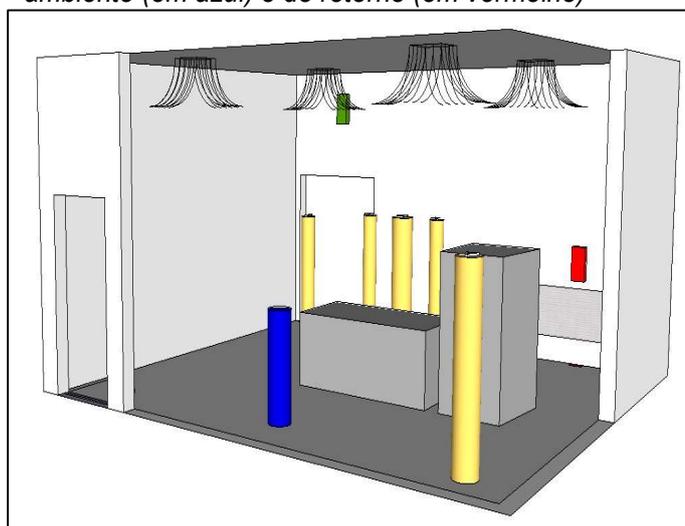
Figura 19 - Esquema da sala F, indicando o fluxo principal de ar, o ponto de medição do insuflamento (em verde), do ambiente (em azul) e do retorno (em vermelho)



A sala J, por sua vez, é do tipo modernizada, sendo muito usada para cirurgias por laparoscopia. O insuflamento é realizado por quatro difusores de quatro

vias localizados no forro e o retorno por uma grelha na parede a 0,5m do piso, não havendo assim um fluxo principal de ar na sala (Figura 20). As duas portas possuem frestas menores do que as das salas A e F, de aproximadamente 0,25cm. Nas salas I e J, o foco cirúrgico possui lâmpadas do tipo LED. Na sala J, o ponto de medição do insuflamento ficou localizado na parede acima da porta ao corredor sujo, a 2,5m do piso, sujeito ao fluxo de ar proveniente do difusor. Assim como nas demais salas, o equipamento de retorno foi posicionado acima da grelha de retorno, a 0,6m do piso. O ponto do ambiente também ficou na lateral da sala, o mais próximo possível da mesa de cirurgia, a 1,2m da parede lateral e a 1,1m do piso.

Figura 20 - Esquema da sala J, indicando o ponto de medição do insuflamento (em verde), do ambiente (em azul) e do retorno (em vermelho)



Além das três salas, foram conduzidas medições nos corredores Limpo e Sujo, e no hall de acesso às salas E, F, G e H pelo lado limpo. Não há sistema de climatização nestes ambientes. Foram coletados dados em apenas um ponto de medição, mas em três alturas (0,5m, 1,1m e 2,5m). No corredor Limpo os equipamentos foram posicionados entre os halls de acesso às salas A a D e E a H. Já no corredor Sujo e no hall de acesso às salas E a H, os pontos de medição ficaram localizados próximos às portas da Sala F.

5.6.2. Caracterização da Ocupação

A ocupação nas salas é bastante diversa, variando de acordo com o tipo da cirurgia. Ao longo das medições no centro cirúrgico foram observados

procedimentos com equipes cirúrgicas de tamanhos variados, havendo de quatro a dez integrantes simultaneamente na sala. Apesar da ocupação bastante heterogênea, pode-se identificar dois grupos de usuários, agrupados por suas atividades, vestimentas e localização na sala. As classificações de atividade e vestimenta seguem os mesmos critérios adotados para o Centro Obstétrico, nas tabelas 4 e 5. Na tabela 7 estão caracterizados os dois grupos de usuários.

Tabela 7 - Grupos de usuários nas salas de cirurgia

Grupo	Grupo I	Grupo II
Classe de Taxa Metabólica	Alta	Baixa
Classe de Vestimenta	Pesada	Leve
Exemplos de Usuários	Cirurgiões ou Residentes	Anestesiista ou circulante
Posição na Sala	Centro, próximo à mesa/cama	No entorno da sala
Sob influência direta do foco luminoso da mesa de cirurgia	Sim	Não
Sujeitos ao fluxo de ar principal	Não	Sim
Número observado de usuários	2 a 6	2 a 5

As salas possuem dois principais equipamentos: o foco cirúrgico e o equipamento de anestesia, localizado próximo à cabeça do paciente. Os equipamentos de apoio também variam de acordo com a cirurgia, tendo sido observados, por exemplo, equipamentos para radiografias, nas cirurgias ortopédicas e compressores para injeção de gases no paciente, nas laparoscópicas.

Já nos dois corredores a ocupação é composta por pessoas caminhando (atividade metabólica baixa), com baixa densidade ocupacional e baixa carga térmica por iluminação. Pequena parte dos usuários apresenta atividade metabólica média, carregando equipamentos, instrumentos ou outros insumos para as salas de cirurgia.

5.6.3. Resultados

Como foram estudadas três salas com características distintas, seus resultados estão apresentados nos subitens dedicados a seguir. Foram, também, conduzidas medições nos dois principais corredores do Centro Cirúrgico, o “Corredor Limpo” e o “Corredor Sujo” e em um hall de acesso às salas E, F, G e H. Estes ambientes não são artificialmente climatizados e possuem ocupação transitória, de

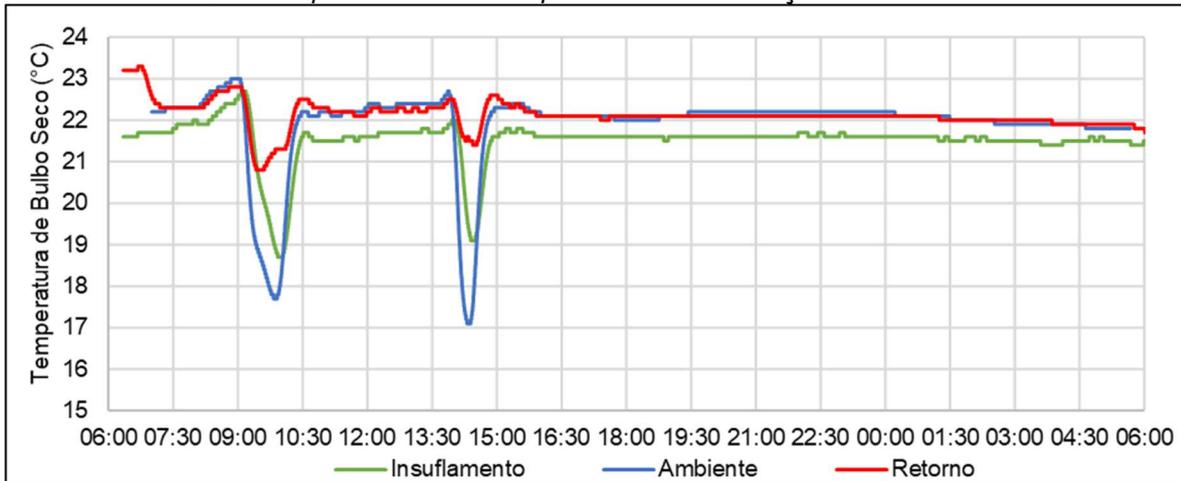
modo que, sem dados simultâneos dos eventos ocorridos dentro das salas de cirurgia, a análise de seus resultados se mostrou pouco interessante, sendo, portanto, suprimida.

5.6.3.1. Sala A – Inverno

Ao longo dos três dias de inverno monitorados na Sala A foram observadas seis cirurgias, uma em cada período (manhã e tarde) de cada dia. Nos demais momentos a sala permaneceu desocupada ou com baixa ocupação, para preparação de cirurgias ou limpezas rotineiras. Nestes períodos, com o ar-condicionado desligado, a temperatura de bulbo seco manteve-se aproximadamente constante na faixa entre 21°C e 23°C, o que pode ser considerado adequado para este tipo de ambiente.

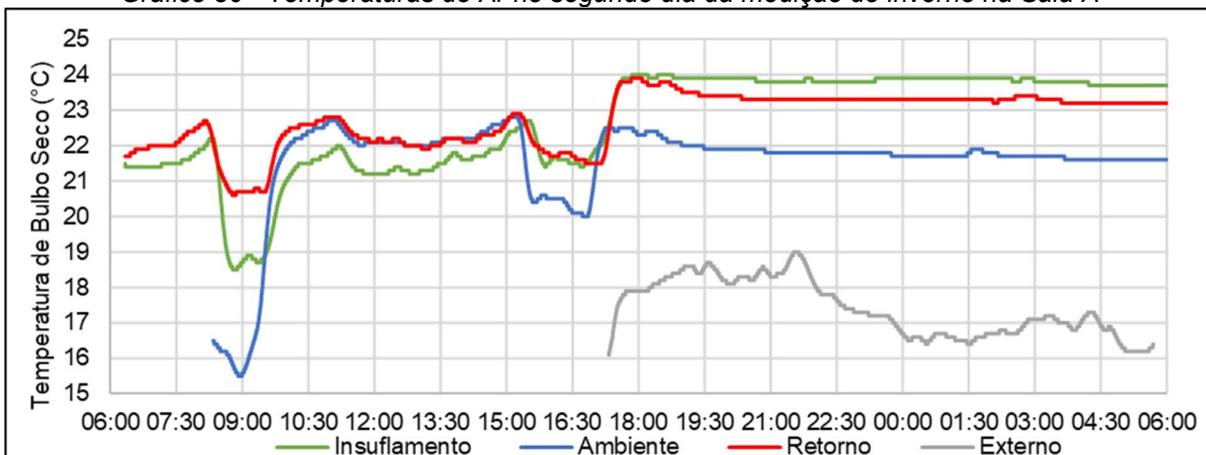
Durante as duas cirurgias realizadas no primeiro dia de medição, as condições foram bastante similares, conforme se observa no gráfico 29. Após acionado o ar-condicionado, a temperatura caiu progressivamente até o desligamento do sistema, atingindo temperaturas na faixa de 17°C a 18°C, inferiores às recomendadas pelas normas referenciadas. Apesar das baixas temperaturas observadas, as sensações térmicas apontadas nos questionários foram bastante variadas, havendo usuários sentido desde “muito frio” até “muito calor”. Ao se segregar as respostas pelos grupos de usuários, definidos na tabela 7, têm-se que aqueles que reportaram sensação de calor pertenciam ao Grupo I, enquanto aqueles que sentiram frio, ao Grupo II. Este padrão pode ser observado também nos questionários dos outros dois dias das medições de inverno na sala, indicando que a distribuição de ar na sala é inadequada para garantir o conforto térmico para o tipo de ocupação ali presente.

Gráfico 29 - Temperaturas do Ar no primeiro dia da medição de inverno na Sala A



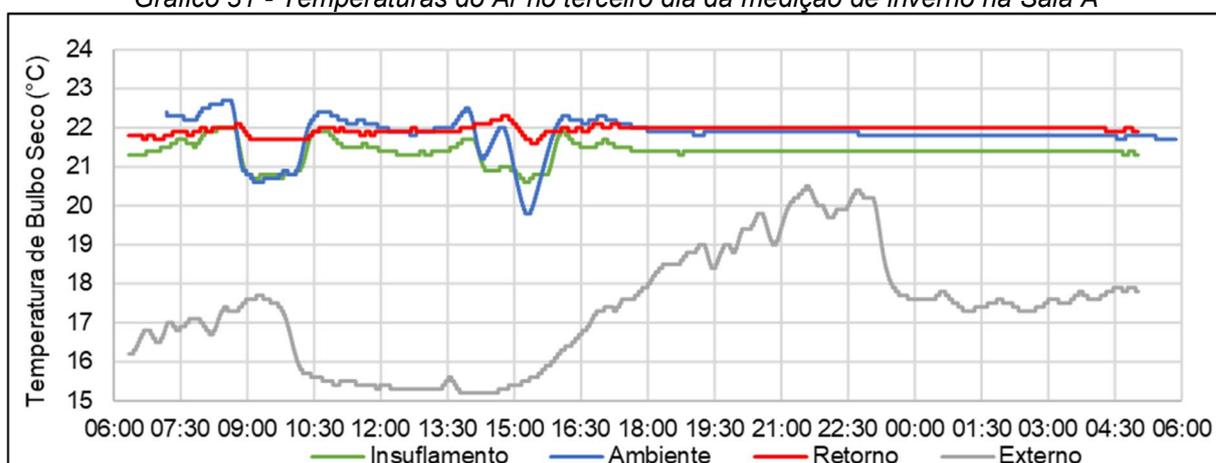
No segundo dia (Gráfico 30), as condições variaram entre as duas cirurgias realizadas. Na executada no período da manhã (por volta das 9:00h), a temperatura do ambiente atingiu 15,5°C, bastante inferior ao recomendado pela NBR7256/2021. Durante o segundo procedimento do dia (por volta das 16:00h), a temperatura ambiente ficou estabilizada em aproximadamente 20°C, dentro da faixa considerada adequada para salas de cirurgia. Os questionários respondidos referentes à primeira cirurgia apresentam padrão semelhante ao observado no primeiro dia, mas, com a temperatura do ar mais baixa do que no dia anterior, os ocupantes do Grupo I relataram se sentir confortáveis, ao invés de com calor. Os usuários do Grupo II continuaram manifestando sensação de “muito frio”. Durante a segunda cirurgia nenhum questionário foi respondido.

Gráfico 30 - Temperaturas do Ar no segundo dia da medição de inverno na Sala A



No decorrer do terceiro dia de medição, foram também realizados dois procedimentos cirúrgicos. Durante o primeiro, no período da manhã, a temperatura no ambiente ficou estabilizada em aproximadamente 21°C até o desligamento do sistema (Gráfico 31). Já no período da tarde, ao longo da segunda cirurgia, a temperatura apresentou comportamento mais inconstante, oscilando entre 20°C e 22°C. Nestas condições, as sensações térmicas relatadas variaram dentro de um intervalo de menor amplitude, entre “frio” e “confortável”, mas ainda sendo possível observar o mesmo padrão percebido nos outros dois dias, aqueles que relataram sensação de “frio” pertencem ao Grupo II, enquanto os outros ao Grupo I.

Gráfico 31 - Temperaturas do Ar no terceiro dia da medição de inverno na Sala A



Em relação à umidade na sala, pode ser observado um equilíbrio entre a desumidificação do ar ocasionada pelo resfriamento promovido pelo sistema de climatização e a umidade gerada pelos ocupantes durante a cirurgia, à exceção do primeiro dia. Nas cirurgias do primeiro dia, a umidade absoluta anterior às cirurgias era aproximadamente 10g/kg_{ar seco}, caindo para próxima a 7g/kg_{ar seco} enquanto o sistema de climatização ficou ligado e, por fim, retornando à 9g/kg_{ar seco} após o término dos procedimentos. Já nos outros dois dias a umidade absoluta no ambiente permaneceu por volta de 10g/kg_{ar seco}, conforme pode ser verificado no gráfico 32, abaixo. Em todas as cirurgias observadas a umidade absoluta permaneceu dentro da faixa indicativa de 4g/kg_{ar seco} a 10,6g/kg_{ar seco} (NBR7256/2021). Apenas os usuários pertencentes ao Grupo I queixaram-se de ressecamento de mucosas. A umidade relativa, ao longo dos três dias, oscilou entre 45% e 60%, conforme gráficos 33 a 35.

Gráfico 32 - Umidades absolutas médias nas medições de inverno na Sala A, no Ambiente

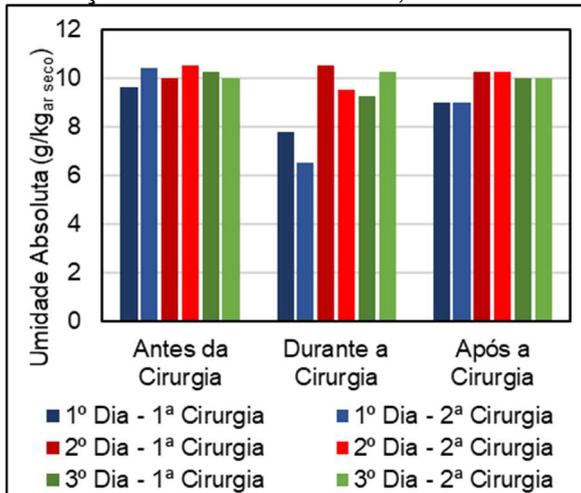


Gráfico 33 - Umidade relativa no primeiro dia de medição de inverno na Sala A

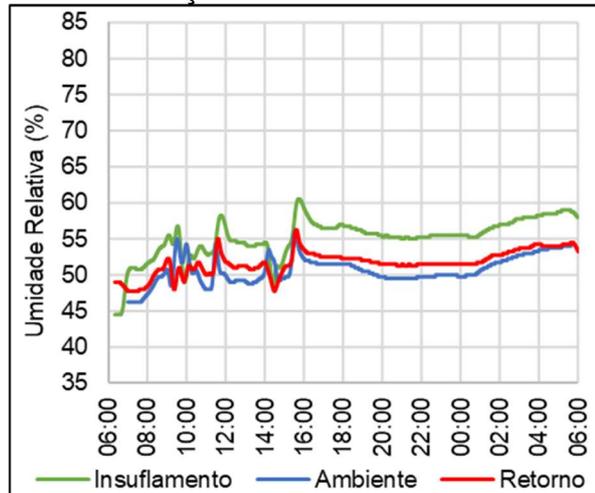


Gráfico 34 - Umidade Relativa no segundo dia de medição de inverno na Sala A

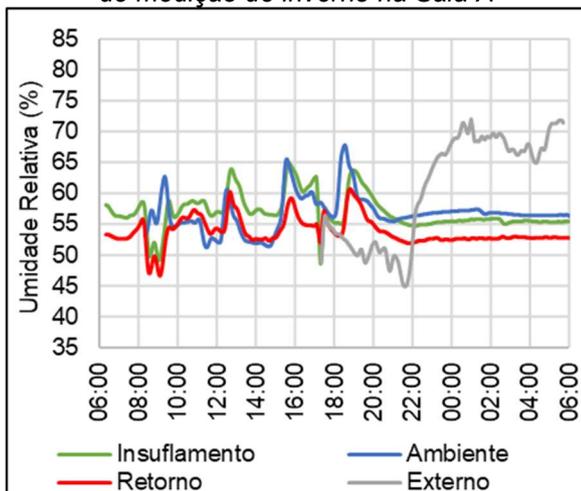
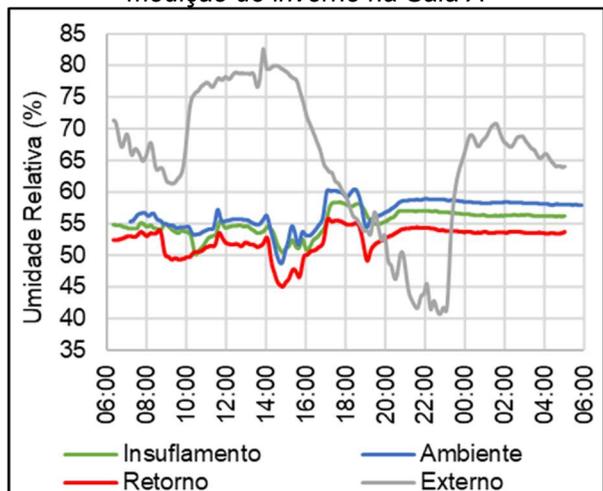


Gráfico 35 - Umidade Relativa no terceiro dia de medição de inverno na Sala A



A concentração de dióxido de carbono apresentou comportamento similar nos três dias de medição. No início das cirurgias pode ser observada uma forte elevação nos níveis de CO₂, a qual é rapidamente revertida com o acionamento do sistema de ventilação, evidenciando sua eficiência em promover a renovação de ar. Nas seis cirurgias monitoradas, o sistema de ar-condicionado foi desligado antes do término do procedimento, ocasionando intenso aumento na concentração do gás. Após o esvaziamento da sala, a concentração de CO₂ reduz de maneira lenta e gradual, levando algumas horas para que retorne aos níveis observados anteriormente às primeiras cirurgias de cada dia. No primeiro dia de medição, até o início da primeira cirurgia, a concentração do gás estava por volta de 500ppm, mas com a ocupação da sala durante o procedimento, ela chegou a atingir 1000ppm. Ao ser acionado o

sistema de ventilação, promove-se a renovação de ar e a concentração de CO₂ na sala retorna à faixa de 550ppm. Ao ser desligado o sistema antes do esvaziamento da sala, observa-se novo aumento de concentração, a qual atinge a faixa de 900ppm, como é apresentado no gráfico 36. Estas tendências podem ser observadas nas seis cirurgias do período (Gráficos 36, 37 e 38).

Gráfico 36 - Concentrações de CO₂ no primeiro dia de medição de inverno na Sala A

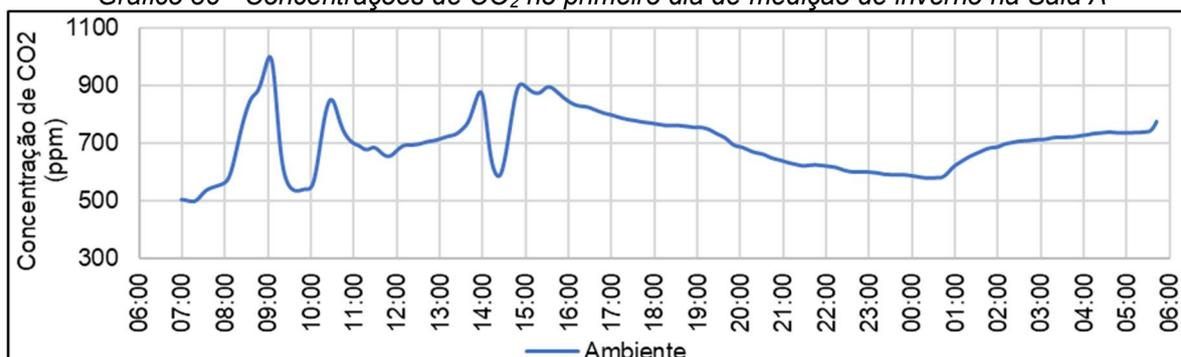


Gráfico 37 - Concentrações de CO₂ no segundo dia de medição de inverno na Sala A

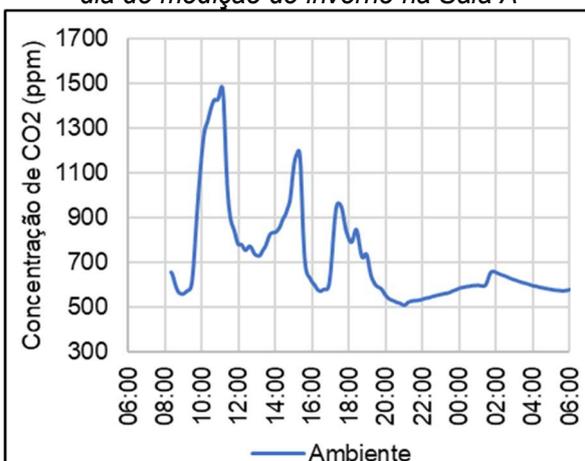
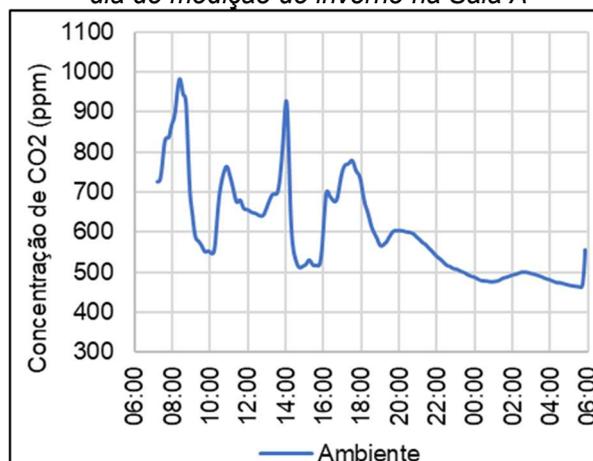


Gráfico 38 - Concentrações de CO₂ no terceiro dia de medição de inverno na Sala A



Conforme pode ser observado nos gráficos 39, 41 e 43, a concentração de monóxido de carbono, ao longo dos três dias de medição de inverno na sala A, apresentou comportamento semelhante ao visto para o dióxido de carbono. No início dos procedimentos cirúrgicos elevou-se significativamente, retornando aos níveis iniciais com o acionamento do sistema de ventilação e voltando a patamares elevados com o desligamento prematuro do sistema de ventilação. Estes resultados corroboram a indicação de suficiência da renovação de ar promovida pelo sistema, mas ineficiência em sua operação. Assim como verificado no Centro Obstétrico, a concentração de compostos orgânicos voláteis (Gráficos 40, 42 e 44) manteve-se,

durante quase todo o período, acima do limite máximo da escala de medição dos sensores utilizados (2000ppb).

Gráfico 39 - Concentrações de CO no primeiro dia de medição de inverno na Sala A



Gráfico 40 - Concentrações de COV no primeiro dia de medição de inverno na Sala A



Gráfico 41 - Concentrações de CO no segundo dia de medição de inverno na Sala A



Gráfico 42 - Concentrações de COV no segundo dia de medição de inverno na Sala A

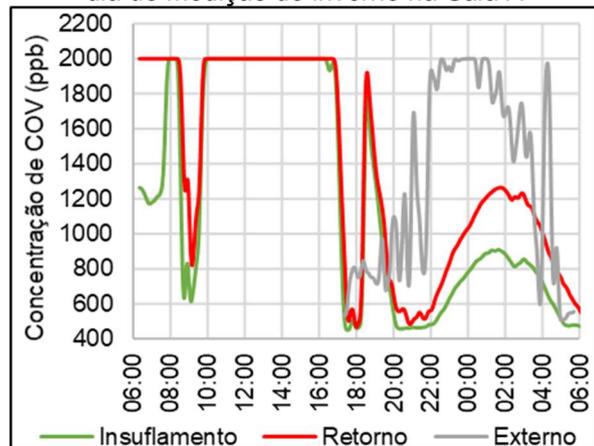


Gráfico 43 - Concentrações de CO no terceiro dia de medição de inverno na Sala A

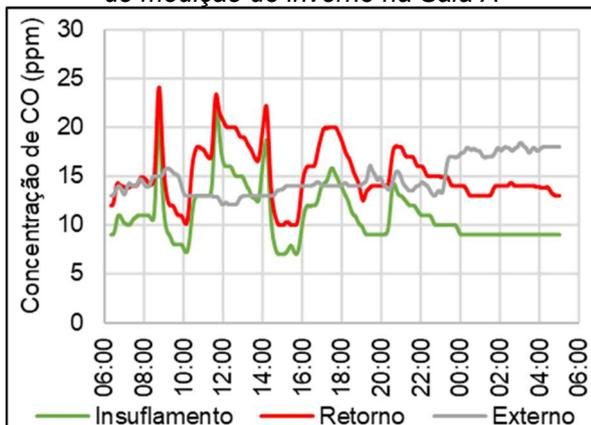


Gráfico 44 - Concentrações de COV no terceiro dia de medição de inverno na Sala A



Também pode ser percebido um padrão de comportamento nas concentrações de particulados $2.5\mu\text{m}$ (Gráfico 45, 46 e 47). No início dos procedimentos, porém antes de ser acionado o sistema de ventilação, nas seis cirurgias do período, pode-se observar um aumento das concentrações do particulado, medidos tanto no insuflamento quanto no retorno. Ao ser acionado, o sistema de ventilação retira parte deste particulado da sala. Pelo indicador IERP, apresentado no gráfico 48, percebe-se que o sistema é capaz de retirar particulado do ambiente, com IERP médio de 107,9%. Pelo indicador IEF, porém, são evidenciadas deficiências na limpeza de dutos e manutenção de filtros fazem com que haja mais particulado no ponto de insuflamento do que no ar externo, resultando em um IEF médio de 79%.

Gráfico 45 - Particulados no primeiro dia de medição de inverno da Sala A

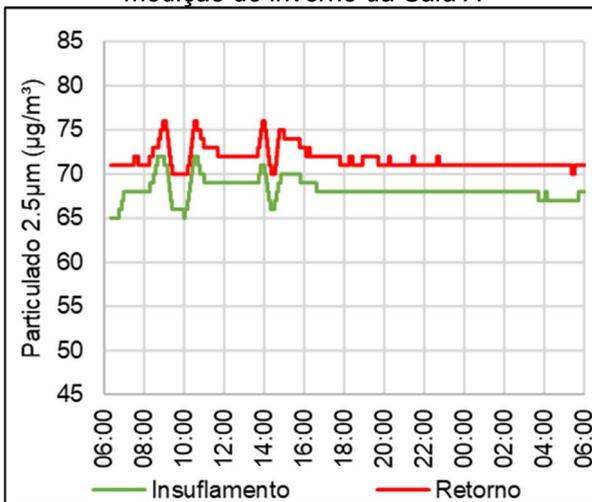


Gráfico 46 - Particulados no segundo dia de medição de inverno da Sala A

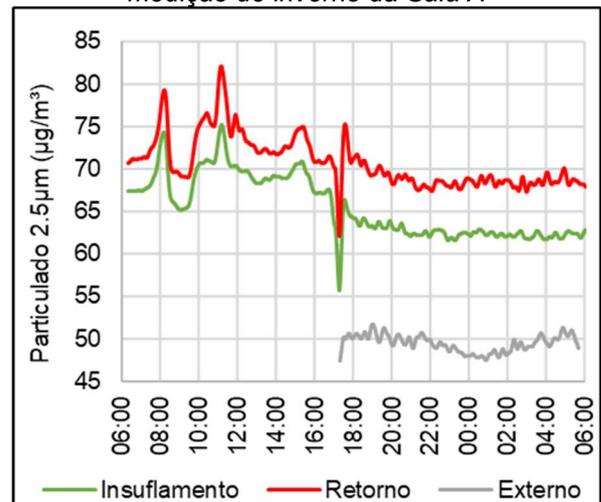
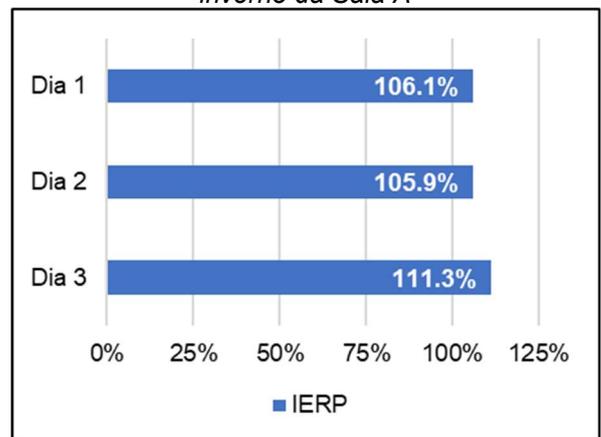


Gráfico 47 - Particulados no terceiro dia de medição de inverno da Sala A



Gráfico 48 - Indicador IERP para as medições de inverno da Sala A



Os usuários, majoritariamente, relataram nos questionários perceber o ar na sala em piores condições do que no exterior do edifício (55,7% das classificações), havendo apontamentos de “ar viciado”, percepção de odores e presença de partículas em suspensão. Os gráficos 49 e 50 resumem as percepções dos usuários em relação à qualidade do ar ao longo das medições de inverno na Sala A.

Gráfico 49 - Percepções dos usuários acerca da Qualidade do Ar Interior nas medições de inverno da Sala A

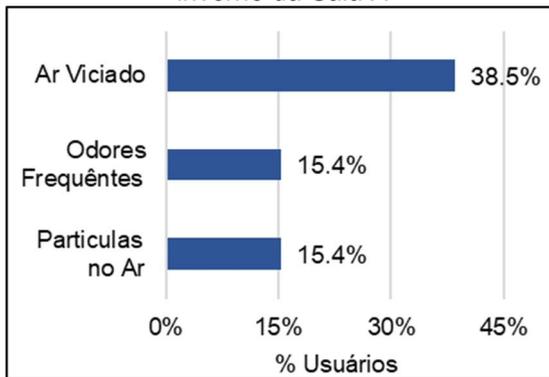
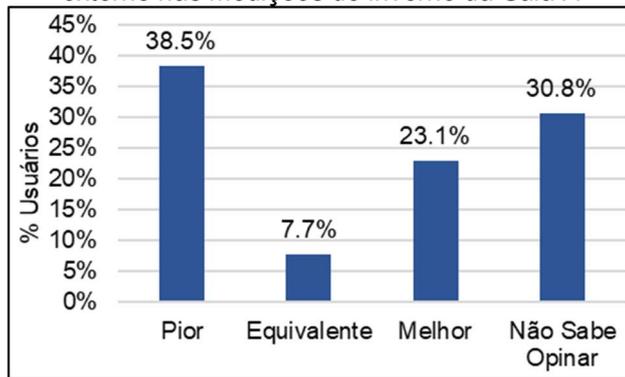


Gráfico 50 - Percepção dos usuários acerca da Qualidade do Ar Interior, relativamente ao ambiente externo nas medições de inverno da Sala A



5.6.3.2. Sala A – Verão

No verão também foram monitorados três dias na Sala A. Foi possível observar a realização de apenas uma cirurgia no primeiro dia de medição, no período da manhã, e duas nos outros dois dias, uma no período da manhã e outra no da tarde de cada um deles. Durante o segundo procedimento do segundo dia o sistema de climatização não foi acionado. Nos demais momentos, com a sala desocupada, a temperatura de bulbo seco permaneceu em aproximadamente 23°C.

Na cirurgia realizada no primeiro dia, pode-se perceber uma elevação da temperatura no início da cirurgia, a temperatura do ar na sala se eleva até o momento do acionamento do sistema de climatização, o qual a manteve estabilizada entre 21°C e 22°C, considerada adequada (Gráfico 51). O mesmo ocorreu para a primeira cirurgia do segundo dia (Gráfico 52) e para as duas conduzidas no terceiro dia (Gráfico 53). Já na segunda cirurgia do segundo dia, como o ar-condicionado não foi acionado, foi possível observar um pequeno aumento na temperatura do ar no ambiente, a qual se aproxima de 24°C, que é limite superior recomendado para este tipo de ambiente.

Assim como no inverno, foram relatadas sensações térmicas bastante distintas entre os usuários, havendo relatos desde “muito frio” a “muito calor”. Ao segregar pelos grupos de usuários, obtém-se que os ocupantes do Grupo II relataram sentir frio enquanto os do Grupo I, calor ou sensação de conforto (Gráfico 54).

Gráfico 51 - Temperatura de bulbo seco no primeiro dia de medição de verão da Sala A

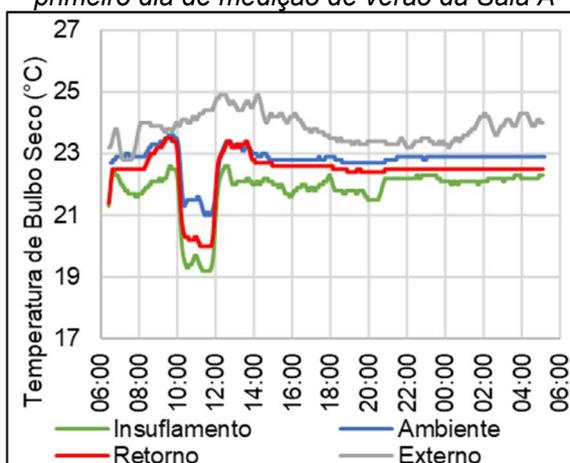


Gráfico 52 - Temperatura de bulbo seco no segundo dia de medição de verão da Sala A

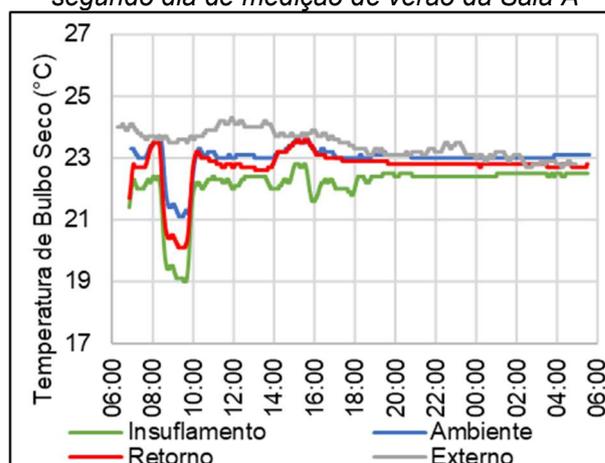


Gráfico 53 - Temperatura de bulbo seco no terceiro dia de medição de verão da Sala A

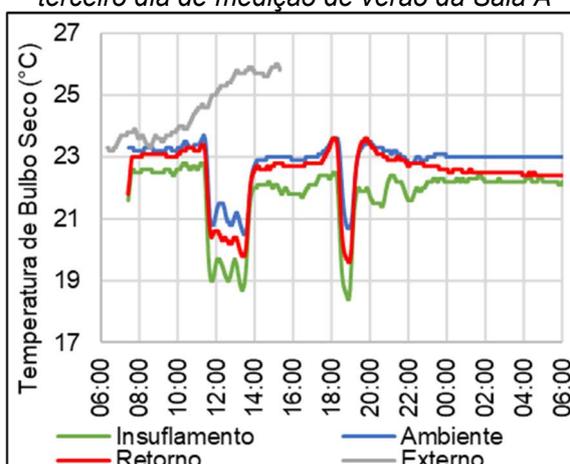
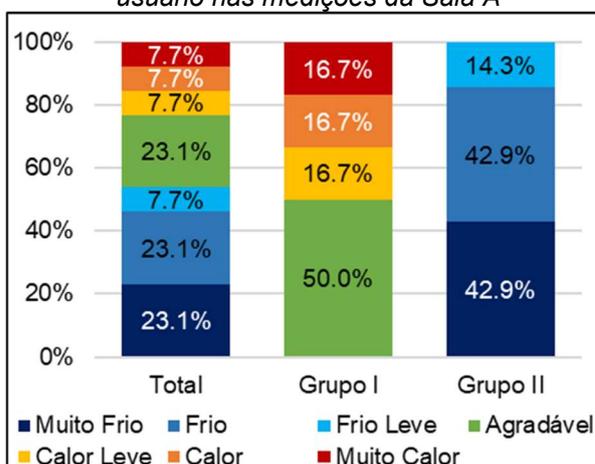


Gráfico 54 - Sensação térmica por grupo de usuário nas medições da Sala A



A velocidade do ar, com o sistema de ventilação desligado, permanece abaixo dos 0,15m/s recomendados, mesmo com a ocorrência do procedimento cirúrgico no segundo dia. Quando o sistema de ventilação é acionado, porém, são atingidas velocidades de até 0,45m/s, no primeiro dia de medição (Gráfico 55), 0,30m/s no segundo dia (Gráfico 56) e 0,35m/s no terceiro (Gráfico 57). Uma vez que a temperatura da sala não se encontrava acima do recomendado para o ambiente

nestes momentos, estas velocidades não se enquadram como compensatórias de temperaturas elevadas, causando o desconforto relatado pelos usuários do Grupo II (Gráfico 58).

Gráfico 55 - Velocidade do ar no primeiro dia de medição de verão na sala A

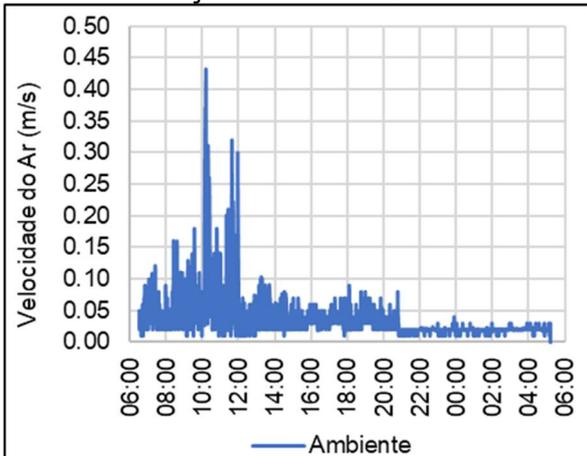


Gráfico 56 - Velocidade do ar no segundo dia de medição de verão na Sala A

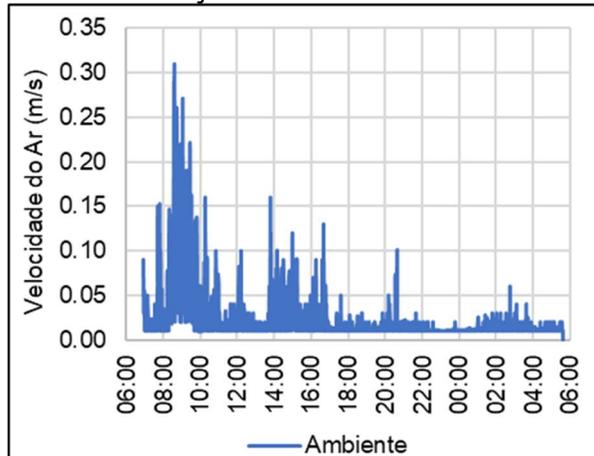


Gráfico 57 - Velocidade do ar no terceiro dia de medição de verão da Sala A

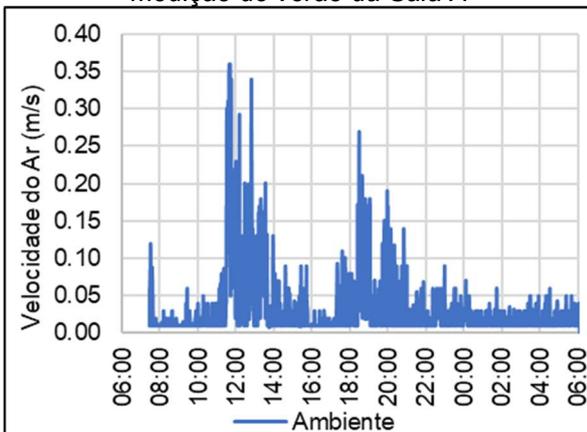
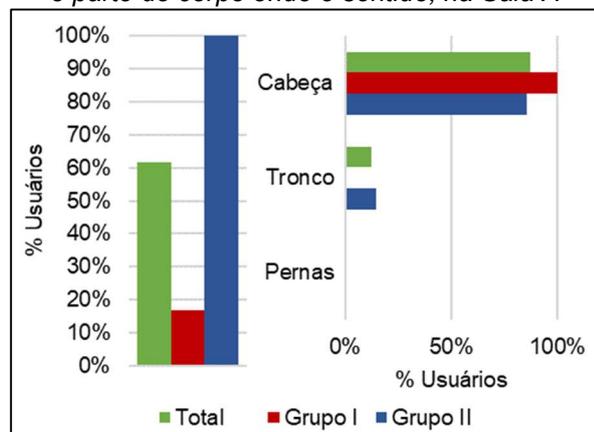


Gráfico 58 - Desconforto por movimentação de ar e parte do corpo onde é sentido, na Sala A



A umidade relativa na sala permaneceu, ao longo dos três dias, majoritariamente acima de 60% (Gráficos 59 a 61), conforme recomendado pela NBR7256/2021. Foram observadas pequenas oscilações na umidade, não significativas dada a precisão dos equipamentos utilizados. Observando a umidade absoluta (Gráfico 62) é possível perceber que ao longo dos procedimentos realizados com o ar-condicionado ligado houve desumidificação do ar superior à produção de vapor pelos ocupantes, levando à queda da umidade absoluta nas quatro ocasiões analisadas. Já na cirurgia realizada sem o sistema de climatização em operação (segunda cirurgia do segundo dia) houve ganho de umidade devido à

ocupação da sala. Apesar disso, exceto na última cirurgia do terceiro dia, a umidade absoluta ficou acima do máximo recomendado pela NBR7256/2021, de 10,6g/kg_{ar seco}.

Gráfico 59 - Umidade relativa no primeiro dia de medição de verão na Sala A

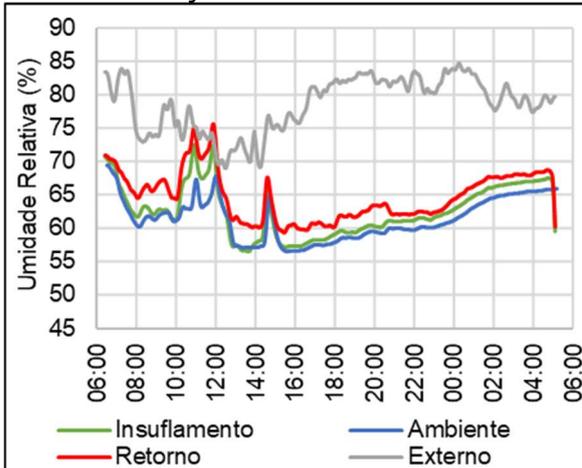


Gráfico 60 - Umidade relativa no segundo dia de medição de verão na Sala A

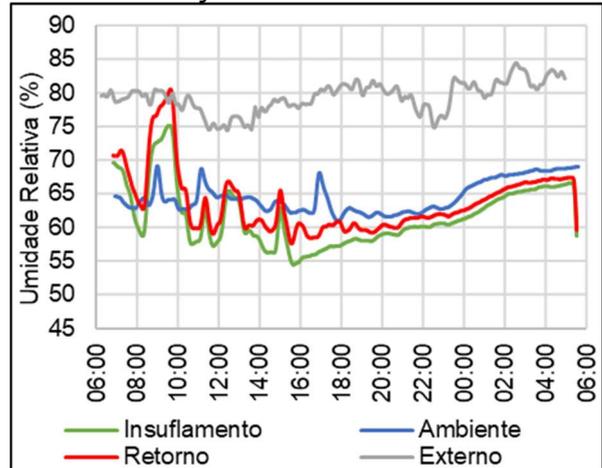


Gráfico 61 - Umidade relativa no terceiro dia de medição de verão na Sala A

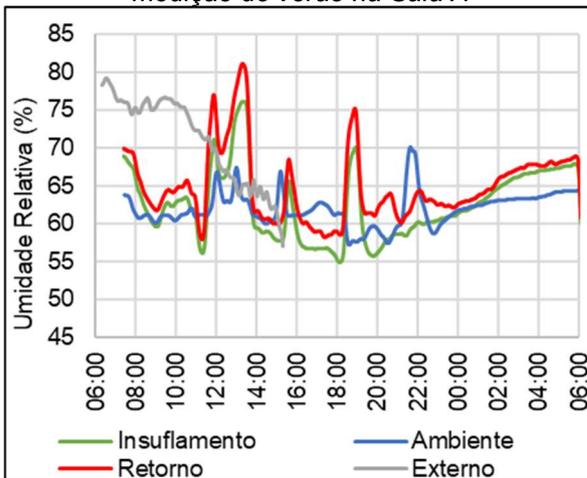
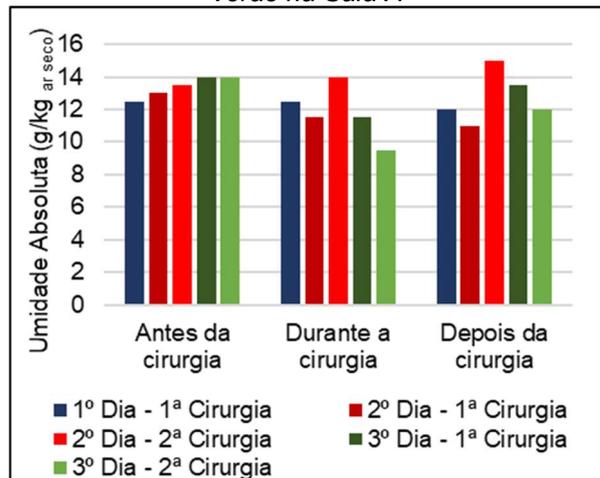


Gráfico 62 - Umidade absoluta nas medições de verão na Sala A



A concentração de dióxido de carbono, nos momentos sem cirurgia, permaneceu por volta de 700ppm, taxa muito próxima à encontrada no exterior do edifício. Durante os procedimentos cirúrgicos, antes de ser acionado o sistema de ventilação, a concentração do gás aumenta, superando em duas das quatro cirurgias observadas, o limite estabelecido pela ANVISA (2002) de 1000ppm (Gráficos 63, 64 e 65). Após o acionamento do sistema de ventilação a concentração de CO₂ no ambiente retorna ao nível observado no exterior do edifício, mais uma vez indicando suficiência da renovação de ar promovida pelo sistema de ventilação. Nestes quatro procedimentos monitorados, o ar-condicionado foi desligado ainda no

decorrer da cirurgia, observando-se um novo aumento da concentração do poluente. Na cirurgia realizada com o sistema desligado (dia 2, segunda cirurgia) observou-se elevação constante da concentração do gás até o final do procedimento, indicando que a ventilação promovida apenas pelas aberturas de portas é insuficiente.

Gráfico 63 - Concentração de dióxido de carbono no primeiro dia de medição de verão da Sala A

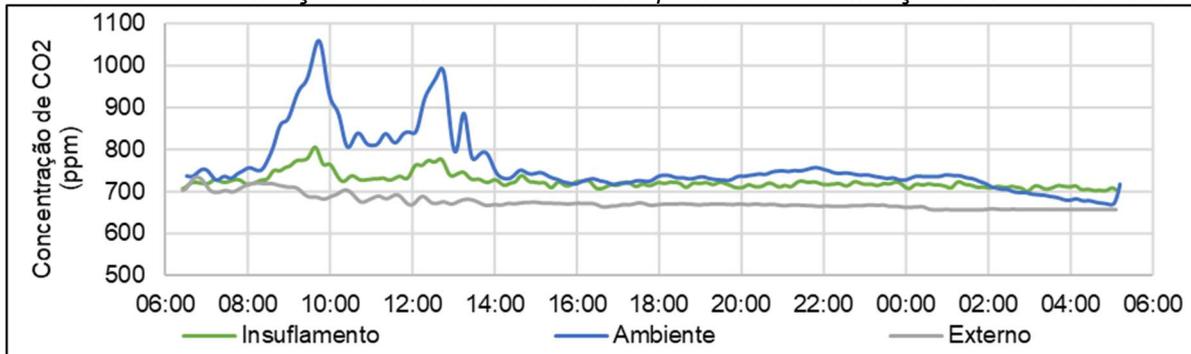


Gráfico 64 - Concentração de dióxido de carbono no segundo dia de medição de verão na Sala A

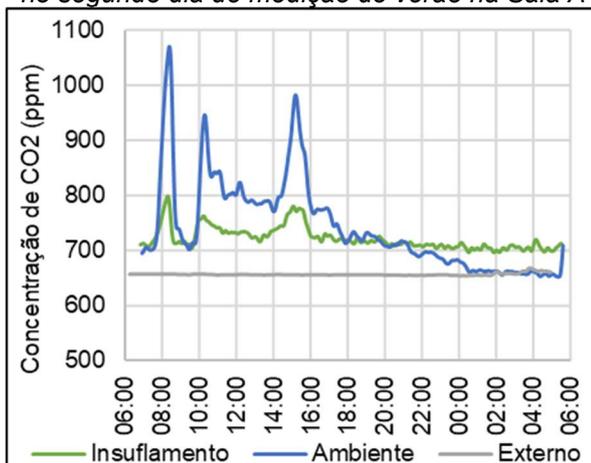
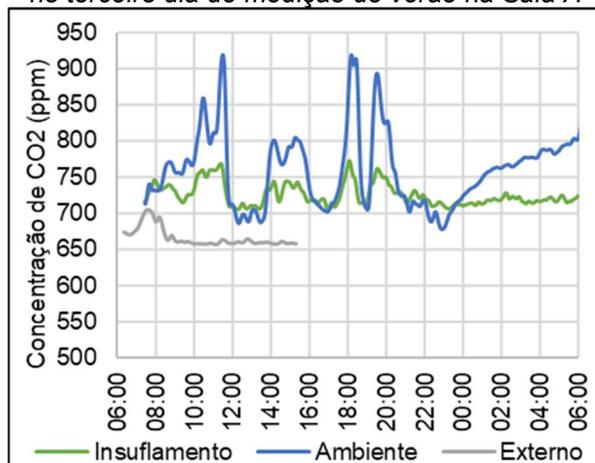


Gráfico 65 - Concentração de dióxido de carbono no terceiro dia de medição de verão na Sala A



Em relação ao particulado $2.5\mu\text{m}$, suas concentrações se mantiveram praticamente constantes ao longo do período de três dias, apresentando pequenas reduções com o acionamento do sistema de ventilação e leves aumentos com a ocupação da sala (Gráficos 66, 67 e 68). No ponto Insuflamento ela oscila próxima aos $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, no Retorno próxima aos $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ e no exterior do edifício $35\mu\text{g}/\text{m}^3$. É possível observar que, mesmo com o sistema de ventilação acionado, as concentrações no ponto do insuflamento são significativamente superiores às no ponto externo, sugerindo deficiências na manutenção de filtros e dutos. A concentração no ponto do retorno é superior à no insuflamento ao longo de todo o

período, indicando haver retirada do particulado do ambiente pelo sistema. Os indicadores IERP e IEF estão apresentados no gráfico 69.

Gráfico 66 - Particulados 2.5 μ m no primeiro dia de medição de verão na Sala A

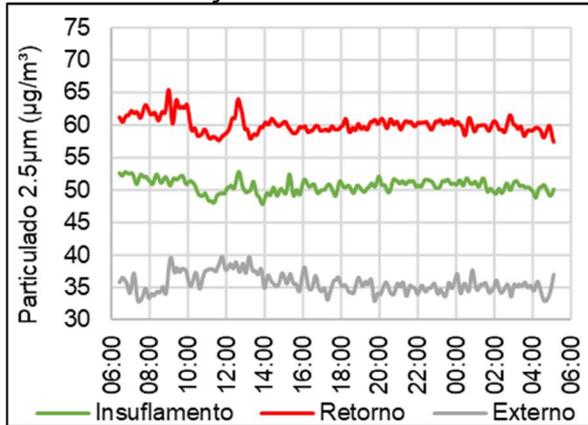


Gráfico 67 - Particulado 2.5 μ m no segundo dia de medição de verão na Sala A



Gráfico 68 - Particulado 2.5 μ m no terceiro dia de medição de verão na Sala A

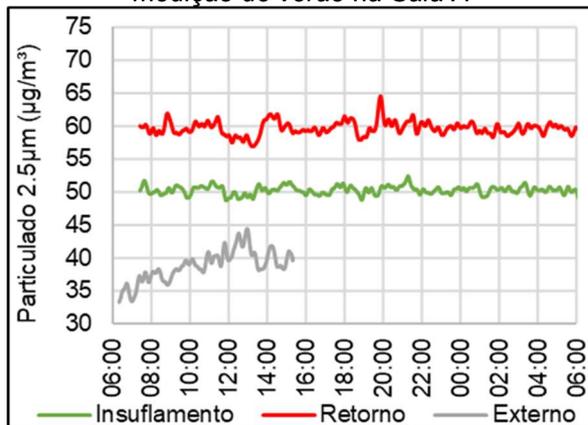
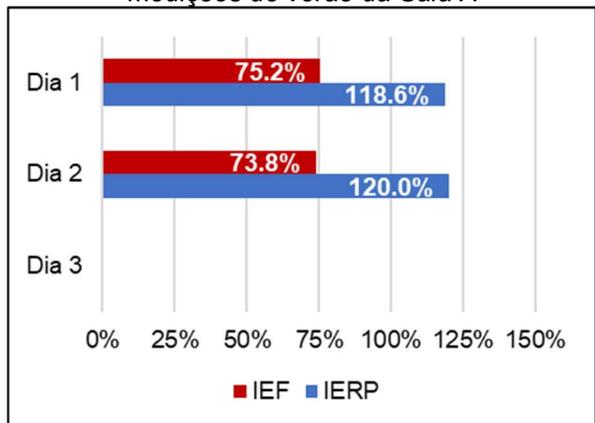


Gráfico 69 - Indicadores IERP e IEF para as medições de verão da Sala A



Vale ressaltar que as concentrações do particulado observadas no verão são inferiores às observadas no inverno em todos os pontos de medição, inclusive no externo. Esta diferença pode estar relacionada à precipitação nos períodos, significativamente inferior no período de inverno. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018) a precipitação total média mensal para os meses em que se realizaram as medições de inverno foi de 37mm, enquanto nos meses das medições de verão atingiu 133,13mm. Estes dados foram coletados na Estação Meteorológica 83781, localizada no bairro de Santana, na cidade de São Paulo.

5.6.3.3. Sala F – Inverno

Durante as medições de inverno na Sala F foram observadas cinco cirurgias, sendo duas em cada um dos dois primeiros dias e apenas uma no terceiro dia. O sistema de ar-condicionado permaneceu ligado em três destas ocasiões: nas duas cirurgias do primeiro dia de medição e na cirurgia do terceiro dia. As duas cirurgias do segundo dia foram realizadas com o ar-condicionado desligado.

A temperatura de bulbo seco, com o sistema de climatização desligado e a sala desocupada, permaneceu estável próxima ao limite máximo recomendado, por volta de 24°C, mesmo com a temperatura externa variando entre 16°C e 21°C no período. Nos momentos em que o sistema de climatização é acionado no primeiro dia (Gráfico 70), a temperatura cai, atingindo a faixa dos 23°C, no intervalo recomendado. Vale ressaltar que em nenhuma das três ocasiões em que o ar-condicionado é acionado neste dia há a estabilização da temperatura, sendo observada sua progressiva redução até o desligamento do sistema. No segundo dia de medição, embora tenham sido executados dois procedimentos cirúrgicos, o sistema de climatização não foi acionado. Nestas ocasiões foram observadas leves elevações da temperatura na sala, mas suficientes para ultrapassar o limite máximo recomendado (Gráfico 71). Já no terceiro dia, quando ar-condicionado foi ligado durante uma cirurgia de maior porte, o ar do ambiente foi resfriado até atingir a temperatura de 24°C, na qual se estabilizou (Gráfico 72). Como pode-se verificar no gráfico 73, todos os usuários do Grupo II que responderam aos questionários relataram sentir-se desconfortáveis, com “muito frio”. Não foram obtidas respostas de usuários pertencentes ao Grupo I.

Gráfico 70 - Temperaturas de bulbo seco no primeiro dia de medição de inverno da Sala F

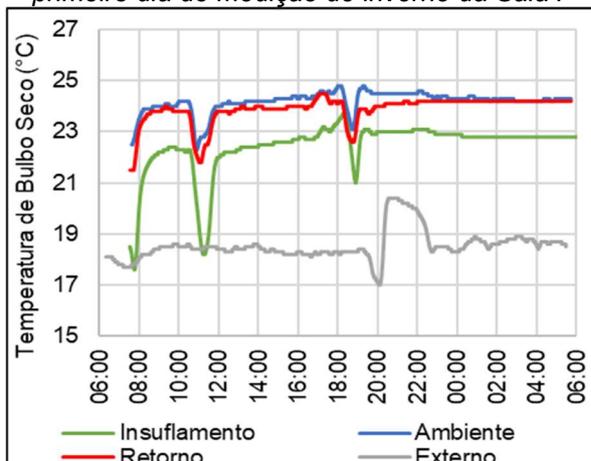


Gráfico 71 - Temperaturas de bulbo seco no segundo dia de medição de inverno da Sala F

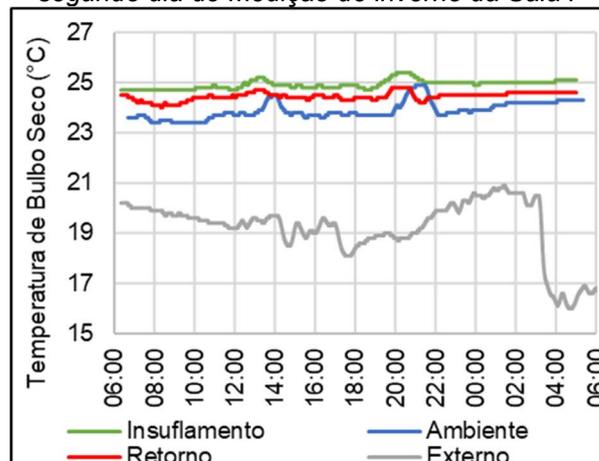


Gráfico 72 - Temperaturas de bulbo seco no terceiro dia de medição de inverno da Sala F

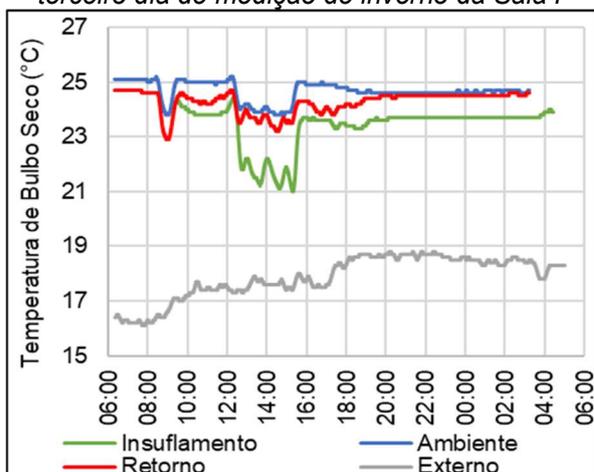
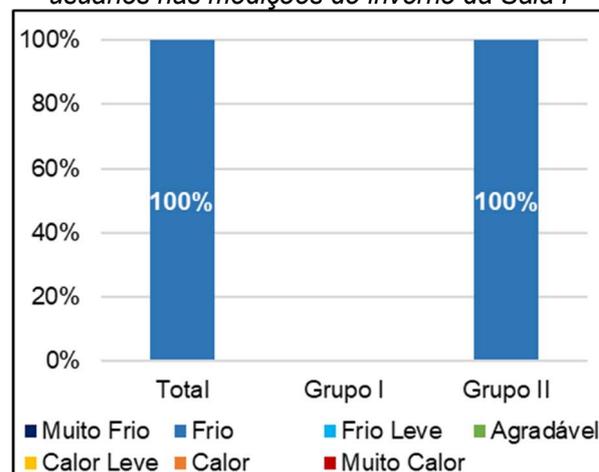


Gráfico 73 - Sensação Térmica relatada pelos usuários nas medições de inverno da Sala F



Com o sistema de climatização desligado, a umidade relativa permaneceu abaixo do intervalo recomendado em Norma, de 45% a 55%, ao longo dos três dias, conforme gráficos 74, 75 e 76. Nos momentos em que o ar-condicionado permaneceu ligado, porém, a umidade relativa se mostrou dentro do que se recomenda para o tipo de ambiente, por volta de 65%. Analisando a umidade absoluta (Gráfico 77) foi observada desumidificação do ar pelo sistema de climatização nas cirurgias do primeiro dia. Na primeira cirurgia do segundo dia, durante a qual o ar-condicionado não foi ligado, observou-se um ganho de umidade na sala, ocasionado pela ocupação, suficiente para superar os $10,6\text{g}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ recomendados. Ao longo da cirurgia realizada no terceiro dia, de maior porte, observou-se que a desumidificação promovida pelo sistema de climatização foi compensada pelo ganho de umidade provocado pela ocupação, verificando-se um

equilíbrio da umidade absoluta no período, em patamar ligeiramente superior ao que se recomenda na NBR7256/2021. Não foram apresentadas queixas pelos ocupantes relacionadas à ressecamento de mucosas.

Gráfico 74 - Umidades Relativas no primeiro dia de medição de inverno da Sala F

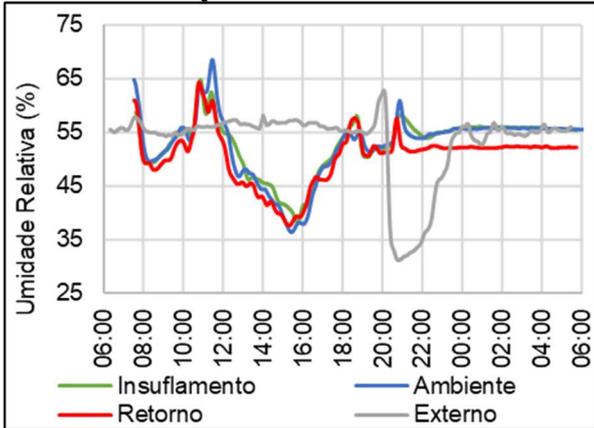


Gráfico 75 - Umidades Relativas no segundo dia de medição de inverno da Sala F

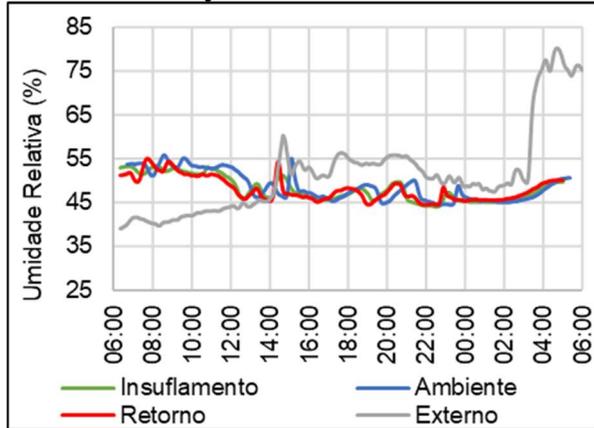


Gráfico 76 - Umidades Relativas no terceiro dia de medição de inverno da Sala F

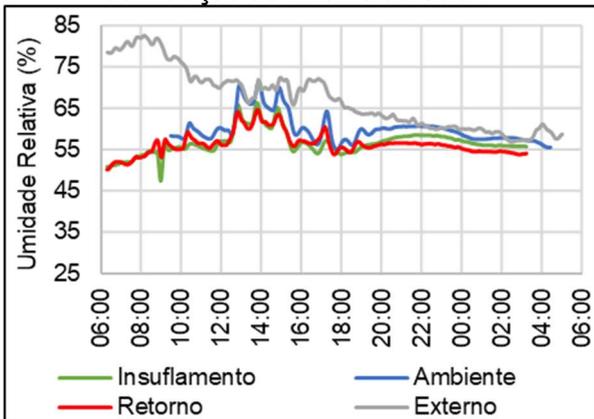
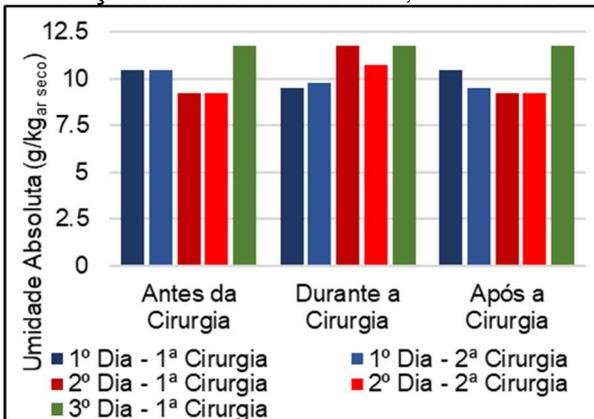


Gráfico 77 - Umidade absoluta média, nas medições de inverno da Sala F, no Ambiente



Em relação à qualidade do ar, a concentração de CO₂ ultrapassou o limite máximo previsto na resolução 9^a da ANVISA apenas em uma ocasião ao longo destes três dias de monitoramento - durante a segunda cirurgia do segundo dia - atingindo 1100ppm (Gráfico 80). Lembra-se que durante esta cirurgia o sistema de ventilação não foi acionado. Nas cirurgias dos outros dois dias observa-se um comportamento similar ao verificado na Sala A. A cirurgia é iniciada sem o sistema estar ligado, ocasionando aumentos da concentração do poluente. Quando acionada a ventilação, têm-se uma rápida redução da concentração do gás, indicando suficiência da renovação de ar promovida pelo sistema (Gráficos 78, 80 e 82). O

mesmo padrão pode ser percebido nos resultados das concentrações de monóxido de carbono (Gráficos 79, 81 e 83).

Gráfico 78 - Concentração de CO₂ no primeiro dia de medição de inverno da Sala F

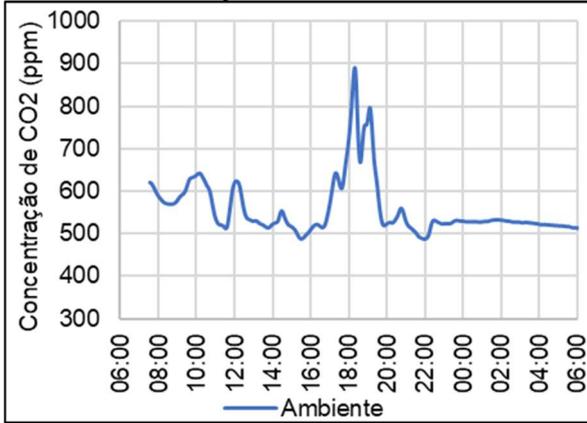


Gráfico 79 - Concentração de CO no primeiro dia de medição de inverno da Sala F

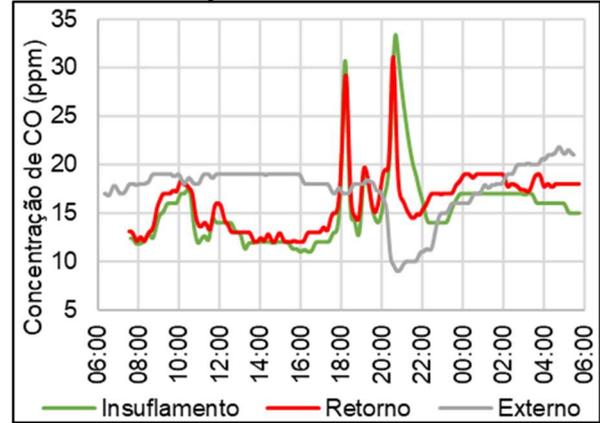


Gráfico 80 - Concentração de CO₂ no segundo dia de medição de inverno da Sala F

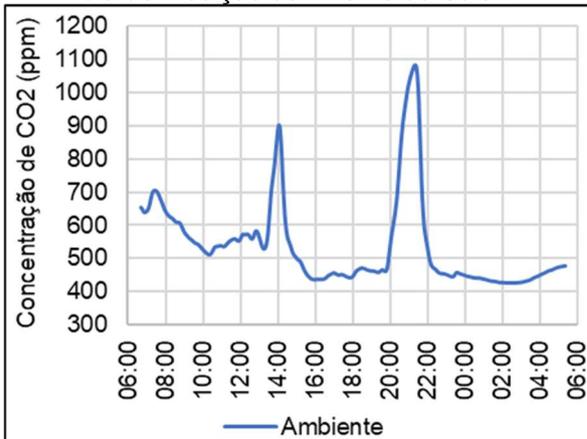


Gráfico 81 - Concentração de CO no segundo dia de medição de inverno da Sala F

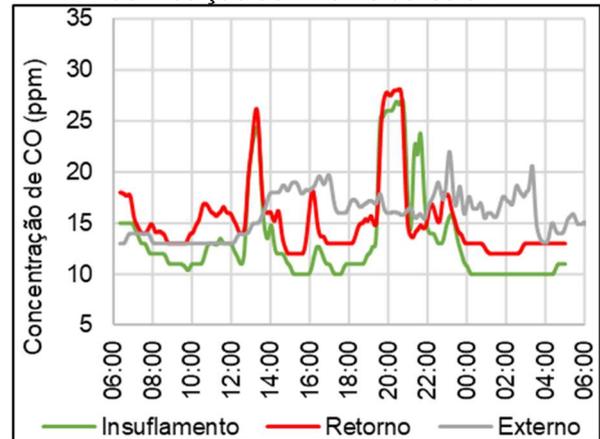


Gráfico 82 - Concentração de CO₂ no terceiro dia de medição de inverno da Sala F

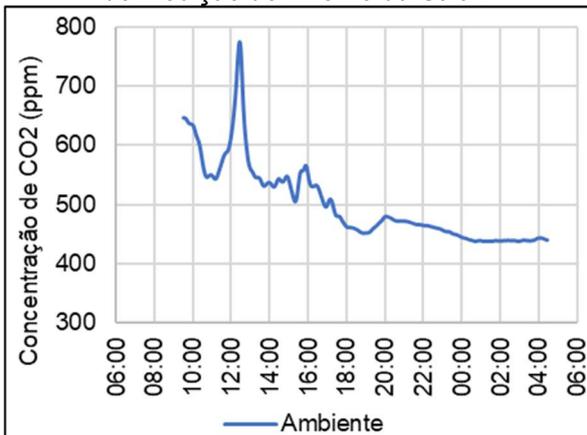


Gráfico 83 - Concentração de CO no terceiro dia de medição de inverno da Sala F



Analisando o comportamento dos particulados observa-se que no ponto Retorno, a concentração do poluente permanece entre $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ e $75\mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto a concentração no insuflamento se encontra por volta de $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ e a externa ao edifício em aproximadamente $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Gráficos 84, 85 e 86). Esta situação pouco se altera nas cirurgias em que o sistema de ventilação é acionado. Na segunda cirurgia do segundo dia, realizada sem o ar-condicionado estar ligado, são verificadas concentrações mais elevadas do particulado em relação aos demais procedimentos, evidenciando haver remoção do particulado pelo do sistema de ventilação. Assim como visto na Sala A, a concentração de particulados mais elevada no ponto Insuflamento do que no ponto externo, sugere deficiências de filtros e na limpeza de dutos. No gráfico 87 são apresentados os indicadores IERP e IEF.

Gráfico 84 - Concentração de particulado $2,5\mu\text{m}$ no primeiro dia de medição de inverno da Sala F



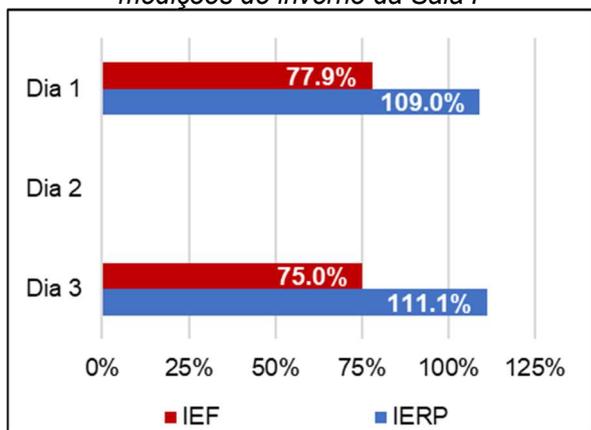
Gráfico 85 - Concentração de particulado $2,5\mu\text{m}$ no segundo dia de medição de inverno da Sala F



Gráfico 86 - Concentração de particulado $2,5\mu\text{m}$ no terceiro dia de medição de inverno da Sala F



Gráfico 87 - Indicadores IERP e IEF para as medições de inverno da Sala F



5.6.3.4. Sala F – Verão

Ao longo dos três dias de medição de verão na sala F foram realizados sete procedimentos cirúrgicos, um no primeiro dia, no período da manhã, dois no segundo dia, sendo um no início da manhã e outro no início da tarde, e quatro no terceiro dia, dois no período da manhã, um no fim da tarde e outro à noite. O ar-condicionado foi acionado apenas em quatro destas ocasiões, nas duas cirurgias do segundo dia e nos dois últimos procedimentos do terceiro dia.

Na cirurgia do primeiro dia observou-se que a temperatura de bulbo seco atingiu 25°C (Gráfico 88), acima do intervalo recomendado. Com a temperatura elevada houve relato de sensação de “muito calor” e transpiração por 100% dos usuários do Grupo I que responderam aos questionários. A mesma situação pode ser observada na segunda cirurgia do terceiro dia, na qual o sistema de climatização também não foi ligado. Nas cirurgias do segundo dia é possível observar que, com o ar-condicionado em funcionamento, a temperatura da sala se mantém próxima de 20°C, adequada para o tipo de ambiente. (Gráfico 89). Nos demais procedimentos ocorridos no terceiro dia, com o sistema de climatização em operação, observou-se que a temperatura do ar permaneceu próxima de 22°C (Gráfico 90), também adequada para o tipo de utilização da sala. Nestas ocasiões, ocupantes do Grupo II apontaram nos questionários sentir entre “frio” e “muito frio” (Gráfico 91).

Gráfico 88 - Temperaturas de bulbo seco no primeiro dia de medição de verão na Sala F

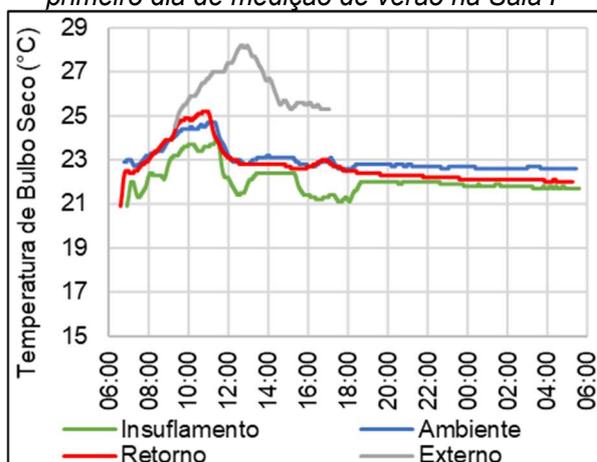


Gráfico 89 - Temperaturas de bulbo seco no segundo dia de medição de verão na Sala F

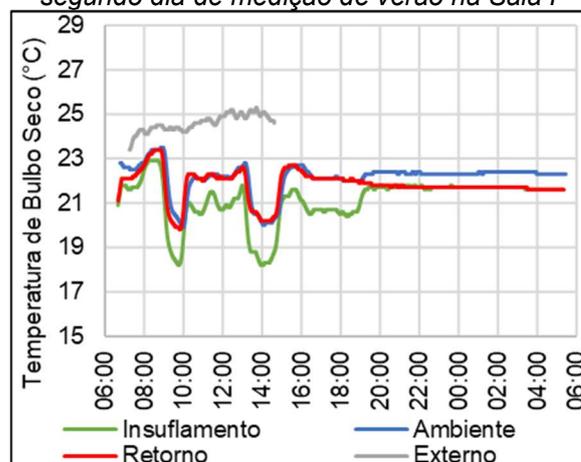


Gráfico 90 - Temperaturas de bulbo seco no terceiro dia de medição de verão na Sala F

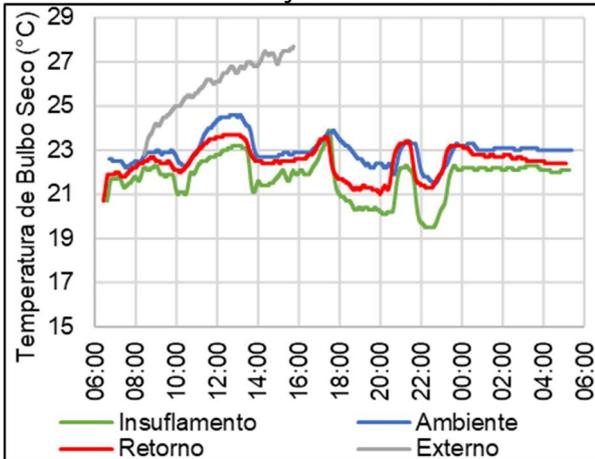
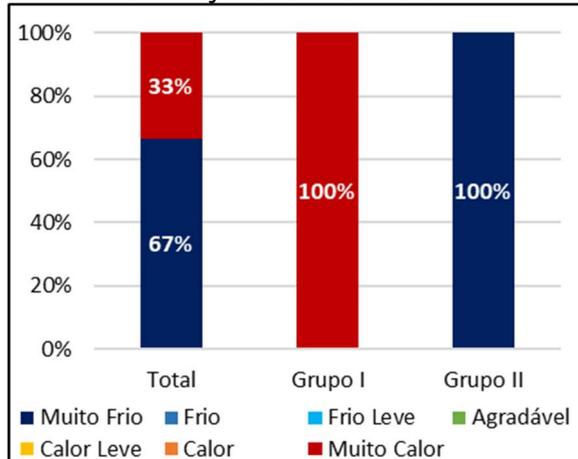


Gráfico 91 - Sensação Térmica dos usuários nas medições de verão da Sala F



A umidade relativa permaneceu, ao longo dos três dias, majoritariamente acima de 60%, como se recomenda para salas de cirurgia (Gráficos 92, 93 e 94). Apenas na primeira cirurgia do segundo dia a umidade absoluta se mantém dentro do intervalo de 4g/kg_{ar seco} a 10,6g/kg_{ar seco}, como previsto na NBR7256/2021. Nas demais, mesmo nas realizadas com o ar-condicionado em operação, a umidade absoluta observada é superior à recomendada (Gráfico 95).

Gráfico 92 - Umidades relativas no primeiro dia de medição de verão na Sala F

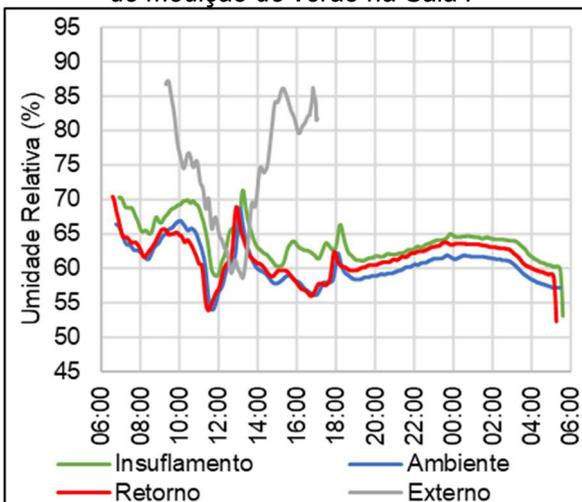


Gráfico 93 - Umidades relativas no segundo dia de medição de verão na Sala F

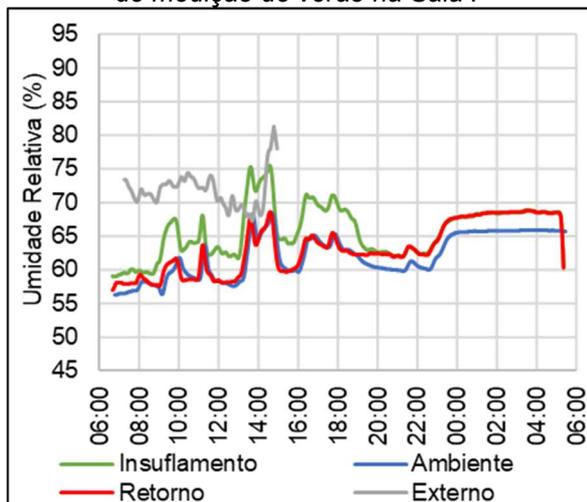


Gráfico 94 - Umidades relativas no terceiro dia de medição de verão na Sala F

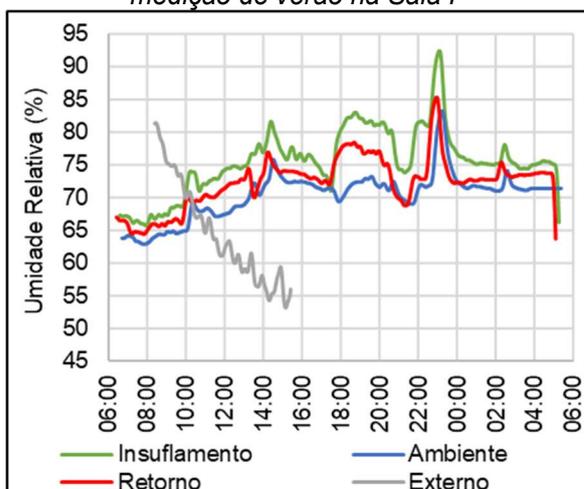
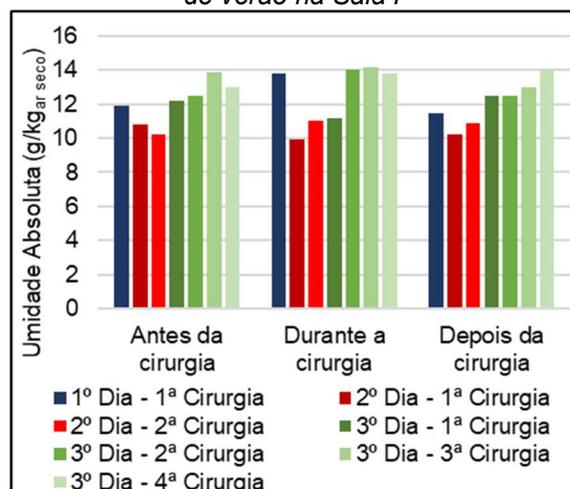


Gráfico 95 - Umidades absolutas nas medições de verão na Sala F



A velocidade do ar permanece de acordo com o que se recomenda na NBR16.401/2008, abaixo de 0,15m/s, apenas nas cirurgias realizadas sem o funcionamento do ar-condicionado. Com o sistema ligado, porém, são observadas velocidades de até 0,5m/s, sem que estas sejam compensatórias de temperaturas elevadas, como ressaltado em Norma (Gráficos 96, 97 e 98). Além de acima do recomendado, as velocidades variam de forma muito significativa com o sistema de ventilação ligado, indicando um fluxo de ar mais turbulento, o que intensifica a sensação de desconforto por movimentação de ar. Conforme gráfico 99, as respostas do Grupo II aos questionários foram unânimes em apontar que a movimentação de ar é percebida como “muito desagradável”. Não houve queixas acerca da movimentação de ar por parte dos usuários do Grupo I.

Gráfico 96 - Velocidades do ar no primeiro dia de medição de verão da Sala F

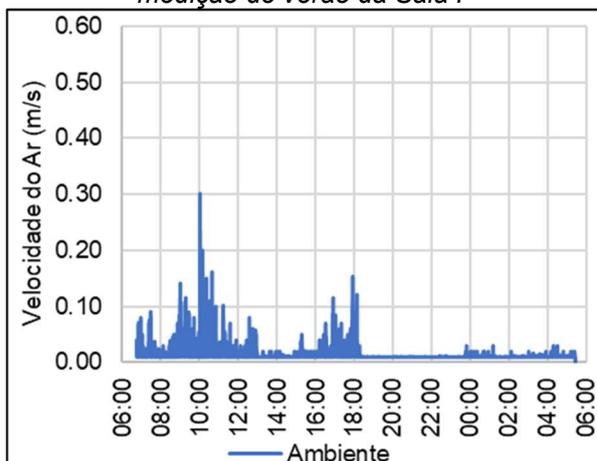


Gráfico 97 - Velocidades do ar no segundo dia de medição de verão da Sala F

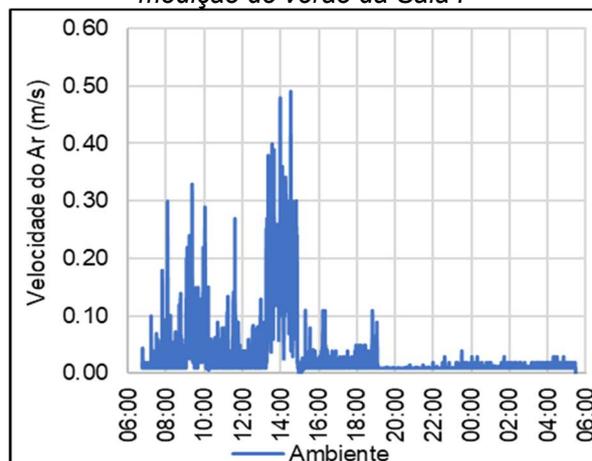


Gráfico 98 - Velocidades do ar no terceiro dia de medição de verão da Sala F

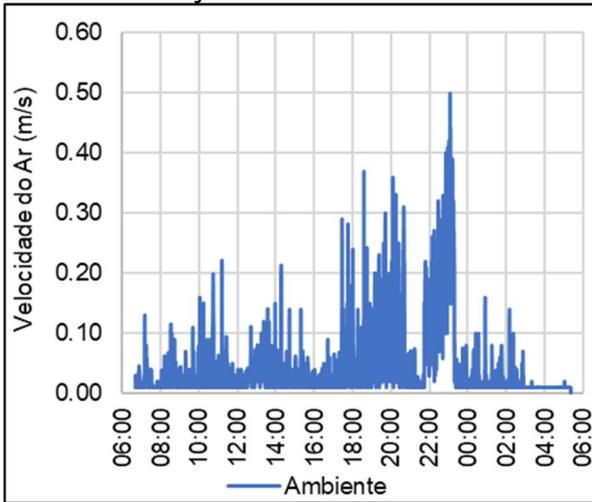
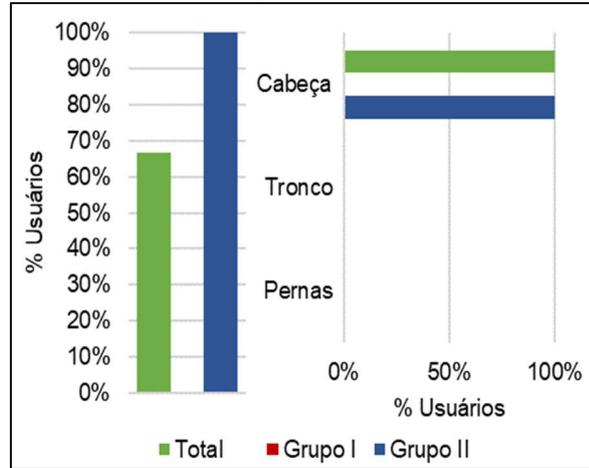


Gráfico 99 - Relatos de desconforto por movimentação de ar e parte do corpo onde é sentido nas medições de verão da Sala F



Foram observadas concentrações de dióxido de carbono acima do estabelecido pela resolução 9 da ANVISA em quatro ocasiões, todas em cirurgias realizadas com o sistema de ventilação desligado. Na primeira delas, foram atingidas concentrações de 1500ppm, sendo que o ar exterior apresentava concentração de 700ppm no momento (Gráfico 100). Situação similar é observada ao longo da segunda cirurgia do terceiro dia (Gráfico 102), também realizada sem o sistema de ventilação em operação. Nesta ocasião a concentração de CO₂ na sala permanece durante praticamente toda a cirurgia acima dos 1000ppm recomendados, chegando a atingir 2300ppm. Nas cirurgias realizadas com o sistema de ventilação em funcionamento, porém, observa-se sua eficiência em promover a renovação de ar adequada na sala, reduzindo rapidamente a concentração do gás a níveis próximos ao externo. Esta situação é bem exemplificada pela primeira cirurgia do segundo dia, a qual foi iniciada com o ar-condicionado desligado, momento em que foram atingidas concentrações acima de 1000ppm, mas, ao ser acionado o sistema de ventilação, a concentração do poluente retorna aos 700ppm observados no ambiente externo (Gráfico 101). Um quarto dos usuários relatou perceber a qualidade do ar na sala F como sendo pior do que no exterior do edifício (Gráfico 103), apresentando a queixa de “ar viciado”. Estes questionários foram respondidos nas cirurgias realizadas com a ventilação desligada. No total destes procedimentos, tal queixa foi relatada por 66,7% dos usuários.

Gráfico 100 - Concentrações de CO₂ no primeiro dia de medição de verão na Sala F



Gráfico 101 - Concentrações de CO₂ no segundo dia de medição de verão na Sala F

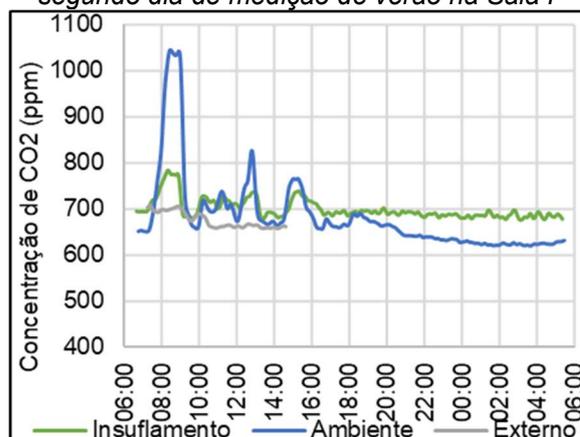


Gráfico 102 - Concentrações de CO₂ no terceiro dia de medição de verão na Sala F

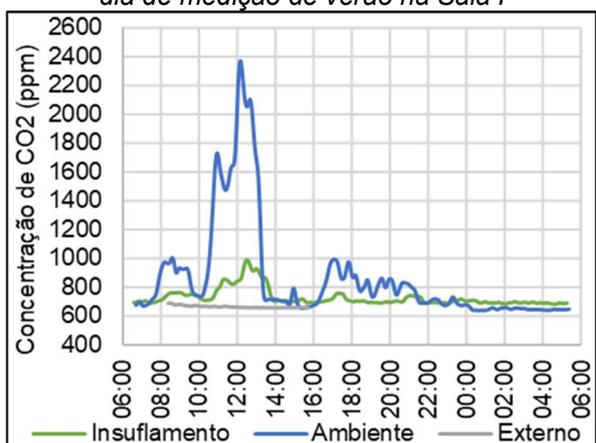
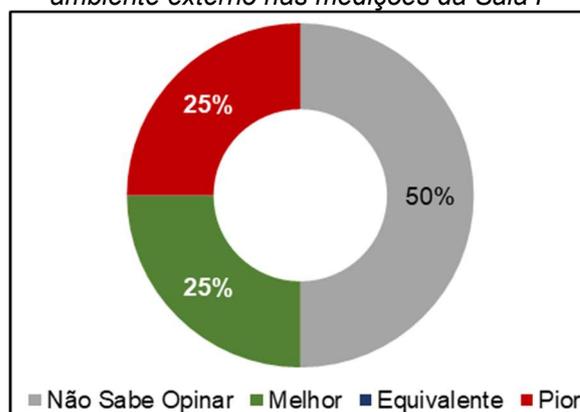


Gráfico 103 - Percepção dos usuários acerca da qualidade do ar interior, relativamente ao ambiente externo nas medições da Sala F



Assim como observado no Centro Obstétrico, na Radiologia e na Sala A, os compostos orgânicos voláteis permaneceram, na maior parte do tempo monitorado acima do limite máximo da escala de medição dos sensores utilizados (2000ppb), inclusive no ponto externo. Desta forma reforça-se aqui a necessidade de futura investigação sobre a origem deste contaminante.

Ao se analisar os gráficos 104, 105 e 106 é percebido o mesmo padrão já comentado para a concentração de particulados 2.5µm nas medições de inverno da sala F e nas medições de inverno e verão na sala A. Observa-se que há retirada de particulados do ambiente pelo sistema, evidenciada pelo indicador IERP médio de 119,5% (Gráfico 107), mas deficiências na limpeza de dutos e filtros resultam em um carregamento de particulado para dentro da sala, tendo sido obtido indicador IEF médio de 81,9%.

Gráfico 104 - Concentração de particulado 2.5 μ m no primeiro dia de verão na Sala F

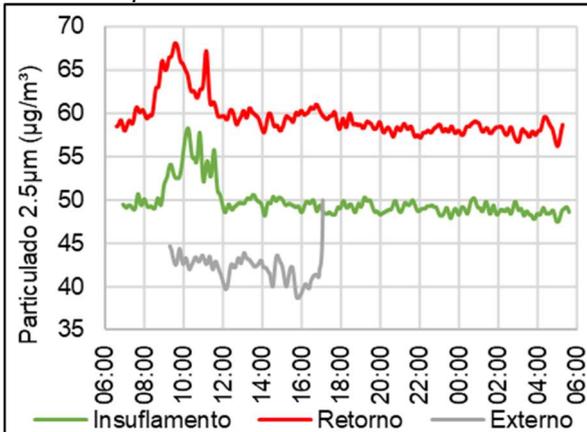


Gráfico 105 - Concentração de particulado 2.5 μ m no segundo dia de verão na Sala F

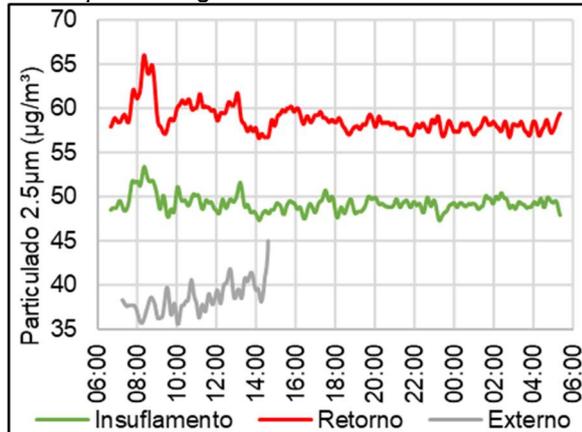


Gráfico 106 - Concentração de particulado 2.5 μ m no terceiro dia de verão na Sala F

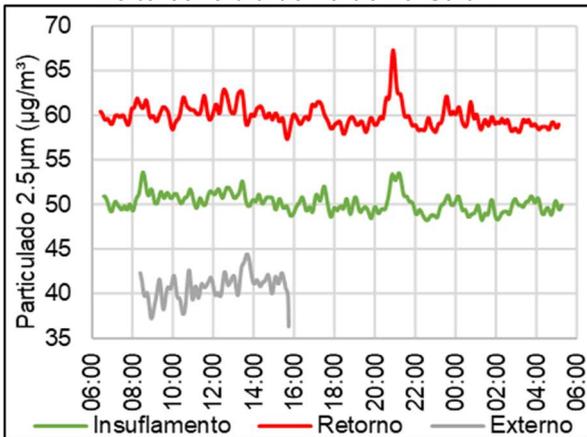
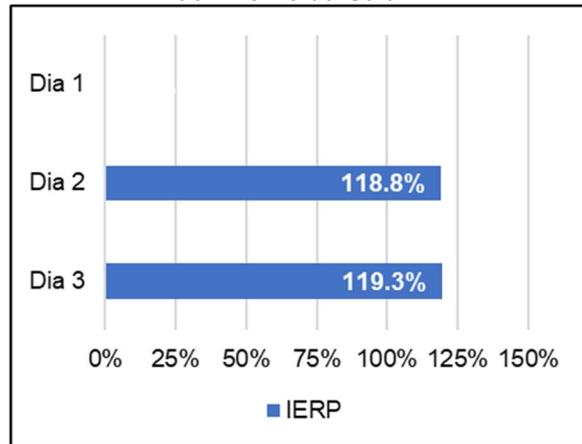


Gráfico 107 - Indicador IERP para as medições de inverno da Sala F



5.6.3.5. Sala J – Inverno

Nas medições de inverno na sala J ocorreram dois procedimentos cirúrgicos, sendo um no primeiro dia e outro no segundo. No primeiro dia o ar-condicionado permaneceu ligado durante todo o dia, não apenas durante a cirurgia. Já nos outros dois dias ele permaneceu sempre desligado.

A temperatura de bulbo seco oscilou entre 22°C e 24,5°C ao longo do primeiro dia de medição, atingindo assim o limite superior do intervalo recomendado nas Normas referenciadas (Gráfico 108). Apesar disto, as sensações térmicas relatadas pelos ocupantes variaram entre frio e confortável (Gráfico 111). Aqueles que se queixaram de frio pertenciam ao Grupo II e alegaram também desconforto por movimentação de ar. Os demais, do Grupo I, também afirmaram sentir movimentação de ar, mas a classificaram como agradável. Ao longo de todo o

segundo dia, no qual foi realizada uma cirurgia, a temperatura permanece estável, em torno de 24°C (Gráfico 109). No terceiro dia, com o ar-condicionado desligado e a sala vazia, a temperatura interna se manteve aproximadamente constante a 23,5°C (Gráfico 110).

Gráfico 108 - Temperaturas de bulbo seco no primeiro dia de medição de inverno na Sala J

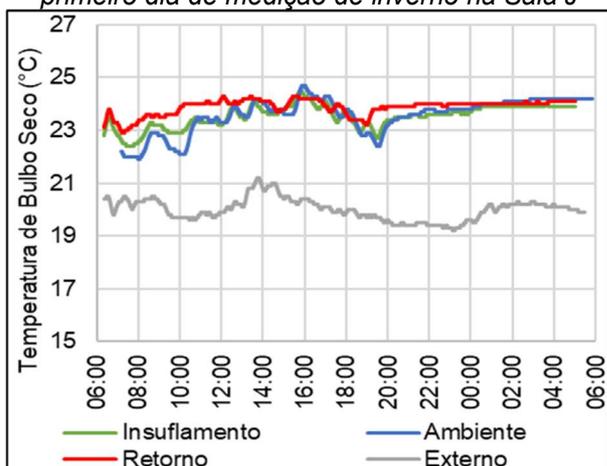


Gráfico 109 - Temperaturas de bulbo seco no segundo dia de medição de inverno na Sala J

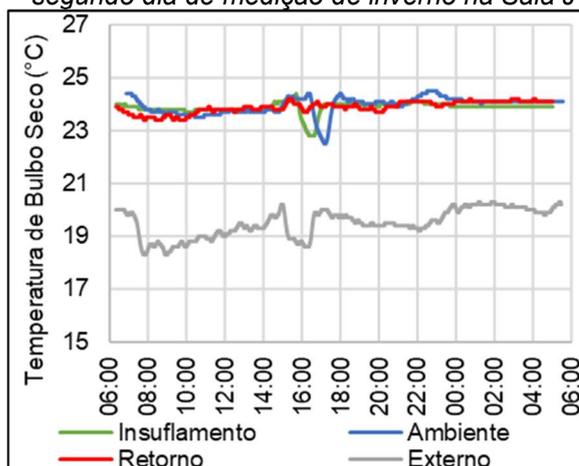


Gráfico 110 - Temperaturas de bulbo seco no terceiro dia de medição de inverno na Sala J

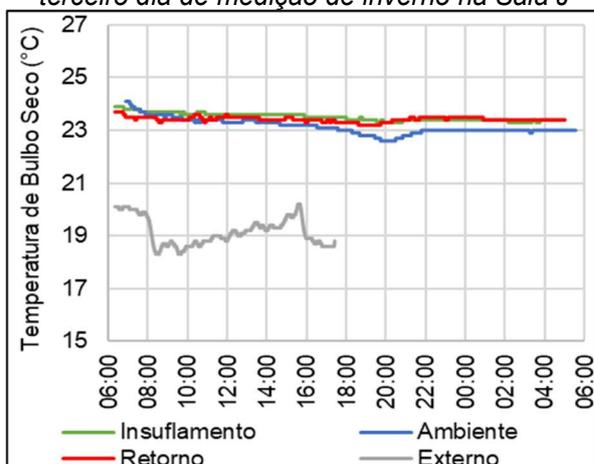
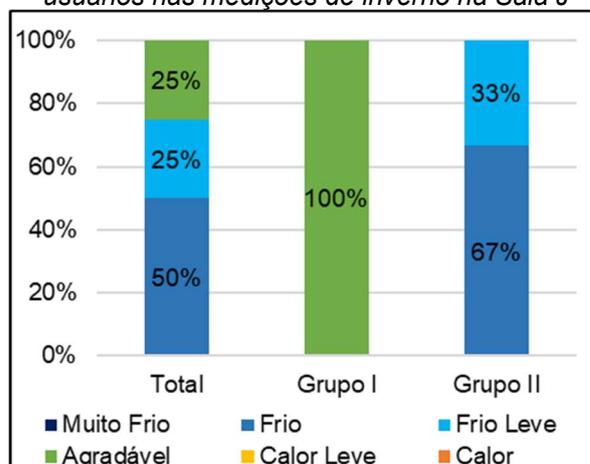


Gráfico 111 - Sensação térmica relatada pelos usuários nas medições de inverno na Sala J



A umidade relativa no início do primeiro dia de medição estava em 55%, mas com o acionamento do sistema de climatização ela foi gradualmente reduzida até que se atingiu 40%, abaixo do mínimo recomendado pela NBR7256/2021, nível no qual permaneceu até o fim do dia (Gráfico 112). Na ocasião foi relatado ressecamento de mucosas por 50% dos ocupantes, os mesmos que relataram sensação de frio e desconforto por movimentação de ar. No início do segundo dia a umidade relativa encontrava-se próxima a 60%, limite mínimo recomendado (Gráfico

113). A partir das 16:30 foi observada uma desumidificação no ar externo, cuja umidade absoluta passou de 8,5g/kg_{ar seco} para 5,75g/kg_{ar seco}. Essa desumidificação pode ser vista também no interior da sala. No terceiro dia a umidade relativa permaneceu abaixo do intervalo recomendado em Norma, oscilando de 45% a 55%, conforme gráfico 114. Como pode ser observado no gráfico 115, a umidade absoluta ficou dentro do intervalo recomendado em ambas as cirurgias realizadas.

Gráfico 112 - Umidades relativas no primeiro dia de medição de inverno na Sala J

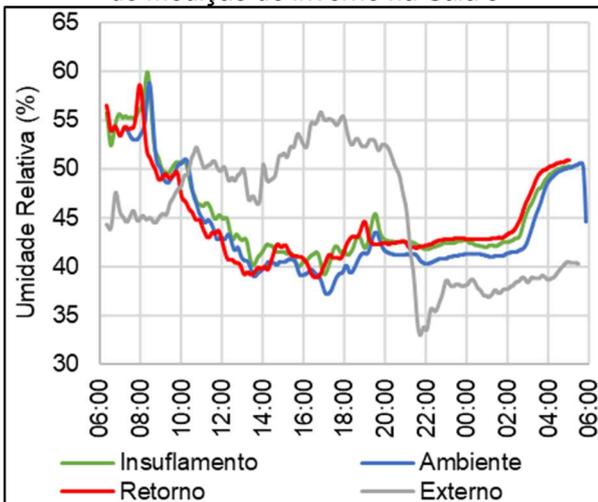


Gráfico 113 - Umidades relativas no segundo dia de medição de inverno na Sala J

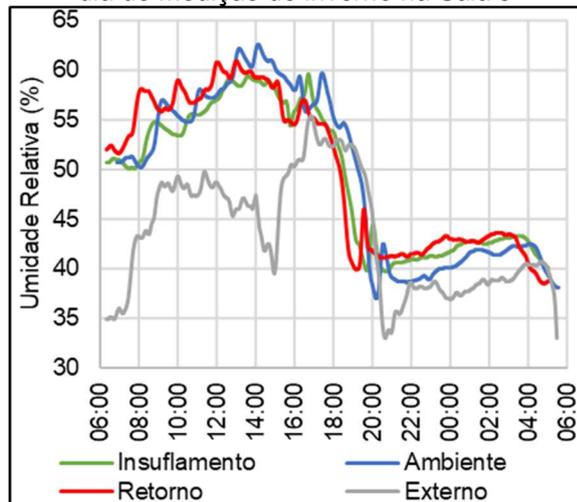


Gráfico 114 - Umidades relativas no terceiro dia de medição de inverno na Sala J

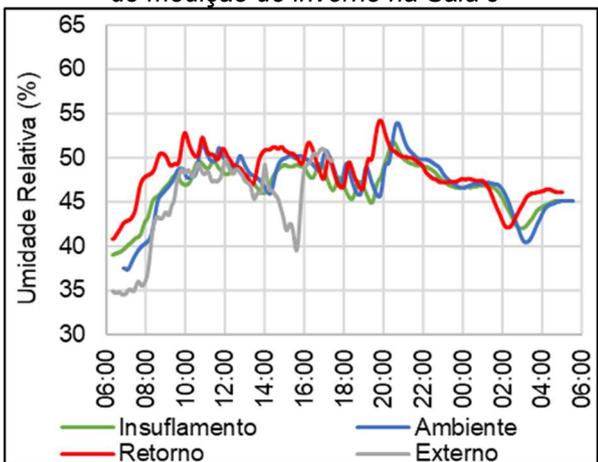
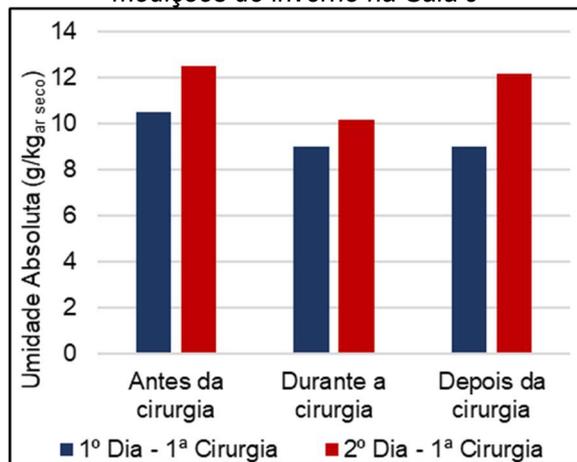


Gráfico 115 - Umidades absolutas nas medições de inverno na Sala J



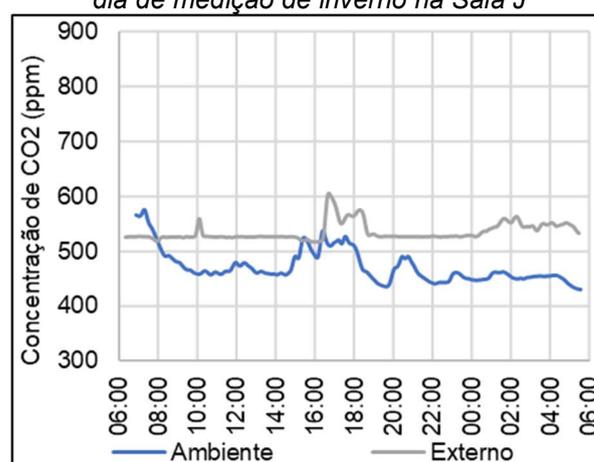
A concentração de dióxido de carbono não ultrapassou o limite máximo previsto na RE09 da ANVISA em nenhum momento ao longo dos três dias de medição. Durante a cirurgia realizada no primeiro dia de medição, o sistema de climatização manteve a concentração do gás limitada a 650ppm, enquanto a concentração no ar externo estava próxima a 750ppm (Gráfico 116). Após a

finalização do procedimento a concentração do poluente se estabilizou em torno de 450ppm. No segundo dia, com o ar-condicionado desligado, a concentração de CO₂ se manteve ligeiramente abaixo de 500ppm sofrendo pequeno aumento com a realização da cirurgia, iniciada por volta das 15:00h (Gráfico 117). No último dia a sala não foi utilizada.

Gráfico 116 - Concentrações de CO₂ no primeiro dia de medição de inverno na Sala J



Gráfico 117 - Concentrações de CO₂ no segundo dia de medição de inverno na Sala J



No primeiro dia de medição, como o sistema de ventilação permaneceu ligado ao longo de todo o dia, é possível notar que, mesmo com a sala desocupada, há três picos de concentração de CO, além do ocorrido durante a cirurgia. Estas elevações da concentração do poluente ocorrem por volta das 08:00, 12:00 e 18:00, horários de maior movimentação dos ônibus no campus (Gráfico 118). O monóxido de carbono é produto da combustão incompleta, comum em ônibus e caminhões em aceleração. A captação de ar do sistema está localizada dentro da casa de máquinas, próxima a um ponto de ônibus na avenida Prof. Lineu Prestes, conforme indicado na figura 21. Tais resultados sugerem que o gás é admitido pelo sistema e levado ao ambiente interno, indicando inadequação na localização do ponto de captação de ar.

Gráfico 118 - Concentrações de CO no primeiro dia de medição de inverno na Sala J

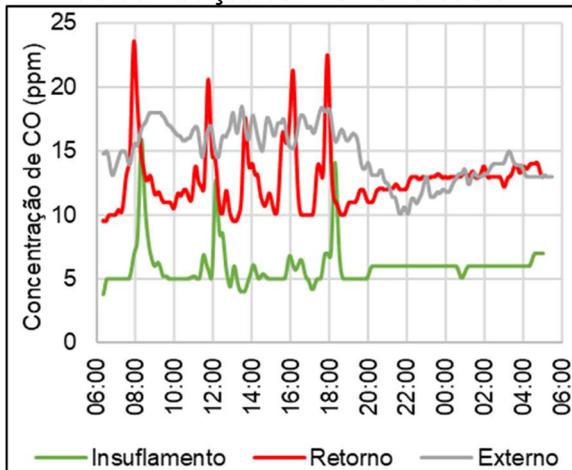


Figura 21 - Av. Prof. Lineu Prestes, ponto de ônibus Biomédicas III



Fonte: Google Street View. Adaptada pelo autor.

Assim como observado no Centro Obstétrico, na Radiologia e nas demais salas do Centro Cirúrgico, os compostos orgânicos voláteis permaneceram a maior parte do tempo monitorado acima do limite máximo da escala de medição dos sensores utilizados (2000ppb), inclusive no ponto externo. Reforça-se aqui, novamente, a necessidade de futura investigação sobre sua origem.

A concentração de particulados $2.5\mu\text{m}$ indicou uma menor eficiência do sistema em sua remoção, tendo sido obtidos valores significativamente inferiores para o indicador IERP e semelhantes para o IEF (Gráfico 119), em relação às demais salas de cirurgia. Como pode ser visto no gráfico 120, as concentrações de particulado no ponto Insuflamento e no ponto Retorno ao longo do primeiro dia de medição são próximas mesmo com o sistema de ventilação ligado. Desde o desligamento do ar-condicionado, no final do primeiro dia, até o final do terceiro dia (Gráficos 120, 121 e 122) pode-se perceber um lento e gradual descolamento entre as concentrações de particulado no insuflamento (2,5m do piso) e retorno (0,5m do piso), indicando a deposição das partículas em suspensão.

Gráfico 119 - Indicadores IERP e IEF para as medições de inverno da Sala J

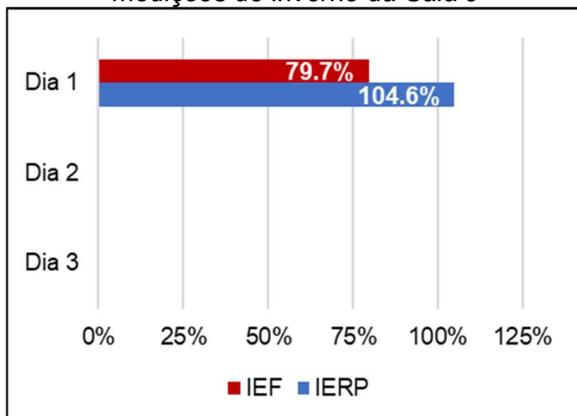


Gráfico 120 - Concentração de particulado 2,5 μ m no primeiro dia de medição de inverno na Sala J

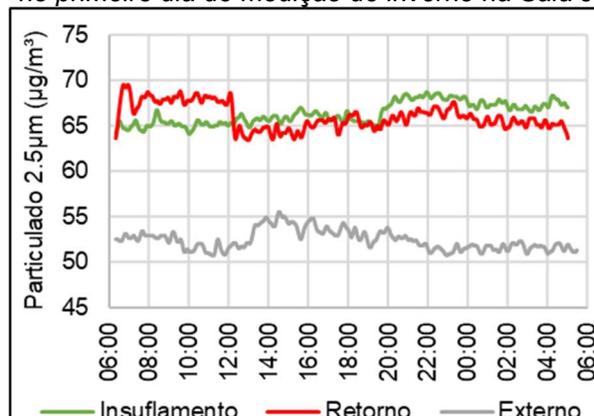


Gráfico 121 - Concentração de particulado 2,5 μ m no segundo dia de medição de inverno na Sala J

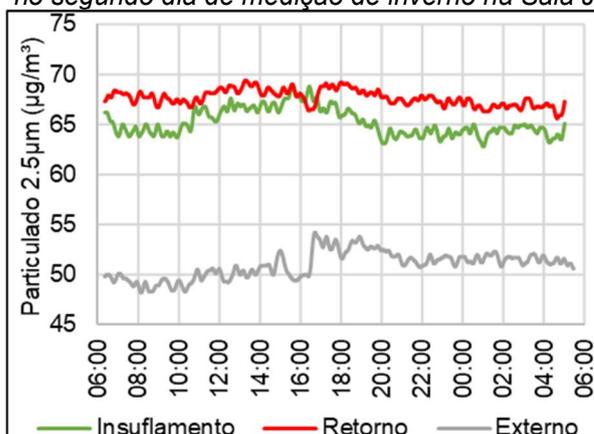


Gráfico 122 - Concentração de particulado 2,5 μ m no terceiro dia de medição de inverno na Sala J

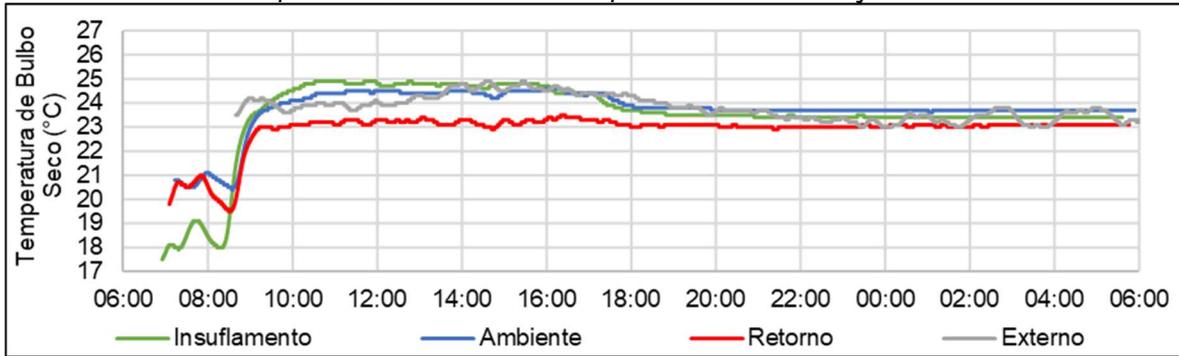


5.6.3.6. Sala J – Verão

Foram observadas cinco cirurgias ao longo dos três dias de medições de verão na Sala J, sendo duas em cada um dos dois primeiros dias e a quinta no último. O ar-condicionado foi acionado em três dessas ocasiões, no início da primeira cirurgia do primeiro dia e nas duas cirurgias do segundo dia de medição.

Ao longo dos três dias de medição, a temperatura de bulbo seco, com sala vazia e o ar-condicionado desligado, oscilou em torno de 24°C, limite superior do intervalo recomendado nas Normas referenciadas. Durante a primeira cirurgia observada no período, o sistema de climatização manteve a temperatura do ambiente entre 20°C e 21°C, faixa considerada adequada para o tipo de ambiente (Gráfico 123). Nesta situação os usuários que responderam aos questionários, todos do Grupo II, se dividiram entre sensação de “frio” (50%) e “conforto” (50%).

Gráfico 123 - Temperaturas de bulbo seco no primeiro dia de medição de verão da Sala J



No segundo dia de medição, o sistema de climatização foi acionado nas duas cirurgias realizadas, mas apenas após o seu início, havendo, portanto, períodos de utilização da sala sem o funcionamento do ar-condicionado. No início dessas cirurgias observa-se uma elevação da temperatura do ambiente, a qual ultrapassa o limite recomendado para o ambiente, atingindo 25°C. Com o acionamento do sistema de climatização a temperatura é reduzida, se mantendo entre 23°C e 24°C (Gráfico 124). Nesta situação, ocupantes do Grupo I relataram sentir calor. No terceiro dia de medição, a cirurgia ocorreu sem a utilização do ar-condicionado. Na ocasião a temperatura no ambiente se manteve ligeiramente acima de 24°C (Gráfico 125).

Gráfico 124 - Temperaturas de bulbo seco no segundo dia de medição de verão da Sala J

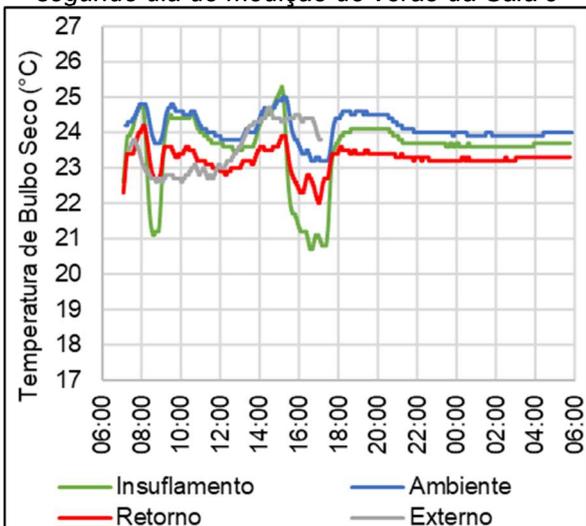
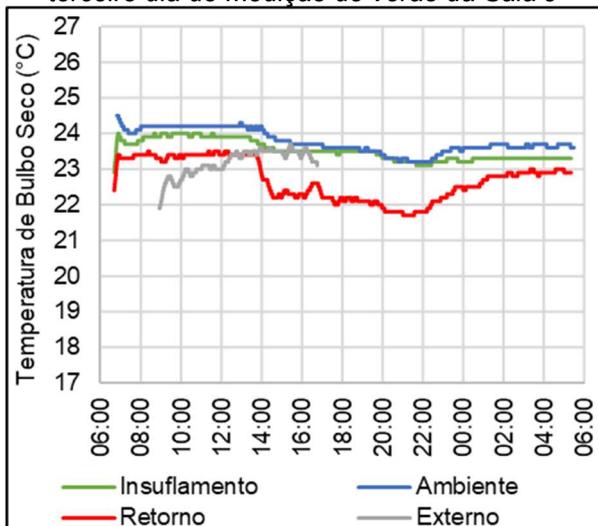


Gráfico 125 - Temperaturas de bulbo seco no terceiro dia de medição de verão da Sala J



A velocidade do ar na sala permaneceu abaixo de 0,15m/s, valor recomendado pela NBR16.401/2008, quase a totalidade dos três dias de medição (Gráficos 126, 127 e 128). Apesar disso, 57,1% dos usuários relataram perceber a movimentação de ar na sala (Gráfico 129), mas, diferentemente do observado nas demais, a maior parte dos ocupantes classificam a sensação como “agradável” ou “indiferente”. Apenas 14,3%, o que corresponde a um usuário, relatou desconforto por movimentação de ar.

Gráfico 126 - Velocidades do ar no primeiro dia de medição de verão da Sala J

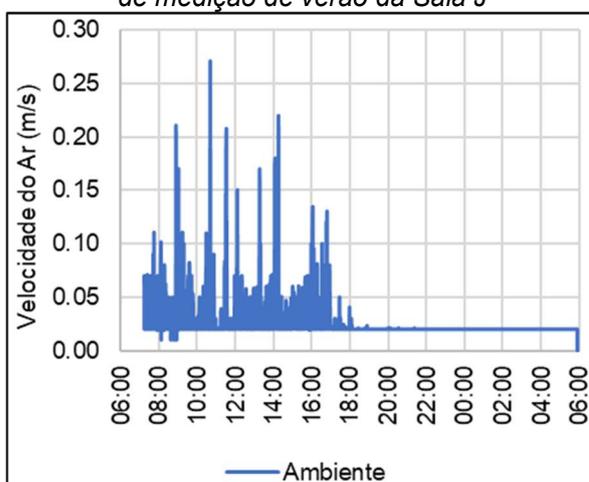


Gráfico 127 - Velocidades do ar no segundo dia de medição de verão da Sala J

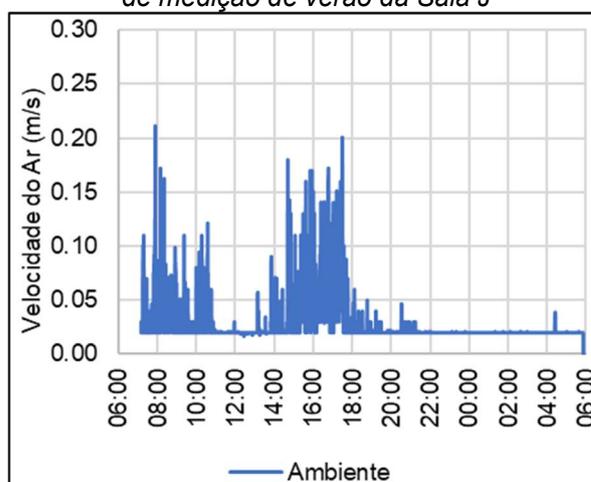


Gráfico 128 - Velocidades do ar no terceiro dia de medição de verão da Sala J

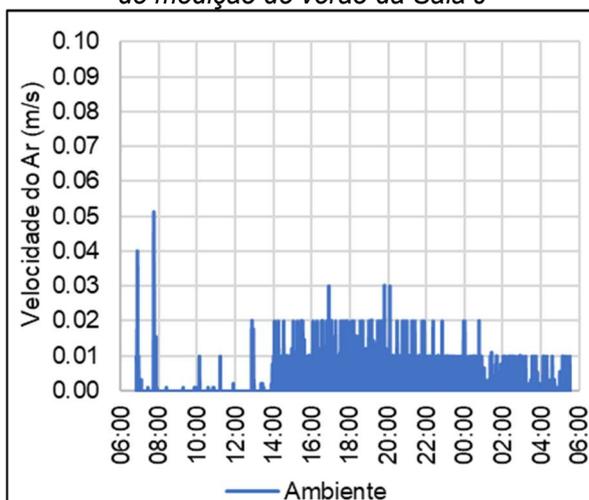
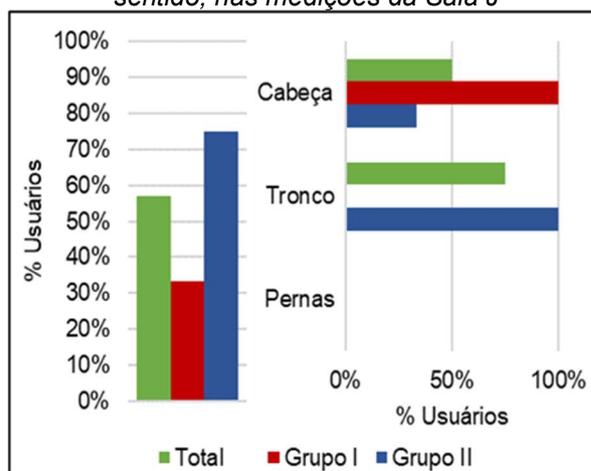


Gráfico 129 - Relatos de percepção por movimentação de ar e parte do corpo onde é sentido, nas medições da Sala J



No decorrer dos três dias de medição de verão na sala J, a umidade relativa oscilou entre 55% e 70% (Gráficos 130, 131 e 132). Analisando a umidade absoluta, percebe-se que o sistema de climatização não é suficientemente capaz de promover a desumidificação do ambiente, de modo que em nenhuma das cirurgias observadas

a umidade absoluta na sala é mantida no intervalo recomendado, de 4g/kg_{ar seco} a 10,6g/kg_{ar seco} (Gráfico 133). Ao longo dos três dias não foram reportadas queixas de ressecamento de mucosas.

Gráfico 130 - Umidades relativas no primeiro dia de medição de verão da Sala J

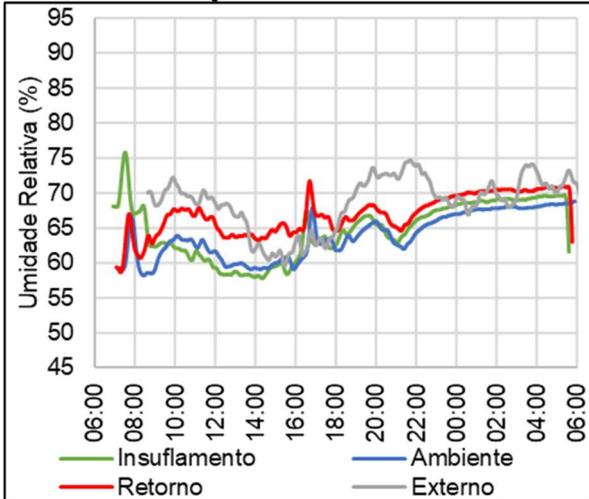


Gráfico 131 - Umidades relativas no segundo dia de medição de verão da Sala J

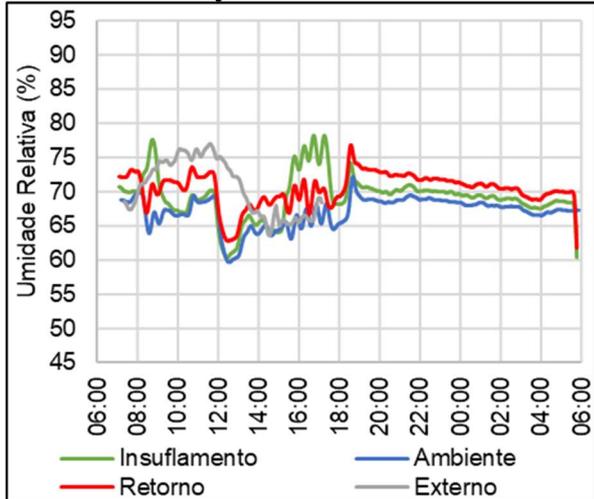


Gráfico 132 - Umidades relativas no terceiro dia de medição de verão da Sala J

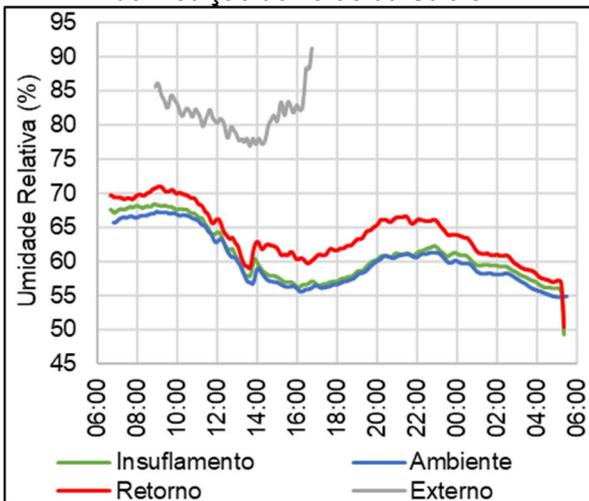
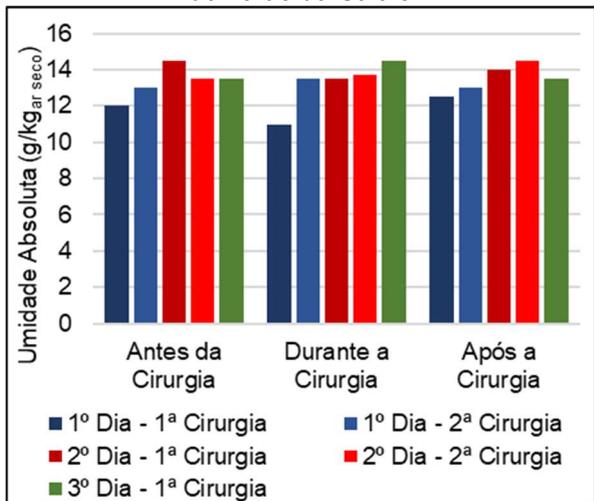


Gráfico 133 - Umidades absolutas nas medições de verão da Sala J



Em relação ao dióxido de carbono, observa-se que o sistema de ventilação é bastante eficiente em promover a renovação de ar de modo a manter a concentração do gás em nível semelhante ao observado no exterior do edifício. Percebe-se, porém, uma ineficiência na utilização do sistema, que não é mantido em funcionamento durante a totalidade das cirurgias, ocasionando concentrações do poluente superiores a 1000ppm. No primeiro dia, o sistema é desligado com a cirurgia em andamento, ocasionando as altas concentrações do poluente

observadas a partir das 09:00 (Gráfico 134). No início da segunda cirurgia do segundo dia, antes de ser ligado o sistema de ventilação, o gás atinge uma concentração de 1400ppm, mas quando se aciona o sistema, ela rapidamente é reduzida a 700ppm, mesmo nível do ar externo (Gráfico 135). Na cirurgia realizada no terceiro dia, sem o ar-condicionado estar ligado, verifica-se, novamente, pela elevação da concentração de CO₂ ao longo da cirurgia que a ventilação da sala sem o sistema de ventilação acionado é insuficiente (Gráfico 136). No gráfico 137 pode-se perceber que os usuários majoritariamente percebem a qualidade do ar interior como pior do que a no exterior do hospital. A principal queixa dos usuários é a percepção de “ar viciado”, apresentada em 25% de tais questionários.

Gráfico 134 - Concentrações de CO₂ no primeiro dia de medição de verão da Sala J



Gráfico 135 - Concentrações de CO₂ no segundo dia de medição de verão da Sala J

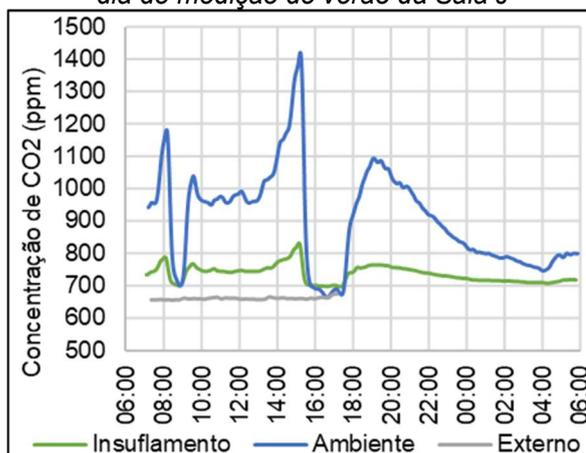


Gráfico 136 - Concentrações de CO₂ no terceiro dia de medição de verão da Sala J

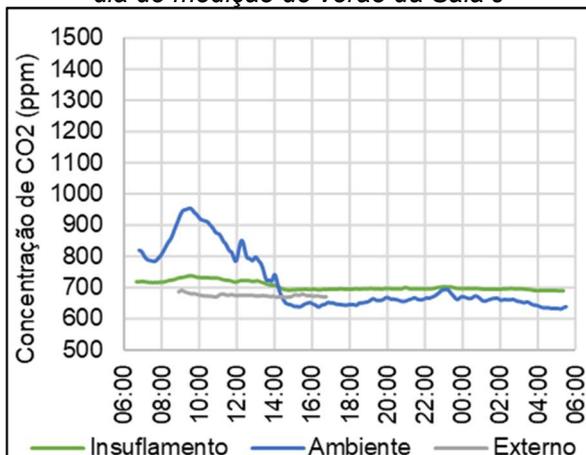
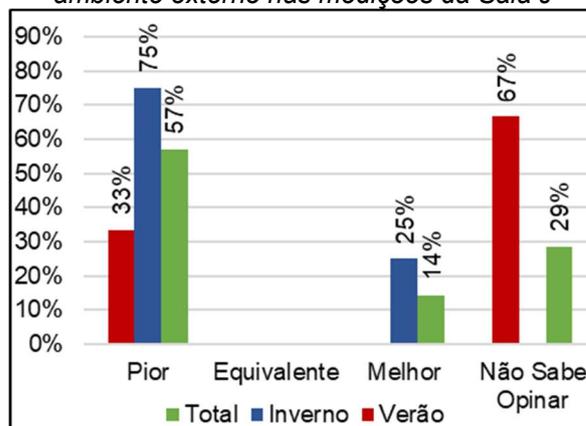


Gráfico 137 - Percepção dos usuários acerca da qualidade do ar interior, relativamente ao ambiente externo nas medições da Sala J



Ao se observar o comportamento dos particulados 2,5 μ m ao longo dos três dias de medição de verão, observa-se que, da mesma forma que para o inverno e

para as outras salas, a concentração do particulado no ponto Insuflamento, mesmo nos momentos em que o sistema de ventilação permaneceu em operação, é significativamente superior à observada no exterior do Hospital, indicando deficiência de filtros, limpeza de dutos e de vazão de ar insuflado. É possível, porém, perceber que, em comparação às outras salas, há uma maior sensibilidade da concentração do particulado no ponto Retorno em relação ao funcionamento do sistema de ventilação, de modo que, quando acionado, é percebida uma redução na concentração do particulado, indicando que o sistema em funcionamento promove a retirada de particulado do ambiente (Gráficos 138, 139 e 140). O Gráfico 141 apresenta os indicadores IERP e IEF.

Gráfico 138 - Concentração de particulado 2,5µm no primeiro dia de medição de verão da Sala J



Gráfico 139 - Concentração de particulado 2,5µm no segundo dia de medição de verão da Sala J



Gráfico 140 - Concentração de particulado 2,5µm no terceiro dia de medição de verão da Sala J

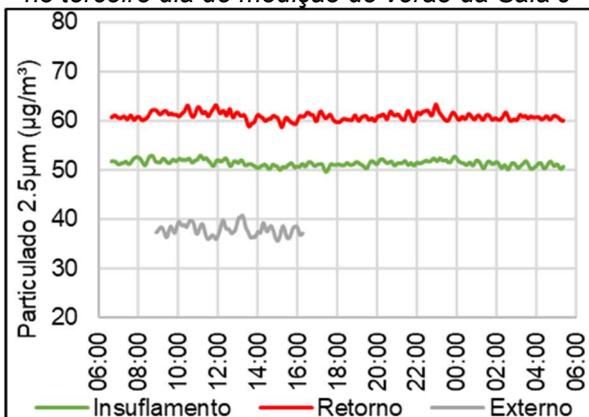
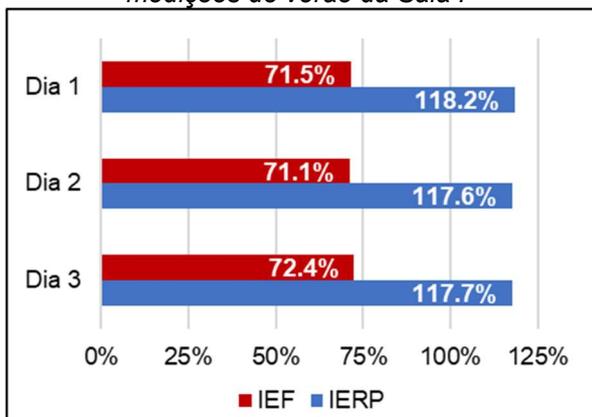


Gráfico 141 - Indicadores IERP e IEF para as medições de verão da Sala F



5.6.4. Discussões e Propostas de Intervenção

A partir dos resultados apresentados foram destacados sete pontos para discussão, dois referentes ao conforto térmico e os outros cinco à qualidade do ar interior. A partir de tais discussões se originaram as propostas de intervenção.

Em relação à qualidade do ar, foram identificados como principais problemas: inadequações no ponto de captação de ar externo do sistema; deficiências de manutenção, afetando limpeza de dutos e filtros; ineficiências na forma de utilização do sistema de climatização e a menor eficiência na remoção de particulados relacionada à posição da mesa cirúrgica, além da insuficiência de retornos. No caso do conforto térmico, destaca-se o desconforto por movimentação de ar nos profissionais do Grupo II, agravado na Sala F pelo posicionamento da mesa cirúrgica, e, portanto, da equipe, perante o insuflamento e a ineficiência do sistema de distribuição de ar em garantir as condições adequadas para os diferentes usuários (Grupo I e Grupo II) nas salas não modernizadas.

5.6.4.1. Ponto de Captação de Ar Externo

Foram observadas altas concentrações de alguns poluentes no interior das salas de cirurgia que, conforme ressaltado nos resultados, não têm origem na sua ocupação, mas são captados no exterior do edifício e levados ao ambiente interno pelo sistema de ventilação. Analisando os dados coletados nos momentos em que os sistemas de ventilação das salas estavam em funcionamento, pode-se verificar que a concentração dos compostos orgânicos voláteis no ambiente interno permanece 49,1% do tempo acima de 2000ppb (limite máximo da faixa de medição do sensor utilizado), sendo que em 70,3% deste período, a concentração externa ao edifício também supera 2000ppb. Além disso, conforme já mencionado, a concentração interna de compostos orgânicos voláteis apresenta comportamento correlacionado ao observado no exterior do hospital. Desta forma, sugere-se a condução de investigação acerca da origem do poluente.

Além dos compostos orgânicos voláteis, foram observadas concentrações elevadas de monóxido de carbono na Sala J em três ocasiões em que a sala estava desocupada e o sistema de ventilação ligado. Como já discutido nos resultados, o gás, produto da combustão incompleta, teria sido emitido na partida dos ônibus no

ponto Biomédicas III, em frente à casa de máquinas do HU, onde estão localizadas as captações de ar dos sistemas que atendem os centros Cirúrgico e Obstétrico. Alterar o ponto de captação do sistema exigiria intervenções de grande porte no sistema de ventilação e na edificação, de forma que se sugere o reposicionamento do ponto de ônibus, avançando na Av. Professor Lineu Prestes, conforme indicado na figura 22, que esquematiza a solução proposta.

Figura 22 - Esquema da proposta de intervenção para reposicionamento do ponto de ônibus Biomédicas III

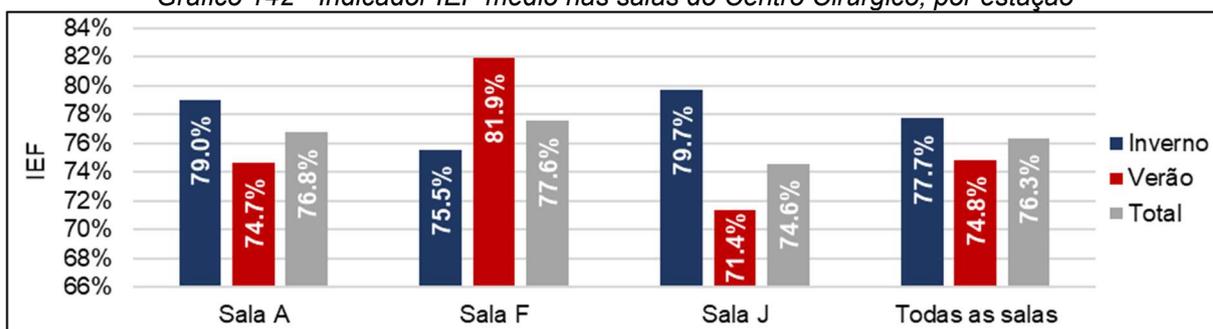


Fonte: Google Maps. Adaptada pelo autor.

5.6.4.2. Conservação e Manutenção

Em todas as salas de cirurgia, para todos os períodos com o sistema de ventilação em operação foram obtidos para o indicador IEF valores abaixo de 100% (Gráfico142), ou seja, a concentração de particulado $2,5\mu\text{m}$ no ponto de insuflamento é maior do que no ponto de captação. Para tanto deve haver maior levantamento de particulado já depositado nos dutos do que a filtragem é capaz de retirar, indicando deficiências na limpeza dos dutos ou na troca de filtros, ou em ambos. Portanto, sugere-se que se realize manutenção no sistema conforme especificado na NBR15.848/2010.

Gráfico 142 - Indicador IEF médio nas salas do Centro Cirúrgico, por estação



5.6.4.3. Utilização, Operação e Controle do Sistema de Ar-Condicionado

Conforme abordado anteriormente, uma das principais deficiências do sistema de ar-condicionado do Centro Cirúrgico do HU é a distribuição de ar nas salas de cirurgia. O sistema instalado induz em parte dos ocupantes a sensação de frio e desconforto por movimentação de ar (Grupo II). Além disso, o sistema de climatização não possui controle de *set point*, havendo apenas a possibilidade de ligá-lo ou desligá-lo, e é indissociável do sistema de ventilação das salas. Acrescenta-se a isso o fato de que o controle de operação do sistema de ar-condicionado fica acessível aos profissionais do Centro Cirúrgico, dando aos usuários a autonomia de desligar ou ligar o sistema de climatização, e, portanto, o de ventilação, das salas de cirurgia.

Foi observado que essa combinação de fatores recorrentemente levou ao desligamento do ar-condicionado das salas durante a realização de cirurgias. Ao longo dos dezoito dias de observação do Centro Cirúrgico foi apurada a razão do tempo das cirurgias em que os sistemas de climatização e ventilação permaneceram ligados, apenas em 27% do tempo total das cirurgias (Gráfico 143). Separando as salas não modernizadas (A e F) da sala modernizada (J) é possível notar que na sala J, onde os ocupantes relataram uma sensação de menor desconforto térmico, a razão do tempo de cirurgia em que o sistema de ar-condicionado foi mantido ligado, embora ainda pequena, é 24% maior em relação às outras duas.

Os efeitos da execução das cirurgias com a ventilação desligada na qualidade do ar interior podem ser percebidos pela concentração de CO₂ na sala. Nestes casos a concentração do poluente permaneceu abaixo de 1000ppm, máximo recomendado pela Anvisa (2009) em apenas 72,9% do tempo de execução das cirurgias, tendo sido observadas concentrações de até 2370ppm. Se analisados os

momentos das cirurgias em que a ventilação permaneceu em operação, o percentual de adequação atinge 98,2% (Gráfico 144). Desta forma, sugere-se que o sistema de ar-condicionado seja mantido em constante funcionamento, conforme recomendado pela NBR7256/2021.

Gráfico 143 - Utilização do sistema de ar-condicionado (AC) durante as cirurgias, por estação do ano e sala

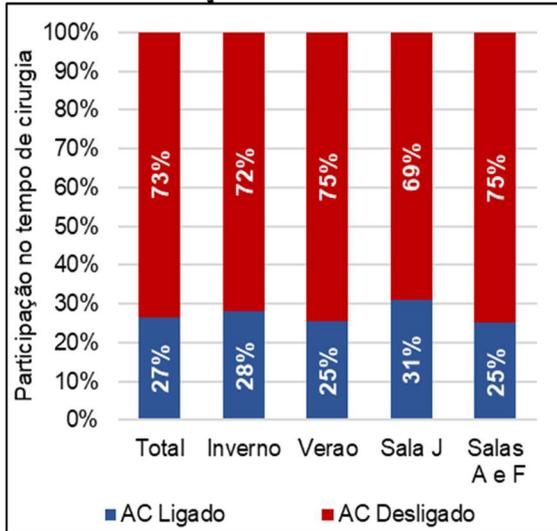
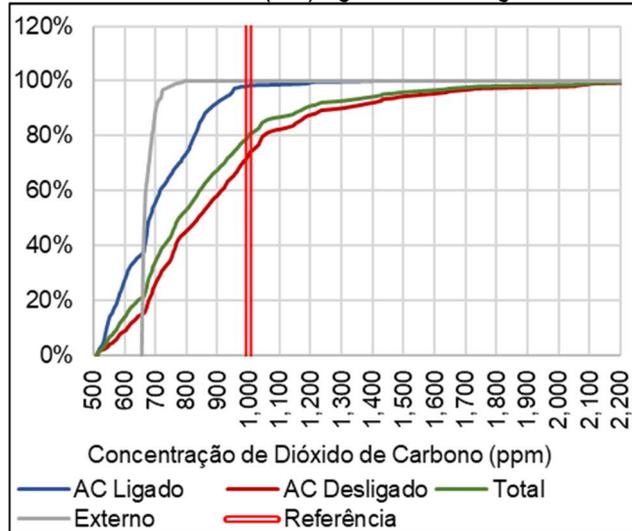


Gráfico 144 - Frequência acumulada da concentração de CO₂ com o sistema de ar-condicionado (AC) ligado ou desligado

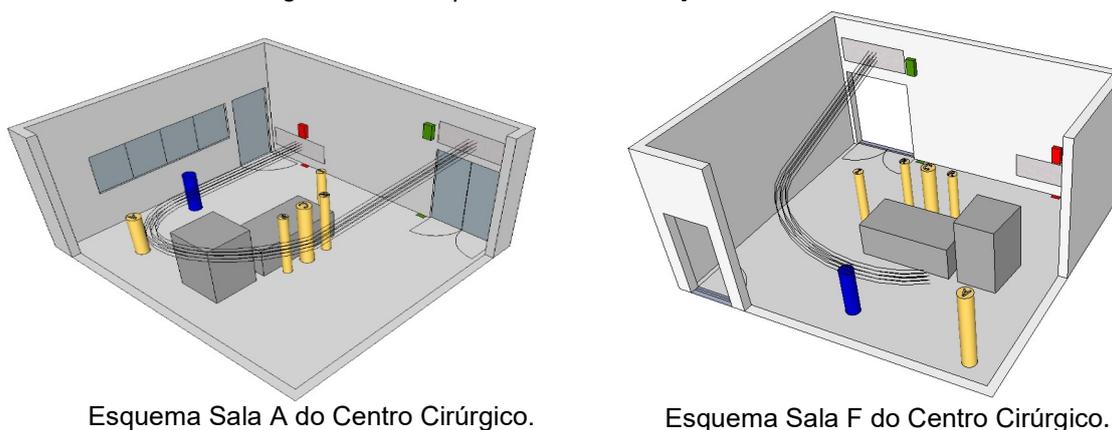


5.6.4.4. Layout das Salas de Cirurgia Não Modernizadas

As salas A e F do Centro Cirúrgico do HU são muito similares, diferenciando-se em três principais aspectos: o tipo da cirurgia mais frequente, a posição dentro do Centro Cirúrgico e seus layouts internos. Pelo fato de estarem ambas localizadas em pavimento subsolo, distantes do perímetro do edifício, havendo piso técnico sobre elas, a diferenciação da localização no pavimento não se mostra relevante para a qualidade do ar e para o conforto térmico, sendo aqui desprezada.

Em relação ao layout, a posição relativa entre a mesa de cirurgia e as grelhas de insuflamento e retorno é distinta nas duas salas, bem como das portas de acesso aos corredores limpo e sujo, conforme esquematizado na figura 23.

Figura 23 - Comparativo entre os layouts das salas A e F



Esquema Sala A do Centro Cirúrgico.

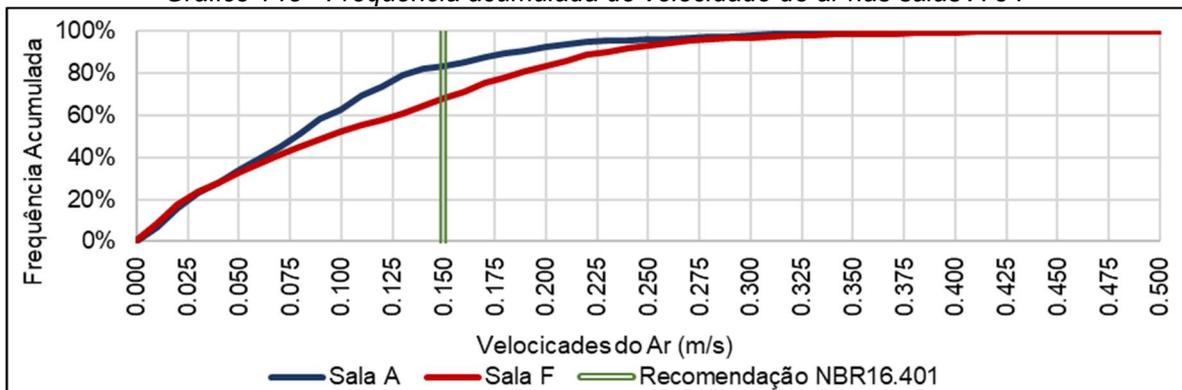
Esquema Sala F do Centro Cirúrgico.

Em observações prévias da velocidade do ar medida com anemômetro portátil pode-se perceber que, enquanto na sala A o fluxo de ar insuflado tem um percurso estimado de contorno da mesa de cirurgia, indo em direção à grelha de retorno, na sala F a movimentação ocasionada pelas constantes aberturas e fechamentos da porta de entrada contribui na modificação do fluxo de ar, que, na sequência, encontra nos equipamentos atrás da mesa cirúrgica um obstáculo e se dispersa próximo ao anestesiológico (Figura 23).

A configuração descrita fez com que no ponto de medição do ambiente – que nas duas salas possui mesma posição relativa à equipe e mesa cirúrgica – as velocidades do ar apresentassem mais fortes oscilações e maiores valores na sala F do que as observadas na sala A, fato que fica evidente no gráfico 145. A diferença no layout fez com que a conformidade com as velocidades do ar recomendadas pela NBR16.401 caísse de 84% (Sala A) para 68% (Sala F) do tempo em que o sistema de ventilação permaneceu ligado.

Neste caso, sugere-se, preliminarmente, a alteração do layout da Sala F, rotacionando em 90°, em sentido anti-horário, a mesa cirúrgica, de modo que ela fique perpendicular à parede onde estão localizados o insuflamento e retorno. Esta proposta será estudada na etapa de simulação, apresentada no capítulo 6.

Gráfico 145 - Frequência acumulada de velocidade do ar nas salas A e F



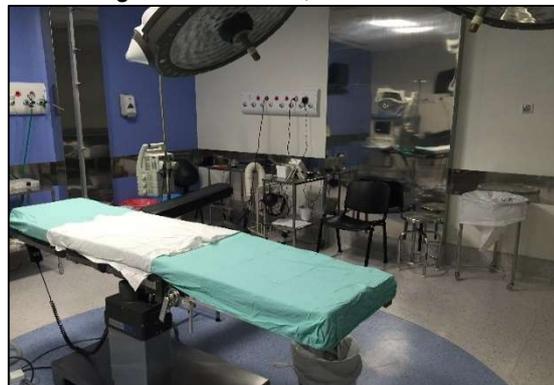
5.6.4.5. Efeitos da Modernização do Sistema de Distribuição de Ar

Dentre as salas de cirurgia estudadas estão compreendidas salas modernizadas (sala J) e salas não modernizadas (salas A e F). A referida modernização das salas contempla o sistema de distribuição de ar, o rebaixamento do forro, portas e esquadrias, acabamentos e equipamentos como pode ser observado nas figuras 24 e 25.

Figura 24 - Sala A, não modernizada



Figura 25 - Sala J, modernizada



Apesar de o sistema de distribuição ter sido modernizado, o sistema de climatização permaneceu inalterado em relação aos das outras salas do centro cirúrgico, de modo a também não haver nas salas modernizadas qualquer controle de *set point*, apenas o controle de ligar ou desligar o sistema todo (inclusive a ventilação).

Analisando as velocidades do ar no período em que o sistema de ventilação permaneceu ligado é possível notar, no gráfico 146, que o percentual do tempo em que o parâmetro está de acordo com o que indica a NBR 16.401 (velocidades do ar

menores ou iguais a 0,15m/s) é bastante discrepante entre as salas não modernizadas (A e F) e a sala modernizada (J). Percebe-se que, enquanto a composição das salas não modernizadas permanece 73,82% do tempo dentro do que recomenda a NBR16.401, na sala modernizada esse percentual é de 99,80%.

Gráfico 146 - Frequência acumulada de velocidade do ar nas salas modernizada e não modernizadas



O efeito da diferença no sistema de distribuição de ar pode ser percebido tanto nas mais adequadas velocidades do ar quanto na homogeneidade da temperatura na sala. Nas salas não modernizadas, apesar de ambos os grupos se sentirem desconfortáveis, o primeiro relatou sentir calor enquanto o segundo frio e desconforto por movimentação de ar. Na tabela 8, onde estão resumidos os resultados dos questionários, pode ser observado que a distribuição de ar da sala J reduz a sensação de desconforto em relação ao observado nas salas A e F.

Tabela 8 - Comparação entre os grupos de ocupantes nos diferentes tipos de sala

Atributo	Grupo I		Grupo II	
	Salas A e F	Sala J	Salas A e F	Sala J
Predominância de desconforto por movimentação de ar?	Não	Não	Sim	Sem predominância das respostas
Sensação térmica predominante	Desconforto (Calor)	Agradável	Desconforto (Frio)	Sem predominância das respostas

Como proposta de intervenção preliminar sugere-se a adoção da solução presente na sala J para os sistemas de distribuição das salas A e F. Esta solução, bem como outras variações, foi estudada a partir de simulações CFD e serão apresentadas no capítulo 6, dedicado às simulações computacionais.

6. SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Sendo o segundo grande eixo de desenvolvimento da pesquisa – após a parte experimental – as simulações CFD foram realizadas com o intuito de aprofundar o entendimento do comportamento do fluxo de ar na sala de cirurgia A, não modernizada, visando estudar propostas de intervenção para as deficiências encontradas e discutidas no capítulo 5.

6.1. Método de Trabalho

Conforme adiantado no capítulo de Estrutura da Pesquisa (Cap.4), aqui será abordado o método da etapa de simulações. Serão descritas e discutidas as características, propriedades e simplificações adotadas para o modelo de simulação e propostas de intervenção estudadas.

6.1.1. Definição das Propostas de Intervenção

Antes de se realizar a modelagem para simulação é fundamental definir quais serão as análises realizadas sobre seus resultados, bem como quais são os fenômenos a serem representados. Estas informações são essenciais na seleção do modelo de turbulência, definição das condições de contorno e para realizar as simplificações, necessárias a qualquer modelagem, de maneira criteriosa. Desta forma, é essencial definir previamente o que o modelo deverá representar, neste caso a sala original e as propostas de intervenção.

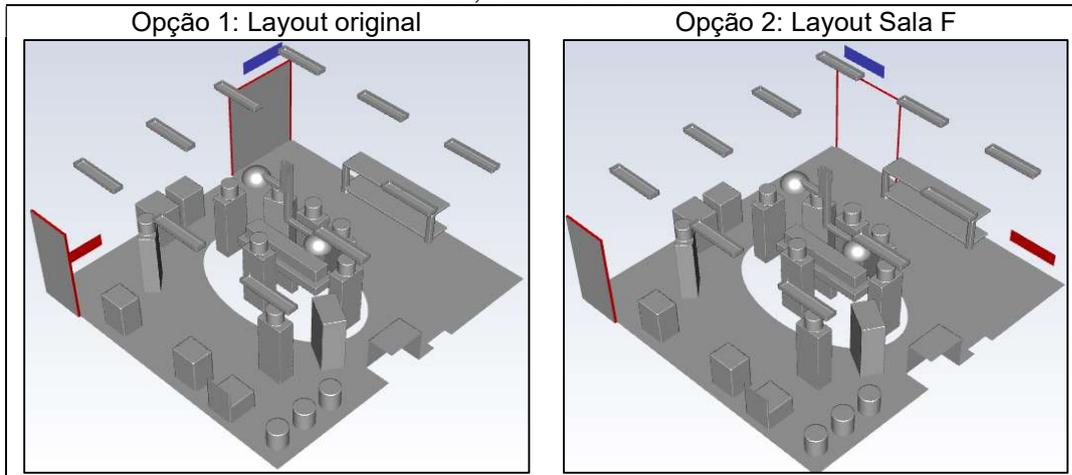
O Hospital Universitário da USP vem passando ao longo dos últimos anos por uma crise financeira, a qual reduziu severamente a capacidade de investimento da instituição. As propostas de intervenção foram concebidas levando este cenário em consideração, de modo a serem privilegiadas soluções de relativo baixo custo, isto é, evitando a utilização de componentes especiais, como difusores para fluxo de deslocamento ou hospitalares, bem como intervenções de grande porte no sistema de climatização ou no edifício. Além disso, buscou-se apresentar múltiplas e gradativas propostas de intervenção para as salas cirúrgicas, de forma que, munido de uma gama de soluções, o HU poderá adotar aquela que melhor se adequa à sua capacidade de execução.

As propostas de intervenção estudadas foram originadas com base nos resultados e discussões da parte experimental da pesquisa e, posteriormente, retroalimentadas com os resultados das próprias simulações, em um processo iterativo. Conforme observado no capítulo anterior, as principais deficiências deste sistema de ar-condicionado são relativas à distribuição de ar, seja pelo fato dela propiciar um espectro de temperaturas bastante heterogêneo (e inverso aos requisitos dos grupos usuários), ou por ocasionar desconforto por movimentação de ar. Ainda, as altas velocidades do ar e turbulência observados induzem maior suspensão de particulado no ar, inadequado para esse tipo de ambiente.

As propostas de intervenção simuladas, portanto, foram direcionadas para a melhoria destes pontos, com foco na distribuição de ar na sala. Para tanto, foram consideradas seis variáveis: (a) o layout da sala; (b) o layout dos difusores de insuflamento; (c) o rebaixamento de forro; (d) o layout e a pressurização de retornos; (e) o tipo do foco cirúrgico e (f) a temperatura de insuflamento, a saber:

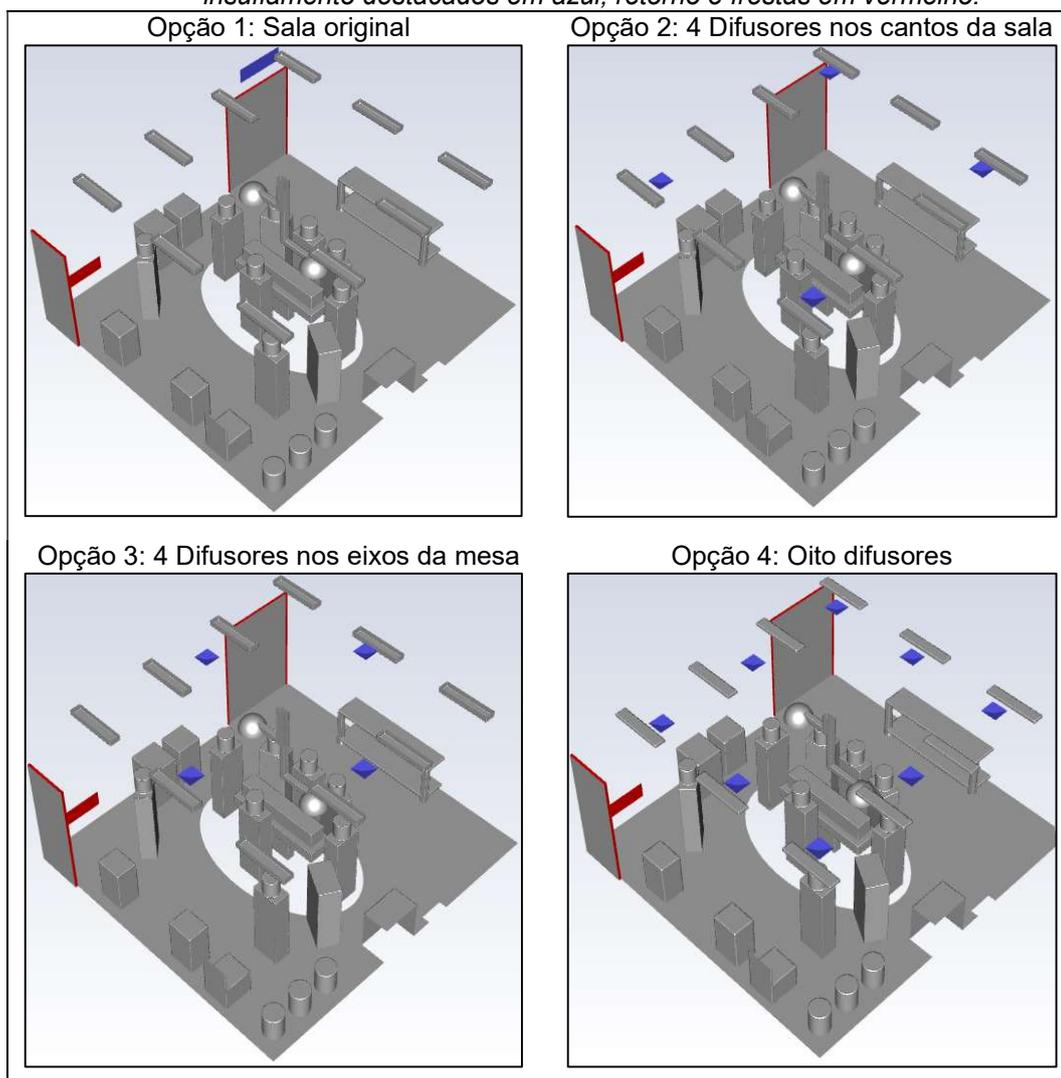
a) Layout da sala: Conforme discutido em 5.6.4.4., os resultados experimentais mostraram que o layout existente na Sala A se mostrou melhor do que o presente na Sala F quanto às condições de conforto térmico para o Grupo II, mas foram inconclusivos sobre seu efeito na qualidade do ar. Para elucidar esta questão, foram simuladas duas opções de layout para a Sala A. A primeira é a configuração original da sala e a segunda emulando o layout da sala F, ao se alterar a posição relativa entre a mesa cirúrgica, as portas e as grelhas de insuflamento e retorno. Na figura 26 estão apresentadas as opções simuladas;

Figura 26 - Comparativo dos layouts das salas A (esquerda) e F (direita). Insuflamento destacado em azul, retorno e frestas em vermelho.



b) Layout dos difusores de insuflamento: Foram considerados quatro layouts diferentes para os difusores de insuflamento, sendo eles: (1) a configuração original da sala A; (2) quatro difusores no teto posicionados nos cantos das salas (solução atualmente presente na sala J); (3) quatro difusores no teto posicionados nos eixos longitudinal e transversal da mesa cirúrgica e (4) a união das duas anteriores, com oito difusores no teto, conforme figura 27. Foram considerados preliminarmente difusores de 304mm e, alternativamente, de 360mm.

Figura 27 – Comparativo das opções de layout dos difusores de insuflamento. Difusores de insuflamento destacados em azul; retorno e frestas em vermelho.



c) Rebaixamento de forro: Foram consideradas, no caso das soluções com difusores de insuflamento no teto, opções com e sem forro rebaixado. O rebaixamento do forro, apesar de ser uma intervenção adicional, simplifica a implantação das soluções com difusores no teto, uma vez que dispensa a abertura de furos na laje. Por outro lado, o rebaixamento de forro reduz o pé-direito da sala, podendo ocasionar velocidades mais elevadas na altura da cabeça dos ocupantes (1,7m) ou no plano de trabalho (1,1m);

d) Layout e pressurização dos retornos: Conforme discutido no capítulo de Pesquisa Experimental, um dos principais problemas encontrados é relativo ao retorno de ar. Para mitigação deste problema foram analisadas três alternativas à configuração original para o retorno. A primeira delas consiste em forçar o

fluxo do retorno já existente com um exaustor, cuja vazão foi dimensionada de modo a prevenir a infiltração de ar pelas frestas das duas portas de acesso. A segunda proposta é a criação de um retorno adicional no canto da sala oposto ao que está localizado o retorno atual (Figura 28), conforme dispõe a NBR7256/2021. Para isso seria criado um chanfro no vértice da sala para possibilitar a instalação de um duto de retorno desde a nova grelha, próxima ao piso, até o pavimento técnico, pelo qual o duto seria encaminhado até o exterior do edifício, em ponto de expurgo (Figura 29). A terceira opção consiste na união das duas anteriores, ou seja, a criação do retorno adicional conjuntamente com a pressurização dos dois retornos por exaustores, também dimensionados para que não haja infiltração de ar pelas frestas das portas.

Figura 28 – Vista isométrica do modelo da sala com o retorno adicional destacado. Difusor de insuflamento em azul; retornos e frestas em vermelho

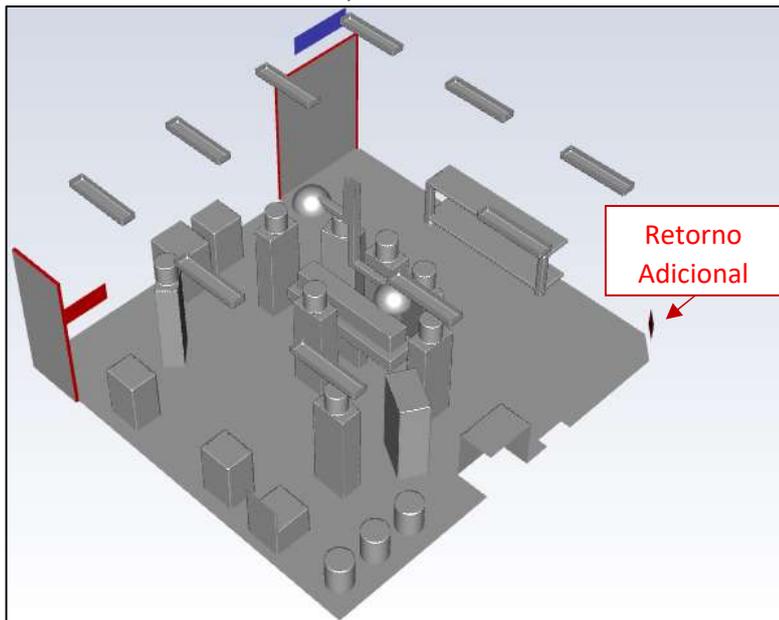
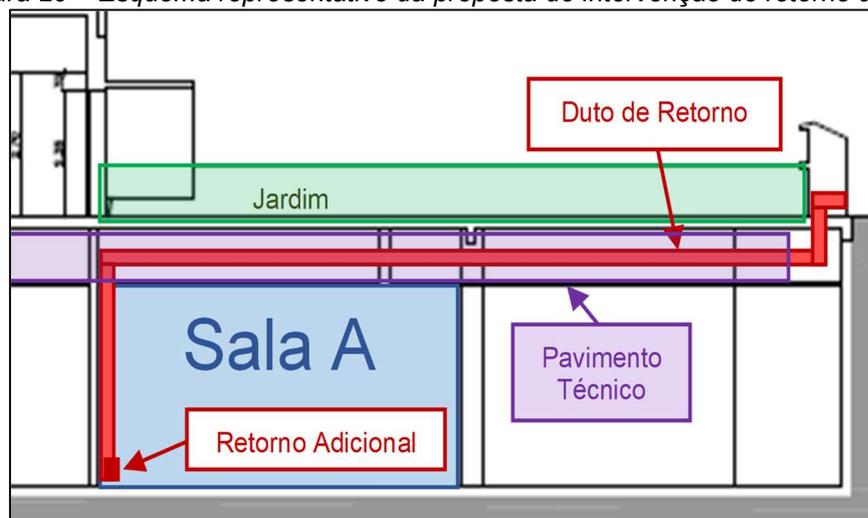


Figura 29 – Esquema representativo da proposta de intervenção de retorno adicional

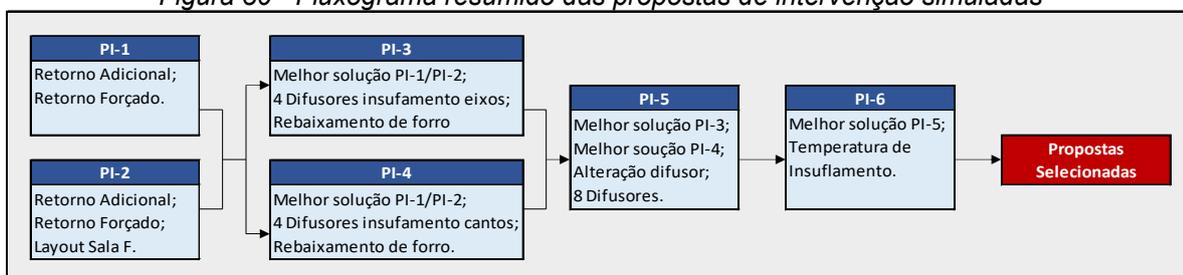


e) Foco cirúrgico: O foco cirúrgico existente nas salas não-modernizadas é uma importante fonte de calor, próxima aos ocupantes do Grupo I, definido no capítulo 5, que são mais suscetíveis a sentirem calor. O foco cirúrgico hoje instalado nessas salas possui lâmpadas halógenas, cuja carga térmica é muito superior quando comparada à de lâmpadas de LED, como é o caso dos focos instalados nas salas modernizadas. Assim considerou-se analisar a troca do tipo de foco cirúrgico. Os resultados das simulações mostraram que o efeito do foco cirúrgico é direcional e localizado, sendo, portanto, altamente dependente da posição e orientação dos canhões de luz. Desta forma, a adequada modelagem destes atributos é fundamental para a condução da análise aqui pretendida. Porém, o foco cirúrgico possui braços e articulações que lhe conferem possibilidade de movimento nos seis graus de liberdade, o que faz com que a modelagem aqui realizada – com o foco em uma posição arbitrária – não seja suficiente para a condução da análise pretendida. Sendo assim, o tipo do foco cirúrgico não foi considerado como uma variável para as propostas de intervenção neste trabalho;

f) Alteração da temperatura de insuflamento: A última variável a ser considerada é a alteração na temperatura de insuflamento, a qual foi variada ao longo do intervalo de 16,5°C (289,5K) a 20°C (293K), em passos de 0,5°C.

Apesar da simulação CFD permitir a testagem de muitas propostas de intervenção a relativo baixo custo, para simular todas as combinações das duas opções de layout da sala com as quatro opções de layout dos difusores, duas alternativas de forro, quatro variações de retorno, dois tamanhos de difusores e oito temperaturas de insuflamento seriam necessárias 1024 simulações, o que seria absolutamente ineficiente. Desta forma, as variáveis analisadas foram combinadas em seis grupos de propostas de intervenção (PI-1 a PI-6) menores e sequenciais, conforme quadro da figura 30. Assim foi possível relacionar estas variáveis performando apenas 42 simulações distintas.

Figura 30 - Fluxograma resumido das propostas de intervenção simuladas



6.1.2. Modelagem

Como todo modelo é uma representação simplificada do objeto real, para poder analisar de maneira adequada os resultados de uma simulação é essencial entender como foi realizada a modelagem, tendo seus objetivos e simplificações bem definidos, assim compreendendo sua abrangência e suas limitações. Neste trabalho, as simulações têm como objetivo a análise das condições de qualidade do ar interior e conforto térmico, especialmente relacionadas à distribuição de ar, na sala de cirurgia A do HU, em situação de uso regular, tanto em sua configuração original quanto nas propostas de intervenção definidas em 6.1.1.

6.1.2.1. Regime Temporal

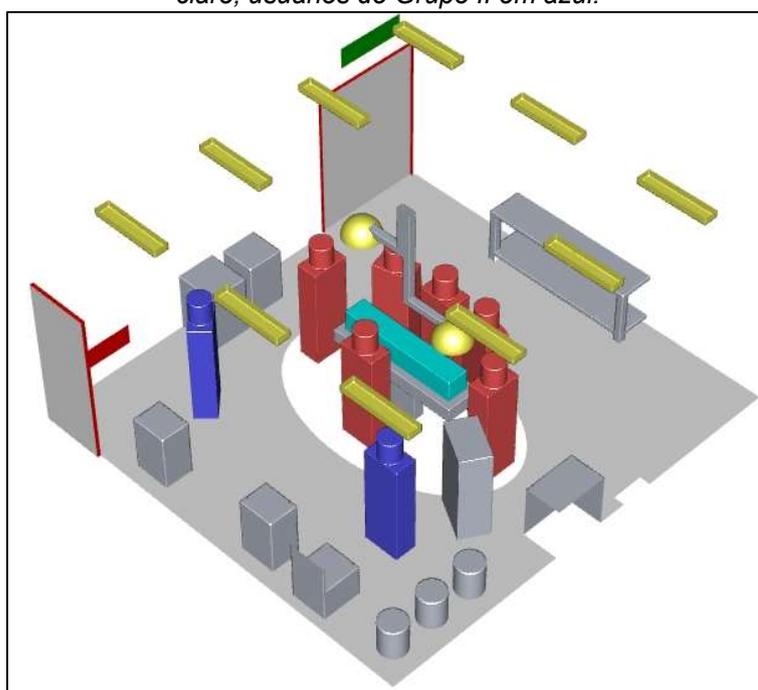
Com o intuito de reduzir o custo computacional total da análise, optou-se por realizar simulações das múltiplas propostas de intervenção em regime permanente, caracterizando uma ocupação média constante com o sistema de climatização em funcionamento durante tempo suficiente para que as condições iniciais da sala

sejam irrelevantes para a análise na condição de equilíbrio. Tal simplificação pode ser realizada uma vez que o sistema de climatização instalado não possui controle de *set point*, de forma que a temperatura e velocidade de insuflamento são variáveis independentes do tempo. A ocupação na sala, apesar de não ser constante ao longo das cirurgias, dada a sua baixa padronização, foi simplificada às suas características médias, de modo a também se tornar independente do tempo.

6.1.2.2. Modelagem Geométrica

A modelagem geométrica foi realizada no *SpaceClaim*, *plug-in* de CAD do *Ansys*. O modelo reflete a Sala A do centro cirúrgico do HU, em situação de uso para procedimento ortopédico, considerando as peças de mobiliário e a ocupação. Como o objetivo da simulação é o entendimento do comportamento do fluxo de ar e dos perfis de temperatura no interior da sala, o comportamento das variáveis de análise nas adjacências do mobiliário e das pessoas é de baixo interesse, de modo que suas geometrias foram simplificadas, buscando reduzir a necessidade de refinamentos de malha nestas regiões e, por consequência, diminuir o custo computacional da simulação (Figura 31).

Figura 31 - Vista isométrica do modelo da Sala A original. Paredes e teto foram retirados da vista para melhor visualização. Insuflamento destacado em verde; retorno e frestas em vermelho; mobiliário em cinza; luminárias e foco cirúrgico em amarelo; paciente em ciano; usuários do Grupo I em vermelho claro; usuários do Grupo II em azul.



6.1.2.3. Malha de Elementos Finitos

O tipo de malha utilizada foi a poliédrica. Este tipo de malha se conforma mais facilmente à geometria complexa da sala ocupada do que uma malha hexaédrica. Além disso, gera uma expressiva redução na quantidade elementos, quando comparada a uma malha tetraédrica, o que se reflete em redução do custo computacional.

A malha poliédrica, porém, induz mais erros numéricos do que outros tipos de malha, especialmente na modelagem de fluxos laminares em camadas limite. Como forma de mitigação, recorreu-se ao recurso “*Inflation*”, que consiste na criação de uma malha de elementos hexaédricos nas imediações das principais superfícies.

Foram criados refinamentos locais de malha nas regiões de maior complexidade de geometria ou de fluxo, de modo a se garantir a resolução adequada sem a necessidade de reduzir o elemento padrão.

Por fim, foi conduzida uma análise de sensibilidade para a malha de elementos finitos a fim de determinar a dimensão do elemento padrão utilizado. A análise partiu de um elemento de 300mm o qual foi sendo reduzido em 25mm a cada passo, até que se obtivesse a malha otimizada. As malhas de 300mm a 225mm apresentaram problemas para convergência ou distorções nos resultados, sendo descartadas da análise, de forma que a malha de 200mm possa ser considerada como a primeira malha viável. Foram analisadas as métricas de assimetria e qualidade ortogonal, comparativamente ao custo computacional, medido na quantidade de elementos.

A assimetria é uma das principais métricas para análise da qualidade de malhas de elementos finitos para uso em fluidodinâmica. Ela mede o quanto o elemento de malha se diferencia de um elemento regular. No caso de uma célula tetraédrica, por exemplo, em relação a uma pirâmide formada por triângulos equiláteros. Em elementos tridimensionais, como é o caso, a assimetria é medida pela diferença relativa de volume entre o elemento de malha e o elemento regular de mesma esfera circunscrita. Desta forma, quanto menor for a assimetria dos elementos da malha, mais ela se aproxima da malha ótima. (ANSYS, 2010)

A qualidade ortogonal também é uma das métricas de qualidade de malha mais relevantes. Uma vez que cada elemento finito é considerado homogêneo com as características de seu ponto central e a relação entre um elemento e seus

adjacentes é dada por suas faces comuns, essa métrica representa o quão coincidente é o vetor normal às faces em relação ao vetor formado entre os centros das duas células em contato. Desta forma, quanto mais próxima de 1 for a qualidade ortogonal, ou seja, quanto mais coincidentes forem esses vetores, melhor a malha.

Foram utilizadas como referências para as análises de sensibilidade a média da assimetria e da qualidade ortogonal do conjunto de elementos da malha, bem como as médias destes indicadores pioradas em um e dois desvios padrão (σ). Desta forma foi verificado se ela atende ao que é recomendado no manual do usuário do Ansys Fluent (2010). Foi também analisado o custo computacional, medido em número de elementos, das possíveis malhas. Conforme os gráficos 147 e 148, foi possível perceber que todas as malhas testadas já apresentaram resultados satisfatórios.

Gráfico 147 - Análise de sensibilidade assimetria da malha de elementos finitos

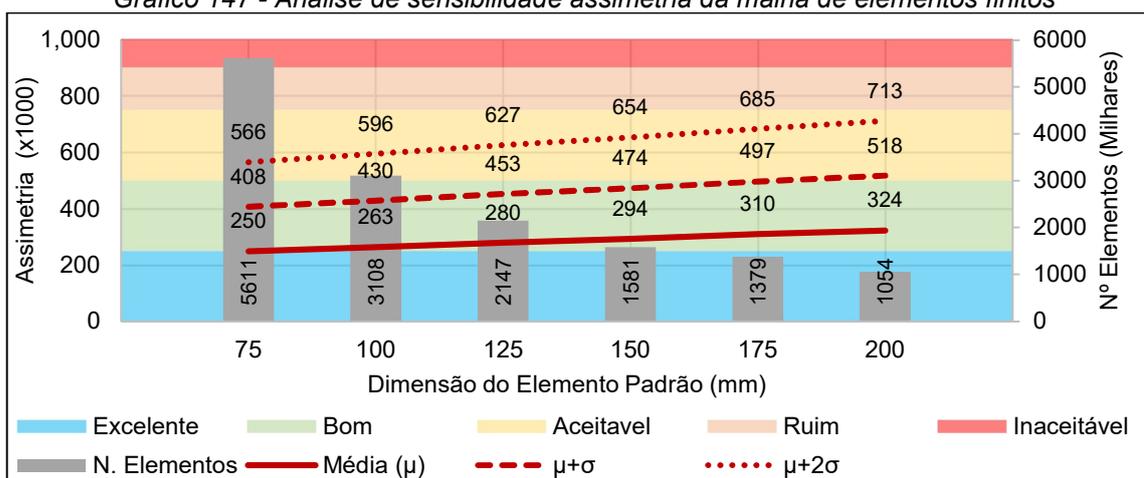
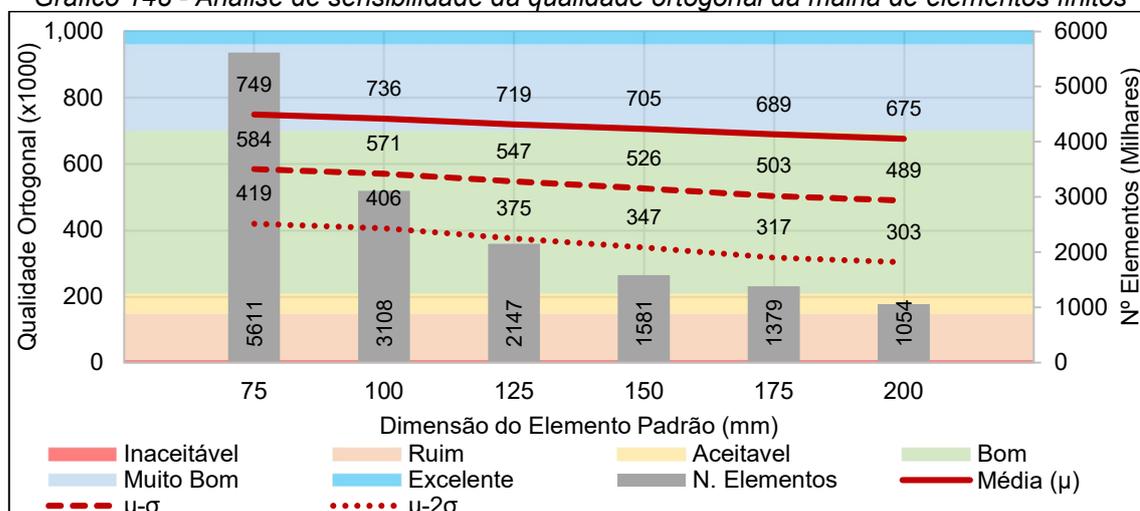
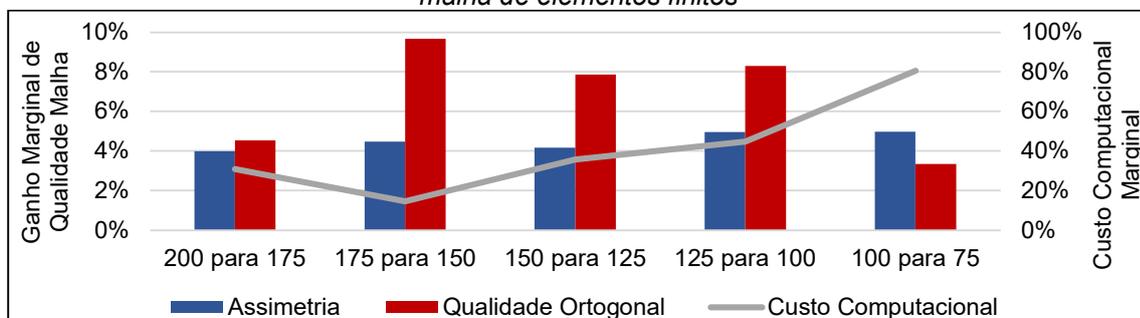


Gráfico 148 - Análise de sensibilidade da qualidade ortogonal da malha de elementos finitos



Analisando o ganho de qualidade em cada refinamento, bem como o custo computacional atrelado a ele (Gráfico 149), é possível notar que até a malha de elementos de 100mm há um ganho importante (superior a 4% para ambas as métricas) de qualidade a cada refino, atrelado a um aumento controlado (limitado a 50%) no custo computacional. Ao se passar da malha com elementos de 100mm para a de elementos com 75mm, o acréscimo do custo computacional é superior a 80%, atrelado a um ganho de qualidade ortogonal inferior ao que se percebia nos refinamentos anteriores. Desta forma optou-se por adotar a malha com elementos de 100mm.

Gráfico 149 - Ganho de qualidade perante crescimento do custo computacional pelo refinamento da malha de elementos finitos



6.1.2.4. Modelo de Turbulência

Como abordado no Capítulo 3, a utilização de um modelo de turbulência adequado é condição fundamental para o sucesso de uma simulação fluidodinâmica. No caso deste projeto é necessária a escolha de um modelo de turbulência que seja adequado para escoamentos com Reynolds relativamente altos, uma vez que o insuflamento se dá a altas velocidades, mas que também seja adequado para escoamentos de camada limite, presente em algumas das propostas de intervenção.

Para a seleção do modelo a ser utilizado, a sala em sua configuração original foi simulada com diferentes modelos de turbulência para que se pudesse fazer uma análise comparativa entre eles e os resultados experimentais. Foram simulados os modelos SST, RSM e k- ϵ padrão, pré-selecionados por serem os mais adequados dadas as características do escoamento estudado. Obteve-se que o modelo SST é o que representava o escoamento do ar de forma mais fidedigna, considerando como referência os indicadores CV(RMSE) e MBE, conforme tabelas 9

e 10. Um modelo pode ser considerado calibrado se os resultados de suas simulações atingem simultaneamente um MBE inferior, em valores absolutos, a 10% e um CV(RMSE) menor o que 30% em comparações horárias (ASHRAE, 2002).

Tabela 9 - Análise de sensibilidade do modelo de turbulência - Indicador CV(RMSE)¹⁹

Modelo de Turbulência	Temperatura de bulbo seco			Velocidade do ar
	Insuflamento	Ambiente	Retorno	Ambiente
SST	7,8%	9,8%	3,7%	25,9%
RSM	8,4%	9,5%	4,9%	36,6%
k-ε padrão	7,1%	9,8%	3,2%	36,8%

Tabela 10 - Análise de sensibilidade do modelo de turbulência - Indicador MBE

Modelo de Turbulência	Temperatura de bulbo seco			Velocidade do ar
	Insuflamento	Ambiente	Retorno	Ambiente
SST	5,7%	-3,2%	-1,9%	-14,2%
RSM	6,4%	-2,2%	3,8%	-29,4%
k-ε padrão	4,6%	-3,3%	4,6%	-29,7%

6.1.2.5. Condições de Contorno

As superfícies do modelo podem ser categorizadas em três tipos de condições de contorno: insuflamento, paredes e retorno, além de condições especiais, como de simetria, por exemplo. A depender dos fenômenos físicos sob análise podem ser definidos diferentes atributos para cada uma das condições de contorno. No caso deste trabalho as propriedades de interesse são as térmicas e cinéticas.

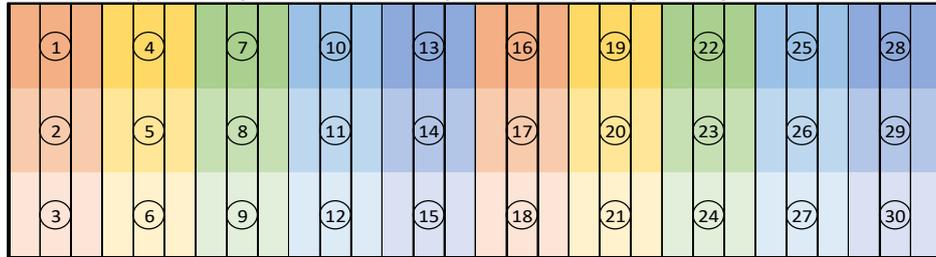
Algumas das condições de contorno puderam ser definidas diretamente através de valores obtidos nas medições em campo, como a velocidade e a temperatura de insuflamento. Já em outros casos, como por exemplo as propriedades térmicas das superfícies corporais dos ocupantes, algumas considerações adicionais ou simplificações tiveram que ser adotadas, a saber:

- a) Insuflamento:** As condições de contorno no insuflamento puderam ser definidas diretamente com base nas medições e observações em campo. Para a determinação da vazão de insuflamento mediu-se as velocidades do ar em trinta pontos da grelha de insuflamento, ilustrados na figura 32, de forma que

¹⁹ Os valores apresentados nas tabelas 9 e 10 se referem apenas a esta análise de sensibilidade, não podendo ser considerados para outros fins. Foram realizadas modificações no modelo após esta etapa.

foi calculada a vazão em cada uma das seções. O mesmo procedimento foi feito para a temperatura. Na modelagem o insuflamento foi considerado uniformemente distribuído pela grelha com suas características médias;

Figura 32 - Esquema representativo dos pontos de medição na grelha de insuflamento



b) Paredes Piso e Teto: As superfícies de paredes, pisos e teto foram consideradas à temperatura constante de 292,5K, temperatura média do ar da sala desocupada e com o ar-condicionado desligado. A temperatura pode ser considerada constante uma vez que a sala A está afastada de outras fontes de calor relevantes, já que a sala B está desativada e as demais paredes são comuns a grandes corredores, com movimentação esparsa. Acrescenta-se a isso o fato de o centro cirúrgico estar localizado no subsolo, sob piso técnico, de forma que alterações nas condições climáticas são pouco influentes nas condições térmicas internas. Isso pode ser evidenciado pela baixa amplitude da temperatura na sala nos momentos em que ela permanece desocupada, independente da estação do ano ou horário verificados na etapa experimental;

c) Superfícies corporais: O ser humano é um animal homeotérmico, ou seja, é capaz de manter a sua temperatura corporal constante, ainda que exercendo atividades de intensidades distintas e estando em ambiente com características térmicas variadas. Para isso o sistema termorregulador utiliza-se da respiração e transpiração. No modelo de simulação, porém, as pessoas são modeladas sob a condição de contorno do tipo “parede”, não havendo atributos de respiração ou transpiração, apenas de condução, convecção e radiação nas superfícies expostas do corpo, cuja geometria também foi simplificada à forma aproximada de um paralelepípedo. Desta forma, para que o modelo represente de forma coerente as trocas de calor com o ambiente de pessoas exercendo atividades distintas, sem que as suas temperaturas corporais sejam alteradas,

foram estabelecidas condições de contorno de condução, convecção e radiação equivalentes para cada um dos grupos de ocupantes. Uma vez que a magnitude das transferências de calor depende do diferencial de temperatura entre corpo e o fluido adjacente tiveram que ser conduzidos processos iterativos para cada um destes grupos para determinação destes coeficientes equivalentes;

d) Foco Cirúrgico: Para a modelagem, o foco cirúrgico foi dividido em duas partes, o vidro, voltado para o paciente, e a casca superior, por onde ele é manuseado. Uma vez que a casca superior possui isolamento térmico para que a equipe cirúrgica possa movimentar o equipamento, mesmo após longos períodos em funcionamento, ela foi assumida como adiabática;

e) Retorno: O retorno foi modelado como “*pressure-outlet*”, sendo atribuída pressão relativa nula. Foi admitida a possibilidade de fluxo reverso, uma vez que em algumas ocasiões este fenômeno foi observado durante as medições. Neste caso a temperatura do ar foi determinada a 292,5K, pelo mesmo racional apresentado para a condição de contorno das paredes;

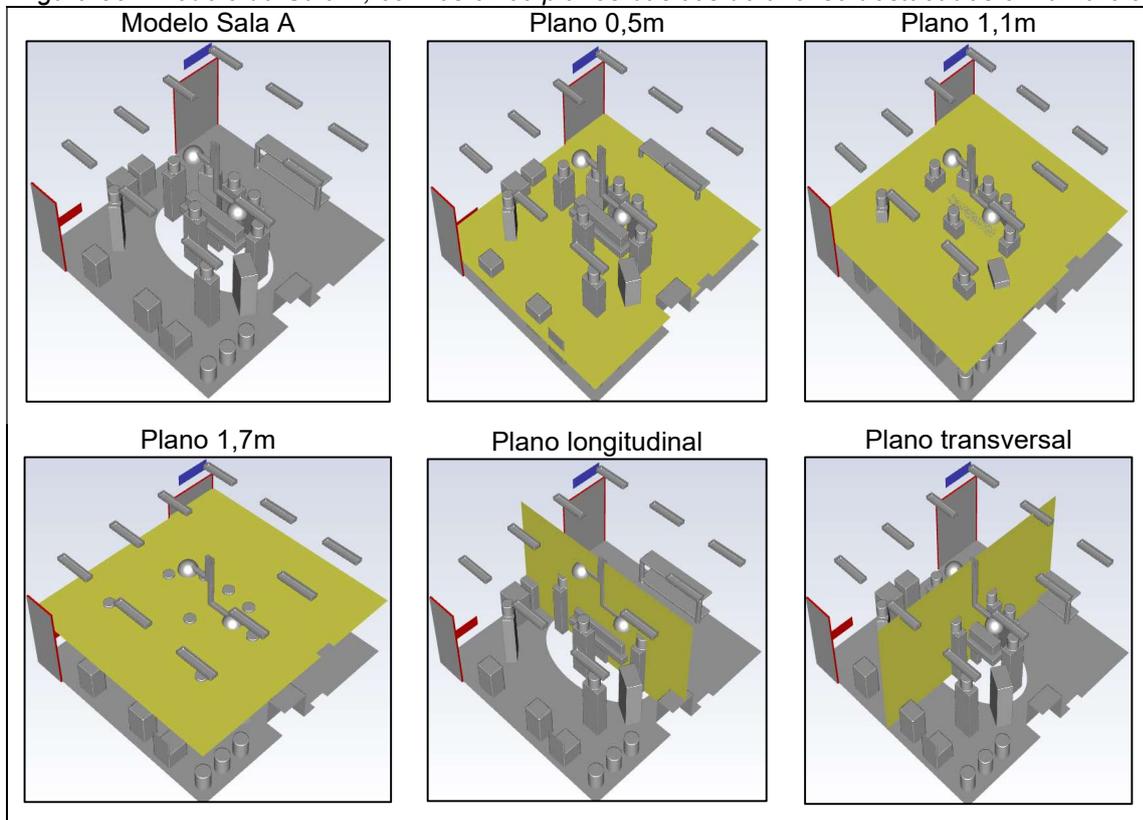
f) Frestas: As portas de acesso à Sala A deixam frestas entre 0,5cm e 2,5cm, inclusive na de acesso ao “Corredor Sujo”, sendo as possíveis infiltrações fatores de interesse na análise dos resultados. Desta forma, as frestas foram modeladas como “*pressure-outlet*”, sendo atribuída pressão relativa nula. Foi admitida a possibilidade de fluxo reverso, à temperatura de 292,5K, pelo racional apresentado para a condição de contorno das paredes.

6.1.2.6. Análises das Simulações e das Propostas de Intervenção

Os resultados das simulações foram analisados a partir da observação de cinco planos de corte básicos, verificados para todas as propostas de intervenção, bem como na observação de fenômenos locais, particulares de cada uma das propostas. Dos cinco planos básicos três são planos horizontais a 0,50m, 1,1m e 1,7m do piso, buscando refletir as alturas das grelhas de retorno, o plano de trabalho e a altura da cabeça da equipe cirúrgica, respectivamente (Figura 33). Os outros

dois planos são os longitudinal e transversal à mesa de cirurgia, também destacados em amarelo na figura 33.

Figura 33 - Modelo da Sala A, com os cinco planos básicos de análise destacados em amarelo



6.2. Validação do Modelo

Antes de analisar os resultados das simulações faz-se necessário verificar se o modelo é capaz de representar a sala de maneira suficientemente fidedigna.

As simulações foram realizadas em regime permanente buscando refletir a situação de equilíbrio em uma cirurgia ortopédica realizada com o ar-condicionado ligado. Para a comparação com os resultados de simulação foram selecionados os dados experimentais coletados durante cirurgias com características similares às adotadas no modelo computacional. Na tabela 11 estão apresentados os critérios utilizados na seleção dos períodos equivalentes.

Dos onze procedimentos monitorados na Sala A, seis se enquadraram nestes critérios, resultando em um período equivalente total de 618 minutos. Os resultados coletados nos três pontos de medição internos referentes à temperatura de bulbo

seco e à velocidade do ar foram comparados aos obtidos na simulação para os pontos de coordenadas semelhantes.

Tabela 11 - Critérios para seleção dos períodos equivalentes

Atributo	Propriedade no modelo	Critério para seleção dos períodos equivalentes
Número de ocupantes	8 profissionais	6 a 10 profissionais
Tipo da cirurgia	Ortopédica	Ortopédica
Duração da cirurgia	Regime permanente (em equilíbrio)	Superior a uma hora, 15min iniciais desconsiderados
Sistema de climatização	Ligado (em equilíbrio)	Ligado, 15min subsequentes ao acionamento desconsiderados

Foram utilizados para a validação do modelo os indicadores do coeficiente de variação da raiz do erro médio quadrático (CV(RMSE) – Root-Meen-Squared-Error) e de erro médio de viés (MBE – Mean-Bias-Error). Todos foram calculados para duas periodicidades (um minuto e uma hora), nos três pontos de medição internos para a temperatura do ar e no ponto “ambiente” para velocidade do ar.

O CV(RMSE) é um indicador de precisão frequentemente utilizado na calibração e validação de modelos computacionais. Tipicamente, modelos cujos resultados de simulação atingem um CV(RMSE) inferior a 30% em comparações horárias podem ser considerados calibrados (ASHRAE, 2002). O MBEs é um indicador de acurácia, portanto sensível ao erro de viés e complementar ao CV(RMSE). Considera-se um modelo como calibrado se os resultados de suas simulações atingem um MBE inferior, em valores absolutos, a 10% em comparações horárias (ASHRAE, 2002).

As diferenças entre a média dos resultados de medição e do de simulação na temperatura foram de 0,3°C no ponto do ambiente, 0,6°C no do insuflamento e 0,5°C no do retorno, resultando em indicadores CV(RMSE) e MBE adequados para se considerar o modelo calibrado (Tabela 12). O mesmo pode ser observado para a velocidade do ar.

Tabela 12 - Indicadores CV(RMSE) e MBE, na comparação horária

Indicador	Temperatura de bulbo seco			Velocidade do ar
	Insuflamento	Ambiente	Retorno	Ambiente
CV(RMSE)	6,1%	9,7%	3,9%	22,2%
MBE	2,9%	-3,0%	2,2%	-5,2%

Os indicadores foram também calculados para uma frequência de análise de uma comparação por minuto (Tabela 13). Considera-se, portanto, que o modelo está calibrado, sendo possível conduzir as análises pretendidas sobre os resultados de suas simulações.

Tabela 13 - Indicadores CV(RMSE) e MBE, com uma comparação por minuto

Indicador	Temperatura de bulbo seco			Velocidade do ar
	Insuflamento	Ambiente	Retorno	Ambiente
CV(RMSE)	6,4%	9,1%	4,3%	29,2%
MBE	2,8%	-1,5%	2,2%	-5,0%

6.3. Resultados

Após validado o modelo, foram conduzidas as simulações para a sala em sua condição original e para as seis propostas de intervenção, com suas variações, conforme apresentado na figura 30, no item 6.1.1.

6.3.1. Sala Original

Assim como identificado nos resultados experimentais, pode-se verificar na região periférica da sala temperaturas mais baixas, especialmente na região lateral à mesa cirúrgica na qual está a grelha de insuflamento (parte inferior na figura 34), entre 18°C e 21°C a 1,1m do piso. Já na parte central da sala, próxima à mesa de cirurgia, são observadas temperaturas mais elevadas, entre 22°C e 25°C. Além de temperaturas mais baixas, no entorno da sala foram verificadas velocidades do ar mais elevadas, majoritariamente acima de 0,25m/s, a 1,1m do piso (Figura 35), que contribuem para a sensação desconforto relatada pelo Grupo II nos questionários.

Figura 34 - Mapa de temperatura do ar, a 1,1m do piso, na Sala A original

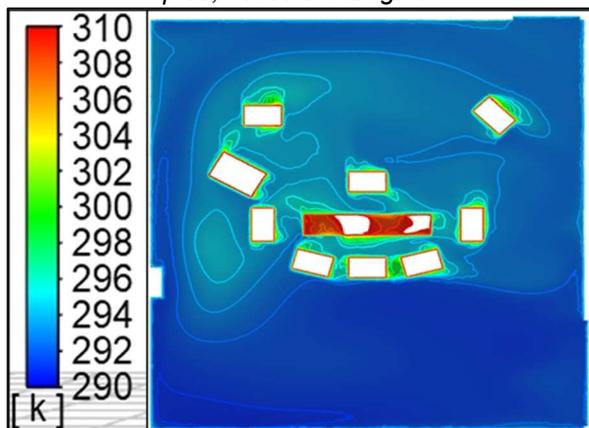
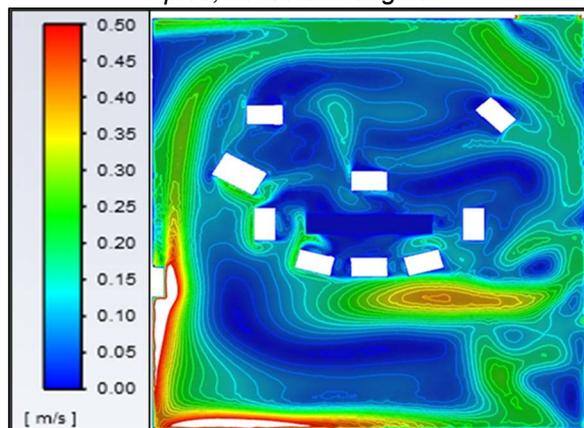


Figura 35 - Mapa de velocidade do ar, a 1,1m do piso, na Sala A original



Ao se observar o plano transversal à mesa (Figura 36) percebe-se que enquanto na região lateral à mesa em que está a grelha de insuflamento (à direita na Figura 36) a temperatura fica na faixa de 17°C a 20°C, na outra lateral são observadas temperaturas de 20°C a 22°C. Na lateral do insuflamento também são observadas velocidades do ar mais elevadas, atingindo 1,2m/s no fluxo principal e 0,45m/s próximo ao piso (Figura 37).

Figura 36 - Mapa de temperatura do ar, no plano transversal à mesa de cirurgia, na Sala A original

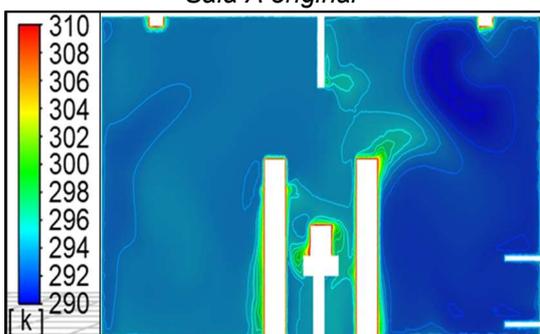
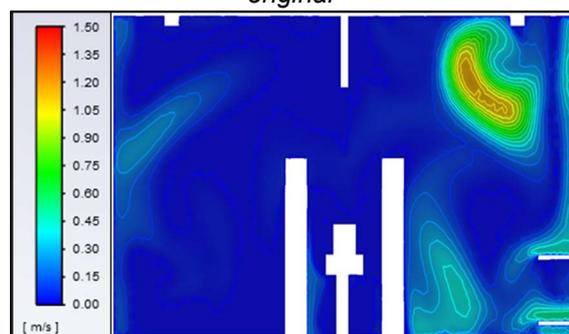


Figura 37 - Mapa de velocidade do ar, no plano transversal à mesa de cirurgia, na Sala A original

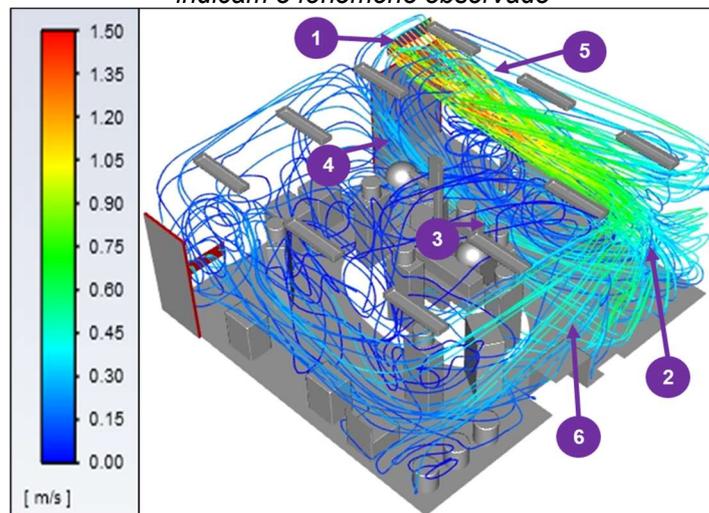


Além de contribuir para a sensação de desconforto relatada pelos usuários, o sistema de distribuição de ar, por causa das velocidades elevadas do ar, contribui para a dispersão de particulado pela sala. Reitera-se que é através das partículas em suspensão que os agentes patogênicos são transportados e, no caso deposição sobre feridas do paciente, podem ocasionar infecções.

Na figura 38 pode-se perceber a existência de um fluxo de ar que promove a suspensão de partículas na sala, o qual é aqui descrito em seis passos, a saber: (1)

o ar é insuflado a altas velocidades por uma grelha na parede; (2) ao atingir a parede oposta, a 0,85m/s, parte do fluxo é direcionado para baixo, de encontro ao piso; (3) o fluxo de ar volta em direção à parede onde está a grelha de insuflamento, mas próximo ao piso, ainda a velocidade elevada (0,55m/s), potencialmente carregando material particulado em deposição; (4) pela subpressão gerada abaixo da grelha de insuflamento, o fluxo de ar é direcionado para cima; (5) o fluxo de ar em questão é misturado ao fluxo de insuflamento e (6) parte do fluxo de ar se distribui para o restante da sala.

Figura 38 - Linhas de fluxo, coloridas pela velocidade do ar, na Sala A original. Setas de 1 a 6 indicam o fenômeno observado



Os resultados da simulação corroboram o observado nas medições: a distribuição de ar é ineficiente para garantir tanto as condições adequadas de conforto térmico dos diferentes grupos de usuários quanto a remoção do particulado em suspensão na sala. Desta forma o conjunto das seis propostas de intervenção buscam a mitigação destes problemas, de maneira gradativa. A primeira proposta busca reduzir o particulado em suspensão através de alterações no retorno.

6.3.2. Proposta de Intervenção 1

As propostas de intervenção estudadas são incrementais, portanto, a primeira (PI-1) é a mais simplificada. Ela consiste na análise de combinações entre as opções de layout e pressurização de retornos, conforme descrito em 6.1. Estas alterações no retorno têm como objetivo a redução da quantidade de particulados

em suspensão, a ser alcançada tanto por uma maior remoção deste particulado pelos retornos quanto pela redução da velocidade no fluxo de ar próximo ao piso, conforme descrito no item anterior, diminuindo o levantamento de partículas em deposição. Ao se combinar estas opções obtém-se quatro variações da proposta, conforme tabela 14.

Tabela 14 - Variações da Proposta de Intervenção 1

Proposta	Retorno Adicional	Retorno Forçado
PI-1-A	Não	Não
PI-1-B	Não	Sim
PI-1-C	Sim	Não
PI-1-D	Sim	Sim

São percebidos efeitos positivos para a qualidade do ar, em especial ao fenômeno de espalhamento de partículas já mencionado, nas três alternativas propostas (B, C e D). Observando nas figuras 39 a 42, o plano a 0,5m do piso (equivalente ao passo 3 indicado na figura 38), é verificada uma redução na magnitude da velocidade do ar em 0,05m/s na solução com retorno único forçado (PI-1-B), em 0,1m/s na opção com retorno adicional não forçado (PI-1-C) e em 0,15m/s na com dois retornos forçados (PI-1-D), em relação à sala original (PI-1-A).

Figura 39 - Mapa de velocidade do ar a 0,5m do piso na PI-1-A. Seta indicando o passo 3 do fenômeno descrito na figura 38

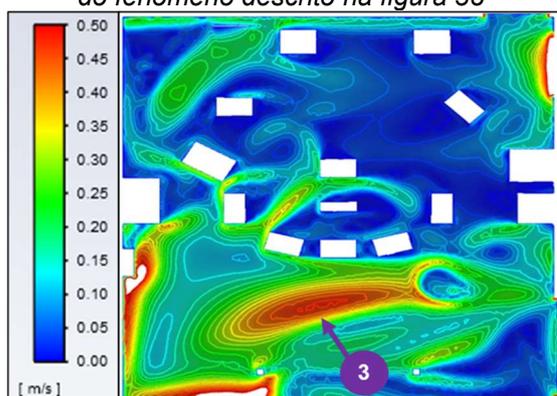


Figura 40 - Mapa de velocidade do ar a 0,5m do piso na PI-1-B. Seta indicando o passo 3 do fenômeno descrito na figura 38

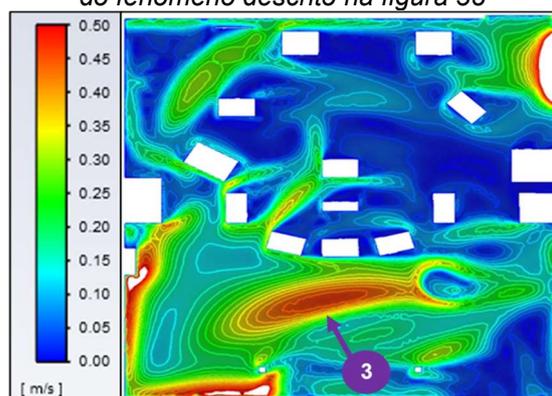


Figura 41 - Mapa de velocidade do ar a 0,5m do piso na PI-1-C. Seta indicando o passo 3 do fenômeno descrito na figura 38

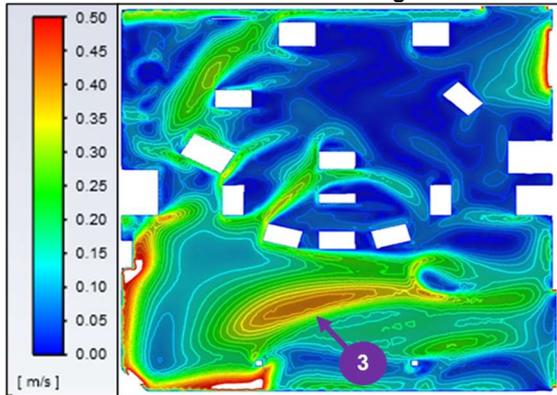
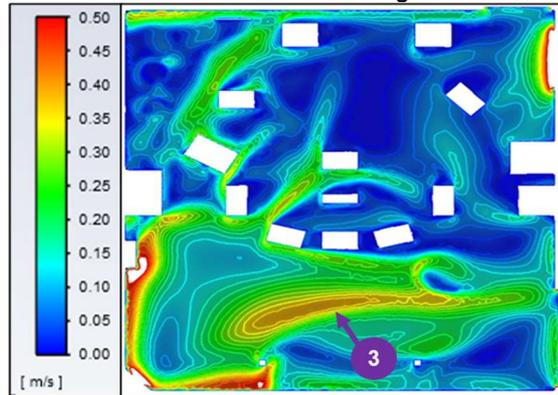


Figura 42 - Mapa de velocidade do ar a 0,5m do piso na PI-1-D. Seta indicando o passo 3 do fenômeno descrito na figura 38



Pelas linhas de fluxo de ar (Figuras 43 a 46), pode-se perceber que essas reduções na velocidade do ar ocasionam em dispersão de parte do fluxo entre os passos 3 e 4, reduzindo a sua mistura com o ar insuflado (passo 5). A solução que apresentou o melhor desempenho é a com dois retornos forçados (PI-1-D).

Figura 43 - Linhas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-1-A. Setas de 3 a 5 conforme figura 38.

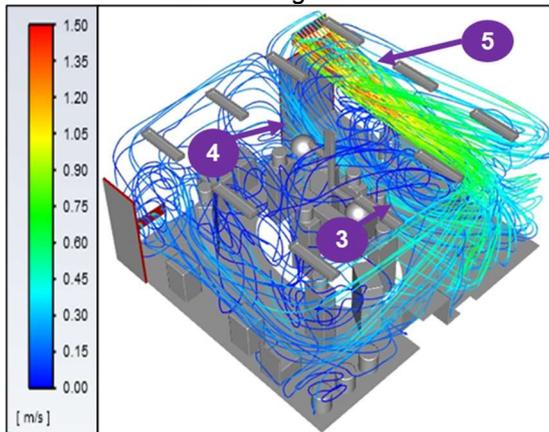


Figura 44 - Linhas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-1-B. Setas de 3 a 5 conforme figura 38.

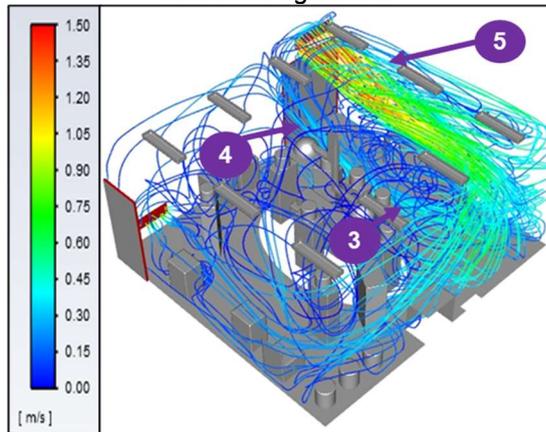


Figura 45 - Linhas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-1-C. Setas de 3 a 5 conforme figura 38.

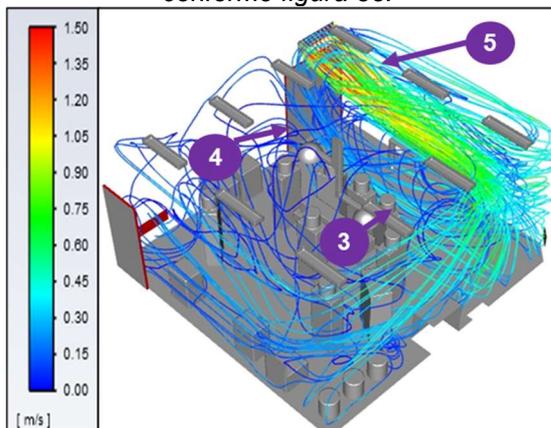
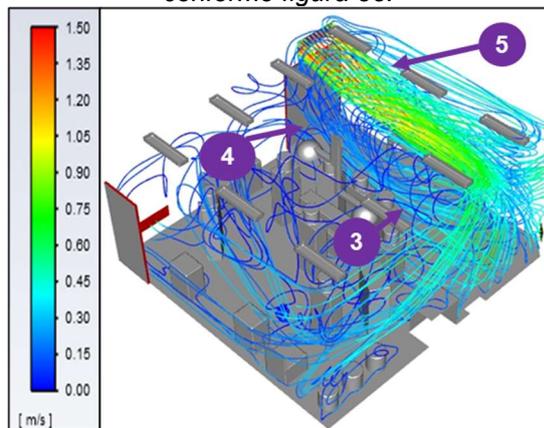


Figura 46 - Linhas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-1-D. Setas de 3 a 5 conforme figura 38.



Pode-se notar por meio das figuras 47 e 48 que a pressurização do retorno original (PI-1-B) atenua a diferença de temperatura entre as duas laterais da mesa. Isso ocorre devido à redução de pressão na lateral em que está o retorno, agora forçado, induzindo o fluxo de ar insuflado para esta região, que fica mais fria. Porém, pelos resultados dos questionários tem-se que os usuários do Grupo II, cujo posto de trabalho fica nesta lateral, já sentiam frio na configuração original, situação de desconforto que se agravaria com a adoção da PI-1-B.

Figura 47 - Mapa de temperatura do ar, a 1,1m do piso, na PI-1-A

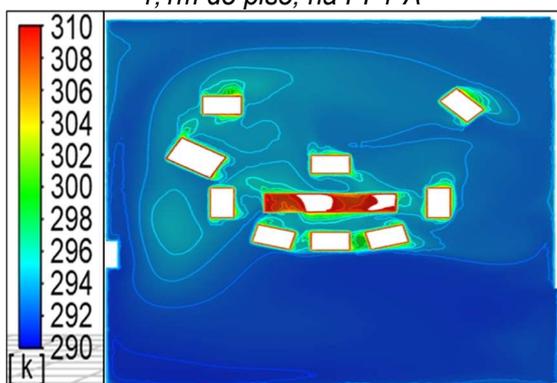
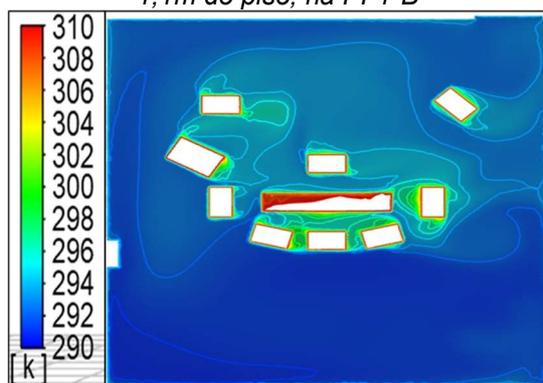


Figura 48 - Mapa de temperatura do ar, a 1,1m do piso, na PI-1-B



Por outro lado, as soluções com retorno adicional (Figuras 49 e 50) levam a um aumento na temperatura da lateral da mesa em que se localiza o retorno original, o que contribui para a redução da sensação de desconforto já mencionada. Porém, ao se analisar os efeitos no centro da sala, onde os usuários do Grupo I relataram

sentir calor, observa-se um aumento da temperatura do ar, o que agravaria o desconforto por eles relatado.

Figura 49 - Mapa de temperatura do ar, a 1,1m do piso, na PI-1-C

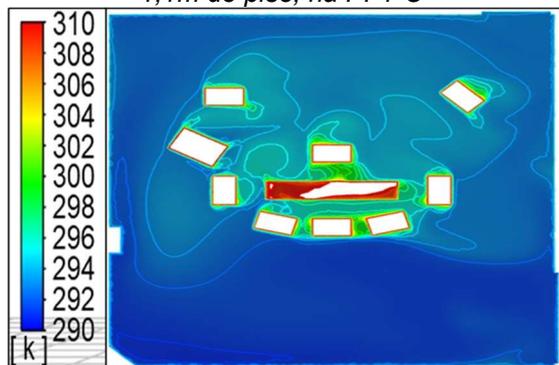
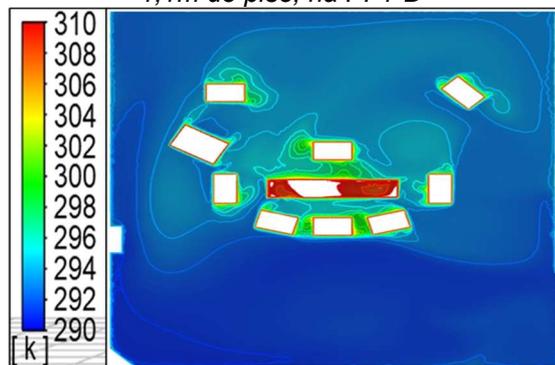


Figura 50 - Mapa de temperatura do ar, a 1,1m do piso, na PI-1-D



Tendo em vista que em todas as soluções propostas há simultaneamente uma melhora das condições de conforto térmico para um dos grupos de ocupantes e uma piora para o outro, bem como o fato de que o principal objetivo da primeira proposta de intervenção é a redução do material particulado em suspensão e que a opção PI-1-D é a que melhor atenua o principal fenômeno de levantamento de partículas, esta foi a selecionada.

6.3.3. Proposta de Intervenção 2

A proposta de intervenção 2 (PI-2) se assemelha com a primeira, ao se alterar layout e pressurização de retornos, mas apresenta uma intervenção adicional, o layout da sala, emulando o atualmente existente na Sala F. Os resultados experimentais mostraram que as condições de conforto térmico na Sala A eram melhores do que na Sala F, mas não foram suficientes para analisar os efeitos da diferença de layout na qualidade do ar interior, no que diz respeito ao material particulado em suspensão. Pretende-se com a presente proposta elucidar esta questão e assim propor a utilização do layout mais eficiente em ambas as salas. Na tabela 15 estão apresentadas as variações de retorno estudadas para esta proposta de intervenção. A NBR7256/2021 recomenda que na impossibilidade de haver mais do que dois retornos, eles se localizem em cantos opostos da sala. Porém, no canto oposto ao retorno existente na Sala F, há a porta de acesso ao Corredor Limpo. O

retorno adicional foi posicionado, então, no canto adjacente ao atual, mas na lateral oposta da mesa cirúrgica.

Tabela 15 - Variações da Proposta de Intervenção 2

Proposta	Layout da Sala	Retorno Adicional	Retorno Forçado
PI-2-A	Layout Sala F	Não	Não
PI-2-B		Não	Sim
PI-2-C		Sim	Não
PI-2-D		Sim	Sim

Analisando inicialmente os resultados da sala na configuração em que não há alteração de retornos, isto é, a configuração original da Sala F com a ocupação típica da Sala A (PI-2-A), pode ser observada uma diferença de temperatura entre as duas regiões laterais à mesa cirúrgica, assim como verificado para a configuração original da Sala A. Na lateral próxima à porta de acesso ao Corredor Limpo (parte superior da figura 51), a temperatura a 1,1m do piso varia entre 19°C e 21°C, enquanto na lateral oposta, próxima à porta de acesso ao Corredor Sujo, entre 21°C e 24°C. Na parte central, também a 1,1m do piso, são observadas temperaturas mais elevadas, em torno de 24°C. As velocidades no entorno da sala (Figura 52) são mais elevadas do que no centro da sala, superando o limite máximo de 0,15m/s recomendado pela NBR16.401 (2008), em diversos pontos, o que é coerente com os resultados dos questionários, nos quais os usuários classificados no Grupo II queixaram-se de desconforto por movimentação de ar.

Figura 51 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-2-A

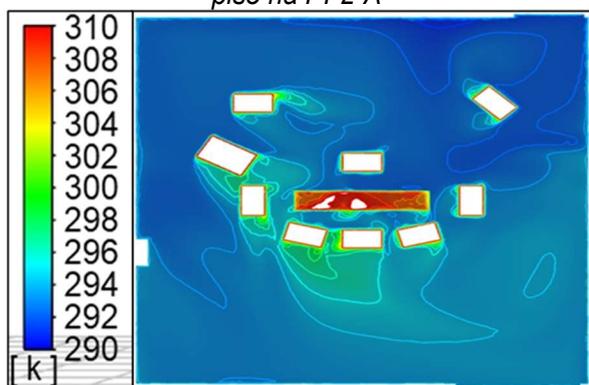
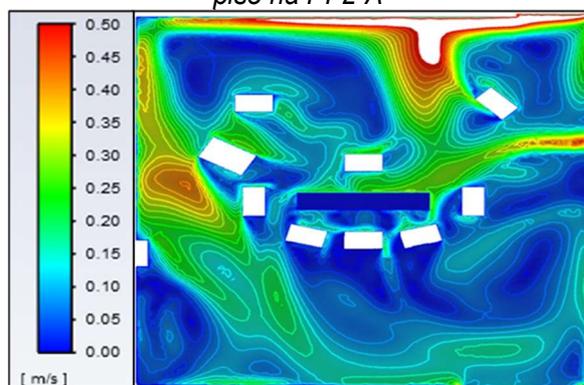


Figura 52 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-2-A



Assim como para a configuração original da Sala A, aqui também pode ser observada a formação de um fluxo de ar que mantém o material particulado em

suspensão na sala. Este fenômeno será aqui descrito em oito passos, os cinco primeiros indicados na figura 53 e os demais na figura 54, a saber: (1) o ar é insuflado a altas velocidades em direção à parede oposta; (2) ao atingir a parede oposta ainda a altas velocidades, parte do fluxo de ar é desviado em direção ao canto oposto à porta de acesso ao corredor sujo (passo três) e parte em direção ao piso (passo seis); (3) ainda a altas velocidades (0,45m/s), o ar flui próximo ao piso, potencialmente carregando partículas em deposição; (4) o fluxo de ar encontra no mobiliário próximo à cabeceira da mesa cirúrgica um obstáculo e desvia em direção ao teto e à porta de acesso ao corredor sujo; (5) parte do fluxo é desviada em direção ao paciente; (6) parte do fluxo de ar insuflado, ao atingir a parede oposta ao insuflamento (passo dois) é desviado em direção ao piso; (7) ainda a altas velocidades (0,55m/s), o fluxo de ar se encaminha em direção à mesa de cirurgia, próximo ao piso; (8) desviado pela ocupação e mobiliário, o fluxo de ar sobe e se dispersa sobre o paciente.

Figura 53 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar, na PI-2-A

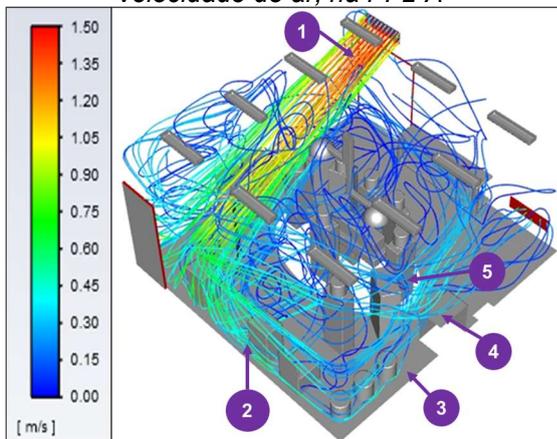
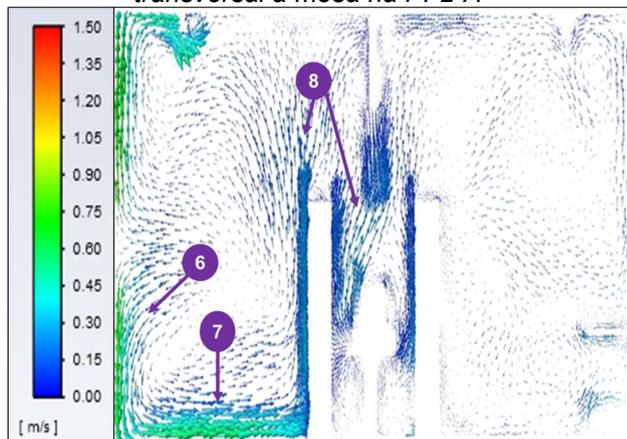


Figura 54 - Vetores de velocidade do ar no plano transversal à mesa na PI-2-A²⁰



As alterações de retorno têm por objetivo reduzir este fenômeno e, por consequência, o material particulado em suspensão na sala, principalmente nas adjacências do paciente. Pelas figuras 55 a 58, pode-se perceber que nas soluções com retorno adicional (PI-2-C e PI-2-D) há uma interrupção do fluxo no passo 3 e, conseqüentemente, uma redução no “espalhamento” do material particulado ocorrido nos passos subsequentes. A pressurização do retorno adicional intensifica essa redução (PI-2-D). Adicionalmente, a pressurização do retorno original (PI-2-B e

²⁰ Vetores coloridos pela magnitude da velocidade do ar nas componentes do plano.

PI-2-D) provoca, durante o passo 4, um desvio no fluxo de ar, que é direccionado para a grelha de retorno.

Figura 55 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar, na PI-2-A

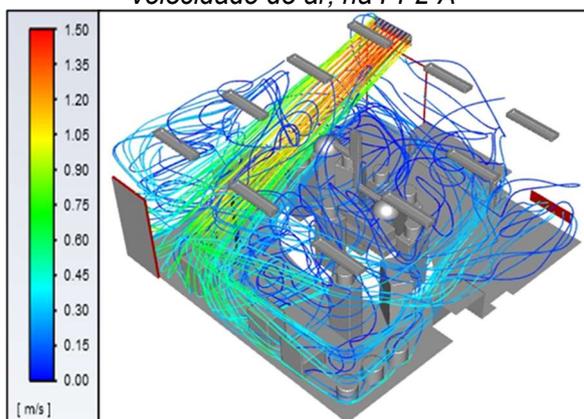


Figura 56 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar, na PI-2-B

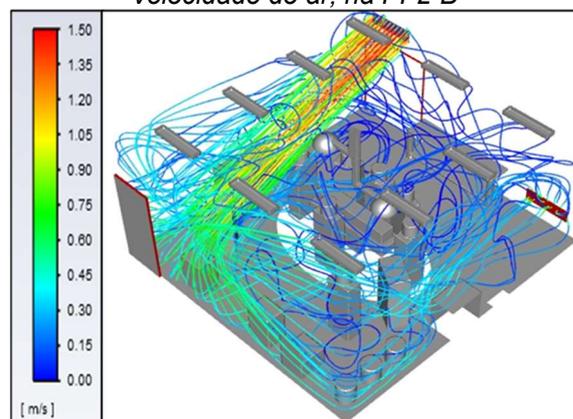


Figura 57 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar, na PI-2-C

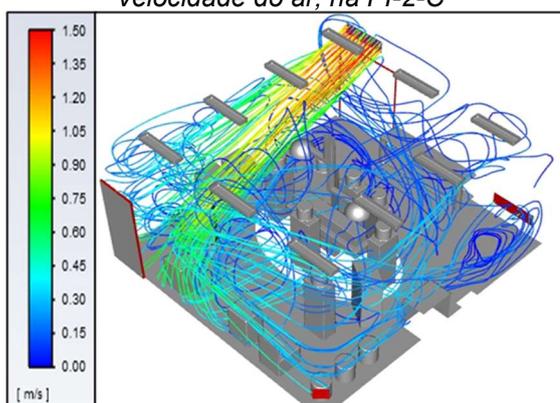
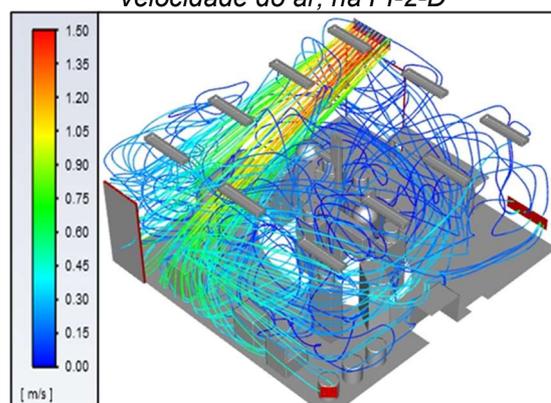


Figura 58 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar, na PI-2-D



A partir destes resultados, pode-se afirmar que a variação da segunda proposta de intervenção mais eficiente em reduzir o material particulado em suspensão na sala é a com dois retornos forçados (PI-2-D). Comparando-a com a opção seleccionada na primeira proposta de intervenção (PI-1-D), percebe-se que o layout da Sala F é menos eficiente do que o da Sala A no que diz respeito à retirada de particulado da sala. Com estes resultados, em conjunto com os experimentais, que mostram que o layout da Sala F também é menos eficiente em promover o conforto térmico para os usuários do Grupo II, descarta-se a alteração de layout para a Sala A. Por outro lado, sugere-se a alteração do layout da Sala F, rotacionando a mesa cirúrgica em 90°, para que a posição relativa entre a mesa cirúrgica e as grelhas de insuflamento e retorno seja semelhante à da Sala A.

6.3.4. Proposta de Intervenção 3

A terceira proposta já apresenta uma intervenção de maior porte em relação às duas primeiras, alterando, além do layout e da pressurização dos retornos, o layout dos difusores de insuflamento. O layout aqui proposto consiste em quatro difusores de quatro vias posicionados nos eixos da mesa cirúrgica, como descrito em 6.1. Além disso, foram estudadas opções com e sem rebaixamento de forro. O forro rebaixado acompanha a troca das luminárias de sobrepor para modelos de embutir. Na tabela 16 estão resumidas as características de cada uma das variações da proposta.

Tabela 16 - Caracterização das variações da terceira proposta de intervenção

Proposta	Insuflamento	Retorno Adicional	Retorno Forçado	Forro Rebaixado
PI-3-A	Quatro difusores de quatro vias nos eixos da mesa	Não	Sim	Sim
PI-3-B		Não	Sim	Não
PI-3-C		Não	Não	Sim
PI-3-D		Não	Não	Não
PI-3-E		Sim	Sim	Sim
PI-3-F		Sim	Sim	Não
PI-3-G		Sim	Não	Sim
PI-3-H		Sim	Não	Não

Com a alteração no layout dos difusores de insuflamento não são mais observadas as diferenças de temperatura entre as regiões central e periférica da sala ou entre as duas laterais da mesa cirúrgica (Figuras 59 a 66), como ocorre na Sala A original. Foi verificada, em todas as suas variações, melhoria das condições de conforto térmico para os dois grupos de usuários, uma vez que se observa uma redução da temperatura do ar no centro da sala e um aumento na do entorno, respectivamente onde o Grupo I relatou sentir calor e o Grupo II frio.

Figura 59 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-A

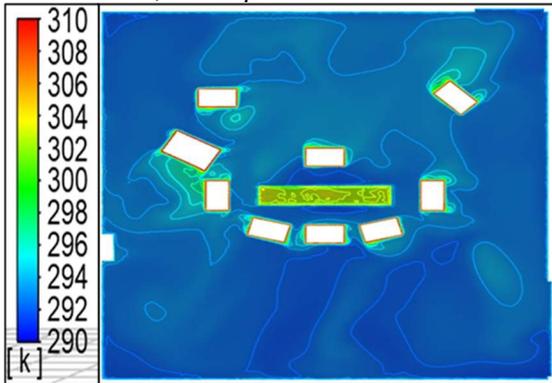


Figura 60 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-B

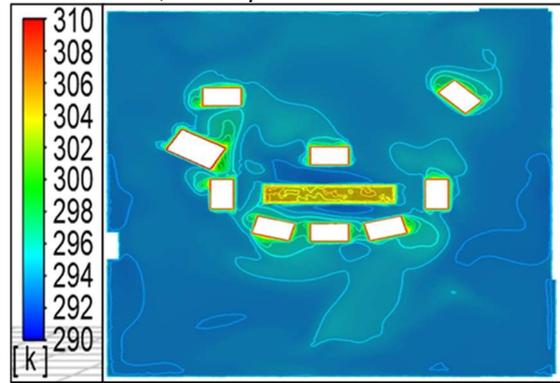


Figura 61 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-C

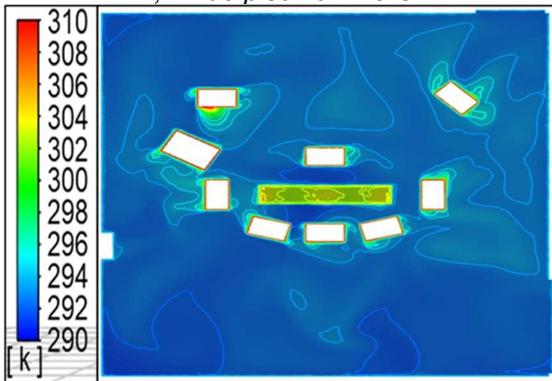


Figura 62 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-D

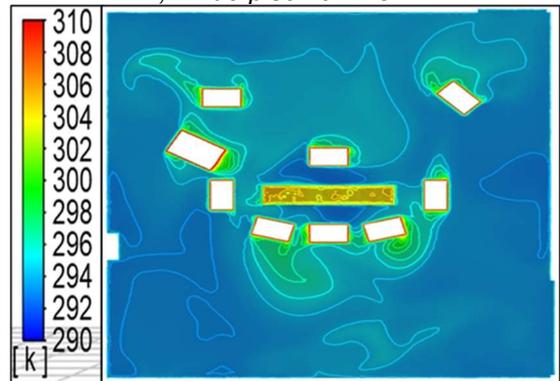


Figura 63 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-E

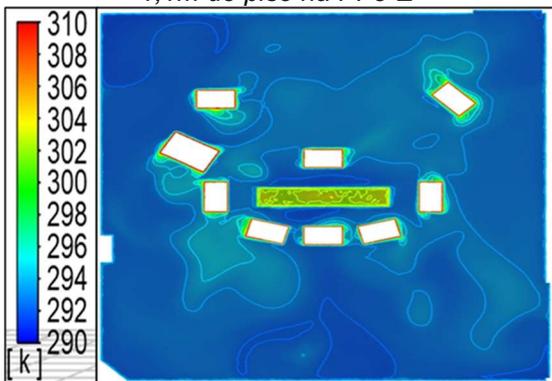


Figura 64 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-F

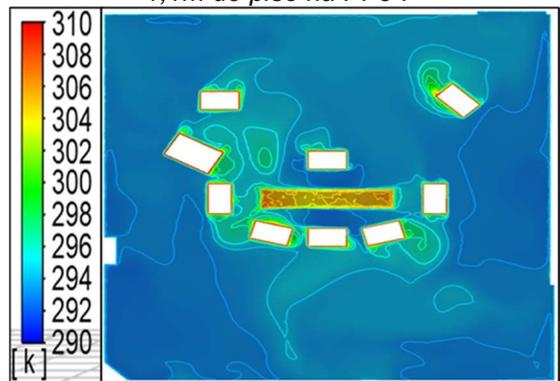


Figura 65 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-G

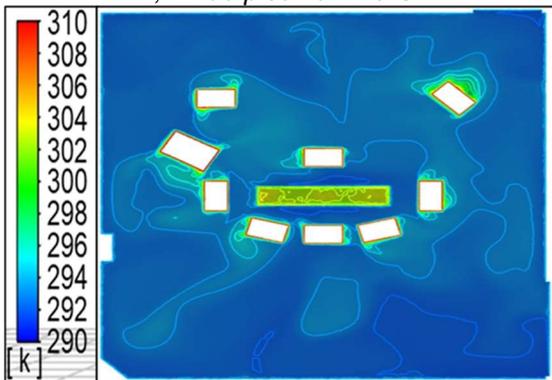
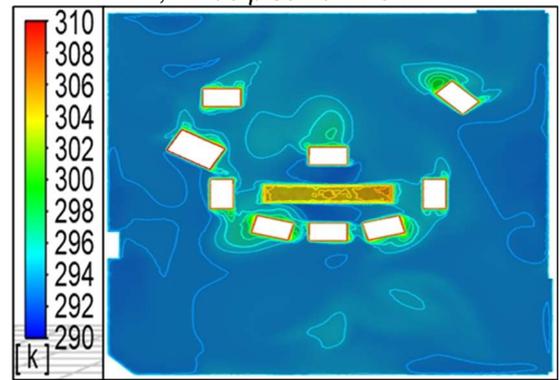


Figura 66 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-3-H



Em todas as opções são observadas reduções da velocidade do ar nas regiões mais afastadas da mesa cirúrgica, mas apenas nas opções sem o rebaixamento de forro a velocidade do ar permanece majoritariamente abaixo do limite máximo recomendado (NBR16.401, 2008) de 0,15m/s (Figuras 67 a 74).

Figura 67 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-A

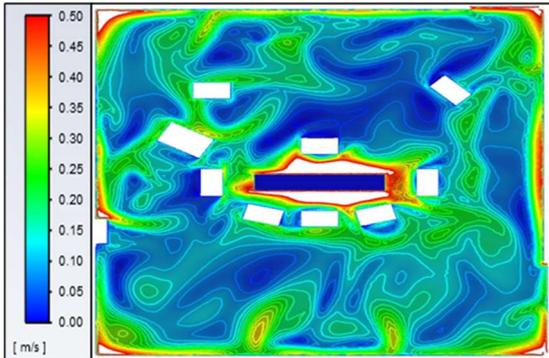


Figura 68 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-B

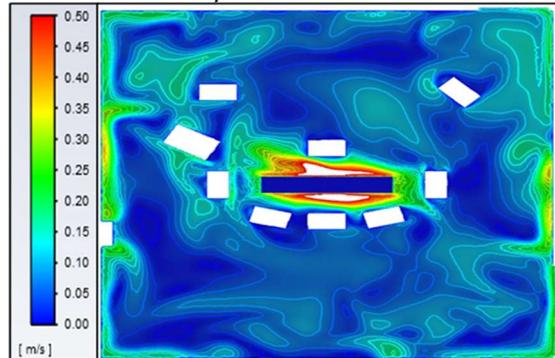


Figura 69 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-C

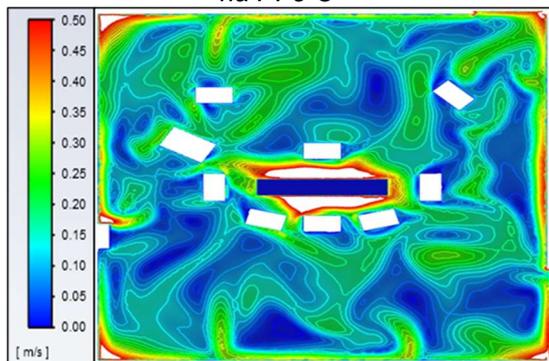


Figura 70 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-D

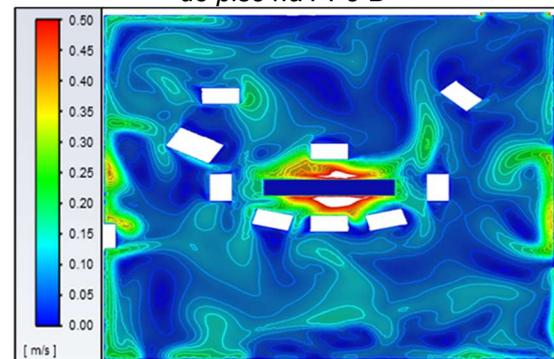


Figura 71 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-E

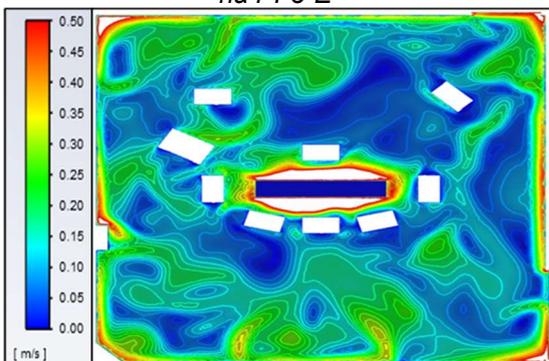


Figura 72 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-F

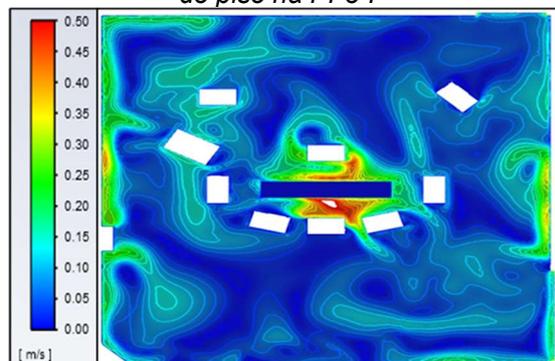


Figura 73 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-G

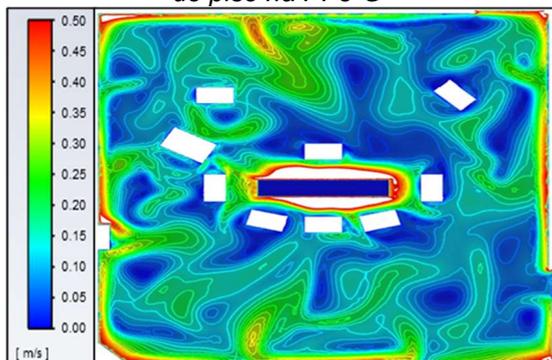
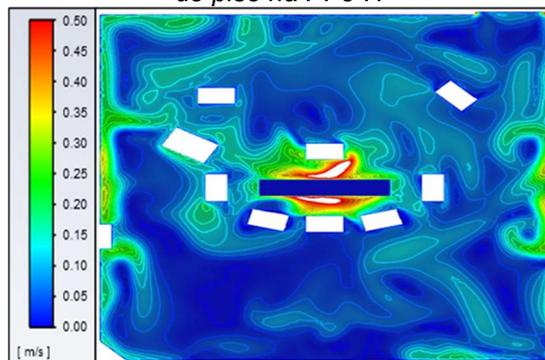


Figura 74 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-3-H



Em todas as opções, porém, são observadas altas velocidades do ar sobre a mesa cirúrgica, ocasionada pela confluência do ar insuflado pelas vias centrais dos quatro difusores. Esse problema é atenuado nas soluções sem o forro rebaixado, dado o maior pé-direito, como pode ser percebido nas figuras 75 e 76. Nelas estão apresentados os mapas de velocidade do ar no plano longitudinal da mesa para duas variações da proposta, diferenciadas apenas pela existência do forro rebaixado. Um fluxo de ar incidente no paciente é inadequado, uma vez que com isso é ampliada a possibilidade do contato de algum patógeno com os seus tecidos expostos, elevando a probabilidade de ocasionar uma infecção. Em decorrência disso, foram descartadas todas as opções desta proposta que preveem o rebaixamento de forro.

Figura 75 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-3-E

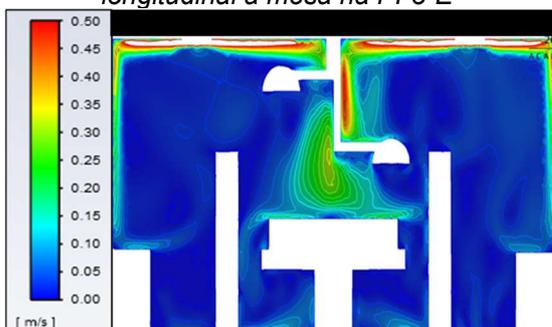
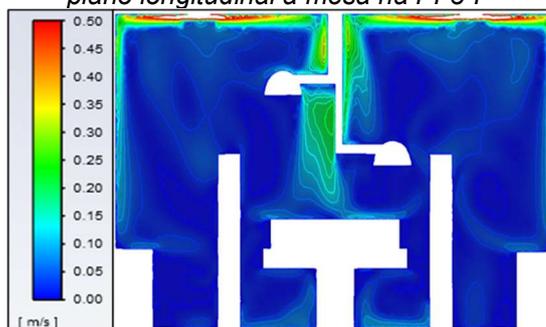


Figura 76 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-3-F



Diferentemente do observado na solução original, ou mesmo nas variações da primeira proposta de intervenção, a solução com quatro difusores de insuflamento de quatro vias distribuídos no teto da sala propiciam um escoamento menos turbulento de modo a não terem sido identificados fenômenos que

propiciassem a suspensão de partículas. Desta forma, as variações de retorno puderam ser analisadas tendo em vista sua eficiência em remover os poluentes da sala de uma forma geral, e não para a mitigação de um fenômeno específico. Observando as linhas reversas de fluxo (fluxo de retorno) nas figuras 77 a 80 é possível perceber uma menor estagnação de ar na solução com dois retornos forçados (PI-3-F), sendo esta a opção selecionada para a terceira proposta de intervenção.

Figura 77 - Linhas reversas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-3-B

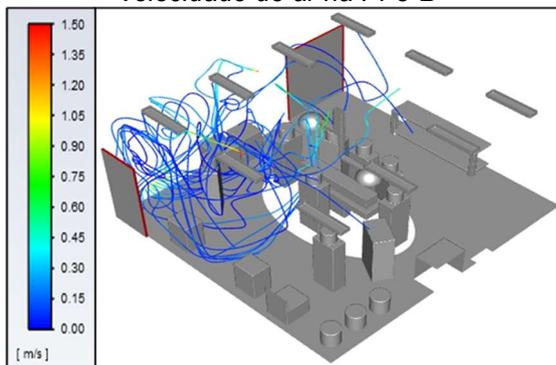


Figura 78 - Linhas reversas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-3-D

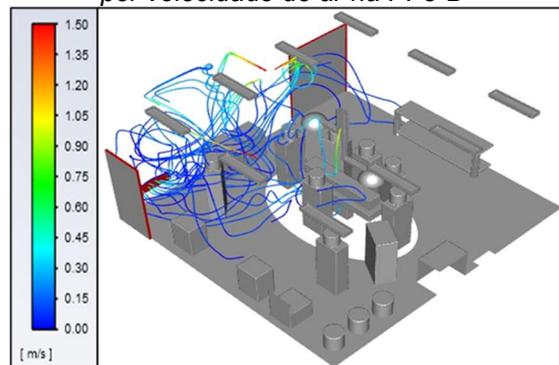


Figura 79 - Linhas reversas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-3-F

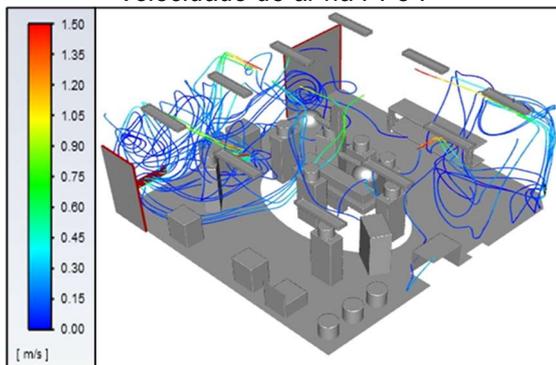
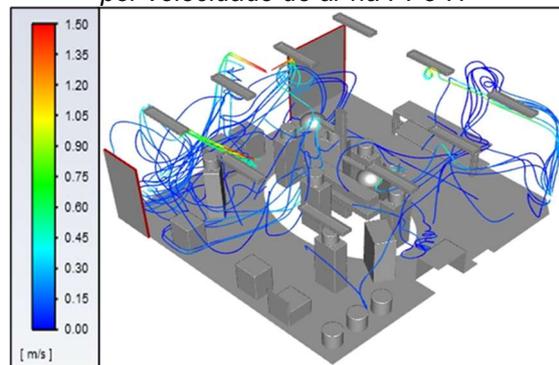


Figura 80 - Linhas reversas de fluxo coloridas por velocidade do ar na PI-3-H



6.3.5. Proposta de Intervenção 4

A quarta proposta de intervenção apresenta apenas uma modificação em relação à terceira, com o intuito de evitar o fluxo de ar incidente sobre o paciente. A posição dos difusores de insuflamento foi alterada para os cantos da sala, conforme descrito em 6.1.1. Também foram analisadas as variações de forro e retorno consideradas na terceira proposta de intervenção, conforme tabela 17.

Tabela 17 - Variações da proposta de intervenção 4

Proposta	Insuflamento	Retorno Adicional	Retorno Forçado	Forro Rebaixado
PI-4-A	Quatro difusores de quatro vias nos cantos da sala	Não	Sim	Sim
PI-4-B		Não	Sim	Não
PI-4-C		Não	Não	Sim
PI-4-D		Não	Não	Não
PI-4-E		Sim	Sim	Sim
PI-4-F		Sim	Sim	Não
PI-4-G		Sim	Não	Sim
PI-4-H		Sim	Não	Não

Quanto aos retornos, podem ser feitas as mesmas considerações da terceira proposta de intervenção, obtendo-se como melhores soluções aquelas com retorno adicional, ambos forçados (propostas PI-4-E e PI-4-F). As variações PI-4-E e PI-4-F diferenciam-se apenas pelo forro rebaixado.

Diferentemente do verificado na terceira proposta de intervenção, como não há fluxo de ar direcionado para o centro da sala, não existe a necessidade de um maior pé-direito para evitar as altas velocidades do ar incidente sobre o paciente, fato que levou à seleção da opção sem rebaixamento de forro na terceira proposta de intervenção.

Foi observado que as luminárias de sobrepor na opção sem forro rebaixado formam um obstáculo para o fluxo de ar insuflado (Figuras 81 e 82), desviando-o para a altura da cabeça dos integrantes da equipe cirúrgica que estão posicionados próximos aos pés e à cabeça do paciente (Figuras 83 e 84), possivelmente causando desconforto. Desta forma foi selecionada a opção com forro rebaixado, com retorno adicional e forçado (PI-4-E).

Figura 81 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar na PI-4-E

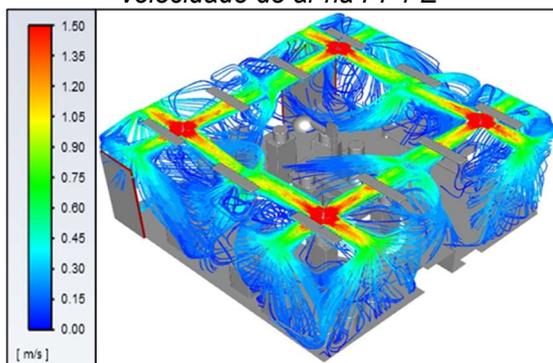


Figura 82 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar na PI-4-F

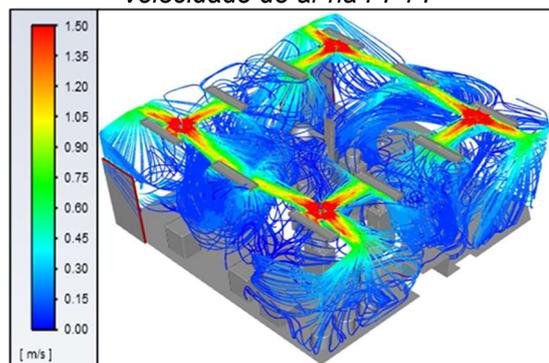


Figura 83 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-4-E

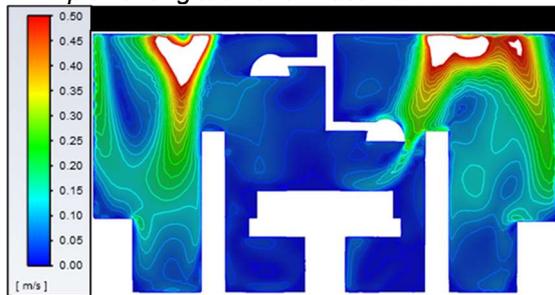
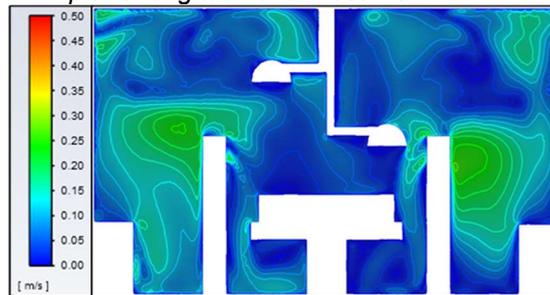


Figura 84 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-4-F



Uma vez selecionada a quarta proposta de intervenção, foram confrontados seus resultados com os das propostas anteriores. Em relação ao conforto térmico percebe-se que a terceira proposta de intervenção apresenta os melhores resultados. No centro da sala, onde fica o Grupo I, mais suscetível à sensação de calor, a temperatura é menor do que nas demais soluções (em torno de 20°C a 1,1m do piso) e a velocidade do ar nas imediações da equipe cirúrgica ligeiramente superiores às observadas nas demais propostas, mas ainda adequadas para o tipo de ambiente e ocupação (entre 0,10m/s e 0,15m/s a 1,1m do piso). Por outro lado, nesta solução é observado um fluxo de ar incidindo sobre o paciente, o que é absolutamente indesejado. De acordo com a NBR7256/2021 a insuflação de ar deve ser projetada para evitar turbulência sobre a mesa cirúrgica. Neste quesito, a proposta que apresenta os melhores resultados é a quarta. Em todas as propostas analisadas a solução de retorno mais eficiente foi a com dois retornos forçados.

Sendo assim, com as próximas propostas de intervenção se buscará melhorar as condições de conforto térmico para ambos os grupos de usuários, sem induzir a criação de um fluxo de ar incidente sobre o paciente. Para tanto serão analisadas outras opções para o insuflamento, contemplando alteração no tamanho dos difusores, para redução da velocidade, aumento do número de difusores e, por fim, a alteração na temperatura de insuflamento. Consolida-se aqui, porém, a opção de retornos.

6.3.6. Proposta de Intervenção 5

A quinta proposta de intervenção consiste em variações adicionais nos difusores de insuflamento. São elas, o aumento do tamanho do difusor utilizado nas duas variações de layout já analisadas nas terceira e quarta propostas de

intervenção (difusores nos eixos da mesa ou nos cantos da sala, respectivamente) e um layout com oito difusores (união das propostas três e quatro), conforme definido em 6.1. Além disso, como foi observado na quarta proposta que as luminárias de sobrepor se tornam obstáculos ao fluxo de ar insuflado, nas novas soluções foi consolidado o rebaixamento de forro. A tabela 18 resume as características das variações da quinta proposta de intervenção.

Tabela 18 - Variações da proposta de intervenção 5

Proposta	Difusores nos eixos da mesa	Difusores nos cantos da sala	Tamanho do difusor utilizado	Retorno adicional e forçado	Forro rebaixado
PI-5-A ²¹	Sim	Não	304mm	Sim	Não
PI-5-B	Não	Sim	304mm	Sim	Sim
PI-5-C	Sim	Não	360mm	Sim	Sim
PI-5-D	Não	Sim	360mm	Sim	Sim
PI-5-E	Sim	Sim	304mm	Sim	Sim

Analisando a PI-5-C em comparação com a sua originária (PI-5-A), observa-se que o aumento do difusor ocasiona uma redução insuficiente na velocidade do fluxo de ar incidente sobre o paciente (Figuras 85 e 86). Essa situação, conforme abordado anteriormente, é indesejada e, portanto, estas duas variações foram descartadas.

Figura 85 - Vetores de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-5-A

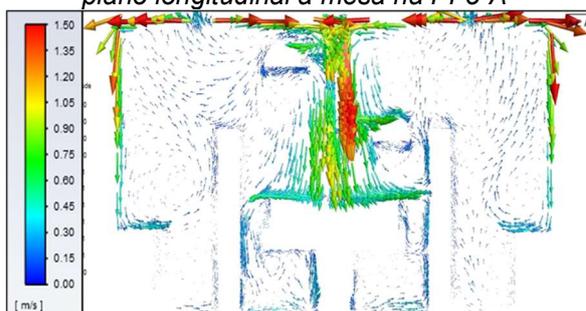
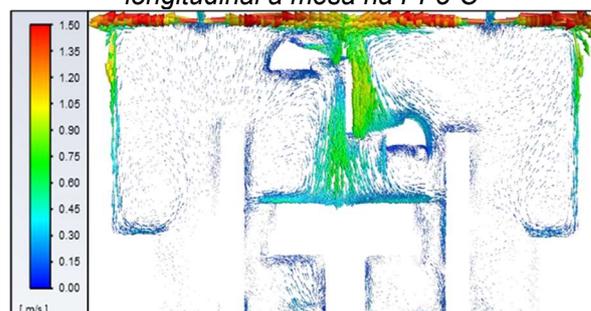


Figura 86 - Vetores de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-5-C



Na solução com os difusores de 360mm nos cantos da sala (PI-5-D) percebe-se uma melhora importante nas condições de conforto em relação à com mesmo layout, mas com difusor de 304mm (PI-5-B). É percebida redução significativa nas

²¹ Esta opção foi considerada sem rebaixamento de forro por equivaler à proposta PI-3-F.

velocidades do ar, não sendo mais observadas velocidades acima de 0,15m/s próximo à cabeça dos ocupantes (Figuras 87 e 88).

Figura 87 - Mapa de velocidade do ar no plano transversal à mesa na PI-5-B

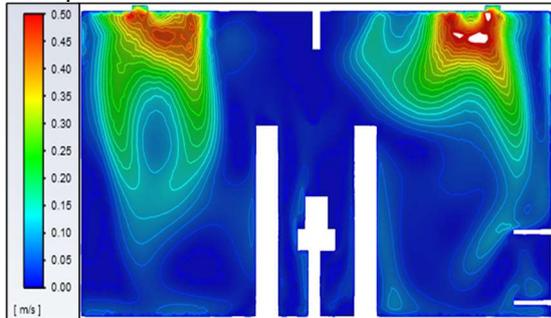
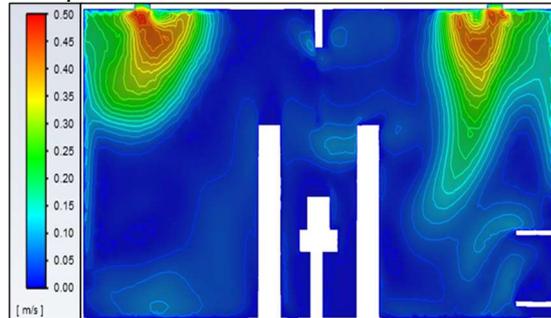


Figura 88 - Mapa de velocidade do ar no plano transversal à mesa na PI-5-D



Em relação à temperatura do ar, não foram observadas alterações com o aumento do difusor, de modo que as duas soluções (PI-5-B e PI-5-D) induziram temperaturas mais elevadas no centro da sala e mais frias no entorno (Figuras 89 e 90), configuração inversa aos requisitos da ocupação.

Figura 89 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-5-B

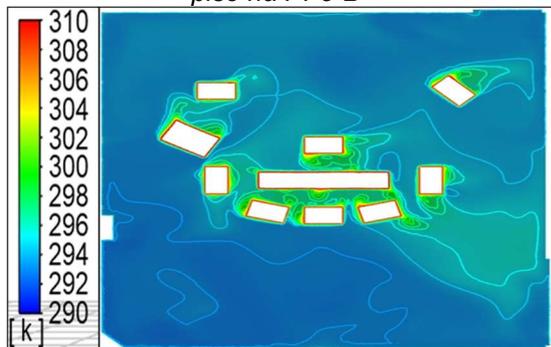
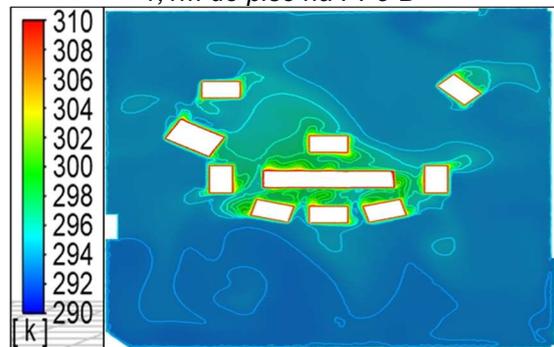


Figura 90 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-5-D



Apesar disso, pode-se afirmar que a proposta PI-5-D apresenta resultados satisfatórios e significativamente melhores do que a solução original (PI-1-A) tanto em qualidade do ar – com uma solução de retornos mais eficiente que contribui para uma menor quantidade de partículas em suspensão – quanto em conforto térmico, apresentando melhor distribuição de temperaturas (Figuras 91 e 92) e velocidades do ar mais baixas (Figuras 93 e 94).

Figura 91 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na Sala A original

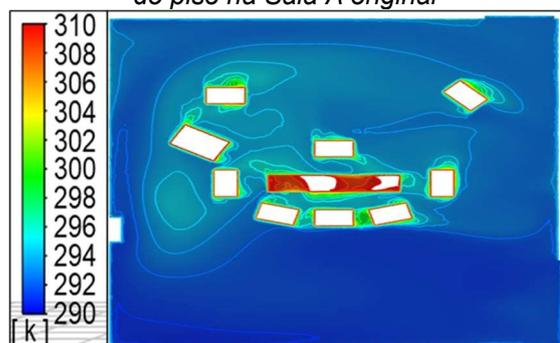


Figura 92 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-5-D

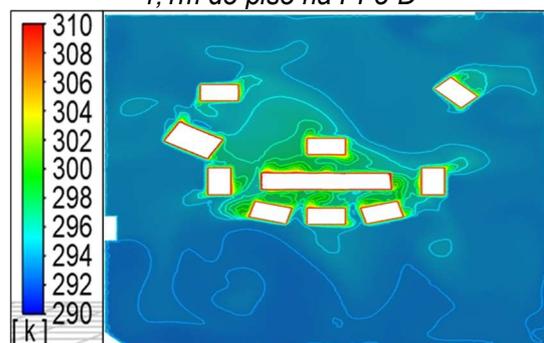


Figura 93 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na Sala A original

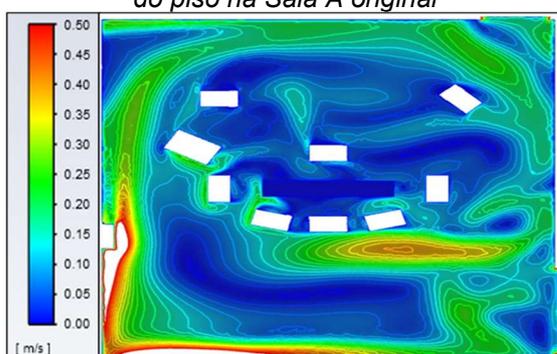
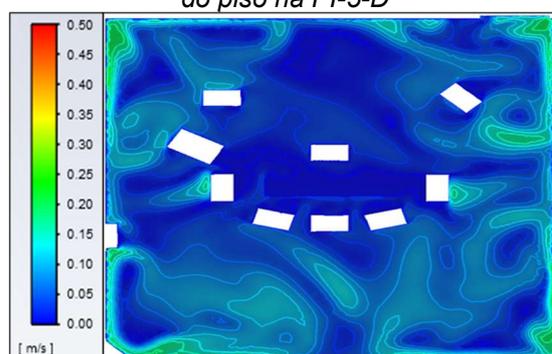


Figura 94 - Mapa de velocidade do ar a 1,1m do piso na PI-5-D



Com os objetivos de reduzir ainda mais as velocidades do ar e adequar a distribuição de temperatura para os requisitos de conforto da ocupação, sem infringir a restrição de fluxo de ar incidente sobre o paciente, foi estudada uma quinta variação da quinta proposta de intervenção (PI-5-E), com oito difusores (quatro nos cantos e quatro nos eixos da mesa cirúrgica). Esta solução trouxe os ganhos esperados em relação à proposta com melhor desempenho até então (PI-5-D). Com ela foi possível alcançar uma redução na temperatura do ar no centro da sala (Figura 95), o que contribui para o conforto térmico do Grupo I, sem que se tenha um fluxo de ar incidente no paciente (Figura 96).

Figura 95 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-5-E

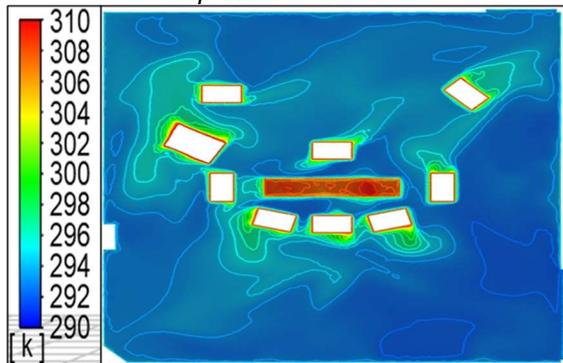
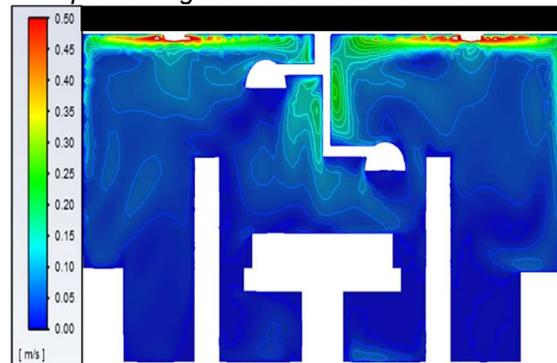


Figura 96 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-5-E



Selecionou-se para a quinta proposta de intervenção a última variação (PI-5-E), uma vez que ela propiciou melhores condições de conforto térmico para o Grupo I, além dos ganhos já obtidos com a opção anterior (PI-5-D). Porém faz-se a ressalva de que ambas as soluções apresentaram resultados satisfatórios e a adoção de qualquer uma delas representaria um ganho importante nas condições de qualidade do ar e conforto térmico na sala.

6.3.7. Proposta de Intervenção 6

A sexta, e última, proposta de intervenção é a única que propõe alterações no sistema de climatização, não apenas na distribuição de ar. Como nas propostas anteriores eram observadas temperaturas menores do que o limite inferior do intervalo recomendado pela NBR7256 (2021), propôs-se o aumento da temperatura de insuflamento. Foram simuladas opções com a temperatura de insuflamento variando em um intervalo de 16,5°C a 20°C, em passos de 0,5°C, conforme a tabela 19.

Tabela 19 - Variações da proposta de intervenção 7

Proposta	Temperatura de insuflamento	Opção com oito difusores	Retorno adicional e forçado	Forro rebaixado
PI-6-A	16,5°C	Sim	Sim	Sim
PI-6-B	17,0°C	Sim	Sim	Sim
PI-6-C	17,5°C	Sim	Sim	Sim
PI-6-D	18,0°C	Sim	Sim	Sim
PI-6-E	18,5°C	Sim	Sim	Sim
PI-6-F	19,0°C	Sim	Sim	Sim
PI-6-G	19,5°C	Sim	Sim	Sim
PI-6-H	20,0°C	Sim	Sim	Sim

Nas propostas com temperatura de insuflamento de 16,5°C (PI-6-A) e 17°C (PI-6-B) foram verificadas temperaturas do ar no entorno da sala inferiores a 20°C, mínimo recomendado para este tipo de ambiente (Figuras 97 e 98). Os usuários do Grupo II, com suas vestimentas leves e atividade moderada, tenderiam a sentir frio nestas condições.

Figura 97 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-6-A

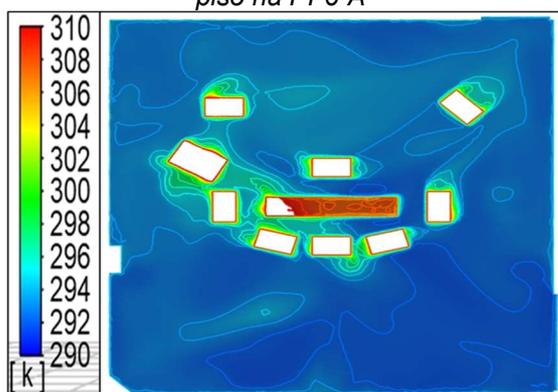
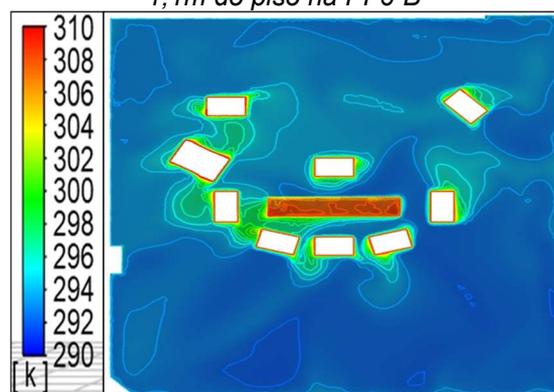


Figura 98 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-6-B



Nas proximidades da mesa cirúrgica, também a 1,1m do piso, porém, são observadas temperaturas do ar superiores à 24°C, máximo recomendado, nas opções com temperatura de insuflamento igual ou superior a 19,5°C (Figuras 99 e 100). Em tais condições os ocupantes do Grupo I sentir-se-iam com calor, portanto em desconforto. Como o objetivo da sexta proposta de intervenção é mitigar o desconforto dos usuários estas opções foram descartadas.

Figura 99 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-6-G

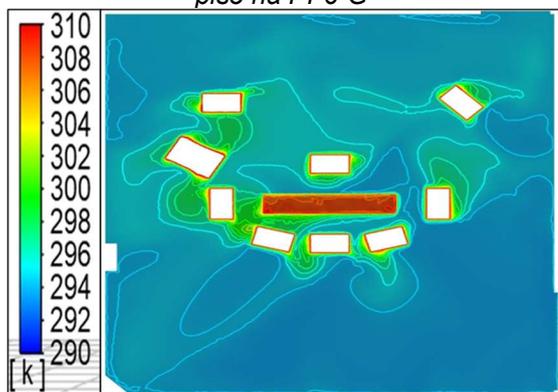
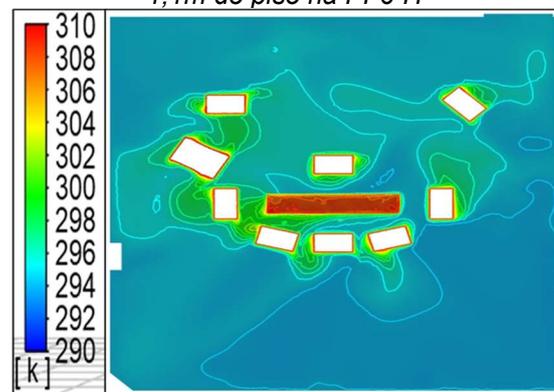


Figura 100 - Mapa de temperatura do ar a 1,1m do piso na PI-6-H



É possível notar por meio das figuras 101 a 104 que as variações da temperatura de insuflamento de 17,5°C a 19°C pouco influenciam na temperatura do

ar nas proximidades da mesa cirúrgica e assim nas condições de conforto do Grupo I. No entorno da sala, porém, observam-se melhorias das condições de conforto para o Grupo II, em termos de temperatura do ar, na medida em que se aumenta a temperatura de insuflamento. Desta forma, foi selecionada a proposta PI-6-F, com temperatura de insuflamento de 19°C.

Figura 101 - Mapa de temperatura do ar no plano transversal na PI-6-C

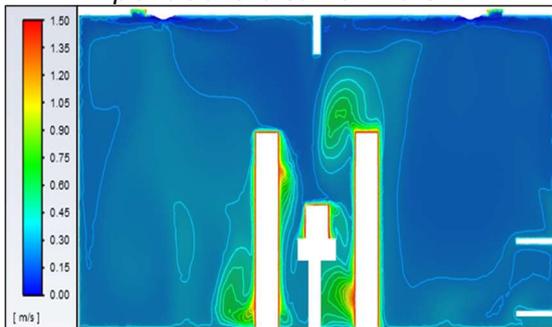


Figura 102 - Mapa de temperatura do ar no plano transversal na PI-6-D

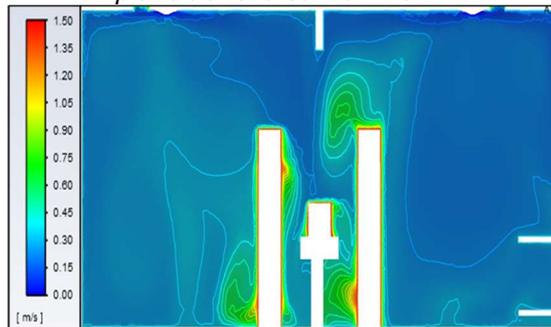


Figura 103 - Mapa de temperatura do ar no plano transversal na PI-6-E

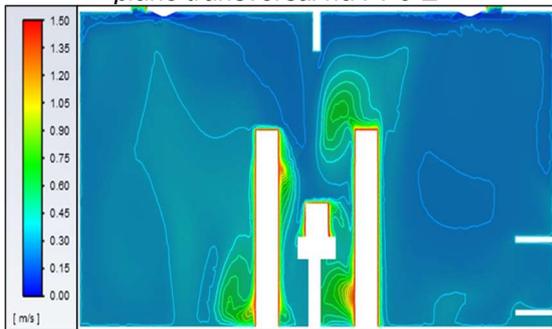
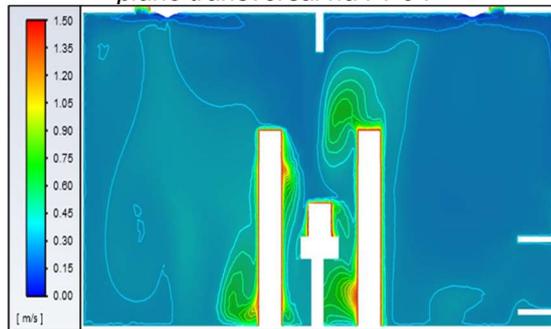


Figura 104 - Mapa de temperatura do ar no plano transversal na PI-6-F



6.4. Discussões e Propostas de Intervenção Finais

As diferentes propostas de intervenções selecionadas trouxeram benefícios sucessivos e complementares às condições de qualidade do ar interior e de conforto térmico na sala cirúrgica analisada. Tais benefícios podem ser divididos entre: (1) conforto térmico dos Grupo I e Grupo II e (2) redução do material particulado em suspensão, os quais serão discutidos nessa seção.

6.4.1. Conforto Térmico dos Usuários dos Grupos I e II

Conforme discutido na parte experimental, os usuários do Grupo I, por suas vestimentas e atividade, tendem a sentir mais calor do que os demais ocupantes.

Apesar disso, a configuração do sistema de distribuição de ar original da Sala A faz com que a região central da sala, onde ficam os profissionais do Grupo I, apresente temperaturas do ar mais elevadas, ocasionando o desconforto térmico relatado por parte destes ocupantes. Os postos de trabalho dos usuários do Grupo II, em contraposição, estão localizados nas áreas mais frias da sala, ainda que suas atividades e vestimentas sejam mais leves.

Pode ser notado que as propostas que trouxeram benefícios ao conforto térmico são aquelas com alterações no insuflamento (PI-3, PI-4, PI-5 e PI-6). O layout proposto para os difusores de insuflamento nessas soluções resolve parte das deficiências na distribuição de ar da sala original, reduzindo tanto as velocidades do ar no entorno da sala, como as diferenças de temperatura entre as regiões central e periféricas do ambiente, as quais ficam, respectivamente, mais fria e mais quente. As propostas em que há difusores nos eixos longitudinal e transversal da mesa cirúrgica (PI-3, PI-5 e PI-6) intensificaram tais ganhos, por haver fluxo de ar insuflado direcionado para o centro da sala, onde a carga térmica é mais alta.

Em relação ao desconforto por movimentação de ar, todas as propostas com a alteração do insuflamento para difusores de quatro vias distribuídos pelo teto (PI-3, PI-4, PI-5 e PI-6) apresentaram resultados bem melhores do que a solução original, com reduções importantes da velocidade do ar no entorno da sala. Porém, apenas as soluções com quatro difusores de 360mm ou oito difusores de 304mm (PI-5-C, PI-5-D, PI-5-E e PI-6) foram capazes de reduzir a velocidade do ar para níveis inferiores ao limite máximo recomendado pela NBR 16.401(2008).

6.4.2. Redução do Material Particulado em Suspensão

Em todos os casos analisados, as soluções com dois retornos forçados, se mostraram as mais eficientes para a redução do material particulado em suspensão, fato que levou à sua adoção em todas as propostas de intervenção. Nas propostas em que não há alterações no insuflamento (PI-1 e PI-2), as soluções de retorno propostas são fundamentais para a redução da dispersão de partículas pela sala e, por consequência, aumentar a segurança contra infecções hospitalares. Apesar dos importantes ganhos, os problemas encontrados na configuração original não são resolvidos, apenas mitigados (Figuras 105 e 106).

Figura 105 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar na Sala A original

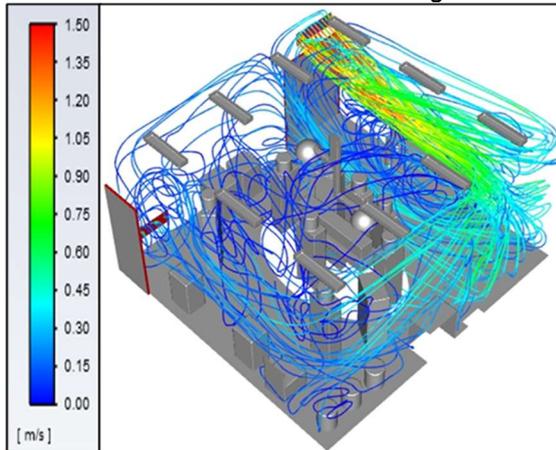
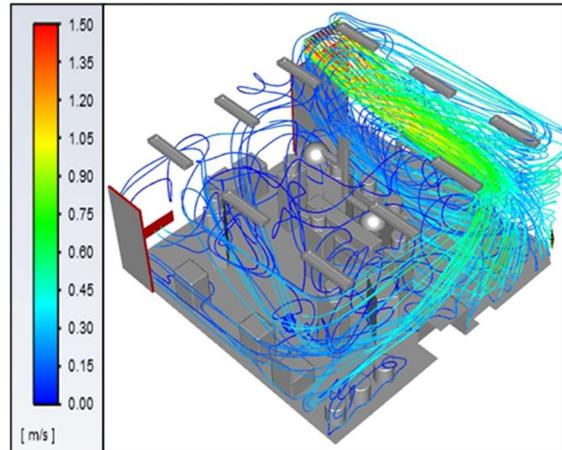


Figura 106 - Linhas de fluxo coloridas pela velocidade do ar na PI-1-D



Na terceira proposta de intervenção, na qual os difusores estão nos eixos da mesa cirúrgica, cria-se um fluxo de ar incidente sobre o paciente pela confluência do insuflamento das vias centrais dos quatro difusores (Figura 107). Conforme comentado nos resultados, é inadequado um fluxo de ar incidente sobre um paciente cirúrgico, uma vez que ele está com tecidos expostos e, assim, mais vulnerável à contaminação. Este fato torna essa solução menos eficiente do que a original da sala (Figura 108), de forma que ela foi descartada.

Figura 107 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na Sala A original

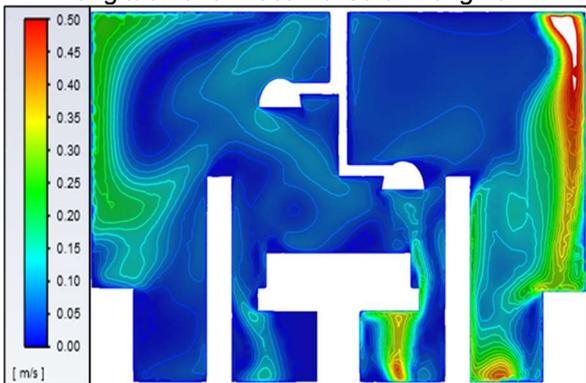
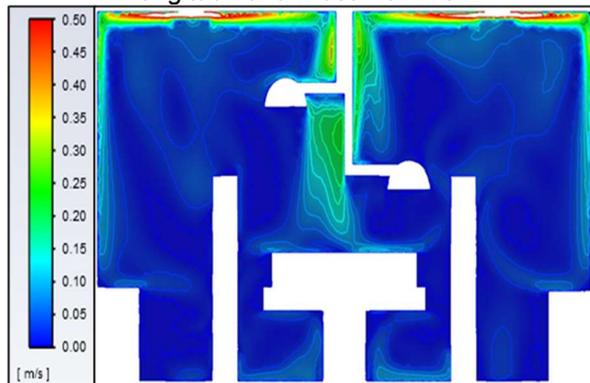


Figura 108 - Mapa de velocidade do ar no plano longitudinal à mesa na PI-3-E



Assim, as melhores condições foram obtidas com a combinação dos dois retornos forçados com os quatro difusores de 360mm nos cantos da sala ou oito difusores de 304mm distribuídos pelo teto (PI-5-D, PI-5-E e PI-6).

6.5. Propostas de Intervenção Finais

Na etapa de simulações desse trabalho dispôs-se a apresentar uma série de propostas de intervenção para que o Hospital possa selecionar a que melhor se adeque à sua capacidade de execução. Como tais propostas são gradativas e incrementais, a última proposta carrega as soluções mais eficientes das anteriores. Desta forma, apesar de a sexta proposta de intervenção (PI-6-F) ser a que apresentou os maiores benefícios, foram aqui selecionadas todas aquelas que trouxeram ganhos às condições de qualidade do ar interior ou conforto térmico da sala estudada. Descartou-se as soluções que ocasionaram piora de alguma dessas condições.

Como já mencionado, as propostas PI-2, PI-3 e PI-5-C resultaram em condições de qualidade do ar inferiores àquelas existentes na sala original, sendo, portanto, descartadas. As variações não selecionadas das primeira, quarta e sexta propostas de intervenção apresentam resultados inferiores e com nível de intervenção semelhante das respectivas opções selecionadas, de forma a não fazer sentido a sua implementação. Estas foram, portanto, descartadas. Com isso, foram selecionadas as propostas PI-1-D, PI-4-E, PI-5D, PI-5-E e PI-6-F.

7. CONCLUSÕES

O propósito deste trabalho, enquanto parte de um programa de mestrado profissional, foi trazer soluções de viável aplicação para garantir as condições adequadas de qualidade do ar interior e conforto térmico no Hospital Universitário da Universidade de São Paulo. Para tanto, perseguiu-se o objetivo de analisar as condições de qualidade do ar interior e de conforto térmico em setores do segundo pavimento do HU e propor intervenções alinhadas à capacidade do Hospital em executá-las, visando a melhoria dessas condições.

Foram feitas medições das variáveis de conforto térmico e qualidade do ar interior em cinco setores do segundo pavimento do Hospital (Centro Cirúrgico, Centro Obstétrico, Radiologia, Ambulatório e Hospital Dia) e aplicados questionários aos colaboradores destas áreas do HU. Com os resultados experimentais foram apontadas propostas de intervenção para melhoria dos problemas encontrados. Adicionalmente, para Sala de Cirurgia A, foram elaboradas propostas de intervenção estudadas por meio de simulações computacionais fluidodinâmicas.

Em relação à qualidade do ar, os resultados mostraram que em todos os sistemas de distribuição de ar dutados havia deficiências na limpeza de dutos e manutenção de filtros e problemas na localização do ponto de captação de ar externo, de modo a serem observados poluentes nos ambientes internos de origem alheia à sua utilização. Um exemplo claro desta situação é a observação de picos na concentração de monóxido de carbono na Sala de Cirurgia J, mesmo enquanto desocupada, durante os horários de pico da circulação de ônibus no Campus da Universidade.

No Hospital Dia (sistema split) e no Ambulatório (ventilação natural), foi constatada ventilação insuficiente. Em alguns sistemas foram observadas deficiências de manutenção, como a falta de difusor de insuflamento em uma das salas de parto, e inadequações de projeto provocadas por reformas posteriores, a exemplo do difusor de insuflamento localizado no banheiro anexo à Sala de Parto 1.

Foram, ainda, percebidas inadequações na forma de utilização do sistema de ar-condicionado instalado no Centro Cirúrgico, mantido desligado durante a maior parte do período de observação das cirurgias (73% do tempo), ocasionando altas concentrações de dióxido de carbono no ambiente, apesar do sistema (quando em

funcionamento) promover suficiente renovação de ar. O desligamento do sistema deve-se à insatisfação dos usuários com as condições térmicas do ambiente.

Em relação ao conforto térmico, foi observado que o sistema instalado nas salas de cirurgia é ineficiente em atender aos requisitos da ocupação. Os membros da equipe cirúrgica podem ser divididos em dois grupos, por suas atividades e vestimentas características, bem como por suas posições na sala. O sistema de distribuição de ar propicia condições inversas aos requisitos de cada um dos grupos de ocupantes, de modo a terem sido constatadas temperaturas do ar mais baixas e velocidades do ar mais elevadas na região ocupada pelo grupo de atividade e vestimentas mais leves e temperaturas mais elevadas nas imediações do outro grupo.

Nos demais setores climatizados, os resultados mostraram condições de conforto térmico, em geral, satisfatórias. Na Sala de Parto 3, o difusor faltante desequilibrou as pressões no duto de insuflamento, propiciando altas velocidades do ar em determinadas partes da sala, alvo de queixa de desconforto por parte dos usuários, relatada nos questionários. No ambulatório, a ventilação natural não é suficiente para manter as condições adequadas de conforto térmico.

Foram apontadas propostas de intervenção para melhoria dos problemas encontrados, as quais consistem desde recomendações de utilização e manutenção dos sistemas de ar-condicionado, até intervenções nos sistemas de distribuição de ar nas salas, criação de sistemas auxiliares de ventilação mecânica para o Ambulatório e Hospital Dia e o reposicionamento do ponto de ônibus localizado próximo ao ponto de captação de ar dos sistemas que atendem ao Centro Cirúrgico e Centro Obstétrico.

Para a Sala de Cirurgia A foram elaboradas, e estudadas por meio de simulações CFD, propostas de intervenção para melhoria da distribuição de ar, tanto com foco no conforto térmico quanto na redução do material particulado em suspensão. Analisou-se alternativas para o retorno, insuflamento e layout da sala. Os resultados mostraram melhoras importantes na qualidade do ar com a implementação de um retorno adicional em paralelo com a pressurização do atual (e do adicional).

A adoção da solução de insuflamento por difusores de quatro vias espalhados pelo teto traz benefícios tanto para o conforto térmico de ambos os grupos de usuários, quanto para a redução das partículas em suspensão. Dentre as opções

analisadas a que apresentou os melhores resultados foi a com oito difusores. As configurações com quatro difusores de insuflamento nos eixos da mesa cirúrgica produziu um efeito adverso de incidência de fluxo de ar turbulento sobre o paciente, enquanto a com quatro difusores nos cantos da sala não foram eficientes em garantir as condições de conforto adequadas nas proximidades da mesa cirúrgica.

Em resumo, os resultados mostraram que grande parte dos problemas encontrados podem ser mitigados com a adoção de medidas simples, como procedimentos de utilização dos sistemas de climatização e manutenções preventivas, com periódicas limpezas de dutos e troca de filtros, ou com intervenções pontuais.

8. TRABALHOS FUTUROS

Ao longo desta pesquisa foram encontrados alguns pontos que mereceriam estudos mais aprofundados, cujo desenvolvimento, porém, não teria espaço no escopo do presente trabalho. Este capítulo é dedicado a explicitá-los para sugerir que sejam desenvolvidos trabalhos futuros.

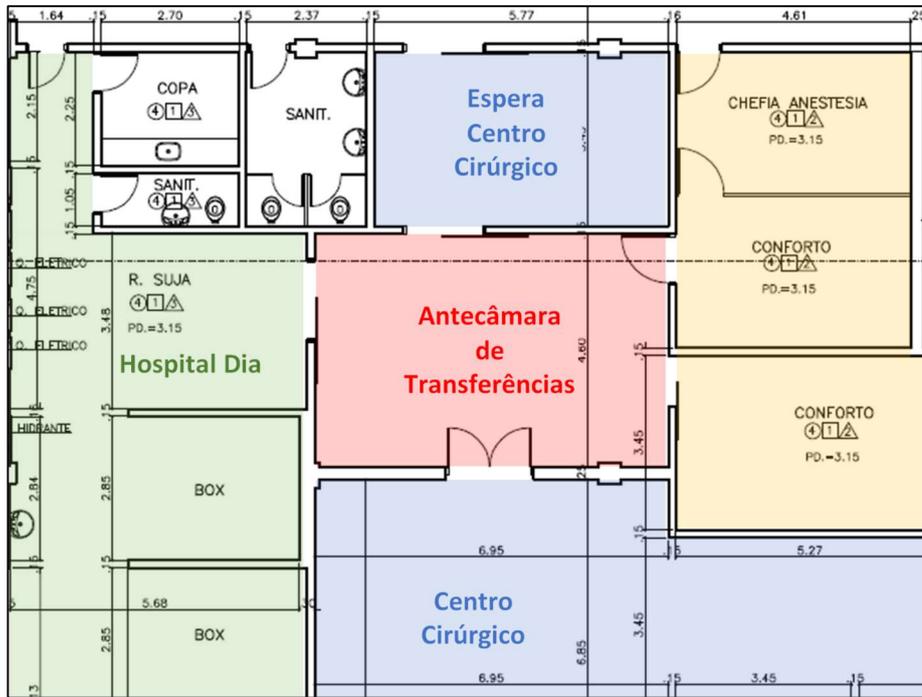
8.1. Soluções passivas para o Ambulatório

Durante a revisão bibliográfica foram encontrados diversos trabalhos realizados em setores de menor criticidade em relação à assepsia, como ambulatórios e enfermarias, (QUIAN *et. al.*, 2010, ADAMU *et. al.*, 2012, ESCOMBE *et. al.*, 2019 e QUADROS e MISGIER, 2020) que foram bem-sucedidos em encontrar soluções passivas que garantissem as condições adequadas de ventilação e conforto térmico. Desta forma sugere-se que sejam estudadas estratégias passivas aplicadas ao Ambulatório do HU, de modo a garantir a segurança de seus usuários e promover condições de conforto, sem que seja necessária a instalação de um sistema de ar-condicionado, solução de elevado custo de implantação e alto consumo energético.

8.2. Interligação entre Hospital Dia e Centro Cirúrgico

O Hospital Dia e o Centro Cirúrgico são setores com diferentes requisitos de assepsia e restrições de utilização. A entrada no Centro Cirúrgico requer a troca de roupa para o conjunto privativo (fornecido pelo HU), o calçamento de sapatilhas descartáveis (propés) e o uso de toucas, exigências que não se aplicam ao Hospital Dia. Há uma interligação entre os dois setores, conforme destacado na figura 109, através de uma antecâmara. No entanto, as portas desta antecâmara são manuais e pesadas, de forma que foi observado em campo que elas são recorrentemente mantidas simultaneamente abertas para a passagem de macas de pacientes. Além disso, a mesma antecâmara de transferências dá acesso às áreas de conforto da equipe e à sala de espera de acompanhantes dos pacientes cirúrgicos, havendo ali intenso fluxo de pessoas com origens e destinos diferentes, dificultando o controle das aberturas de portas. Assim, sugere-se um estudo mais aprofundado do modo de utilização desta interligação e de seus efeitos na qualidade do ar do Centro Cirúrgico.

Figura 109 - Planta da interligação entre o Centro Cirúrgico e o Hospital Dia



8.3. Investigações sobre o ponto de captação de ar

Conforme discutido neste trabalho, foram identificados poluentes nos ambientes internos de origem alheia à sua utilização, os quais teriam sido carregados pelo sistema de ventilação do ambiente externo para o interno. No caso do monóxido de carbono pode-se identificar a sua origem, dada pela proximidade do ponto de captação de ar externo do sistema com um ponto de ônibus. Sugere-se o estudo de estratégias complementares à aqui apresentada para mitigação do problema, como por exemplo barreiras vegetais, sem que seja necessária a alteração da localização do ponto de captação de ar, solução de alto grau de intervenção.

Sugere-se, também, a investigação da origem das elevadas concentrações de compostos orgânicos voláteis observadas nos ambientes externo e interno, uma vez que não foi possível identificá-la neste trabalho. Assim poderão ser elaboradas estratégias de mitigação deste problema.

8.4. Simulações transientes e refino da modelagem da ocupação

Para melhor entendimento do efeito das propostas de intervenção apontadas, sugere-se que estas sejam estudadas também em regime transiente. Estas simulações nos permitiriam avaliar a performance das soluções propostas enquanto o equilíbrio térmico não é atingido, bem como respondem a mudanças na ocupação. Para tanto seria necessário um refino na modelagem da ocupação, demandando um estudo mais aprofundado da dinâmica da equipe cirúrgica e utilização de equipamentos. Estes parâmetros são altamente dependentes do tipo da cirurgia, sendo interessante a simulações de cirurgias de outras especialidades, além da ortopédica.

8.5. Simulações paramétricas e análises quantitativas

Este trabalho propôs-se a realizar análises qualitativas de múltiplas opções de propostas de intervenção simuladas em CFD. Tais soluções foram pré-determinadas para que se pudesse analisar as diversas estratégias propostas. Uma vez definidas as estratégias mais eficientes, sugere-se que sejam realizadas simulações paramétricas para refino das soluções, ou mesmo de soluções adicionais que não puderam ser aqui contempladas, como a substituição do tipo de foco cirúrgico.

8.6. Expansão da análise para novos setores

Além dos estudados neste trabalho, existem no HU outros setores com requisitos e características de ocupação específicos, os quais podem ser bastante diversos aos dos setores aqui contemplados. As unidades de terapia intensiva, prontos-socorros, enfermarias e áreas de internação são alguns exemplos de setores que poderiam ser estudados em pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMU, Z. A., PRICE, A. D. F., COOK, M. J. **Performance evaluation of natural ventilation strategies for hospital wards - A case study of Great Ormond Street Hospital.** Building and Environment, v.56, p. 211-222, 2012.

AFONSO, M. S. M., SOUZA, A. C. S., TIPPLE, A. F. V., MACHADO, E. A., LUCAS, E. A. **Condicionamento de Ar em Salas de Operação e Controle de Infecção – Uma Revisão.** Revista Eletrônica de Enfermagem, v.08 n.01, p.134 – 143, 2006.

AHLAWAT, A., WIEDENSOHLER, A., MISHRA, S. K. **Na Overview of the Role of Relative Humidity in Airborne Transmission of SARS-CoV-2 in Indoor Environments.** Aerosol and Air Quality Research, v.20 – Special Issue on Covid-19 Aerosol Drivers, Impacts and Mitigation, p. 1856-1861, 2020.

ANDERSSON, A. E., PETZOLD, M., BERGH, I., KARLSSON, J., ERIKSSON, B., NILSSON, K. **Comparison between mixed and laminar airflow systems in operating rooms and the influence of human factors: Experiences from a Swedish orthopedic center.** American Journal of Infection Control, v.42, p. 665-669, 2014.

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução nº9.** Dispõe sobre os Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior em Ambientes Climatizados Artificialmente de Uso Público e Coletivo, e dá outras providencias. Brasília, 2003.

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução – RDC nº50.** Dispõe sobre o Regulamento Técnico para planejamento, programação, elaboração e avaliação de projetos físicos de estabelecimentos assistenciais de saúde. Brasília, 2002.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Guideline 14. Measurement of Energy, Demand and Water Savings.** Atlanta, 2002.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook of HVAC-Applications.** Atlanta, 2011.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard-55: Thermal environmental conditions for human occupancy.** Atlanta, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard-170 Ventilation of Health Care Facilities**. Atlanta, 2008.

ANSYS INC. **ANSYS Meshing User's Guide**. Ansys Inc. Canonsburg, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7256: Tratamento de ar em estabelecimentos assistenciais de saúde (EAS) - Requisitos para projeto e execução das instalações**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15848: 2010, Sistemas de ar condicionado e ventilação – Procedimentos e requisitos relativos as atividades de construção, reformas, operação e manutenção das instalações que afetam a qualidade do ar interior**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401: Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários**. Rio de Janeiro, 2008.

ALSVED, M., CIVILIS, A., EKOLIND, P., TAMMELIN, A., ANDERSSON, A. E., JAKOBSSON, J., SVENSSON, T., RAMSTORP, M., SADRIZADEH, S., LARSSON, P. A., BOHGARD, M., SANTL-TEMKIV, T., LONDAHL, J. **Temperature-controlled airflow ventilation in operating rooms compared with laminar airflow and turbulent mixed airflow**. *Journal of Hospital Infection*, v. 98, p. 181-190, 2018.

BALARAS, C. A., DASAKALAKI, E., GAGLIA, A. **HVAC and indoor thermal conditions in hospitals operating rooms**. *Energy and Buildings*, v. 37, 2007.

BARNA, E., BÁNHIDI, L. **Combined effect of two local discomfort parameters studied with a thermal manikin and human subjects**. *Energy and Buildings*, v. 51, 2012.

BAURÈS, E., BLANCHARD, O., MERCIER, F., SURGET, E., Le CANN, P., RIVIER, A., GANGNEUX, J. P., FLORENTIN, A. **Indoor air quality in two French hospitals: measurement of chemical and microbiological contaminants**. *Science of the Total Environment*, v. 642, 2018.

BIRGAND, G., TOUPET, G., RUKLY, S., ANTONIOTTI, G., DESCHAMPS, M.N., LEPELLETIER, D., PORNET, C., STERN, J. B., VANDAMME, Y. M., MARQUET, N., TIMSIT, J. F., LUCET, J. C. **Air contamination for predicting wound contamination in clean surgery: A large multicenter study**. *American Journal of Infection Control*, v.43, p. 516-521, 2015.

CALLEGARO, R. F. **Uma arquitetura para fusão de dados de sensores de baixo custo em redes de sensores sem fio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

CAO, G., STORAS, M. C. A., AGANOVIC, A., STENSTAD, L. I., SKOGAS, J. G. **Do surgeons and surgical facilities disturb the clean air distribution close to a surgical patient in an orthopedic operating room with laminar airflow?** American Journal of Infection Control, v.46, p. 1115-1122, 2018.

CARVALHO, A. P. A., BATISTA, L. F., VIEIRA, L. T. K. **Análise pós-ocupação em uma unidade de centro cirúrgico**. Anais do I Congresso da ABDEH – IV Seminário de Engenharia clínica, 2004.

CAVALCANTI, B. P., ELY, V. H. M. B., JEREMIAS, D. M., SCHNEIDER, J. P., SILVA, M. V., BORTOLUZZI, T. V. C. **Avaliação pós-ocupação de unidades de emergência hospitalares de Florianópolis: Problemas recorrentes e possíveis soluções**. Ambiente Construído, 2019.

CHAN, K. H., PEIRIS, J. S. M., LAM, S. Y., POON, L. L. M., YUEN, K. Y., SETO, W. H. **The Effects of Temperature and Relative Humidity on the Viability of the SARS Coronavirus**. Advances in Virology, v. 2011, 2011.

CHESTNUT, D. H. **Chestnut Anestesia Obstétrica: Princípios e Prática**. Elsevier Brasil, 2016

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO CONAMA RE03/90** Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. 1990.

ESCOMBE, A. R., TICONA, E., CHÁVEZ-PÉREZ, V., ESPINOZA, M., MOORE, D. A. J. **Improving natural ventilation in hospital waiting and consulting rooms to reduce nosocomial tuberculosis transmission risk in a low resource setting**. BMC Infectious Diseases v. 19, n. 88, 2019.

FAN, M., CAO, G., PEDERSEN, C., LU, S., STENSTAD, L. I., SKOGAS, J.G. **Suitability evaluation on laminar airflow and mixing airflow distribution strategies in operating rooms: A case study at St. Olavs Hospital**. Building and Environment, v. 194, 2021.

FANGER, P.O. **Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering**. McGraw-Hill Book Company. Copenhagen, 1972.

FÉLIX, V. B. **Condições de conforto térmico e desconforto local em salas cirúrgicas**. 2008. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2008.

FENG, Y., MARCHAL, T., SPERRY, T., YU, H. **Influence of wind and relative humidity on the social distancing effectiveness to prevent COVID-19 airborne transmission: a numerical study**. Journal of Aerosol Science v. 147, 2020.

FILHO, P.P.G., SILVA, C. R. M., KRITSKI, A. L. **Ambientes Climatizados, Portaria 3.523 de 28/08/1998 do Ministério da Saúde e Padrões de Qualidade do Ar de Interiores do Brasil**. Jornal de Pneumologia v.26 n.5. São Paulo, 2000.

FONSECA, A., ABREU, I., GUERREIRO, M. J., ABREU, C., SILVA, R., BARROS, N. **Indoor Air Quality and Sustainability Management – Case Study in Three Portuguese Healthcare Units**. Sustainability v. 11, 2018.

HOSPITAL UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **História**. Disponível em: <http://www.hu.usp.br/historia>, acesso em: 07/janeiro/2022.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **BDMAP - Dados Históricos**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>, acesso em 31 de agosto de 2018.

ISO – International Organization For Standardization. **ISO7243:1989 Hot environments — Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)**. ISO, 1989.

ISO – International Organization For Standardization. **ISO7726:1998, Ergonomics of the thermal environment: Instruments for measuring physical quantities**. ISO, 1998.

ISO – International Organization For Standardization. **ISO7730:2005, Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. ISO, 2005.

KENARKOOHI, A., NOORIMOTLAGH, Z., FALAHI, S., AMARLOEI, A., MIRZAEI, S. A., PAKZAD, I., BASTANI, E. **Hospital indoor air quality monitoring for the detection of SARS-CoV-2 (COVID-19) virus**. Science of the Total Environment, v.748, 2020.

LEITE, B. C. C. **Sistema de ar condicionado com insuflamento pelo piso em ambientes de escritórios: avaliação do conforto térmico e condições de**

operação. 2003, Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2003.

LOWEN, A. C., MUBAREKA, S., STEEL, J., PALESE, P. **Insfluenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature.** PLoS Pathlog 3(10), 2007.

MARÈ, R.; LEITE, B. C. C. **Estudo da contribuição de um sistema de ar condicionado com distribuição de ar pelo piso para a remoção de particulados e dióxido de carbono do ar de um ambiente interno.** Ambiente Construído, v. 13, n. 4, 2013.

MECKLER, M. P. E. **Indoor air quality design guidebook.** Lilburn: The Fairmont Press, INC, 1991. 283p.

MELLO, F. M. **Avaliação Pós Ocupação em Estabelecimentos de Saúde: o caso de um Centro de Parto Normal em Hospital Filantrópico.** Ambiente Hospitalar v. 7, São Paulo, 2011.

MINISTÈRE DU TRAVAIL ET DES AFFAIRES SOCIALES. **Pollution atmosphérique à l'intérieur des bâtiments: Sources, expositions et risques sanitaires.** Paris: Technique & Documentation, 1996. 100p.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria Nº3523 de 28 de agosto de 1998.** Brasília, 1998.

MOBIN, M., SALMITO, M. A. **Microbiota fúngica dos condicionadores de ar nas unidades de terapia intensiva de Teresina, PI.** Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical, Teresina, 2006.

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

MOTAMEDI, H., MOHAMMADREZA, S., TOMINAGA, Y., MIRZAEI, P. A. **CFD Modeling of airborne pathogen transmission of COVID-19 in confined spaces under different ventilation strategies.** Sustainable Cities and Society v. 76, 2022.

NOORIMOTLAGH, Z., JAAFARZADEH, N., MARTÍNEZ, S. S., MIRZAEI, S. A. **A systematic review of possible airborne transmission of the COVID-19 virus (SARS-CoV-2) in the indoor environment.** Environmental Research v. 193, 2021.

NUNES, Z.G. **Estudo da qualidade microbiológica do ar de ambientes internos climatizados**. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2005

ONO, R., ORNSTEIN, S. W., VILLA, S. B., FRANÇA, A. J. G. L. **Avaliação pós ocupação na arquitetura, no urbanismo e no design: da teoria à prática**. Oficina de Textos. São Paulo, 2018.

PEREIRA, M. L. **Medição, predição e análise de partículas aéreas em salas cirúrgicas**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PEREIRA, L. J., VILAIN, R., PEREIRA, M. L., TRIBESS, A. **Contaminação aérea em salas cirúrgicas: o impacto da utilização de um sistema de condicionamento de ar de parede**. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, 2010.

QIAN, H., LI, Y., SETO, W. H., CHING, P., CHING, W. H., SUN, H. Q. **Natural ventilation for reducing airborne infection in hospitals**. Building and Environment, v. 45, p. 559-565, 2010.

QUADROS, B. M., MISGIER, M. O. **Conforto térmico em ambientes de internação hospitalar naturalmente ventilados**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 113-134, 2020.

QUADROS, M. E., LISBOA, H. M., OLIVEIRA, V. L., SCHIMER, W. N. **Qualidade do ar em ambientes internos hospitalares: estudo de caso e análise crítica dos padrões atuais**. Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 14 n. 3, Rio de Janeiro, 2009.

SANTANA, E.G.F. **Conforto térmico e concentração de CO₂ em salas de cirurgia e salas de espera para pacientes, climatizadas artificialmente**. 2013. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.

SILVA, C. A. **Análise do escoamento do ar em uma sala cirúrgica via simulação em CFD**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2016.

SOUSA, I. D. **Simulação do escoamento de ar no auditório da FEUP**. 2011. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.

SUN, C., ZHAI, Z. **The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission.** Sustainable Cities and Society, v. 62, 2020.

TANG, J. W. **The effect of environment parameters on survival of airborne infectious agents.** Journal of the Royal Society Interface, v. 22, 2009.

THOMAZONI, A. D. L., ORNSTEIN, S. W. **O estudo dos fluxos em hospitais complexos: a Avaliação Pós-Ocupação (APO) aplicada a um estudo de caso.** Projetar – Originalidade, criatividade e inovação no projeto contemporâneo: ensino, pesquisa e prática. Natal, 2015.

VEJA SÃO PAULO. **Hospital Universitário da USP vai restringir pronto-socorro adulto.** Veja São Paulo, 2016.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. **Na Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume.** Second edition. Pearson Education Limited, Essex, 2007.

VEYSI, R., HEIBATI, B., JAHANGIRI, M., KUMAR, P., LATIF, M. T., KARIMI, A. **Indoor air quality-induced respiratory symptoms of a hospital staff in Iran.** Environ Monit Assess, v. 191: 50, 2019.

VILAIN, R. **Análise experimental e numérica da concentração e dinâmica de partículas em sala cirúrgica ou quarto de isolamento hospitalar.** 2016. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2016.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling: An Overview.** American Institute of Aeronautics & Astronautics, 2001.

WHYTE, W., MACKINTOSH, C. A. **The design and testing of unidirectional airflow operating theatres.** International Journal of Ventilation, v. 20, 2021.

WOLOSZYN, M., VIRGONEA, J., MELEN, S. **Diagonal air-distribution system for operating rooms: experiment and modeling.** Building and Environment, v. 39, p. 1171-1178, 2004.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Prevention of hospital-acquired infections: a practical guide.** Genebra, Lyon, 2002.

APÊNDICE A – Questionário Aplicado



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia de Construção Civil

AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO E DA QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES HOSPITALARES

Pesquisa de Iniciação Científica

Nº Questionário

Aluno: Roberto Bozza Namur
Orientadora: Brenda Chaves Coelho Leite

Caro colaborador,

Favor preencher os campos deste questionário assim que for solicitado.

Pedimos a gentileza de responder a este questionário no seu posto de trabalho

Sexo: F M Idade: ____

Setor do HU em que está agora: _____ Tipo de atividade: _____

Data: ___/___/____ Hora: ____:____

Favor preencher sua vestimenta deste momento na tabela abaixo:

Chinelo / sandália	<input type="checkbox"/>	Tênis / Sapato	<input type="checkbox"/>
Bermuda / saia curta	<input type="checkbox"/>	Calça / Saia longa	<input type="checkbox"/>
Jaleco manga curta	<input type="checkbox"/>	Jaleco manga comprida	<input type="checkbox"/>
Blusa (camisa) manga curta	<input type="checkbox"/>	Blusa (camisa) manga comprida	<input type="checkbox"/>
Sem agasalho	<input type="checkbox"/>	Com agasalho	<input type="checkbox"/>

1. No **local onde você se encontra** como está sentindo a temperatura do ar?

MF	F	LF	C	LQ	Q	MQ
<input type="checkbox"/>						

MF=Muito Frio F=Frio LF=Ligeiramente Frio C=Confortável LQ=Ligeiramente Quente Q=Quente MQ=Muito Quente
Agradecemos sua colaboração!



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia de Construção Civil

2. Na condição térmica **em que se encontra no momento**, você sente algum desses sintomas?

- Ressecamento dos olhos
- Ressecamento da pele
- Ressecamento das narinas
- Ressecamento da garganta
- Espirros
- Falta de ar (bronquite)
- Transpiração
- Não sinto nenhum desses sintomas

3. Você percebe movimento de ar (vento) em alguma parte específica do corpo?

Sim Não

Se sim, em qual dos níveis especificados?



Se sim, como isso te afeta?

MD	D	LD	I	LA	A	MA
<input type="checkbox"/>						

MD=Muito Desagradável D=Desagradável

LD=Ligeiramente Desagradável

I=Não faz diferença pra você

LA=Ligeiramente agradável

A=Agradável MA=Muito agradável

Agradecemos sua colaboração!



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia de Construção Civil

4. Você sente frio ou calor em alguma parte específica do corpo?

Se sim, em qual dos níveis especificados?



Se sim, como isso te afeta?

MD	D	LD	I	LA	A	MA
<input type="checkbox"/>						

MD=Muito Desagradável D=Desagradável

I=Não faz diferença pra você

LA=Ligeiramente agradável

A=Agradável MA=Muito agradável

5. Você sente alguma diferença de temperatura do ar entre os pés e a cabeça?

E como isso te afeta?

MD	D	LD	I	LA	A	MA
<input type="checkbox"/>						

MD=Muito Desagradável D=Desagradável

LD=Ligeiramente Desagradável

I=Não faz diferença pra você

LA=Ligeiramente agradável

A=Agradável MA=Muito agradável

Agradecemos sua colaboração!

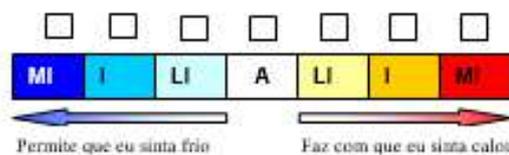


ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia de Construção Civil

6. No seu dia-a-dia, com relação à qualidade do ar dentro neste local, você:

- Tem a sensação de que o ar está parado (“ar viciado”)
- Percebe odores frequentemente no ambiente
- Acha que há muito vento
- Percebe a presença de partículas no ar
- Sente que o ar dentro do prédio é melhor do que o de fora (ar externo)
- Sente que o ar dentro do prédio é igual ao de fora
- Sente que o ar dentro do prédio é pior do que o de fora

7. Como você considera a roupa que está usando neste momento, com relação às condições térmicas do ambiente em que se encontra no momento?



MI=Muito inadequada I=Inadequada LI=ligeiramente inadequada A=Adequada

8. Você gostaria de poder controlar as condições térmicas no seu posto de trabalho, de acordo com sua preferência?

Sim

Não

Agradecemos sua colaboração!