



isec
Engenharia

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Projeto de um sistema de tratamento de
ar de um bloco operatório no hospital
CUF Tejo, Lisboa**

DEFINITIVO

Autor

Carlos Manuel Magalhães Semanas

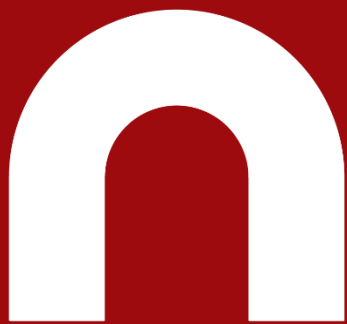
Orientador

**Prof. Doutor João Manuel Nogueira Malça de Matos
Ferreira**

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, Março 2022



isec

Engenharia

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Projeto de um sistema de tratamento de ar de um bloco operatório no hospital CUF Tejo, Lisboa

Relatório de Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Mecânica

Especialização em Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas
Térmicos

Autor

Carlos Manuel Magalhães Semanas

Orientador

Prof. Doutor João Manuel Nogueira Malça de Matos Ferreira

Coimbra, Março 2022

INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

AGRADECIMENTOS

A realização deste projeto não seria possível sem o apoio incondicional de várias pessoas às quais devo expressar o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, gostava de agradecer à Systemair e a todos os membros colaboradores pelo acolhimento, oportunidade e voto de confiança que me foi dado desde o primeiro dia.

Um agradecimento especial ao Eng. Pedro Pereira pelo extraordinário acompanhamento e disponibilidade demonstrada durante realização deste projeto, assim como os conhecimentos transmitidos e a amizade que se estabeleceu durante este percurso.

Ao Prof. Doutor João Malça, pela disponibilidade e orientação não só na realização deste projeto, como também durante todo o meu percurso académico no ISEC.

Aos meus pais e à minha irmã, pelo apoio incondicional durante o meu percurso académico e por todas as oportunidades que me proporcionaram durante a minha vida. Sem eles, nada disto seria possível.

Agradeço à minha família “emprestada” de Gondomar, pela educação, carinho e apoio que me foi dado ao longo deste percurso.

Aos meus amigos, por todo o apoio, mas, acima de tudo, pela verdadeira amizade que fomos criando ao longo destes cinco anos académicos.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste projeto.

RESUMO

A climatização de salas limpas é um processo de extrema importância em contexto hospitalar, tendo um impacto relevante no resultado das intervenções cirúrgicas. O projeto de sistemas de climatização em blocos operatórios é, por isso, alvo de estudo e otimizações permanentes a nível global.

Existem várias normas e técnicas com o objetivo de manter uma sala cirúrgica com um elevado grau de higiene e limpeza, como por exemplo o nível de filtragem a utilizar na insuflação de ar novo e a sobrepressão do bloco operatório em relação aos locais que lhe são adjacentes.

O presente projeto teve como objetivo o dimensionamento de um sistema de tratamento de ar para um bloco operatório no Hospital CUF Tejo – Lisboa. Adicionalmente, efetuou-se uma análise CFD (Computational Fluid Dynamics Analysis) de forma a verificar se a sala limpa respeita todas as condições necessárias ao seu bom funcionamento, nomeadamente condições de temperatura, velocidade do ar, humidade relativa, concentração de partículas e tempo de recuperação.

A realização deste projeto com o apoio da empresa Systemair SA foi uma excelente oportunidade para pôr em prática todas as competências adquiridas ao longo do percurso académico, mas também para aprofundar conhecimentos na área da climatização e perceber um pouco da dinâmica do mercado de trabalho nesta área.

Palavras-Chave: Bloco operatório, Computational Fluid Dynamics, concentração de partículas, tempo de recuperação, unidade de tratamento de ar.

ABSTRACT

The air conditioning of cleanrooms is an extremely important process in a hospital context, having a relevant impact on the outcome of surgical interventions. The design of air conditioning systems in operating rooms is therefore the subject of permanent study and optimization at a global level.

There are several standards and techniques to maintain an operating room with a high degree of hygiene and cleanliness, such as the level of filtration to be used in the supply of fresh air and the overpressure of the operating room concerning adjacent areas.

This project aimed to design an air treatment system for an operating room at Hospital CUF Tejo – Lisbon. Additionally, a CFD (Computational Fluid Dynamics Analysis) analysis was carried out to verify that the cleanroom complies with all the required conditions for its proper functioning, namely temperature, air velocity, relative humidity, particle concentration, and time of recovery.

Carrying out this project with the support of the company Systemair SA was an excellent opportunity to put into practice all the skills acquired along the academic path, but also to deepen knowledge in the area of air conditioning and understand a little of the dynamics of the labor market in this area.

Keywords: Air handling unit, Computational Fluid Dynamics, concentration of particles, recovery time, Surgery room.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	ix
SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Estrutura do relatório de Projeto	2
2. ESTADO DA ARTE	3
2.1 Bloco Operatório	3
2.2 Arquitetura de um Bloco Operatório	3
2.3 Principais fontes de contaminação num bloco operatório	4
2.4 Classe de limpeza	5
2.5 Zona de risco	6
2.6 Taxa de renovação do ar vs Risco de infeção	7
2.7 Taxa de remoção da contaminação envolvente	8
2.8 Limpeza do ar num Bloco Operatório	10
2.9 Fluxo Turbulento vs Fluxo Laminar	12
2.10 Condições interiores num Bloco Operatório	15
2.10.1 Pressão (p)	15
2.10.2 Temperatura (T)	16
2.10.3 Humidade Relativa (HR)	17
2.10.4 Velocidade do ar (v)	17
2.10.5 Caudal (Q)	18
3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE AR DO BLOCO OPERATÓRIO	20
3.1 Dados fornecidos	20
3.2 Planeamento do sistema de tratamento de ar	20
3.3 Dimensionamento do Teto Filtrante	21

3.4	Dimensionamento da Unidade de Tratamento de Ar	22
3.4.1	Configuração da Unidade de Tratamento de Ar	23
3.4.2	Determinação das condições de insuflação do ar tratado	24
3.4.3	Condições do ar na insuflação	25
3.4.4	Balanço de caudais	27
3.4.5	Recuperação da energia do ar de retorno para o ar exterior após a roda térmica [1-2]	28
3.4.6	Condições do ar após a recirculação [2-2']	29
3.4.7	Condições do ar após a bateria de água fria [2'-3]	32
3.4.8	Condições do ar após a bateria de água quente [3-4/5]	36
4.	ANÁLISE CFD DO BLOCO OPERATÓRIO	38
4.1	Introdução ao CFD	38
4.2	Procedimento para a determinação do “Efeito Protetor ou Grau de Proteção” 39	
4.3	Procedimento para a determinação do “Tempo de Recuperação”	41
4.4	Condições de entrada para a análise CFD	41
4.5	Resultados da simulação CFD	43
4.5.1	Resultados CFD dos perfis de Velocidade, Temperatura e Humidade Relativa para a entrada de partículas externas	44
4.5.2	Resultados CFD dos perfis de Velocidade, Temperatura e Humidade Relativa para a entrada de partículas internas	50
4.5.3	Resultados CFD dos perfis de Concentração de Partículas para a entrada de partículas externas	56
4.5.4	Resultados CFD dos perfis de Concentração de Partículas para a entrada de partículas internas	62
4.6	Conclusões da análise CFD	68
4.7	Resultados do Grau de Proteção	68
4.8	Resultados do Tempo de Recuperação	69
5.	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	Anexo i	75
	Anexo ii	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fachada da empresa Systemair S.A, Zona Industrial da Maia.	1
Figura 2 - Divisão de um bloco operatório por zonas.	4
Figura 3 - Condições recomendadas para um Bloco Operatório (Decreto Regulamentar nº 63/94 de 2 de novembro de 1994).	8
Figura 4 - Sistema de fluxo turbulento com insuflação de ar pelo teto (Marcelo Luiz Pereira, Arlindo Tribess, 2004).	13
Figura 5 - Sistema de fluxo turbulento com insuflação de ar pela parede (Marcelo Luiz Pereira, Arlindo Tribess, 2004).	14
Figura 6 - Sistema de fluxo laminar (Marcelo Luiz Pereira, Arlindo Tribess, 2004). ..	15
Figura 7 - Cascata de pressões (NF S 90-351, 2013).	16
Figura 8 - Velocidade do ar à saída do teto filtrante (SagiCofim, 2010).	18
Figura 9 - Zonas do teto laminar.	22
Figura 10 - Unidade de Tratamento de Ar.	23
Figura 11 - Pontos de estudo assinalados na Unidade de Tratamento de Ar.	24
Figura 12 - Pontos de estudo marcados no diagrama psicrométrico.	24
Figura 13 - Pontos de estudo assinalados no diagrama psicrométrico (ampliação da Figura 12).	25
Figura 14 - Determinação da entalpia do ar de retorno (Ponto 6).	26
Figura 15 - Determinação da entalpia do ar de retorno (Ponto 6), através do programa Psycro.	26
Figura 16 - Condições iniciais da seleção da Unidade de Tratamento de Ar.	28
Figura 17 - Condições do ar após a roda térmica (Ponto 2), calculadas pelo SystemairCAD.	29
Figura 18 - Condições do ar na zona de mistura (Ponto 2').	30
Figura 19 - Condições do ar na zona de mistura (Ponto 2'), calculadas através do SystemairCAD.	31
Figura 20 - Condições do ar na zona de mistura (Ponto 2'), calculadas através do programa Psycro.	32
Figura 21 - Condições do ar após a bateria de água fria (Ponto 3).	33
Figura 22 - Cálculo da potência da bateria de água fria, a partir do SystemairCAD.	33
Figura 23 - Determinação da entalpia do ar após a bateria de água fria (Ponto 3). ..	34
Figura 24 - Determinação da entalpia do ar na zona de mistura (Ponto 2').	34
Figura 25 - Determinação da entalpia do ar após a bateria de água fria (Ponto 3). ..	35
Figura 26 - Determinação da entalpia do ar na zona de mistura (Ponto 2').	35
Figura 27 - Cálculo da potência da bateria de água quente, a partir do SystemairCAD.	36
Figura 28 - Teste de proteção contra a entrada de carga contaminante proveniente do interior (DIN 1946-4, 2015).	40

Figura 29 - Teste de proteção contra a entrada de carga contaminante proveniente do exterior (DIN 1946-4, 2015).....	40
Figura 30 - Vista isométrica do Bloco Operatório.	42
Figura 31 - Perfil da Velocidade do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).	44
Figura 32 - Perfil da Velocidade do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).	45
Figura 33 - Perfil da Temperatura do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).	46
Figura 34 - Perfil da Temperatura do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).	47
Figura 35 - Perfil da Humidade Relativa do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).	48
Figura 36 - Perfil da Humidade Relativa do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).	49
Figura 37 - Perfil da Velocidade do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).	50
Figura 38- Perfil da Velocidade do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).	51
Figura 39 - Perfil da Temperatura do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).	52
Figura 40 - Perfil da Temperatura do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).	53
Figura 41 - Perfil da Humidade Relativa do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).	54
Figura 42 - Perfil da Humidade Relativa do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).	55
Figura 43 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 0,3µm em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).	56
Figura 44 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 0,3µm em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).	57
Figura 45 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 0,5µm em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).	58
Figura 46 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 0,5µm em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).	59
Figura 47 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 1µm em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).	60
Figura 48 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 1µm em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).	61

Figura 49 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 0,3µm em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).....	62
Figura 50 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 0,3µm em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).....	63
Figura 51- Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 0,5µm em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).....	64
Figura 52 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 0,5µm em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).....	65
Figura 53 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 0,5µm em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).....	66
Figura 54 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 1µm em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).....	67
Figura 55 - Esquema de circulação de ar com recurso a condutas (Piso 0).	75
Figura 56 - Esquema de circulação de ar com recurso a condutas (Piso 1).	76
Figura 57 - Esquema de circulação de ar com recurso a condutas (Área técnica Piso 1).	76
Figura 58 – Esquema completo de circulação de ar com recurso a condutas (Piso 1).	77
Figura 59 – Vista lateral do esquema de circulação de ar com recurso a condutas.	78
Figura 60 - Folha de seleção da UTA.....	79
Figura 61 - Dimensões da UTA.	80
Figura 62 - Seleção do Permutador de calor.....	80
Figura 63 - Seleção da bateria de arrefecimento.....	80
Figura 64 - Seleção da bateria de aquecimento.	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classe de limpeza das salas limpas em função da concentração das partículas em suspensão no ar (ISO 14644-1:2015).	5
Tabela 2 - Classe de risco (NF S 90-351, 2013).	6
Tabela 3 - Classe de risco em função da atividade cirúrgica (NF S 90-351, 2013).....	6
Tabela 4 - Número de renovações de ar por hora, tempo e eficiência da remoção de aerossóis (Decreto Regulamentar nº14, 2020).....	9
Tabela 5 - Eficiência mínima de filtragem recomendada em função das categorias ODA e SUP (EUROVENT 4/23, 2017).	11
Tabela 6 - Comparação entre as normas EN 779:2012 e EN ISO 16890 (EUROVENT 4/23, 2017).....	12
Tabela 7 - Exemplos de classes de filtros que atendem aos requisitos das categorias ODA/SUP (EUROVENT 4/23, 2017).	12
Tabela 8 - Tipo de escoamento e velocidade média do ar utilizada em função da classe de limpeza do BO (ISO 14644-4, 2001).	18
Tabela 9 - Tabela de seleção do teto filtrante.	21
Tabela 10 - Condições de entrada de ar através do teto filtrante.	41
Tabela 11 - Características do Bloco Operatório.....	42
Tabela 12 – Determinação do Efeito Protetor.....	69
Tabela 13 - Tempo de recuperação em função do tamanho das partículas.	70

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

ACSS	Administração Central do Sistema de Saúde
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
AESOP	Associação dos Enfermeiros de Sala de Operações Portuguesas
BO	Bloco Operatório
CFD	Computational Fluid Dynamics
DGS	Direção Geral da Saúde
HEPA	High Efficiency Particulate Air
ODA	Outdoor Air
SUP	Supply Air
ULPA	Ultra Low Penetration Air
UTA	Unidade de Tratamento de Ar
A_{Ref}	Área do teto filtrante
bs	Bolbo seco
C_1	Concentração inicial de contaminantes
C_2	Concentração final de contaminantes
C_{Ref}	Concentração de partículas de referência
C_x	Concentração média de partículas no ponto de medição X
$e_{PMx, cum}$	Eficiência acumulada
e_{PMx}	Eficiência fracionária para cada estágio de filtragem
Hr	Humidade Relativa
M1	Ponto de medição na cabeça do paciente
M2	Ponto de medição no tronco do paciente
M3	Ponto de medição nos pés do paciente
QT	Carga interna
Q_s	Carga sensível
Q	Caudal de ar
Q_{Ref}	Taxa de geração de partículas
SG	Grau de Proteção
t_1	Instante inicial

t_2	Instante final
V_{Ref}	Velocidade do ar à saída do teto filtrante
V	Volume do Bloco Operatório

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, o mercado da climatização tem vindo a tornar-se um mercado cada vez mais competitivo e procurado. As empresas e as marcas da área da climatização apresentam um ciclo de constante evolução, tendo sempre como objetivo a diminuição dos custos e a otimização dos seus equipamentos.

Um sistema de climatização bem projetado, em contexto hospitalar, é um dos principais motivos relacionados com o sucesso das operações e dos tratamentos cirúrgicos. Por esta razão, todos os equipamentos utilizados na área hospitalar são estudados ao pormenor de forma a conseguir garantir todas as condições necessárias para um bom funcionamento de um espaço hospitalar, neste caso, de um Bloco Operatório.

1.1 Objetivos

O presente projeto foi desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Projeto/Estágio/Dissertação do segundo ano do Mestrado em Engenharia Mecânica – Especialização em Projeto, Instalação e Manutenção de Sistemas Térmicos (MEM-PIMST), lecionada no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC).

Este projeto foi proposto pela empresa Systemair S.A, e foi desenvolvido entre Outubro de 2020 e Dezembro de 2021. Tem como objetivo o dimensionamento de um sistema de AVAC para o Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo – Lisboa, de modo a que o Bloco Operatório garanta uma classe de limpeza ISO 5. Após o dimensionamento, recorre-se a análises CFD, com base na norma DIN 1946-4:2015, para verificar se o dimensionamento foi bem realizado.

O principal objetivo deste projeto, realizado em contexto profissional, foi o de adquirir e aprofundar conhecimentos na área do AVAC, nomeadamente em contexto hospitalar.



Figura 1 - Fachada da empresa Systemair S.A, Zona Industrial da Maia.

A Systemair, S.A, empresa que promoveu a realização do presente projeto, é uma empresa multinacional especializada em seleção e vendas de equipamentos AVAC. Esta empresa foi fundada no ano de 1974 em Skinnskatteberg, Suécia. Atualmente, a Systemair é uma empresa espalhada por mais de 50 países da Europa, América do Norte, América do Sul, Ásia e África. A aposta da Systemair, S.A em Portugal iniciou-se no ano 2005. Em Portugal, o grupo Systemair, S.A possui sede em duas regiões. Uma das sedes localiza-se no Parque das Nações, em Lisboa, enquanto que a sede principal se localiza na Zona Industrial da Maia, Porto.

1.2 Estrutura do relatório de Projeto

Este relatório encontra-se dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo está presente uma breve introdução, principais objetivos do Projeto e a estrutura que o relatório apresenta. No segundo capítulo encontra-se o estado da arte, um enquadramento teórico sobre as salas limpas e aspetos a considerar aquando da sua planificação. O terceiro capítulo corresponde a uma aproximação a um contexto real, mais propriamente ao dimensionamento de um sistema de tratamento de ar para o Bloco Operatório CUF Tejo – Lisboa. No quarto capítulo encontra-se a verificação de que a sala limpa é aprovada, a partir de análises CFD, e ainda algumas conclusões tiradas das análises CFD. O quinto e último capítulo é reservado para algumas conclusões tiradas após o Projeto estar concluído.

2. ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta um enquadramento teórico aos sistemas AVAC em contexto hospitalar, nomeadamente normas e aspetos importantes a considerar quando se pretende fazer um projeto de um sistema de tratamento de ar para um Bloco Operatório (BO).

2.1 Bloco Operatório

“Bloco operatório corresponde, para a DGS, à Unidade orgânico-funcional constituída por um conjunto integrado de meios humanos, físicos e técnicos destinada à prestação de tratamento cirúrgico ou realização de exames que requeiram elevado nível de assepsia e em geral anestesia (DGS, 2015).” (DGS, 2015).

Um Bloco Operatório é um serviço único devido às diversas atividades cirúrgicas que nele são realizadas. Devido à sua grande importância exige-se um elevado rigor técnico, nomeadamente nas instalações e nos equipamentos que nele se encontram.

2.2 Arquitetura de um Bloco Operatório

A arquitetura de uma sala de operações depende sempre do tipo de operações que o centro hospitalar pretende realizar nesse bloco operatório. Esta preocupação deve-se à necessidade de uma área adequada e eficaz do ponto de vista organizacional para que decorram as intervenções cirúrgicas.

Desta forma, quanto mais complexa for a operação, quanto maior for a necessidade de utilização de equipamentos/ferramentas hospitalares ou ainda quantos mais operacionais de saúde forem necessários para a realização da operação, maiores terão de ser as dimensões do bloco operatório.

Segundo a norma francesa “Établissements de santé – Zones à environnement maîtrisé – Exigences relatives à la maîtrise de la contamination aéroportée” (NF S 90-351:2013), as conceções das instalações devem ter como prioridade o conforto do paciente e dos membros da equipa médica e ainda a procura da redução do cruzamento entre diferentes fluxos (proveniente dos membros da equipa médica, provenientes do paciente, etc) (NF S 90-351, 2013).

De acordo com o Decreto Regulamentar n.º 63/64 de 02/11/1994, uma sala em que se prevê a realização de pequenas operações, possui uma área livre de $24m^2$ (Decreto Regulamentar n.º63/64, 1994), já uma sala cujo objetivo seja realizar operações relacionadas com ortopedia ou operações do tipo cardiovasculares, precisa de ter uma área livre de pelo menos $36m^2$ (Decreto Regulamentar n.º63/64, 1994).

Uma sala cirúrgica, é normalmente, dividida em três zonas:

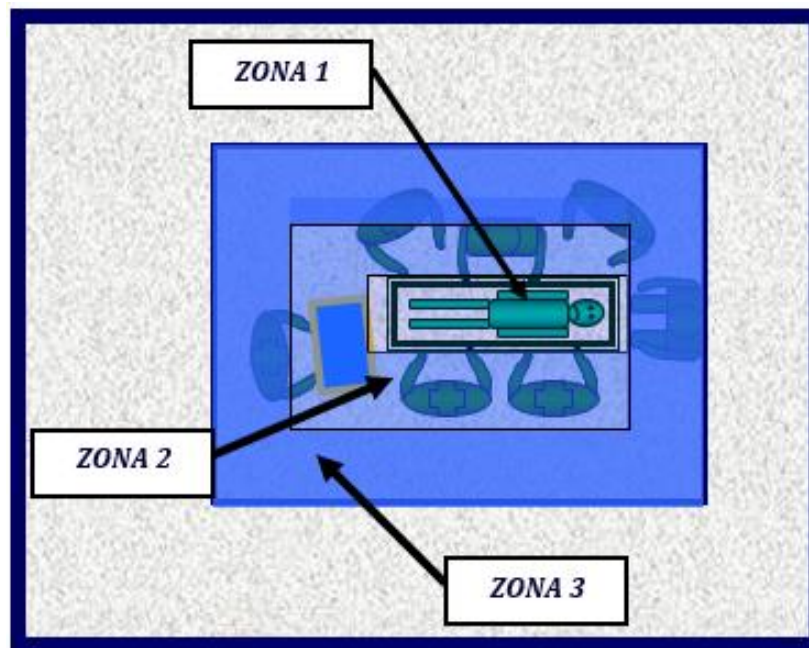


Figura 2 - Divisão de um bloco operatório por zonas.

Zona 1 – A zona 1 corresponde à mesa de operações, local onde se encontra o paciente e onde se vão realizar as operações. A velocidade aconselhada para garantir uma eliminação de contaminantes nesta zona é de 0,3 a 0,45 m/s.

Zona 2 – A zona 2 é ocupada pela equipa médica e pelos instrumentos médicos. De forma a minimizar as contaminações por parte da equipa médica, a velocidade do escoamento deverá variar de 0,25 a 0,3 m/s.

Zona 3 – Na zona 3, zona limite para a equipa médica e para os utensílios hospitalares, a velocidade do ar deve rondar a ordem dos 0,2 a 0,25 m/s.

2.3 Principais fontes de contaminação num bloco operatório

Um dos grandes objetivos de uma sala cirúrgica é o controlo da concentração de partículas transportadas pelo ar no momento da cirurgia. De acordo com o famoso médico e cientista John Zhang, as partículas indesejadas num BO podem surgir de várias fontes de contaminação, sendo as fontes principais (John Zhang, 2004):

- Partículas provenientes do ar insuflado;
- Partículas geradas no interior da sala (respiração e movimentação dos ocupantes do bloco operatório);
- Partículas infiltradas no BO, provenientes das salas adjacentes.

2.4 Classe de limpeza

Os blocos operatórios são locais que exigem um elevado nível de higiene e limpeza, sendo deste modo designados por “Salas limpas” devido ao nível de limpeza do seu ar interior. A classe de limpeza é, basicamente, uma classificação feita a partir de uma medição da quantidade de microrganismos e de partículas que se encontram em suspensão no ar de uma área que é considerada como área limpa.

A classificação de um bloco operatório de acordo com a sua classe de limpeza é realizada através da norma “Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration” (ISO 14644-1:2015). Esta norma divide a classificação das salas limpas em nove classes de limpeza, da ISO 1 à ISO 9, sendo a ISO 1 a classe “mais limpa” e a ISO 9 a classe “menos limpa” (ISO 14644-1, 2015).

As classes de limpeza são divididas de acordo com a quantidade e tamanho das partículas que se encontram suspensas no ar por m^3 , conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Classe de limpeza das salas limpas em função da concentração das partículas em suspensão no ar (ISO 14644-1:2015).

Nº de Classificação ISO	Concentrações admissíveis (partículas/ m^3) em partículas de dimensão igual ou superior					
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	1 μm	5 μm
ISO 1	10	2	0	0	0	0
ISO 2	100	24	10	4	0	0
ISO 3	1000	237	102	35	8	0
ISO 4	10000	2370	1020	352	83	3
ISO 5	100000	23700	10200	3520	832	29
ISO 6	1000000	237000	102000	35200	8320	293
ISO 7	-	-	-	352000	83200	2930
ISO 8	-	-	-	3520000	832000	29300
ISO 9	-	-	-	35200000	8320000	293000

A partir da análise da Tabela 1, pode-se constatar que uma sala cirúrgica será “mais limpa” quanto menor for a quantidade e o tamanho das partículas existentes no ar. Como já foi referido, o tipo de cirurgia a exercer num bloco operatório depende de vários fatores, não só da área livre da sala, como também da classe de limpeza da mesma.

2.5 Zona de risco

Uma zona de risco, no ponto de vista de um bloco operatório, é uma zona que é classificada tendo em conta o seu grau de contaminação, ou seja, tendo em conta a sua exposição a bactérias.

De forma a proporcionar um maior controlo bacteriológico, sempre que seja previsto uma construção de uma sala cirúrgica ou até mesmo a sua remodelação, é necessária uma avaliação cuidada do risco de contaminação em todas as suas zonas.

Na Tabela 2, com base na norma francesa NF S 90-351:2013, encontram-se as classificações utilizadas numa sala de operações, tendo em conta o seu risco de infeção.

Tabela 2 - Classe de risco (NF S 90-351, 2013).

Risco de infeção	Nível de infeção
Nulo	1
Médio	2
Alto	3
Muito Alto	4

Por norma, as cirurgias que apresentam um maior risco de infeção (nível 4) são cirurgias do tipo ortopédicas, cardiovasculares, neurológicas, cirurgias em que o paciente está mais exposto à contaminação. O risco de infeção é menor quando a cirurgia é considerada uma cirurgia mais simples onde o paciente não fica tão exposto às possíveis contaminações, como é o caso da realização de uma endoscopia (NF S 90-351, 2013).

Tabela 3 - Classe de risco em função da atividade cirúrgica (NF S 90-351, 2013).

Especialidade cirúrgica	Nível de infeção
Ortopedia	4
Cardiologia	4
Cirurgias plásticas	3
Sala de atendimento pré-operatório	2
Neurologia	4
Endoscopia	2
Quarto de hospital	1
Ginecologia	3

Na Tabela 3 é possível identificar o nível do risco de infeção em função da atividade cirúrgica que irá ser exercida (NF S 90-351, 2013). Estes riscos de infeção podem ser minimizados através dos sistemas de climatização instalados no Bloco Operatório. Os

sistemas de climatização instalados têm como objetivo satisfazer e manter a qualidade do ar, dentro das condições que são aconselhadas pela classe de limpeza da sala cirúrgica, para que haja um bom resultado durante e após as operações. Caso a qualidade do ar não seja assegurada, o risco de infeção dos pacientes aumenta.

Ao longo do Projeto, serão abordadas algumas técnicas recomendadas para a redução do risco de infeção, como é o caso da utilização de escoamento laminar durante as intervenções cirúrgicas.

2.6 Taxa de renovação do ar vs Risco de infeção

A renovação do ar num bloco operatório é um dos processos de maior importância para o bom funcionamento do mesmo. Recorre-se a este processo, não só para garantir uma melhor higiene do ar envolvente, mas também para garantir uma menor taxa de contaminação do meio envolvente.

Considera-se que uma sala procedeu a uma renovação de ar quando o volume de ar do local em questão, é insuflado ou extraído desse mesmo local. Quando se trata de uma insuflação, o ar a insuflar é por norma ar novo na sua totalidade.

Durante a renovação do ar, todas as possíveis escapatórias de ar que existem no bloco (janelas/portas) devem ficar fechadas de forma a contribuir para o equilíbrio entre o caudal de ar insuflado e o caudal de ar extraído. Caso seja necessária a abertura de portas ou janelas, é recomendada a sua abertura pelo o mínimo tempo possível.

A quantidade de renovações que ocorre na sala de operações em cada hora depende do grau de risco da cirurgia que nela ocorre. Quanto maior for a grau de risco da cirurgia, maior será o número de renovações de ar por hora.

A relação entre a quantidade de renovações a realizar no local da operação e o nível de risco de infeção faz, sem dúvida alguma, todo o sentido. Numa cirurgia em que o risco de infeção é elevado (risco 4), como por exemplo em cirurgias cardiovasculares, a probabilidade de infeção será elevada (NF S 90-351, 2013). De forma a combater esse risco de infeção, é necessário um elevado número de renovações do ar para promover uma maior limpeza do ar envolvente, garantindo assim que o paciente não esteja tão sujeito a contaminações.

O contrário ocorre quando as cirurgias a realizar são de menor risco de infeção, como por exemplo endoscopias. Nestes casos o número de renovações necessárias para garantir uma boa qualidade do ar será menor.

Segundo o Decreto Regulamentar nº 63/94 de 2 de Novembro de 1994, em Portugal o número médio recomendado de renovações de ar por hora num Bloco Operatório é de cerca de 15 a 20 renovações (Figura 3) (Decreto Regulamentar n.º63/64, 1994).

2.1 - Salas de operações:

a) Temperatura do termómetro seco: 20°C a 24°C;

b) Humidade relativa: 60%;

c) Nível de ruído: 30 NC;

d) Uma unidade de tratamento de ar por sala;

e) Em sobrepressão;

f) Número de renovações (R) do ar por hora (h): 15 R/h a 20 R/h;

Figura 3 - Condições recomendadas para um Bloco Operatório (Decreto Regulamentar nº 63/94 de 2 de novembro de 1994).

2.7 Taxa de remoção da contaminação envolvente

Analizada a importância da renovação do ar num bloco operatório e o seu benefício para um melhor funcionamento das atividades cirúrgicas, surgem outros fatores relevantes a ter em conta como é o caso do tempo de remoção da contaminação aérea.

Na fase de projeto de um bloco operatório, o tempo de remoção da contaminação envolvente é um fator bastante importante, uma vez que é a partir desse fator que se vai determinar o intervalo de tempo que uma sala de operações deve estar inativa, até que seja permitido o retomar da atividade cirúrgica.

De acordo com a norma “Ventilation and air conditioning – Part 4: VAC systems in buildings and rooms used in the health care sector” (DIN 1946-4:2015), o tempo de remoção da contaminação envolvente ou tempo de recuperação corresponde ao tempo que decorre desde que a geração de partículas é interrompida até se reduzir a concentração de partículas em 99% (DIN 1946-4, 2015). Após esse tempo de repouso, as contaminações contidas no ar envolvente causadas pela operação anterior foram removidas em 99%, sendo deste modo possível recorrer novamente à utilização da sala de operações, sem que haja risco de contaminação.

O Decreto Regulamentar nº14:2020 contém informação acerca dos efeitos das taxas de renovações do ar na remoção das partículas não desejadas que circulam no Bloco Operatório (Decreto Regulamentar nº14, 2020).

Tabela 4 - Número de renovações de ar por hora, tempo e eficiência da remoção de aerossóis (Decreto Regulamentar nº14, 2020).

Número de renovações de ar/hora (RAH), tempo e % de eficiência da remoção de aerossóis		
RAH *	Tempo (min) requerido para renovação com 99% de eficiência	Tempo (min) requerido para renovação com 99.9% de eficiência
2	138	207
4	69	104
6*	46	69
8	35	52
10*	28	41
12*	23	35
15*	18	28
20	14	21
50	6	8

Analisando a Tabela 4, pode-se perceber a relação existente entre o número de renovações do ar, o tempo necessário para que as partículas sejam removidas e a eficiência com que este processo ocorre. É, assim, possível determinar quanto tempo é necessário para que o ambiente de uma sala cirúrgica seja renovado com ar filtrado, assumindo uma mistura perfeita.

Considerando um Bloco Operatório que está sujeito a 20 renovações de ar por hora, verifica-se que serão necessários 21 minutos para que haja uma redução das partículas em suspensão, com 99.9% de eficácia.

A tabela apresentada anteriormente (retirada do Decreto Regulamentar nº14:2020), é obtida a partir da equação (1) (Decreto Regulamentar nº14, 2020):

$$t_2 - t_1 = \left[\frac{\ln\left(\frac{C_2}{C_1}\right)}{\frac{Q}{V}} \right] \times 60, \text{ com } t_1 = 0 \quad (1)$$

Onde:

t_1 = Instante inicial [min]

t_2 = Instante final [min]

C_1 = Concentração inicial de contaminantes

C_2 = Concentração final de contaminantes

Q = Caudal de ar [m^3/h]

V = Volume do Bloco Operatório [m^3]

2.8 Limpeza do ar num Bloco Operatório

O controlo das partículas, substâncias químicas e radioativas perigosas, odores, vírus e microrganismos transportados pelo ar é considerado essencial para a proteção dos ocupantes da sala cirúrgica (Pereira e Tribess, 2004).

Segundo a norma “High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) – Part 1: Classification, performance testing, marking” (EN 1822-1:2019), para além da renovação do ar, um dos processos mais importantes para garantir uma boa qualidade do ar num bloco operatório é o nível de filtragem utilizado (EN 1822-1, 2019). Quanto maior for a classe de limpeza desejada numa determinada sala, mais eficientes têm de ser os filtros utilizados para a limpeza do ar insuflado. Posto isto, serão necessários filtros com um nível de filtragem mais elevado (mais eficientes) para a limpeza do ar num bloco operatório, do que os filtros necessários para a limpeza do ar de um escritório comum.

Em salas cirúrgicas, os filtros mais utilizados para a obtenção de uma sala limpa quase livre de partículas são os filtros HEPA. Este tipo de filtros são filtros de alta eficiência (High Efficiency Particulate Air). Para além dos filtros HEPA, existem ainda classes de filtros mais eficientes como é o caso dos filtros ULPA (Ultra Low Penetration Air).

Segundo a ASHRAE, a maior parte dos filtros HEPA possuem uma eficiência de cerca de 99,97% quando se trata de partículas com um tamanho igual ou superior a $0,3 \mu\text{m}$. Isto significa que 99,97% das partículas que tentam atravessar o filtro ficam retidas, enquanto as restantes partículas conseguem atravessar o filtro (ASHRAE, 2012).

A partir do tamanho das partículas que se encontram em suspensão no ar, sabe-se que nível de filtragem é aconselhado utilizar e a sua respetiva eficiência (Tabela 5).

O conjunto de filtros que fará parte da limpeza do ar do bloco operatório é designado por cadeia de filtros. Como o nome indica, são um conjunto de filtros de diferentes eficiências, responsáveis pela filtragem do ar que se pretende insuflar, pelo que a qualidade do ar interior vai depender dessa cadeia de filtros. O ar que se encontra no exterior, antes de ser insuflado, é conduzido até uma UTA (Unidade de tratamento de ar), onde vai atravessar vários níveis de filtragem, dispostos do filtro menos eficiente (filtro responsável pela filtragem das partículas de maiores dimensões) até ao mais eficiente (filtro responsável pela filtragem das partículas de menores dimensões).

O documento “EUROVENT 4/23-2017 – Selection of EN ISO 16890 Rated Air Filter Classes for General Ventilation Applications”, da autoria da Eurovent, procura recomendar a filtragem mínima que um local deve estar sujeito, em função das condições a que o ar se encontra no exterior e em função das condições desejadas no interior do local (Tabela 5) (EUROVENT 4/23, 2017).

Tabela 5 - Eficiência mínima de filtragem recomendada em função das categorias ODA e SUP (EUROVENT 4/23, 2017).

AR EXTERNO			AR DE SUPRIMENTO				
			SUP 1* PM _{2,5} ≤ 2,5 PM ₁₀ ≤ 5	SUP 2* PM _{2,5} ≤ 5 PM ₁₀ ≤ 10	SUP 3** PM _{2,5} ≤ 7,5 PM ₁₀ ≤ 15	SUP 4 PM _{2,5} ≤ 10 PM ₁₀ ≤ 20	SUP 5 PM _{2,5} ≤ 15 PM ₁₀ ≤ 30
Categoria	PM _{2,5}	PM ₁₀	ePM ₁	ePM ₁	ePM _{2,5}	ePM ₁₀	ePM ₁₀
ODA 1	≤ 10	≤ 20	70%	50%	50%	50%	50%
ODA 2	≤ 15	≤ 30	80%	70%	70%	80%	50%
ODA 3	> 15	> 30	90%	80%	80%	90%	80%

A qualidade do ar que se encontra no exterior é classificada em três classes, ODA 1, ODA 2 e ODA 3. A primeira classe, ODA 1, corresponde a locais onde o ar é puro (tendo apenas como impureza, e de forma temporária, pólen), como por exemplo zonas rurais ou lugares pouco movimentados. A ODA 2 corresponde a zonas em que o ar ambiente engloba algumas poeiras na sua constituição, como é o caso de pequenas cidades que possuam um movimento considerável. A terceira e última classe, ODA 3, é a classe a que pertencem as zonas de elevada concentração de partículas em suspensão no ar, como é o caso de grandes cidades onde existe uma elevada taxa de poluição comparativamente aos locais referidos nas classes anteriores.

No que diz respeito à qualidade do ar interior, esta é classificada em cinco classes. A classificação varia da SUP 1 à SUP 5, isto é, da classificação onde a qualidade do ar interior é mais elevada, ou seja, requer um nível de filtração mais exigente (SUP 1), até à classificação onde a qualidade do ar interior é menos elevada, ou seja, o nível de filtragem recomendado não é tão exigente (SUP5). Por norma, locais classificados como SUP1 são locais com altas exigências higiénicas, como é o caso de hospitais, principalmente salas onde ocorrem cirurgias. O inverso verifica-se em locais classificados com a classe SUP 5, locais onde a qualidade do ar não é prioridade, como por exemplo armazéns industriais.

A eficiência mínima recomendada pela norma “Air filters for general ventilation – Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM)” (ISO 16890-1:2016) é obtida pela equação (2) (ISO 16890-1, 2016):

$$ePM_{x, cum} = 100 \left(1 - \left(\left(1 - \frac{ePM_{x,s1}}{100} \right) \times \left(1 - \frac{ePM_{x,s2}}{100} \right) \dots \left(1 - \frac{ePM_{x,sn+1}}{100} \right) \right) \right) \quad (2)$$

Onde:

$ePM_{x, cum}$ = Eficiência acumulada [%]

ePM_x = Eficiência fracionária para cada estágio de filtragem [%]

Da comparação das normas ISO 16890-1:2016 e EN 779:2012, é possível seleccionar o tipo de filtragem a utilizar (EUROVENT 4/23, 2017).

Tabela 6 - Comparação entre as normas EN 779:2012 e EN ISO 16890 (EUROVENT 4/23, 2017).

EN 779: 2012	EN ISO 16890 – faixa de eficiências médias medidas reais		
Classe de filtros	ePM ₁	ePM _{2,5}	ePM ₁₀
M5	5% - 35%	10% - 45%	40% - 70%
M6	10% - 40%	20% - 50%	60% - 80%
F7	40% - 65%	65% - 75%	80% - 90%
F8	65% - 90%	75% - 95%	90% - 100%
F9	80% - 90%	85% - 95%	90% - 100%

Tabela 7 - Exemplos de classes de filtros que atendem aos requisitos das categorias ODA/SUP (EUROVENT 4/23, 2017).

Qualidade do ar exterior		Qualidade do ar de insuflamento				
		SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5
ODA 1	Exemplo 1	ePM ₁₀ 50% + ePM ₁ 60%	ePM ₁ 50%	ePM _{2,5} 50%	ePM ₁₀ 50%	ePM ₁₀ 50%
	Exemplo 2	ePM ₁ 70%	-	-	-	-
ODA 2	Exemplo 1	ePM ₁ 50% + ePM ₁ 60%	ePM ₁₀ 50% + ePM ₁ 60%	ePM ₁ 50%	ePM _{2,5} 50%	ePM ₁₀ 50%
	Exemplo 2	ePM ₁ 80%	ePM ₁ 70%	ePM _{2,5} 70%	ePM ₁₀ 80%	-
ODA 3	Exemplo 1	ePM ₁ 50% + ePM ₁ 80%	ePM ₁ 50% + ePM ₁ 60%	ePM ₁₀ 50% + ePM ₁ 60%	ePM ₁ 50%	ePM _{2,5} 50%
	Exemplo 2	ePM ₁ 90%	ePM ₁ 80%	ePM _{2,5} 80%	ePM ₁₀ 90%	ePM ₁₀ 80%

Após análise das tabelas 6 e 7, verifica-se que é necessário garantir, pelo menos, um nível de filtragem de, por exemplo ePM₁ 50% + ePM₁ 80%, que equivale a um conjunto de filtros F7+F9.

Segundo a norma DIN1946-4:2015, para a filtragem do ar de extração é necessária a utilização de pelo menos um filtro de classe M5 (ePM_{2,5} 30%) na área de extração de ar (DIN 1946-4, 2015).

2.9 Fluxo Turbulento vs Fluxo Laminar

Tal como foi referido anteriormente, a renovação do ar num bloco operativo é um processo bastante importante para garantir a ausência de bactérias e partículas em suspensão no ar, de forma a não prejudicar o resultado da cirurgia. Dada essa

importância, são considerados dois tipos de insuflação do ar novo, insuflação de ar por fluxo turbulento ou por fluxo laminar.

O Fluxo Turbulento é um fluxo caracterizado principalmente pelo movimento irregular das partículas do fluido, neste caso do ar. É também caracterizado por ocorrer quando a velocidade de insuflação do ar numa sala cirúrgica é considerada elevada.

As salas cirúrgicas que utilizam sistemas de fluxo turbulento, insuflam o ar novo através de difusores instalados no teto ou nas paredes. O ar tratado é misturado com o ar ambiente de forma rápida e uniforme, provocando assim uma diluição da concentração dos contaminantes. Desta forma, a contaminação que estava contida numa determinada área, é distribuída de forma uniforme por toda a sala cirúrgica (Pereira e Tribess, 2004).

Neste tipo de fluxo, o sentido irregular da circulação das partículas em suspensão no ar é considerado uma grande desvantagem num bloco operatório. Esta irregularidade faz com que em caso de existência de contaminações contidas no ar envolvente, estas se distribuam por todo o bloco, pondo em risco a saúde e o bem-estar dos ocupantes da sala, principalmente do paciente. Desta forma, para não haver o risco de depósito de microrganismos ou até mesmo poeiras sobre as feridas cirúrgicas, a utilização do fluxo turbulento é aconselhada em atividades que possuam um risco de infeção baixo, como é o caso de endoscopias, cirurgias simples à garganta/nariz, etc.

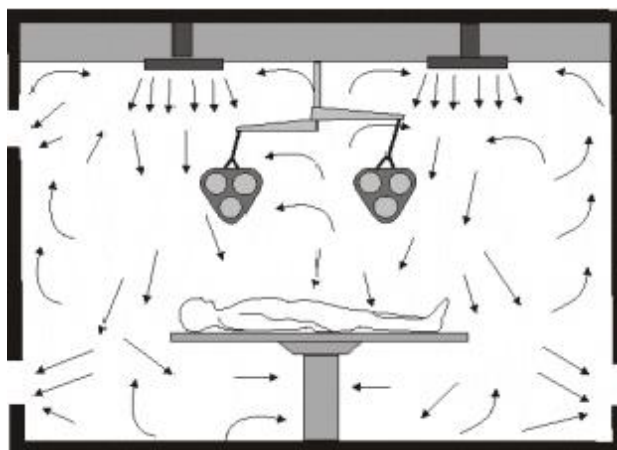


Figura 4 - Sistema de fluxo turbulento com insuflação de ar pelo teto (Pereira e Tribess, 2004).

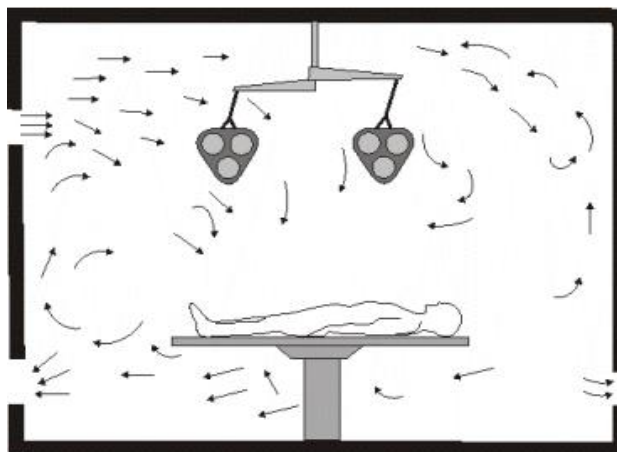


Figura 5 - Sistema de fluxo turbulento com insuflação de ar pela parede (Pereira e Tribess, 2004).

Relativamente ao fluxo laminar, também denominado por fluxo unidirecional, verifica-se o oposto. Este tipo de sistema é caracterizado por seguir uma linha de fluxo, ou seja, o fluido move-se em camadas paralelas evitando desta forma, a mistura entre as partículas em suspensão no ar. Segundo a ASHRAE, nos sistemas que promovem um fluxo de ar unidirecional, o ar circula de forma uniforme, mantendo sempre as suas linhas de fluxo de ar paralelas (ASHRAE, 2002).

Tal como no fluxo turbulento, os sistemas de fluxo laminar utilizam difusores instalados no teto ou na parede para insuflar o ar tratado. Um dos métodos mais utilizados quando se recorre ao fluxo laminar é a utilização de difusores de teto equipados com filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air), sendo este o último nível de filtragem do ar.

Estes difusores de fluxo laminar promovem uma descarga de ar perpendicular à zona de fixação, sendo essa descarga uma descarga unidirecional. O uso deste método reduz assim a mistura entre o ar tratado e o ar contaminado. Esta diminuição de contacto entre o ar que é insuflado e o ar existente na sala cirúrgica deve-se ao facto de, como já foi referido, o ar tratado ser insuflado de forma unidirecional, movendo-se em camadas paralelas, originando assim uma camada protetora entre o paciente e o ar envolvente (ASHRAE, 2016).

De acordo com a norma “Cleanrooms and associated controlled environments – Part 3: Test methods” (ISO 14644-3:2019), é necessária uma escolha correta da área onde irá ocorrer a insuflação do ar, de modo a garantir um varrimento correto da zona a ser protegida e evitar áreas de estagnação de ar.

Nos sistemas de fluxo vertical, os retornos de ar devem ser distribuídos pela sala da forma mais equilibrada possível (ISO 14644-3, 2019).

O fluxo laminar, em comparação com o fluxo turbulento, é um fluxo que acaba por ser mais eficiente do ponto de vista de estabelecer uma barreira entre o paciente e o ar contaminado. Por esta razão, este tipo de fluxo é muito utilizado em cirurgias onde o

risco de infeção é elevado, como por exemplo cirurgias da área da neurologia, ortopedia (operações com uma duração de várias horas), etc.

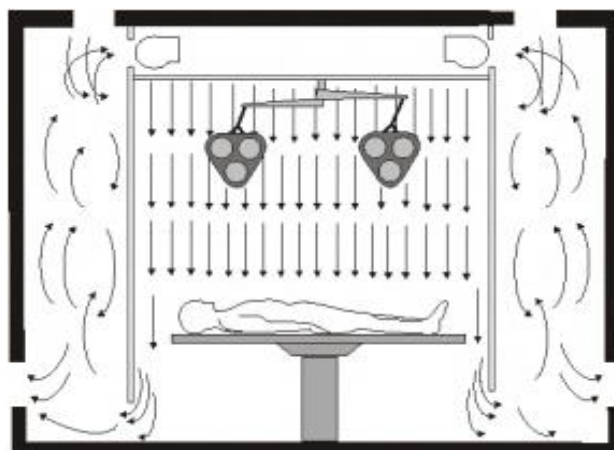


Figura 6 - Sistema de fluxo laminar (Pereira e Tribess, 2004).

2.10 Condições interiores num Bloco Operatório

Segundo o Decreto Regulamentar nº 63/94 do 2/11/1994 e a norma ISO 14644-1:2015, para que um BO seja aprovado, alguns dos parâmetros/condições interiores das salas limpas devem ser controlados de forma a minimizar a introdução ou a retenção de partículas que contribuem para o insucesso das atividades cirúrgicas (Decreto Regulamentar n.º 63/64, 1994) (ISO 14644-1, 2015).

As condições a que as salas limpas devem atender são:

- Pressão e diferencial de pressão (p)
- Humidade relativa (HR)
- Temperatura ambiente (T)
- Velocidade do ar (v)
- Caudal de ar (Q)

2.10.1 Pressão (p)

Num BO, é possível minimizar facilmente a infiltração das partículas que contribuem para a contaminação do ar que circula na sala cirúrgica, a partir da introdução de uma maior quantidade de ar insuflado, em comparação com a quantidade de ar que é extraído. Deste modo, diz-se que a sala cirúrgica está em sobrepressão em relação às salas adjacentes (John Zhang, 2004).

A Figura 7 representa o efeito da pressurização. Analisando a figura, verifica-se que a primeira sala encontra-se em sobrepressão em relação à segunda, e a segunda sala encontra-se em sobrepressão em relação à terceira (NF S 90-351, 2013).

Segundo a norma “Cleanrooms and associated controlled environments – Part 4: Design, construction and start-up” (ISO 14644-4:2001), para os blocos operatórios deve-se considerar um gradiente de pressão entre 5 Pa e 20 Pa, sendo o valor de 15 Pa o mais utilizado (ISO 14644-4, 2001). Este valor é considerado suficiente para garantir o controlo do fluxo de ar. Já a Administração Central do Sistema de Saúde (ACSS), aconselha uma sobrepressão de 20 Pa, correspondente a um caudal de 20 $m^3/h.ml$ de perímetro de entradas (ACSS, 2014).

Estes gradientes de pressão podem ser estabelecidos a partir da utilização de várias técnicas que permitem o ajuste da diferença do fluxo necessário entre o ar fornecido e o ar extraído.

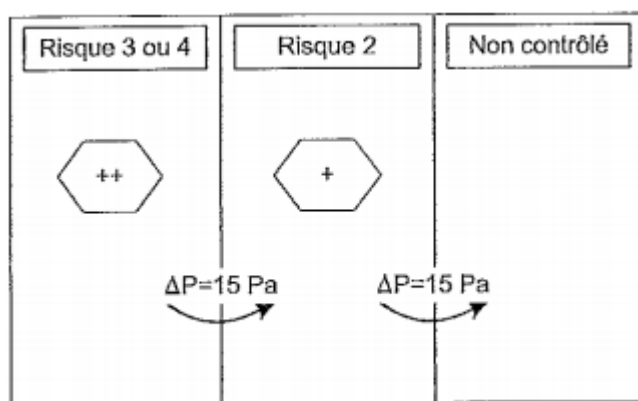


Figura 7 - Cascata de pressões (NF S 90-351, 2013).

2.10.2 Temperatura (T)

A temperatura ambiente num bloco operatório deve ser definida tendo como prioridade garantir o conforto dos ocupantes da sala cirúrgica.

“A sensação de desconforto por frio pode indicar o início da descida da temperatura corporal, devido ao vestuário reduzido e insuficiente proteção térmica. Este sinal contribui para a deteção precoce da hipotermia e permite tornar mais céleres as intervenções de aquecimento. Acresce, ainda, que o desconforto pode significar um estado de ansiedade da pessoa proposta para intervenção cirúrgica ou contribuir, de forma severa, para o agravamento da mesma. A atenção ao conforto térmico, para além de constituir um elemento importante no controlo da HIPOP-I, reduz o nível de ansiedade e incrementa o nível de satisfação da pessoa para com os cuidados prestados.” (AESOP, 2017) (AESOP, 2017).

Segundo o Decreto Regulamentar nº 63/94 do 2/11/1994, a temperatura a considerar numa sala de operações deve estar entre os 20°C e os 24°C (Decreto Regulamentar n.º 63/64, 1994). O mesmo não se verifica nas Especificações Técnicas para

Instalações de AVAC – ET 06/2008 emitidas pela ACSS, que determina um intervalo de temperatura de 17°C a 27°C como temperatura ambiente num BO (ACSS, 2014).

O relatório da “Avaliação da Situação Nacional dos Blocos Operatórios”, criado pelo Despacho Nº 4321/2013, aconselha uma temperatura a manter nas salas limpas entre os 19 °C e os 24°C, para uma humidade relativa de 50 a 55% (DGS, 2015). Posto isto, a temperatura mais utilizada em Portugal no interior de um bloco operatório situa-se entre os 20°C e os 24°C.

2.10.3 Humidade Relativa (HR)

A humidade relativa, tal como a temperatura, é uma propriedade de extrema importância no contexto de um Bloco Operatório, uma vez que, está diretamente relacionada com o conforto e com a higiene que o espaço tem para oferecer.

Numa sala cirúrgica, não é aconselhada utilização de uma humidade relativa muito baixa nem muito elevada. A utilização de um nível de humidade relativa muito baixa faz com que o ar ambiente fique muito seco, contribuindo assim para uma secagem mais rápida das feridas, da garganta e dos olhos, causando desta forma, um enorme desconforto para com o paciente. Para além dos pontos negativos que uma baixa humidade relativa traz à saúde do paciente, também pode afetar os materiais eletrónicos que se encontram na sala cirúrgica devido ao aumento da eletricidade estática. Por outro lado, um nível de humidade relativa elevado provoca um aumento do risco de condensação, criando desta forma condições para o desenvolvimento de bactérias e microrganismos indesejados durante a cirurgia (ASHRAE, 2016).

De acordo com a ASHRAE e com a Administração Central do Sistema de Saúde (ACSS), a humidade relativa recomendada deve situar-se entre os 30% e os 60% (ASHRAE, 2016) (ACSS, 2014).

2.10.4 Velocidade do ar (v)

A velocidade de insuflação do ar é uma propriedade importante no controlo da dispersão e proteção das salas limpas. Nos casos em que se utiliza escoamento unidirecional as velocidades são mais elevadas para garantir um efeito de lavagem e evitar a deposição de partículas na ferida cirúrgica. A velocidade do ar de insuflação aconselhada pela norma NF S 90-351:2013 deve rondar em média os 0,25 m/s e os 0,35 m/s (NF S 90-351, 2013). Normalmente, é utilizada uma velocidade superior do ar sobre a marquesa, diminuindo do centro para a periferia. Este efeito é conseguido recorrendo à utilização de um teto de fluxo diferencial, onde graças à calibração das perdas de carga dos diferentes filtros, se conseguem velocidades de escoamento diferenciadas em áreas diferentes do teto de fluxo laminar.

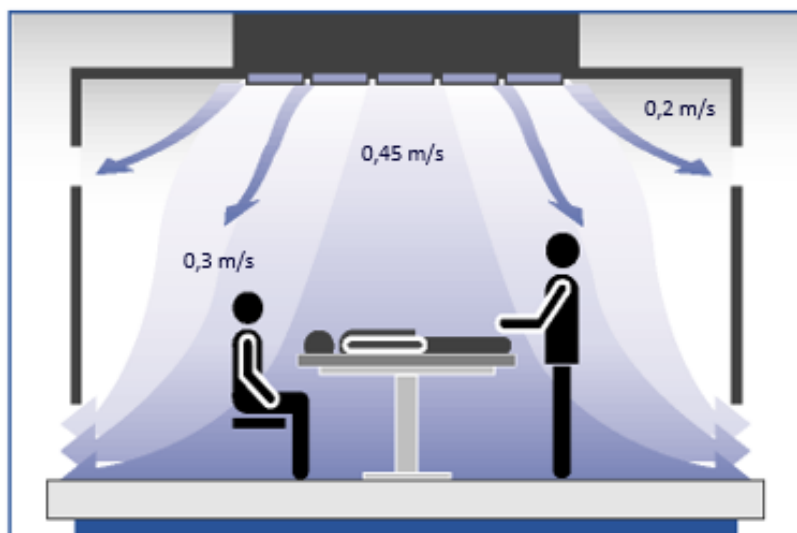


Figura 8 - Velocidade do ar à saída do teto filtrante (SagiCofim, 2010).

A norma ISO 14644-4:2001 defende que a velocidade a definir num bloco operatório depende da classe de limpeza que a sala limpa apresenta (Classes ISO) e ainda do tipo de escoamento que a sala utiliza (laminar ou turbulento) (Tabela 8) (ISO 14644-4, 2001).

Tabela 8 - Tipo de escoamento e velocidade média do ar utilizada em função da classe de limpeza do BO (ISO 14644-4, 2001).

Classe ISO	Tipo de escoamento	Velocidade [m/s]
2	Unidirecional	0,3 - 0,5
3	Unidirecional	0,3 - 0,5
4	Unidirecional	0,3 - 0,5
5	Unidirecional	0,2 - 0,5
6	Turbulento	-
7	Turbulento	-
8	Turbulento	-

2.10.5 Caudal (Q)

A quantidade de ar a insuflar e a extrair é responsável por manter a sala limpa em sobrepressão (quantidade de ar insuflado superior à quantidade do ar extraído). A quantidade de ar novo recomendada num BO é, segundo a ACSS, cerca de $100 \text{ m}^3 / \text{h} \cdot \text{pessoa}$ ($600 \text{ m}^3 / \text{h}$ ou 5 Ren/h , no mínimo) (ACSS, 2014).

3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE AR DO BLOCO OPERATÓRIO

Neste capítulo, apresenta-se o processo de dimensionamento do sistema de tratamento de ar do bloco operatório CUF Tejo – Lisboa, incluído os dados e hipóteses considerados.

3.1 Dados fornecidos

No processo de construção do bloco operatório, a Systemair foi contactada com o objetivo de dimensionar e selecionar o sistema de tratamento de ar para Bloco Operatório CUF Tejo – Lisboa, a partir de algumas condições impostas pelo projetista responsável.

Relativamente às condições interiores do BO, foi solicitado uma sala limpa com uma classe ISO 5, com temperatura interior entre os 20°C e 25°C e uma humidade relativa de 40% a 60%. Para além destas considerações, foi assumida uma carga interna aproximada de 8 kW ($QT = 8kW$) (com o objetivo de representar a presença da equipa médica, paciente e equipamento hospitalar) e que a zona limpa para proteção do paciente e equipe médica tivesse uma dimensão de 3mx3m. O rácio de carga sensível/latente considerado pelo projetista foi de 0,67. Por fim, o caudal de ar novo mínimo a considerar seria de 10% do caudal de insuflação, com um mínimo de 600 m³/h.

3.2 Planeamento do sistema de tratamento de ar

O condicionamento térmico do bloco operatório efetuou-se genericamente através de uma unidade de tratamento de ar interligada a um teto filtrante.

A unidade de tratamento de ar será responsável por parte da filtragem necessária para a proteção dos componentes da máquina e dos ocupantes no interior do Bloco Operatório e será também responsável pelo arrefecimento/desumidificação, aquecimento e/ou humidificação do ar insuflado, de modo a corrigir os desequilíbrios térmicos provocados pelas cargas geradas no interior da sala pela equipa médica, paciente e equipamento hospitalar ou pelas cargas provenientes do exterior.

A insuflação do ar será realizada pelo teto filtrante. Este teto é constituído por vários difusores de seção quadrada, dotados de um nível de filtragem H14 e terá uma área de proteção de 3mx3m, conforme solicitado. Relativamente ao retorno do ar, este será realizado por oito grelhas, quatro das grelhas instaladas nos quatro cantos inferiores da sala cirúrgica, de onde se irá extrair 2/3 do caudal total, e outras quatro instaladas

nos quatro cantos superiores da sala por onde se irá extrair 1/3 do caudal total insuflado na sala.

Esta assimetria tem por objetivo aumentar a eficiência de ventilação, forçando o ar tratado e insuflado pelo teto, a percorrer todo o pé direito da sala, funcionando como um êmbolo sobre a zona protegida, garantindo assim a assepsia desejada.

A circulação de ar foi realizada com recurso a condutas dimensionadas com a ajuda da empresa Climacer, S.A. Os esquemas de circulação de ar encontram-se anexados no presente relatório (Anexo I).

3.3 Dimensionamento do Teto Filtrante

As salas cirúrgicas são as áreas do hospital onde é necessário um maior controle da esterilização do local. Como tal, o sistema de filtragem utilizado foi um teto filtrante de fluxo unidirecional com diferentes velocidades. O teto filtrante possui três zonas diferentes, cada uma delas com velocidades distintas que decrescem do centro para a periferia de forma a criar uma barreira protetora entre a mesa de operações e o restante espaço do bloco operatório. A filtragem utilizada no teto recorre a filtros HEPA absolutos, classe H14.

No dimensionamento do teto laminar procedeu-se de forma direta a partir de uma tabela cedida por um fabricante parceiro da Systemair, que tem como especialidade o fabrico de tetos laminares e outros equipamentos de filtragem.

Tabela 9 - Tabela de seleção do teto filtrante.

AIR FLOW SELECTION												Average
			LV			LV2			LV1			
Mod	Size	Requested air flow [m³/h]	Q.ty	Vel [m/s]	Q [m³/h]	Q.ty	Vel [m/s]	Q [m³/h]	Q.ty	Vel [m/s]	Q [m³/h]	
5/435	2,4 x 2,4	4500	3	0,40	271	6	0,30	205	16	0,23	153	0,26
6/435	2,4 x 2,8	5500	3	0,40	275	9	0,30	208	18	0,23	156	0,27
5/555	3,0 x 3,0	7500	3	0,41	456	6	0,31	345	15	0,23	253	0,27
6/555	3,0 x 3,5	9000	3	0,41	450	9	0,31	340	18	0,23	250	0,27
5/610	3,2 x 3,2	12000	3	0,52	695	6	0,39	524	16	0,29	392	0,34

Recorrendo à Tabela 9, selecionou-se o teto com o tamanho solicitado, 3mx3m. De acordo com a Tabela 9, a velocidade média de insuflação do ar através do teto laminar, utilizando um caudal de insuflação de 7500 m³/h, é de cerca de 0,27 m/s. Deste modo, uma vez que o valor da velocidade média de insuflação está entre 0,25 m/s e os 0,35 m/s, pode-se afirmar que a seleção do teto laminar cumpre com a norma NF S 90-351:2013 (NF S 90-351, 2013). Caso a média da velocidade de insuflação do ar estivesse fora do intervalo de velocidades mencionado, era necessário o ajuste do caudal de insuflação. Ter-se-ia que aumentar o caudal de insuflação se a média

da velocidade de saída do teto laminar fosse menor que 0,25 m/s ou diminuir se a média da velocidade fosse superior a 0,35 m/s.

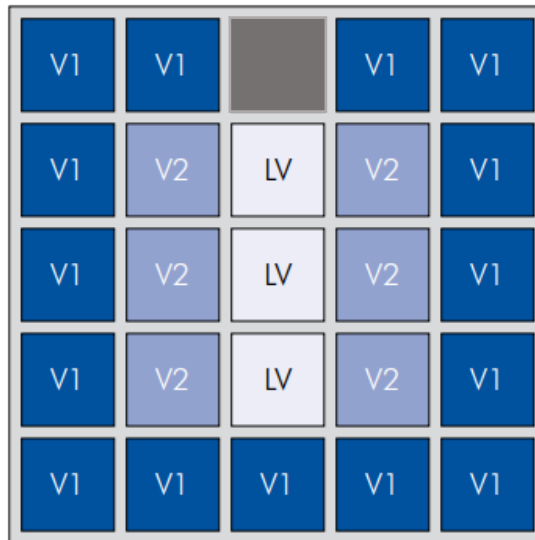


Figura 9 - Zonas do teto laminar.

A Tabela 9 apresenta ainda o caudal e as diferentes velocidades de insuflação do ar em cada zona do teto laminar. O teto divide-se em três zonas, LV, V2 e V1, sendo a zona LV aquela que se encontra por cima do paciente e por essa razão, apresenta maior velocidade de insuflação, cerca de 0,41 m/s em cada um dos três difusores. De seguida, tem-se a zona V2 com uma velocidade de 0,31 m/s em cada um dos seus seis difusores e, por fim, a zona V1 com uma velocidade de 0,23 m/s em cada um dos seus quinze difusores. O espaço a cinzento está reservado para o braço que segura o teto filtrante ao teto do bloco operatório.

3.4 Dimensionamento da Unidade de Tratamento de Ar

O dimensionamento dos componentes da unidade de tratamento de ar teve por base a situação mais desfavorável de cargas térmicas de verão.

O Bloco Operatório é um espaço que está totalmente integrado no interior do edifício, sem ganhos/perdas consideráveis pela envolvente, com cargas térmicas consideradas constantes ao longo do ano, e funciona em regime de prontidão permanente, ou seja, as condições de sobrepressão, temperatura e humidade no seu interior estão sempre no set-point desejado ou muito próximo deste. A única variante no funcionamento da unidade tem por base a quantidade de ar exterior, tratado na unidade e que tem um valor de 10% do caudal total. Além desta baixa percentagem, a unidade possui ainda recuperação de energia e recirculação, pelo que as condições à entrada das baterias são praticamente as mesmas durante todo o ano.

A partir da utilização do SystemairCAD, programa de configuração de unidades de tratamento de ar da Systemair, procedeu-se à fase da construção da UTA responsável pelo tratamento de ar do bloco operatório (Anexo II) (SystemairCAD 2.0).

3.4.1 Configuração da Unidade de Tratamento de Ar

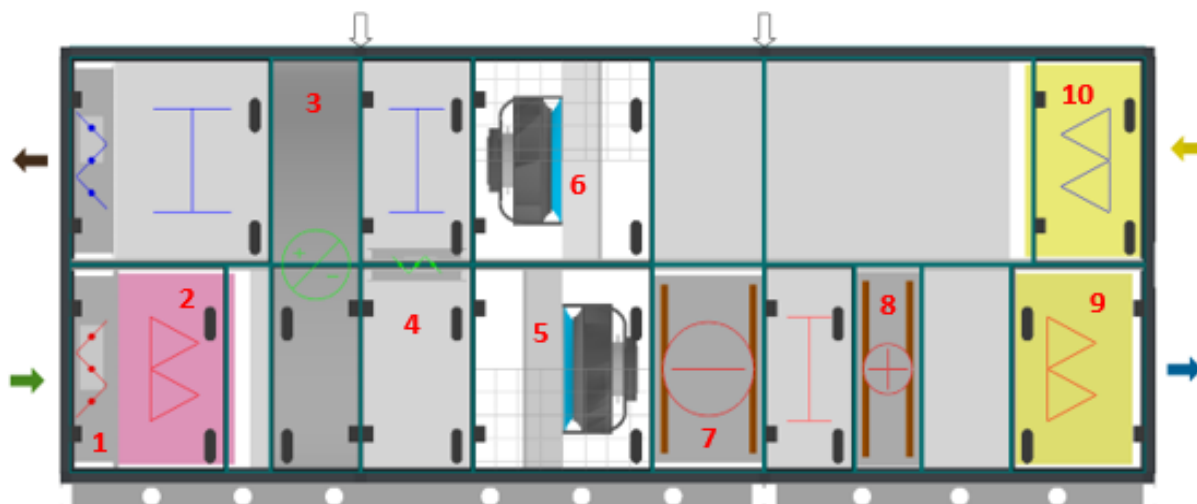


Figura 10 - Unidade de Tratamento de Ar.

Legenda:

- 1- Registo de caudal
- 2- Filtro de ar novo classe F7 ePM1 60%
- 3- Recuperador de calor do tipo roda térmica
- 4- Caixa de mistura/recirculação de ar
- 5- Ventilador de insuflação
- 6- Ventilador de extração
- 7- Bateria de água fria/desumidificação
- 8- Bateria de água quente
- 9- Filtro terminal de insuflação de ar classe F9 ePM1 85%
- 10- Filtro de retorno de ar classe M6 ePM2,5 50%

Relativamente aos caudais utilizados na configuração da UTA, sabe-se que o caudal de insuflação de $7500 \text{ m}^3/\text{h}$ foi obtido pela seleção do teto filtrante e o caudal de retorno será de $7100 \text{ m}^3/\text{h}$, sendo $6750 \text{ m}^3/\text{h}$ recirculados e os restantes $350 \text{ m}^3/\text{h}$ rejeitados para o exterior, mantendo assim o bloco operatório na sobrepressão necessária, face aos $750 \text{ m}^3/\text{h}$ de ar novo introduzidos na sala.

As condições de temperatura e humidade relativa exterior que foram consideradas para Lisboa foram as de 34°C bolbo seco (bs) e uma humidade relativa de 40% para o verão e uma temperatura de 3°C bs e uma humidade relativa de 90% para o inverno.

Relativamente às condições do ar no interior do Bloco Operatório, foi considerada a condição mais desfavorável de arrefecimento/desumidificação com uma temperatura de 20°C bs e uma humidade relativa de 55%, valores estes dentro do intervalo de temperatura e humidade solicitados pelo projetista.

3.4.2 Determinação das condições de insuflação do ar tratado

A determinação das condições de insuflação do ar tratado teve como fase inicial a seleção dos pontos de estudo que seriam importantes analisar e a partir dos quais fosse possível efetuar o dimensionamento dos componentes da unidade de tratamento de ar.

Para alcançar os valores pretendidos, houve a necessidade de utilizar não só o programa SystemairCAD, mas também um diagrama psicrométrico.

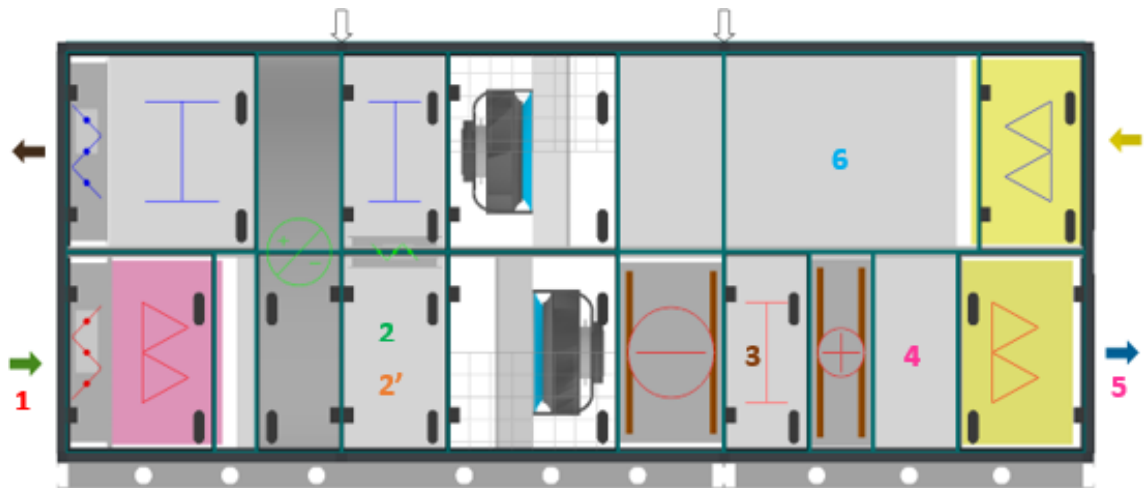


Figura 11 - Pontos de estudo assinalados na Unidade de Tratamento de Ar.

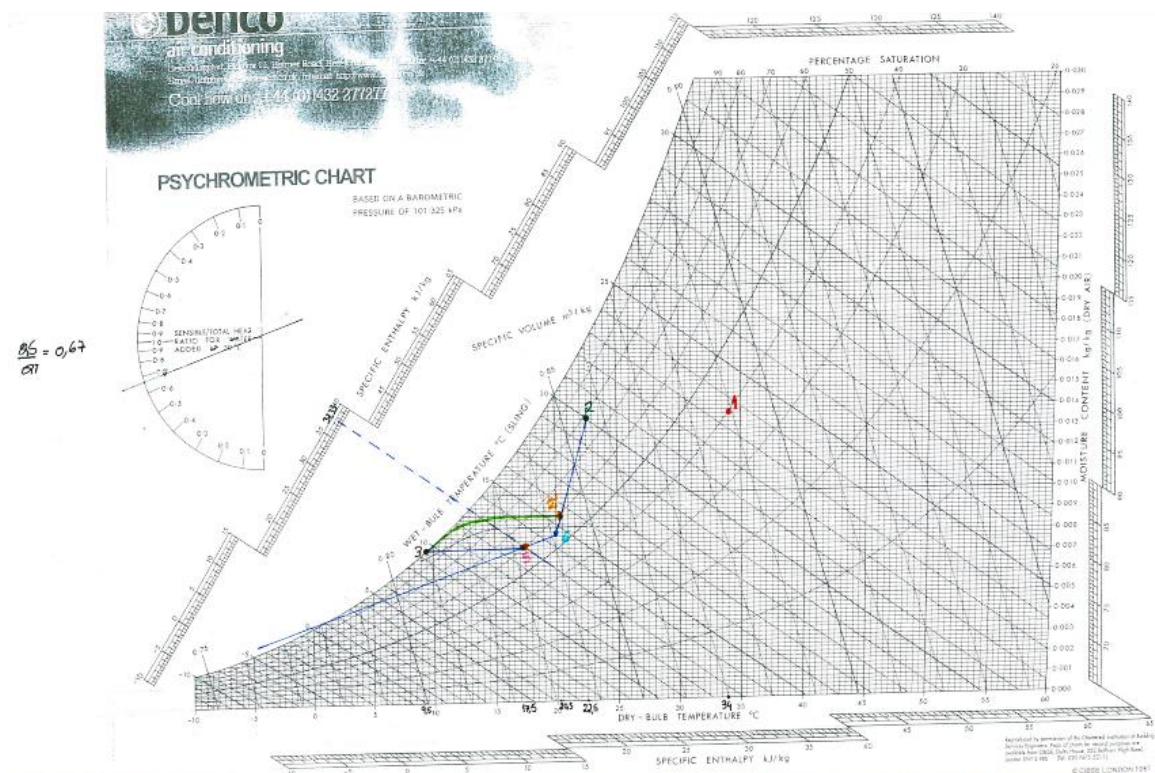


Figura 12 - Pontos de estudo marcados no diagrama psicrométrico.

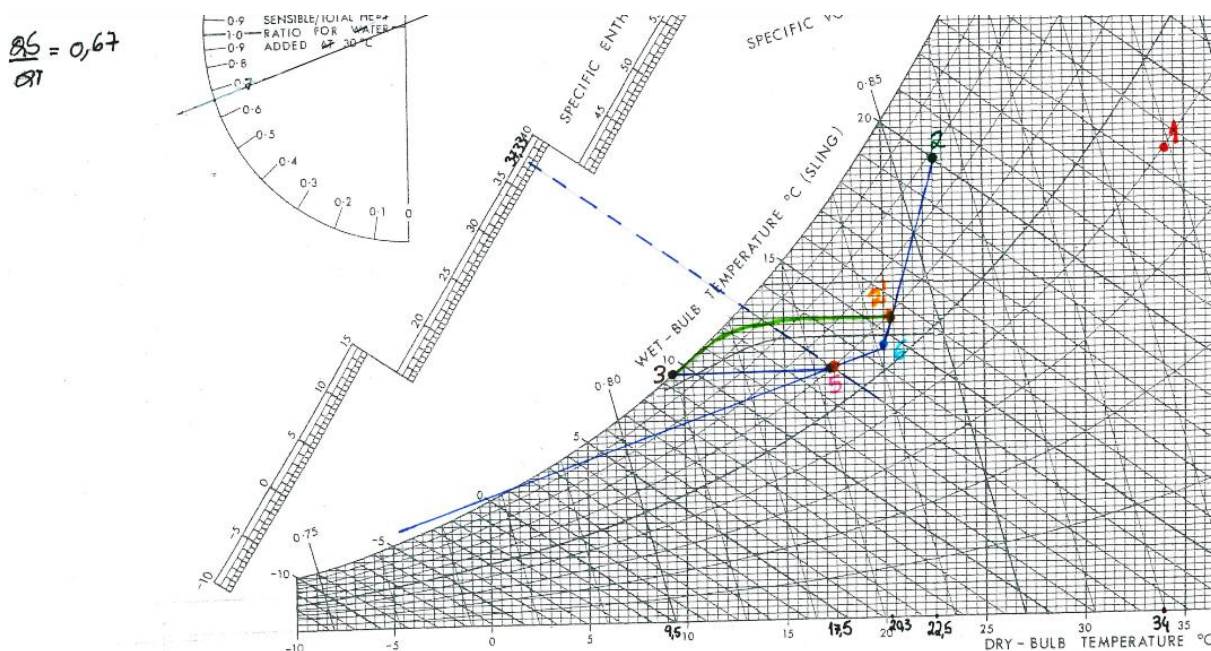


Figura 13 - Pontos de estudo assinalados no diagrama psicrométrico (ampliação da Figura 12).

Legenda das condições do ar:

- 1- Ar exterior no Verão: 34°C bs e 40% Hr
- 2- Ar exterior após recuperação de energia na roda: 22,5°C bs e 79,4% Hr
- 2'- Ar de mistura (retorno/ar exterior) após recuperação: 20,3°C bs e 58% Hr
- 3- Ar após a bateria de arrefecimento/desumidificação: 9,5°C bs e 100% Hr
- 4- Ar após a bateria de aquecimento/reaquecimento: 17,5°C bs e 60% Hr
- 5- Ar insuflado: 17,5°C bs e 60% Hr
- 6- Ar interior/retorno: 20°C bs e 55% Hr

3.4.3 Condições do ar na insuflação

Tendo como objetivo garantir as condições de 20°C bs e 55% Hr no interior do Bloco Operatório, foi necessário calcular as condições de insuflação de ar que permitiriam, para o caudal de insuflação selecionado, vencer as cargas térmicas interiores apresentadas pelo projetista.

Para isso, utilizou-se a carga interna do BO, $Q_t = 8\text{ kW}$, um rácio de $Q_s/Q_t = 0,67$, um caudal de $7500\text{ m}^3/\text{h}$ e as condições do ar interior de 20°C bs com 55% Hr (Ponto 6).

Houve ainda a necessidade de recorrer uma vez mais ao diagrama psicrométrico, com o objetivo de retirar a entalpia do ar interior (Ponto 6).

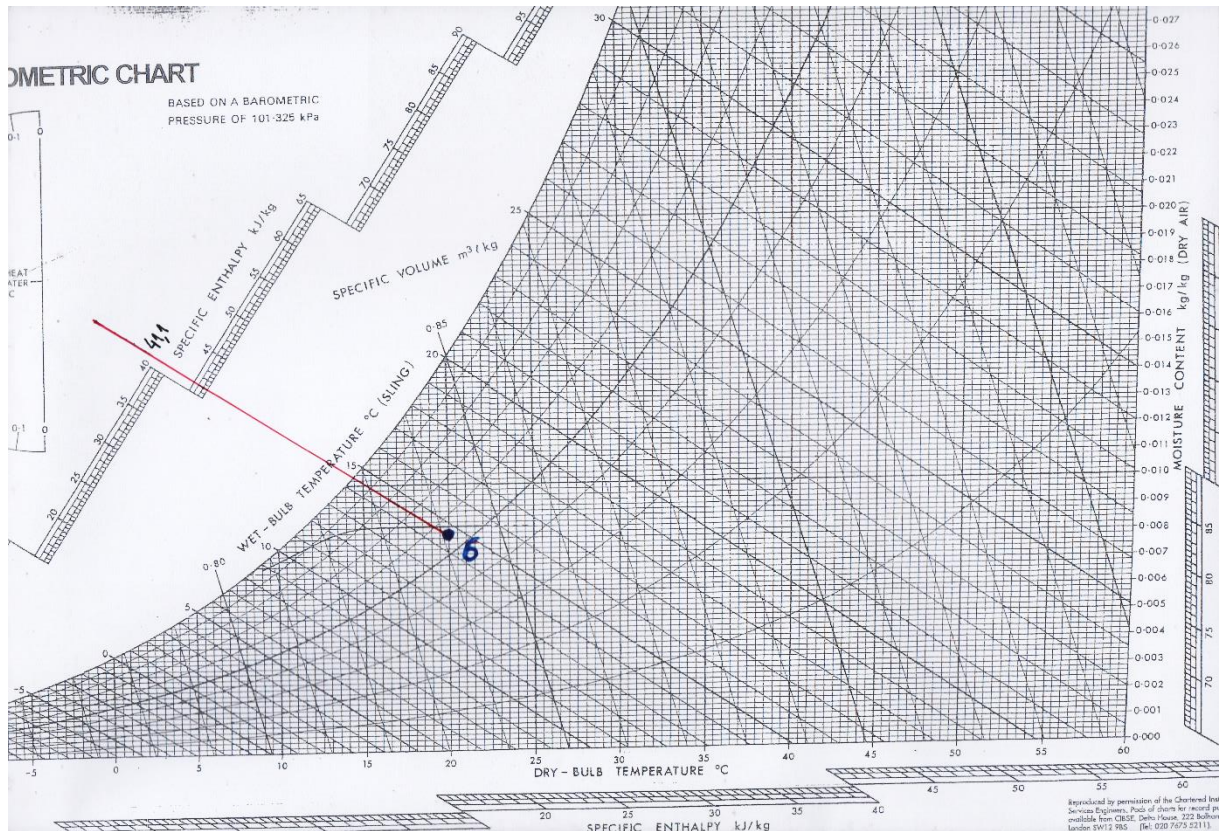


Figura 14 - Determinação da entalpia do ar de retorno (Ponto 6).

A utilização manual do diagrama psicrométrico é uma ferramenta bastante útil na área da climatização, mas acaba por ser uma ferramenta um bocado imprecisa no que toca à leitura de valores exatos. Por esta razão, utilizou-se o programa Psycro para retirar um valor mais preciso da entalpia do ar de retorno (Ponto 6), obtendo-se uma entalpia de 40,53 kJ/kg.

Punto

Entrada	
Temp. Bulbo Seco	[°C] 20,00
Humedad relativa	[%] 55,00
Temp. Bulbo Húmedo	[°C] 14,43
Humedad Absoluta	[g/Kg] 8,1
Temp. Rocío	[°C] 10,72
Densidad	[Kg/m³] 1,189
Volumen	[m³/Kg] 0,841
Entalpia	[KJ/Kg] 40,53
Caudal en volumen	[m³/h] 7500
Caudal en masa	[Kg/h] 8919

Figura 15 - Determinação da entalpia do ar de retorno (Ponto 6), através do programa Psycro.

Após determinação da entalpia do ar interior/de retorno, utilizou-se a equação (3) com o objetivo de determinar a entalpia do ar insuflado no bloco operatório (Ponto 5).

$$\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta h \quad (3)$$

Onde:

$\dot{Q}$ = Carga térmica [kW]

$\dot{m}$ = caudal [m^3/h]

Δh = variação de entalpia [kJ/kg]

Posto isto:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta h \Leftrightarrow 8 = \frac{7500}{3600} \times 1,2 \times (40,53 - h_5) \Leftrightarrow h_5 = 37,33 \text{ kJ/kg}$$

Sabendo a entalpia no ponto 5, traçou-se uma reta paralela à reta Q_s/Q_t no diagrama psicrométrico, com origem no Ponto 6 (condições interiores) intercetando com a reta de entalpia no ponto 5 ($h_5 = 37,33 \text{ kJ/kg}$), obtemos as condições necessárias para a insuflação do ar no Bloco Operatório (como se pode verificar na Figura 12). Através da análise do diagrama psicrométrico, verifica-se que o ar no ponto 5 possui uma temperatura de $17,5^\circ\text{C}$ bs e uma humidade relativa de 60%.

Com estes dados, pode finalmente proceder-se ao dimensionamento dos componentes da unidade de tratamento de ar, de forma a que no fim do processo o ar seja insuflado nas condições calculadas.

3.4.4 Balanço de caudais

Os pontos 1 e 6 correspondem respetivamente às condições do ar exterior na estação de verão (situação mais desfavorável) e às condições do ar no interior do bloco operatório.

Através da Figura 16 podem observar-se as condições de projeto que foram inseridas no programa, como é o caso dos caudais de insuflação e de extração que como foi referido anteriormente, o caudal de insuflação considerado foi cerca de $7500 \text{ m}^3/h$ e o caudal de retorno $7100 \text{ m}^3/h$, sendo $6750 \text{ m}^3/h$ do caudal de retorno recirculados e os restantes $350 \text{ m}^3/h$ rejeitados para o exterior, com o objetivo de garantir uma sobrepressão do bloco operatório ao introduzir uma taxa de ar novo de $750 \text{ m}^3/h$ na

sala cirúrgica. Com a análise da Figura 16, é ainda possível verificar as condições do ar no ponto 1 (34°C bs e 40% Hr) e no ponto 6 (20°C bs e 55% Hr) que foram introduzidas no programa SystemairCAD.



Figura 16 - Condições iniciais da seleção da Unidade de Tratamento de Ar.

3.4.5 Recuperação da energia do ar de retorno para o ar exterior após a roda térmica [1-2]

Os pontos 1 e 2 correspondem respetivamente às condições do ar exterior na estação de verão e às condições do ar após recuperação de energia na roda térmica. Tendo como objetivo determinar as condições do ar no ponto 2, utilizou-se o programa SystemairCAD, como mostra a Figura 17.

Permutador de calor rotativo

Tipo de permutador: ST - Temperatura

Eficiência (altura de onda): A A alta eficiência<-> D baixa perda de carga

Transmissão do rotor: Velocidade variável

Seção do rotor dividida na horizontal: ☐

INVERNO

Temperatura do ar à entrada: (3.0) °C (20.0)

Humidade relativa do ar à entrada: (90.0) % (55.0)

VERÃO

Temperatura do ar à entrada: (34.0) °C (20.0)

Humidade relativa do ar à entrada: (40.0) % (55.0)

Calcular permutador de calor para o Verão: ☒

Resultado

	INVERNO		VERÃO	
	Admissão	Extração	Admissão	Extração
Perda de carga, ar	130 Pa	123 Pa		
Temperatura do ar à saída do	17.0 °C	5.3 °C	22.5 °C	32.1 °C
Humidade relativa do ar à saída do	53.1 %		79.4 %	
Eficiência da temperatura	82.1 %		82.1 %	
Eficiência de recuperação de	57.0 %		-0.2 %	
Capacidade	49.2 kW		30.5 kW	

	Montante	Descrição
1	☐	1 Visor de inspeção
2	☐	1 Amadura de iluminação LED com interruptor.
3	☒	1 Setor de purga

OK

Nota

Calcular

Guardar valor

catálogo

Cancelar

Figura 17 - Condições do ar após a roda térmica (Ponto 2), calculadas pelo SystemairCAD.

Através do software obtiveram-se as condições de 22,5°C bs e 79,4% Hr. Assumindo uma eficiência de recuperação de calor de 82%, confirma-se a temperatura T2 já obtida.

Recorrendo à equação (4), pode-se verificar que é obtida a mesma temperatura T2.

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_6 - T_1} \quad (4) \Leftrightarrow 0,82 = \frac{T_2 - 34}{20 - 34} \Leftrightarrow T_2 = 22,5^\circ\text{C bs}$$

Através da utilização da fórmula, verifica-se que a temperatura do ar após a roda térmica deve rondar 22,5°C bs.

Após estar definido o ponto 1 e 2 no diagrama Psicrométrico, é possível verificar que na transição do ponto 1 para o ponto 2 houve uma descida significativa de temperatura de cerca de 11,5°C bs e um aumento da humidade relativa para 79,4%.

3.4.6 Condições do ar após a recirculação [2-2']

As condições do ar na zona de mistura entre o ar novo insuflado ($750 \text{ m}^3/\text{h}$) e o ar recirculado ($6750 \text{ m}^3/\text{h}$) foram obtidas a partir do diagrama psicrométrico e de alguns cálculos matemáticos.

De modo a calcular as condições do ar no ponto 2' (ar após a recirculação), efetuou-se o cálculo para a temperatura média entre o ponto 2 (ar à saída da roda térmica) e o ponto 6 (ar de retorno) e ainda a humidade absoluta média entre esses mesmos pontos. Importa lembrar que o ar novo insuflado corresponde a 10% da mistura, enquanto que o ar recirculado corresponde a 90%.

$$T = (0,1 \times T_2) + (0,9 \times T_6) \Leftrightarrow x = (0,1 \times 22,5) + (0,9 \times 20) \Leftrightarrow T = 20,25^\circ\text{C bs}$$

$$x = (0,1 \times x_2) + (0,9 \times x_6) \Leftrightarrow x = (0,1 \times 13,6) + (0,9 \times 8,1) \Leftrightarrow x = 8,65 \text{ g/kg}$$

Após a execução dos cálculos apresentados, segue a marcação do ponto 2' no diagrama psicrométrico. Marcado o ponto 2', é possível retirar as restantes condições do ar após mistura.

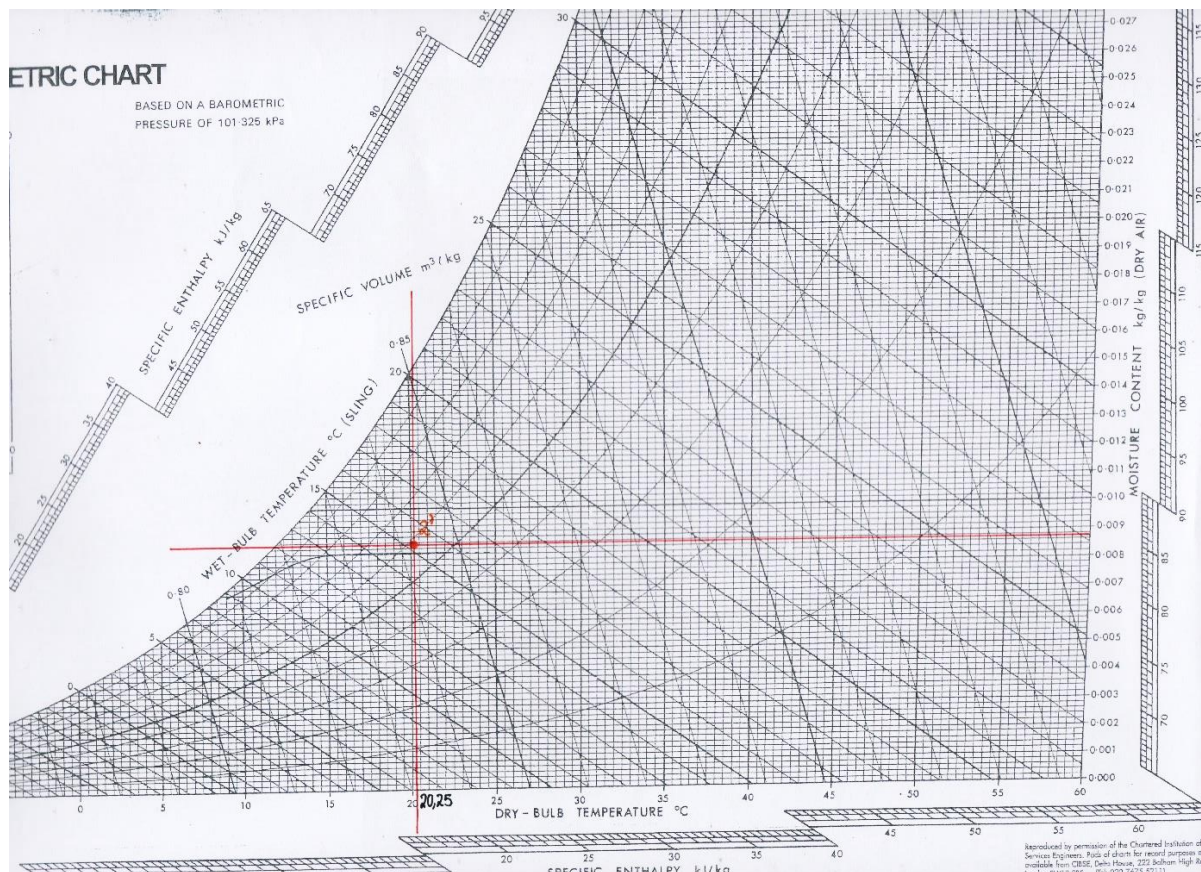


Figura 18 - Condições do ar na zona de mistura (Ponto 2').

Segundo o diagrama psicrométrico, pode-se constatar que no ponto 2', o ar tem uma temperatura de $20,25^\circ\text{C bs}$ e uma humidade relativa de 58%. Estes valores de

temperatura e de humidade relativa podem ser confirmados a partir do software SystemairCAD.

Registo de mistura

Tipo de elemento

Posição: Automático

Material: Aluzink

Lâminas dos registos: Standard

Metade do tamanho: ☒

Rácio de mistura: 90.0 % ☐ Dim. Ponto de funcionam

Admissão de ar novo: 10.0 % de insuflação de

Temperatura do ar à entrada: Admissão (17.0) Extração (20.0) °C

Humidade relativa do ar à entrada: Admissão (53.1) Extração (55.0) %

VERÃO

Rácio de mistura: 90.0 % ☐ Dim. Ponto de funcioname

Admissão de ar novo: 10.0 % de insuflação de ar

Temperatura do ar à entrada: Admissão (22.5) Extração (20.0) °C

Humidade relativa do ar à entrada: Admissão (79.4) Extração (55.0) %

Resultado

Perda de carga, ar: 0 Pa

Temperatura do ar à saída do: 19.7 °C

Humidade relativa do ar à saída do: 55 %

20.3 °C

58 %

	Montante	Descrição
1	☐	1 Armadura de iluminação LED com interruptor.
2	☐	1 Atuador do registo - retorno por mola
3	☐	1 Registo on/off
4	☐	1 Atuador do registo - modulante com mola de retorno
5	☐	1 Atuador do registo - modulante sem mola de retorno
6	☒	1 Kit Higiénico

OK

Calcular

Nota

Guardar valor

catálogo

Cancelar

Figura 19 - Condições do ar na zona de mistura (Ponto 2'), calculadas através do SystemairCAD.

A partir da Figura 19, pode-se confirmar que as condições do ar no Ponto 2' foram bem calculadas, apesar dos cálculos apresentarem uma ligeira diferença no que toca à temperatura do ar.

Para além da utilização do diagrama psicrométrico e do software SystemairCAD, utilizou-se ainda o programa Psycro que permitiu não só verificar que as condições do ar no ponto 2' foram bem determinadas, mas também, verificar que as condições do ponto 2' estão mais próximas do ponto 6 do que do ponto 2, isto pelo simples facto de que 90% da mistura ser composta pelo ar de recirculação.

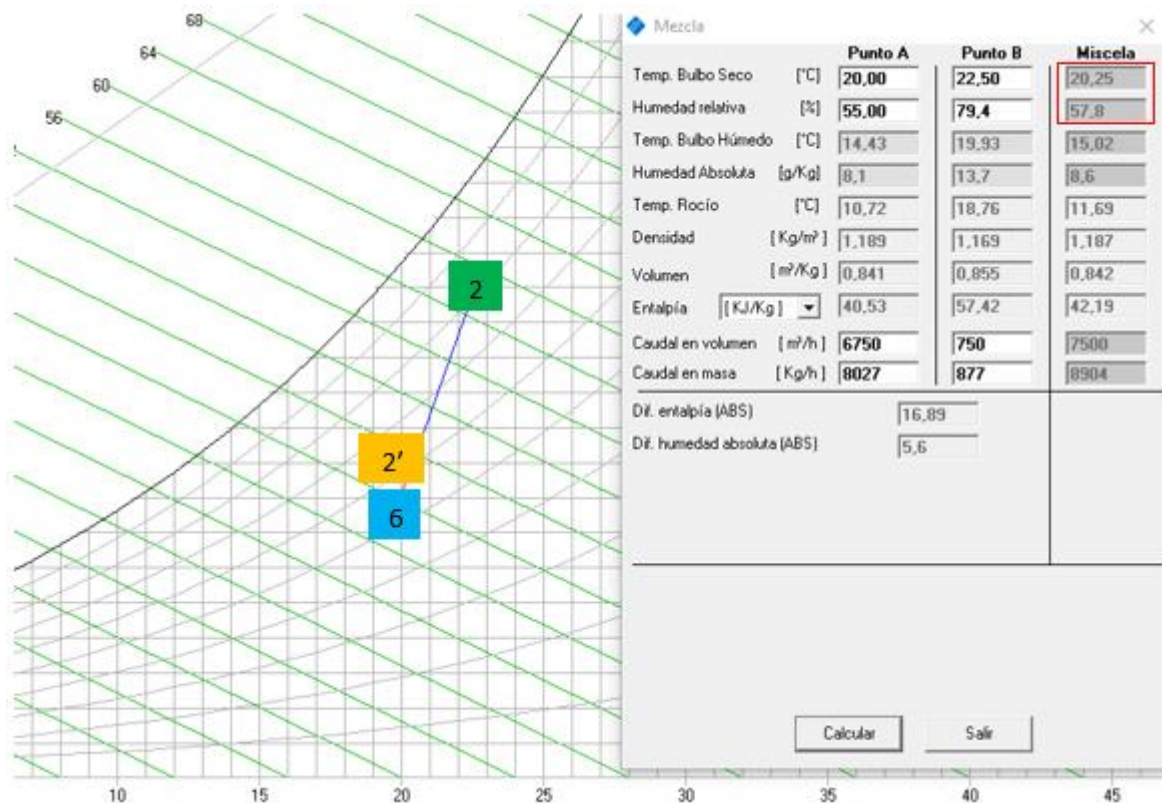


Figura 20 - Condições do ar na zona de mistura (Ponto 2'), calculadas através do programa Psycro.

3.4.7 Condições do ar após a bateria de água fria [2'-3]

O passo seguinte teve como objetivo determinar as condições do ar à saída da bateria de água fria (Ponto 3), de forma a ser possível calcular a potência da bateria, necessária ao arrefecimento e desumidificação do ar. Partindo das condições de insuflação do ar no bloco operativo (Ponto 5), calculadas previamente, deslocou-se o ponto até a linha de saturação simulando o reaquecimento sensível e encontrando a temperatura à saída da bateria de frio e entrada da bateria de quente. Posto isto, retirou-se as condições do ponto 3 a partir do diagrama psicrométrico, como simula a Figura 21, obtendo assim uma temperatura de 9,5°C bs e uma humidade relativa de 100%.

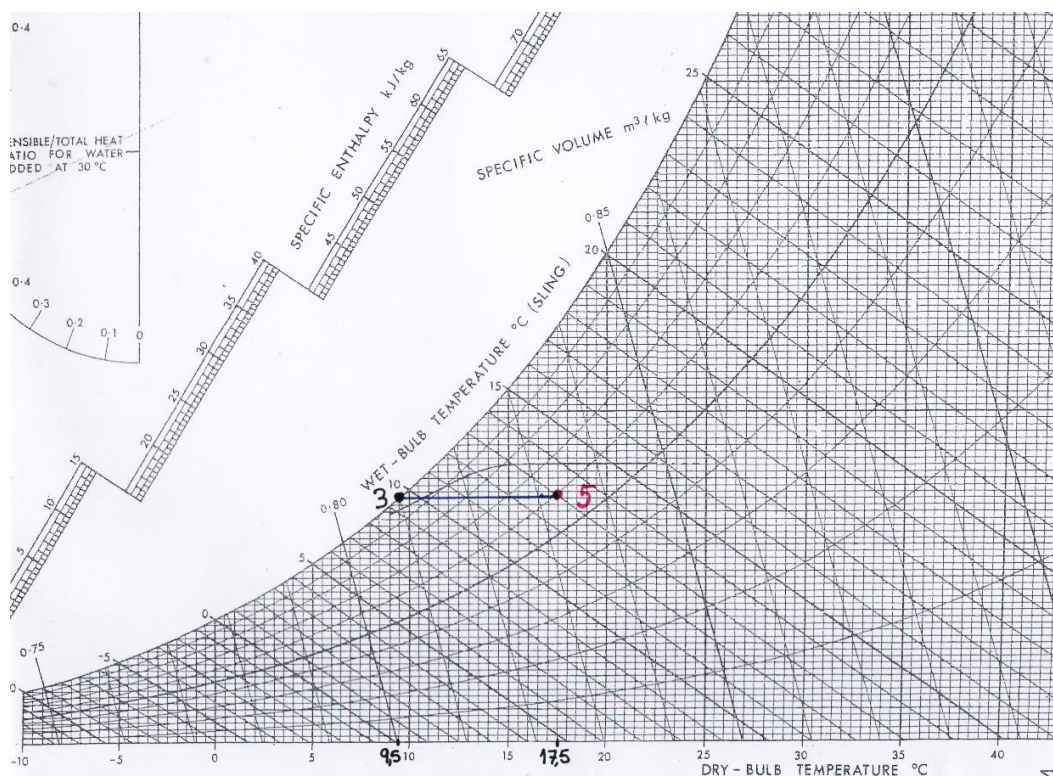


Figura 21 - Condições do ar após a bateria de água fria (Ponto 3).

Após serem determinadas as condições de temperatura e humidade relativa à saída da bateria de água fria, utilizou-se o software SystemairCAD para determinar a potência da bateria de arrefecimento.

Bateria de arrefecimento

Lado de ligação: Lado de serviço

Material: Aluzink

Tipo de bateria: Standard

Comprimento: Standard

Temperatura do ar à entrada: °C (20.3)

Humidade relativa do ar à entrada: % (58)

Temperatura do ar à saída do: ☒ 9.5 °C ☐ 0.0 kW

Potência de arrefecimento: ☐ 0.0 kW

Dados do fluido

Temperatura de entrada do fluido: 7.0 °C

Temperatura de saída do fluido: ☒ 12.0 °C (12.0)

Caudal do fluido: ☐ 0.00 l/s (1.68)

perda de carga máxima: 30.0 kPa

Tipo de fluido: Água

Glicol: %

Resultado

Perda de carga no ar, bateria de: 139 Pa

Perda de carga ar, bateria seca: 100 Pa

Temperatura do ar à saída do: 9.5 °C

Humidade relativa do ar à saída do: 100.0 %

Capacidade: **35.0 kW**

Vel. de passagem na bateria: 1.7 m/s

Perda de carga, fluido: 19.5 kPa

Diâmetro ligação: 1 1/2" / 1 1/2"

Bateria

GXX-18-W-3-10-39-775-1613-2-5-CU-AI10-H-1 1/2

Bateria

Tipo de tubo: 3/8" (P25)

Tipo de bateria: CW, água fria

Espaçamento entre alhetas: 2.5 mm

N.º de fiadas: 0

Circuitos: 0

Circuito de arrefecimento: 1

Material do tubo: Cu

Material da alheta: Alumínio 0,10 mm

Diâmetro de ligação: Automático

Bateria adicional: 1.00

Tabuleiro de condensados: Aço inoxidável

Eliminador de gotas: ☐ Bloquear bateria: ☐

Válvula para arrefecimento: 14 Nenhum

Cálculo da perda de carga da: kPa Valor Kvs: (16.0) Automático

Figura 22 - Cálculo da potência da bateria de água fria, a partir do SystemairCAD.

De acordo com o software SystemairCAD (Figura 22) pode-se concluir que a bateria de água fria deverá ter uma potência de 35 kW.

Para além da utilização do SystemairCAD, utilizou-se ainda outro método, com o objetivo de confirmar qual a potência que teria de ter a bateria de água fria, para que a temperatura do ar à saída da bateria fosse de 9,5°C bs. Para este segundo método foram retiradas as entalpias do ponto 3 e do ponto 2' através do diagrama psicrométrico.

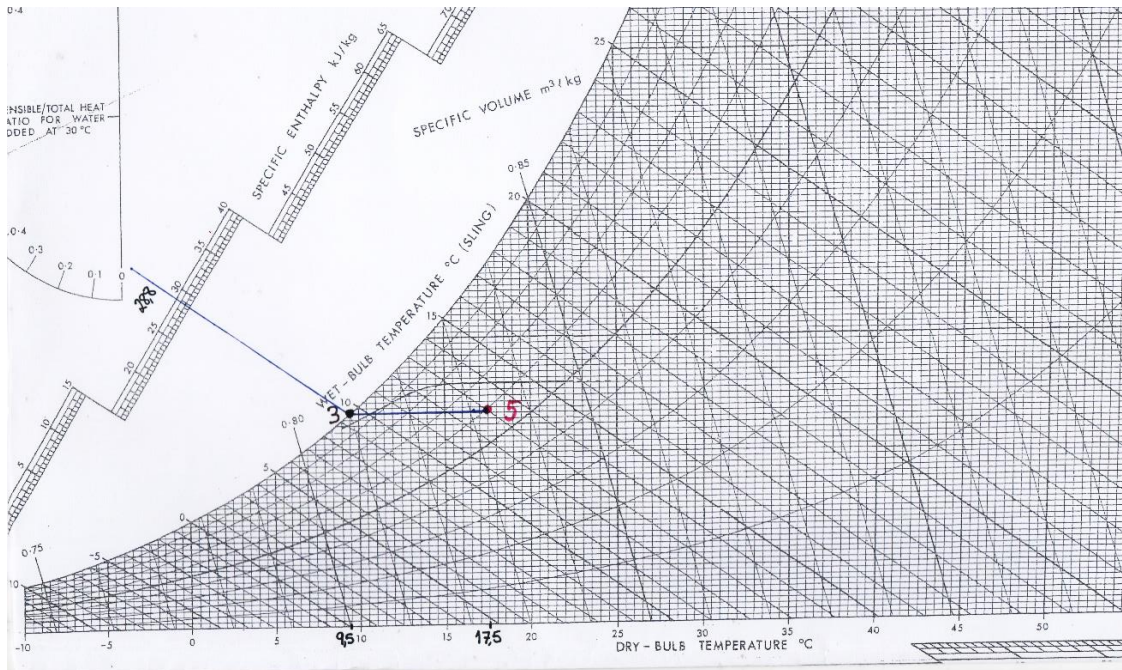


Figura 23 - Determinação da entalpia do ar após a bateria de água fria (Ponto 3).

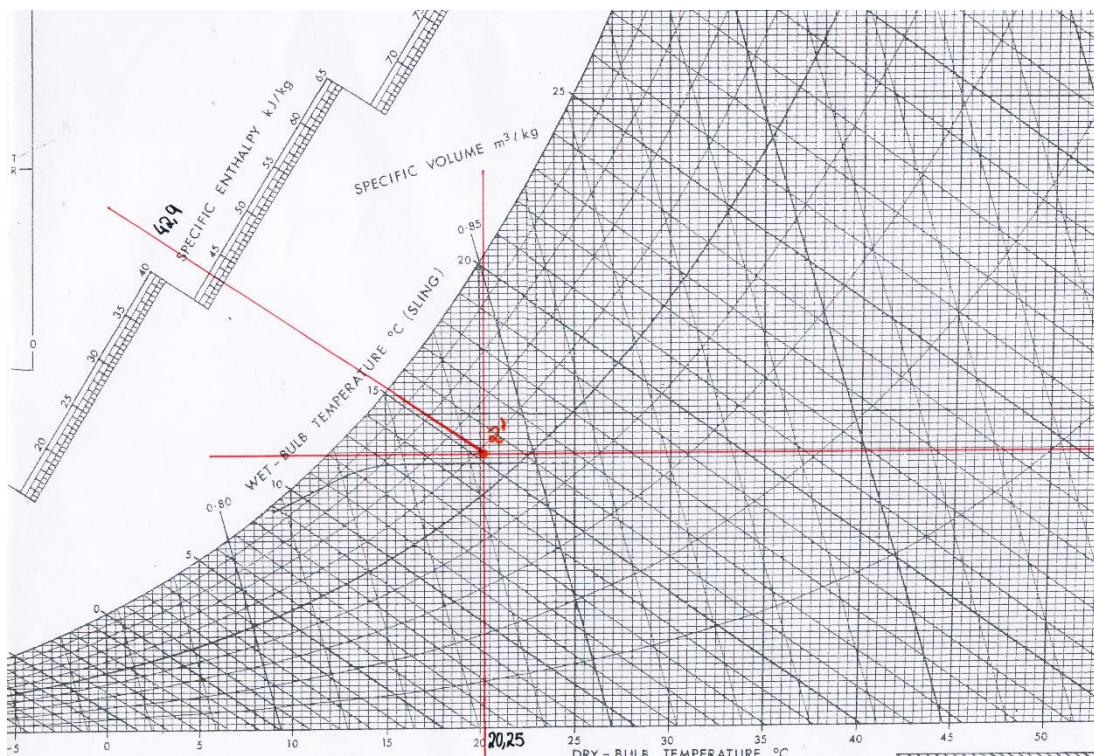
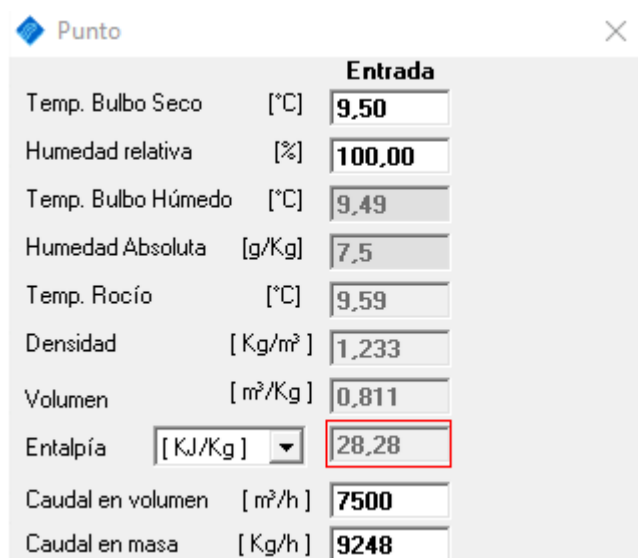


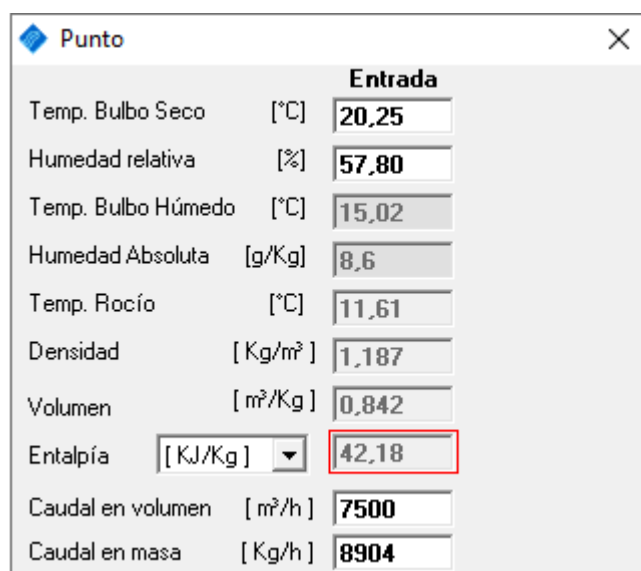
Figura 24 - Determinação da entalpia do ar na zona de mistura (Ponto 2').

De acordo com as Figuras 23 e 24, pode-se verificar que a partir do diagrama foi retirada uma entalpia de 28,8 kJ/kg para o ponto 3 e uma entalpia de 42,9 kJ/kg para o ponto 2'. De forma a evitar incertezas de leitura, foi utilizado o programa Psycro para retirar a entalpia do ar no ponto 3 e no ponto 2'.



Entrada	
Temp. Bulbo Seco	[°C] 9,50
Humedad relativa	[%] 100,00
Temp. Bulbo Húmedo	[°C] 9,49
Humedad Absoluta	[g/Kg] 7,5
Temp. Rocío	[°C] 9,59
Densidad	[Kg/m³] 1,233
Volumen	[m³/Kg] 0,811
Entalpía	[KJ/Kg] 28,28
Caudal en volumen	[m³/h] 7500
Caudal en masa	[Kg/h] 9248

Figura 25 - Determinação da entalpia do ar após a bateria de água fria (Ponto 3).



Entrada	
Temp. Bulbo Seco	[°C] 20,25
Humedad relativa	[%] 57,80
Temp. Bulbo Húmedo	[°C] 15,02
Humedad Absoluta	[g/Kg] 8,6
Temp. Rocío	[°C] 11,61
Densidad	[Kg/m³] 1,187
Volumen	[m³/Kg] 0,842
Entalpía	[KJ/Kg] 42,18
Caudal en volumen	[m³/h] 7500
Caudal en masa	[Kg/h] 8904

Figura 26 - Determinação da entalpia do ar na zona de mistura (Ponto 2').

Determinadas as entalpias do ar no ponto 3 e no ponto 2', procedeu-se ao cálculo da potência da bateria de água fria.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta h \Leftrightarrow \dot{Q} = \frac{7500}{3600} \times 1,2 \times (42,18 - 28,28) \Leftrightarrow \dot{Q} = 34,75 \text{ kW}$$

O valor da capacidade da bateria de arrefecimento (35 kW) é bastante superior aos 8 kW necessários para vencer a carga interna do espaço, uma vez que a potência necessária para o arrefecimento e desumidificação do ar da mistura é consideravelmente superior à carga interna.

3.4.8 Condições do ar após a bateria de água quente [3-4/5]

As condições do ar à saída da bateria de água quente (Ponto 4) e as condições do ar à entrada do Bloco Operatório (Ponto 5), serão as mesmas uma vez que, de acordo com a constituição da Unidade de Tratamento de Ar construída (Figura 11), entre o ponto 4 e o ponto 5 não existe nenhum componente que possa influenciar as condições do ar.

Sabendo as condições do ar no ponto 3 (9,5°C bs e 100% Hr) e nos pontos 4/5 (17,5°C bs e 60% Hr), procedeu-se ao cálculo da potência da bateria de água quente. O cálculo da capacidade da bateria de aquecimento foi efetuado através do software SystemairCAD utilizando como temperatura do ar à saída da bateria a temperatura de 17,5°C bs.

Bateria de aquecimento

Lado de ligação: Lado de serviço

Material: Aluzink

Tipo de bateria: Standard

Comprimento: Standard

Temperatura do ar à entrada: 9.5 °C (9.5)

Humidade relativa do ar à entrada: 100 % (100)

Temperatura do ar à saída do elemento: ☒ 17.5 °C

Capacidade: ☐ 0.0 kW

Dados do fluido

Temperatura de entrada do fluido: 45.0 °C

Temperatura de saída do fluido: ☒ 40.0 °C (40.0)

Caudal do fluido: ☐ 0.00 l/s (0.99)

perda de carga máxima: 20.0 kPa

Tipo de fluido: Água

Glicol: %

Bateria

Tipo de tubo: 1/2" (F3012)

Tipo de bateria: Fluido

Espacamento entre alhetas: 2.5 mm

N.º de fiadas: 0

Circuitos: 0

Circuito de arrefecimento: 1

Material do tubo: Cu

Material da alheta: Aluminio 0.11 mm

Diâmetro de ligação: Automático

Bloquear bateria: ☐

Bateria adicional: 1.00

Válvula para aquecimento: Nenhum

Cálculo da perda de carga da: 13 kPa Automático

Resultado

Perda de carga, ar: 6.9 Pa

Temperatura do ar à saída do: 17.5 °C

Humidade relativa do ar: 100/59 %

Capacidade: 20.1 kW

Vel. de passagem na bateria: 1.7 m/s

Perda de carga, fluido: 15.6 kPa

Diâmetro ligação admissão/descarga: 1 1/4" / 1 1/4"

A bateria seleccionada existe em stock.

Bateria: GXH-18-W-4-1-8-750-1615-2-5-CU-AL11-H-1 1/4

	Montante	Descrição
1	☒	1 Bainha para sonda anti-congelação
2	☐	1 Proteção contra congelamento, sensor de água

Nota

Calcular

Guardar valor

catálogo

OK

Cancelar

Figura 27 - Cálculo da potência da bateria de água quente, a partir do SystemairCAD.

De acordo com o software, a potência da bateria de aquecimento deverá ser de 20,1 kW. Esta potência pode ser confirmada pelo seguinte cálculo:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta h \Leftrightarrow \dot{Q} = \frac{7500}{3600} \times 1,2 \times (17,5 - 9,5) \Leftrightarrow \dot{Q} = 20 \text{ kW}$$

4. ANÁLISE CFD DO BLOCO OPERATÓRIO

O presente capítulo apresenta um estudo de Dinâmica de Fluidos Computacional, efetuado por uma empresa parceira da Systemair, de forma a demonstrar que o sistema de tratamento de ar do Bloco Operatório foi bem dimensionado, cumprindo assim todas as características da classe de limpeza ISO 5, tendo como base os requisitos da norma DIN 1946-4:2015 (DIN 1946-4, 2015).

4.1 Introdução ao CFD

Dinâmica dos Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) é um processo de simulação numérica de fenómenos físicos que envolvem escoamentos de fluidos. O CFD baseia-se em equações físicas fundamentais de escoamento de fluidos e transferência de energia, designadas por equações de Navier-Stokes. As equações de Navier-Stokes são equações que descrevem o movimento do fluido, relacionando fatores como velocidade, pressão, temperatura e densidade do fluido em movimento (NASA, 2021).

A grande vantagem das análises em CFD é a capacidade de representar escoamentos complexos aplicados a geometrias complexas, com metodologias de análise e cálculo que têm por base modelos físicos aplicáveis. Para além desta vantagem, apresenta também uma repetibilidade do processo utilizando novas parâmetros e condições fronteiras, possui a capacidade de analisar situações antes da sua existência física, evitando assim que em caso de falha o projeto seja removido na totalidade ou alterado, possivelmente com custos económicos e logísticos elevados, bem como atrasos nos prazos de conclusão. Desde então, o CFD tem sido desenvolvido e aplicado a uma gama cada vez mais diversificada de situações. Para além da sua aplicabilidade em contexto hospitalar, a análise CFD é também aplicada em muitas outras áreas, por exemplo automóvel, aeroespacial, engenharia nuclear, segurança contra incêndios, entre outras.

Tendo como objetivo validar o dimensionamento da sala cirúrgica realizado no capítulo 3, foi solicitada a uma empresa parceira da Systemair, especializada na área, uma análise CFD para o Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo – Lisboa, com base nos requisitos da norma DIN 1946-4:2015. Para o efeito, foi utilizado o programa de simulação Ansys Fluent v2021 R2 (Ansys, 2021).

A partir da análise CFD foi possível verificar se os perfis de velocidade, temperatura e humidade relativa estavam de acordo com o esperado e ainda verificar se o grau de proteção e o tempo de recuperação do bloco operatório correspondiam aos requisitos necessários para obter uma classe de limpeza ISO 5.

Segundo os padrões da norma DIN 1946-4:2015, a sala cirúrgica deve ser testada para verificar se cumpre com o “efeito protetor ou grau de proteção” e o “tempo de recuperação” (DIN 1946-4, 2015).

4.2 Procedimento para a determinação do “Efeito Protetor ou Grau de Proteção”

O objetivo da medição do grau de proteção é obter a avaliação quantitativa do nível de proteção fornecido contra a entrada de cargas de contaminação externa e interna na área protegida, levando em consideração quaisquer obstruções que perturbem o fluxo e as cargas de arrefecimento dentro da área protegida.

O grau de proteção em salas de operação de classe ISO 5 deve ser avaliado em duas situações, sendo a primeira demonstrar que o bloco operatório está protegido contra a entrada de cargas contaminantes vindas do exterior e a segunda demonstrar que o bloco operatório está protegido contra a entrada de cargas contaminantes provenientes do interior.

O grau de proteção varia de >5 a 0 até um valor negativo, sendo que 5 indica um efeito de proteção excelente e 0 ou número negativo indica que não há efeito de proteção.

Para garantir uma classe de limpeza ISO 5, o valor obtido nos resultados do efeito de proteção deve ser maior ou igual a quatro (≥ 4) caso a sala limpa não tenha luzes cirúrgicas ou maior ou igual a dois (≥ 2) caso a sala limpa seja projetada com luzes cirúrgicas. Esses resultados devem ser calculados na mesa cirúrgica em três pontos de medição padrão, M1, M2 e M3 que correspondem respetivamente à cabeça, tronco e pés do paciente (DIN 1946-4, 2015).

De acordo com as Figuras 28 e 29, o teste é realizado para determinar as condições de entrada da carga contaminante de partículas externas e internas e ainda o grau de proteção, a partir do cálculo das concentrações médias das partículas em cada ponto de medição (M1, M2 e M3), localizados um pouco acima da mesa cirúrgica.

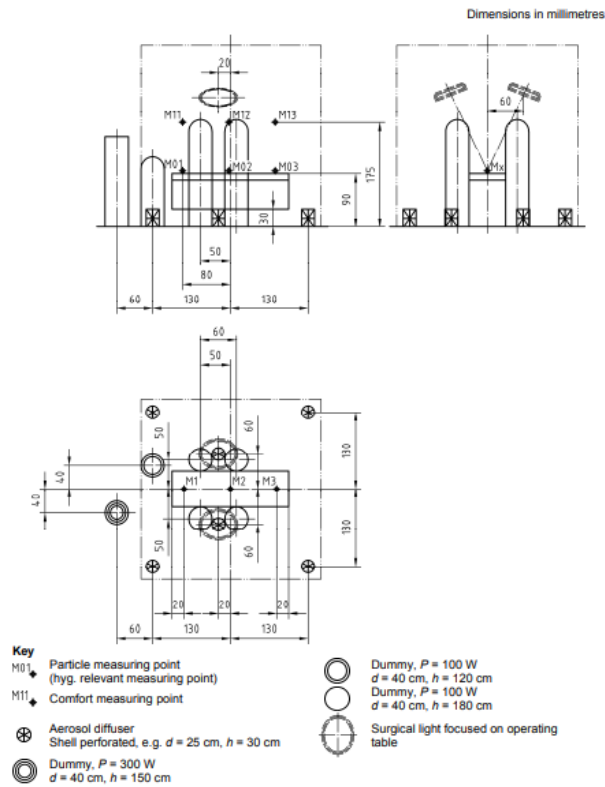


Figura 28- Teste de proteção contra a entrada de carga contaminante proveniente do interior (DIN 1946-4, 2015).

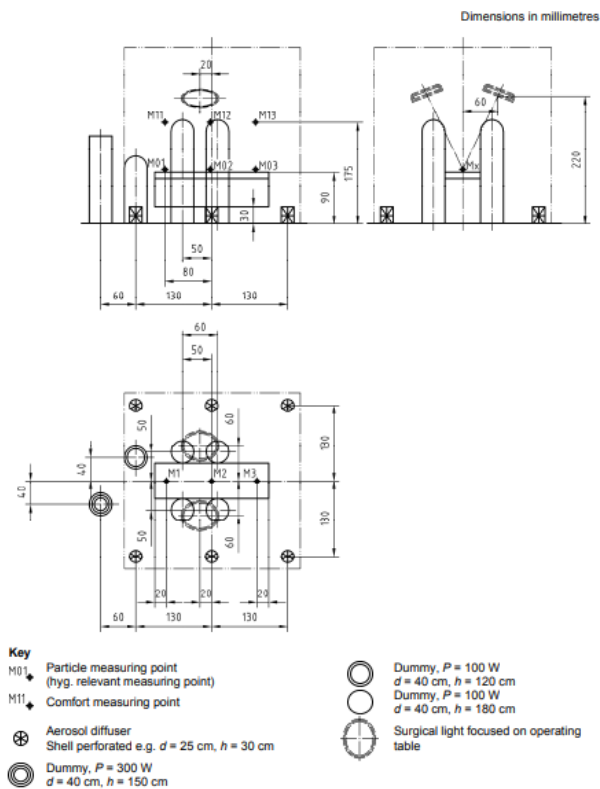


Figura 29- Teste de proteção contra a entrada de carga contaminante proveniente do exterior (DIN 1946-4, 2015).

4.3 Procedimento para a determinação do “Tempo de Recuperação”

A definição de tempo de recuperação de acordo com a norma DIN 1946-4:2015 para salas de Classe ISO 5 diz que a redução da concentração de partículas em 99% deve ocorrer dentro de um intervalo de tempo de 25 minutos após a geração de partículas ter sido interrompida (DIN 1946-4, 2015).

Para calcular o tempo de recuperação a partir das simulações de CFD, primeiro é necessário gerar condições de estado estacionário dentro da sala de operações para as condições de entrada de partículas externas e de entrada de partículas internas.

De seguida, a análise CFD funciona durante 30 minutos para três dimensões distintas de partículas, partículas de $0,3\mu\text{m}$, $0,5\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$, de modo a verificar quanto tempo é necessário para reduzir a concentração de partículas até aos limites permitidos para garantir uma classificação ISO 5: $10200 P/m^3$ para partículas com um diâmetro de $0,3\mu\text{m}$, $3520 P/m^3$ para partículas com um diâmetro de $0,5\mu\text{m}$ e $832 P/m^3$ para partículas com um diâmetro de $1\mu\text{m}$ (DIN 1946-4, 2015).

4.4 Condições de entrada para a análise CFD

O sistema de tratamento de ar do bloco operatório foi projetado para insuflar um fluxo total de ar de $7500 m^3/h$ através de um teto filtrante. O teto foi projetado para estar localizado no centro da sala, por cima da marquesa, com uma dimensão de 3m x 3m.

Tabela 10 - Condições de entrada de ar através do teto filtrante.

Parâmetros	Nº de aberturas	Fluxo de ar de cada abertura [m^3/h]	Velocidade de passagem do ar de cada abertura [m/s]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$] e Humidade Relativa [%] do ar insuflado
Aberturas de insuflação de ar de baixa velocidade	15	253	0,23	T=17,5°C HR=60%
Aberturas de insuflação de ar de média velocidade	6	345	0,31	
Aberturas de insuflação de ar de elevada velocidade	3	456	0,41	
Fluxo total de ar insuflado	-	7500	-	

Na Tabela 10 estão representadas as condições de entrada do ar através do teto filtrante e ainda as condições de temperatura e humidade relativa do ar insuflado, após a passagem pela UTA (Ponto 5).

Tabela 11 - Características do Bloco Operatório.

Parâmetros	Dimensões
Área do Bloco Operatório	40,1 m ²
Altura do teto mais baixo	3,75 m
Altura do teto mais alto	5,75 m

Para a realização da análise CFD, foram também consideradas algumas características acerca da geometria do bloco operatório fornecidas pelo projetista (Tabela 11). Além das cargas de referência, o teste teve de considerar uma carga térmica de 800W referente às luzes cirúrgicas e às cargas térmicas internas. Esta carga térmica foi fornecida a partir de seis “dummies” (quatro “dummies” de forma a representar os cirurgiões e a equipa assistente com uma carga térmica de 100W cada, localizados nas laterais da mesa de operações, um “dummy” a representar a anestesista com uma carga térmica de 100W e um “dummy” a representar o equipamento cirúrgico com uma carga térmica de 300W), segundo a norma DIN 1946-4:2015 (DIN 1946-4, 2015).

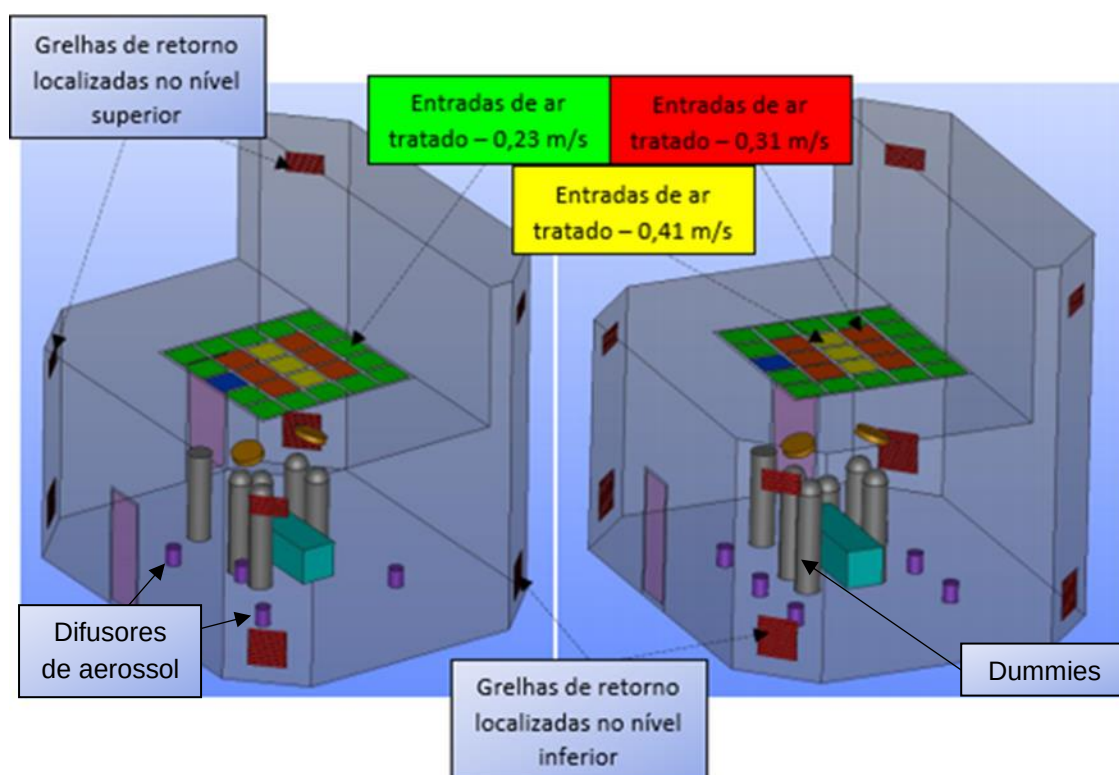


Figura 30 - Vista isométrica do Bloco Operatório.

De modo a ser possível realizar corretamente a análise CFD, foi criado o modelo do bloco operatório CUF Tejo – Lisboa, com base na descrição e nas características dadas pelo projetista. Através da Figura 30 consegue-se identificar o teto filtrante

(selecionado no capítulo 3.3), as oito grelhas de retorno (representadas a vermelho), os difusores de aerossol (representados a lilás) e os “dummies” (representados a cinzento).

4.5 Resultados da simulação CFD

De acordo com os detalhes e condições mencionados anteriormente, a análise CFD foi realizada para cenários de entrada de partículas externas e internas e para três tamanho de partículas ($0,3\mu\text{m}$, $0,5\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$). A partir desta análise, foi possível avaliar os perfis de velocidade, temperatura e humidade relativa que irão ocorrer dentro da sala cirúrgica, mas sobretudo analisar se os parâmetros de efeito protetor e tempo de recuperação no bloco operatório estão de acordo com a norma DIN 1946-4:2015 (DIN 1946-4, 2015).

Os resultados CFD obtidos resultaram de medições efetuadas a partir de diferentes cotas no bloco operatório (0,5 m, 1,2m, 1,75m, 3,17m e 5,41m) e em diferentes planos (X, Y e Z). Para realizar a análise CFD, as partículas foram inseridas no bloco operatório através dos difusores de aerossol, com uma taxa de geração de $5,15 \times 10^9 \text{ P/min}$.

A taxa de geração de partículas Q_{Ref} [P/min] é dada por:

$$Q_{Ref} = C_{Ref} \times A_{Ref} \times V_{Ref} \quad (5)$$

Onde:

C_{Ref} – Concentração de partículas de referência [$35,3 \times 10^6 \text{ P/m}^3$]

A_{Ref} – Área do teto filtrante [m^2]

V_{Ref} – Velocidade do ar à saída do teto filtrante [m/s]

Obtendo-se então:

$$Q_{Ref} = (35,3 \times 10^6) \text{ P/m}^3 \times (3 \times 3) \text{ m}^2 \times 0,27 \text{ m/s} \times 60 \text{ s/min}$$

$$Q_{Ref} = 5,15 \times 10^9 \text{ P/min}$$

4.5.1 Resultados CFD dos perfis de Velocidade, Temperatura e Humidade Relativa para a entrada de partículas externas

4.5.1.1 Perfis de Velocidade nos planos X, Y e Z para penetração de partículas externas

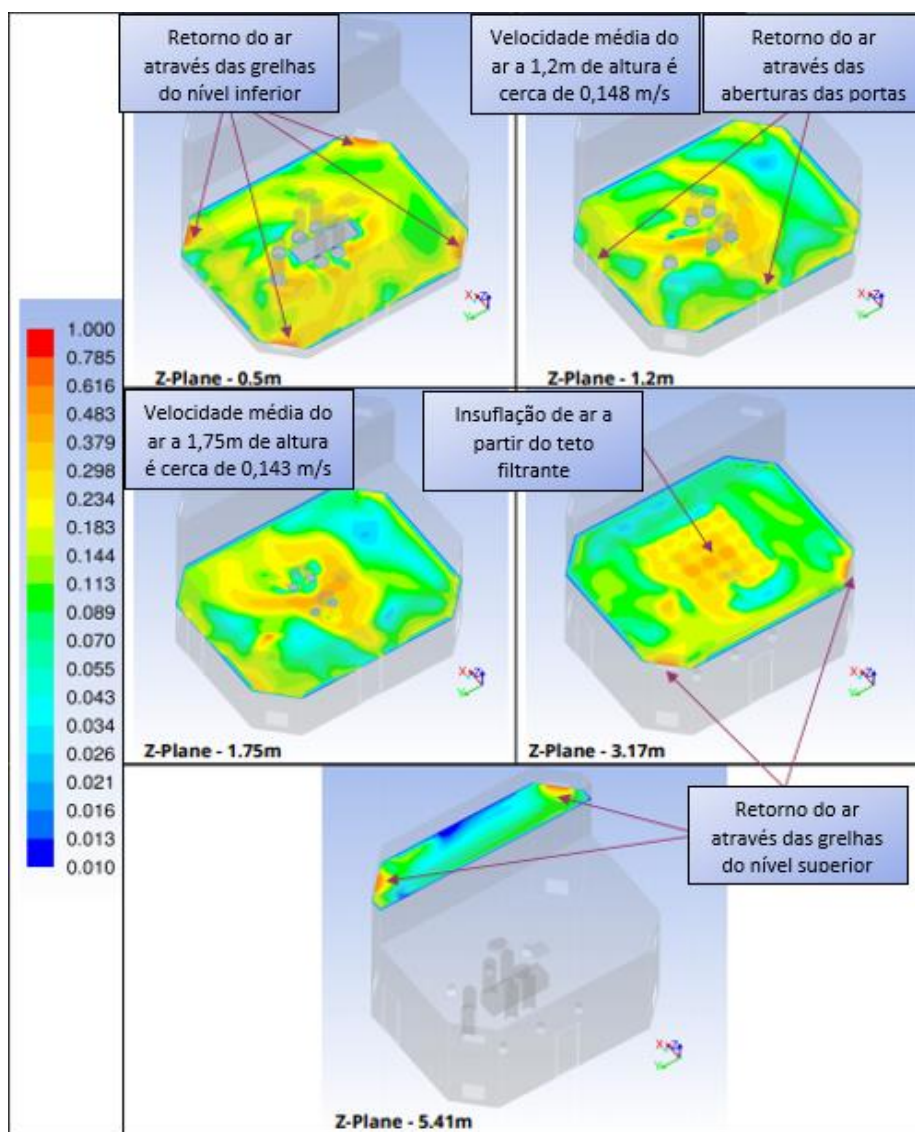


Figura 31 - Perfil da Velocidade do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

O perfil de velocidade do ar no plano Z mostra que as zonas em que o ar apresenta uma maior velocidade são nos cantos inferiores e superiores do bloco operatório, onde ocorre o retorno do ar através das grelhas.

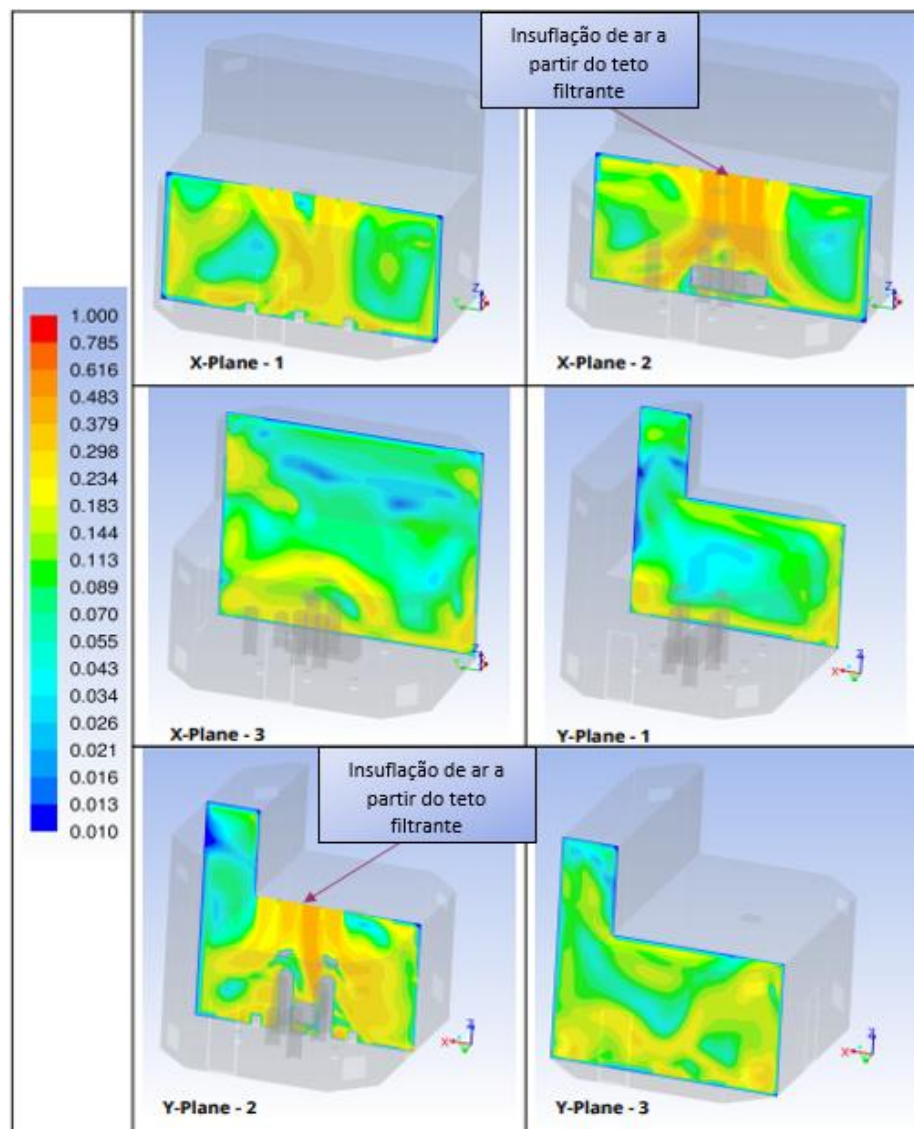


Figura 32 - Perfil da Velocidade do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

Outra zona em que o ar apresenta uma velocidade considerável é na zona à saída do teto filtrante, onde ocorre a insuflação de ar, como se pode verificar no plano X.

4.5.1.2 Perfis de Temperatura nos planos X, Y e Z para penetração de partículas externas

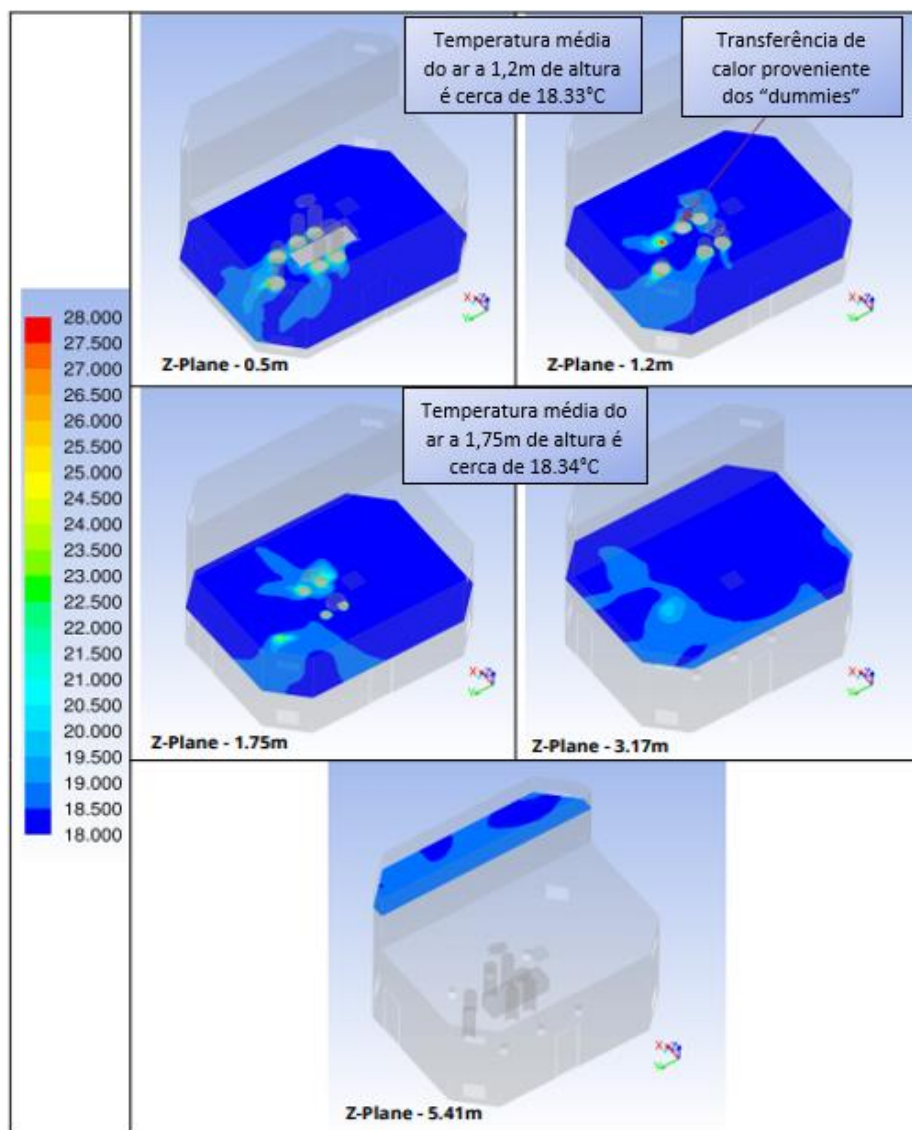


Figura 33 - Perfil da Temperatura do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

Pelo perfil de velocidade no plano Z, pode-se verificar que não existem grandes oscilações de temperatura, exceto na zona onde se encontram os "dummies" e as luzes cirúrgicas.

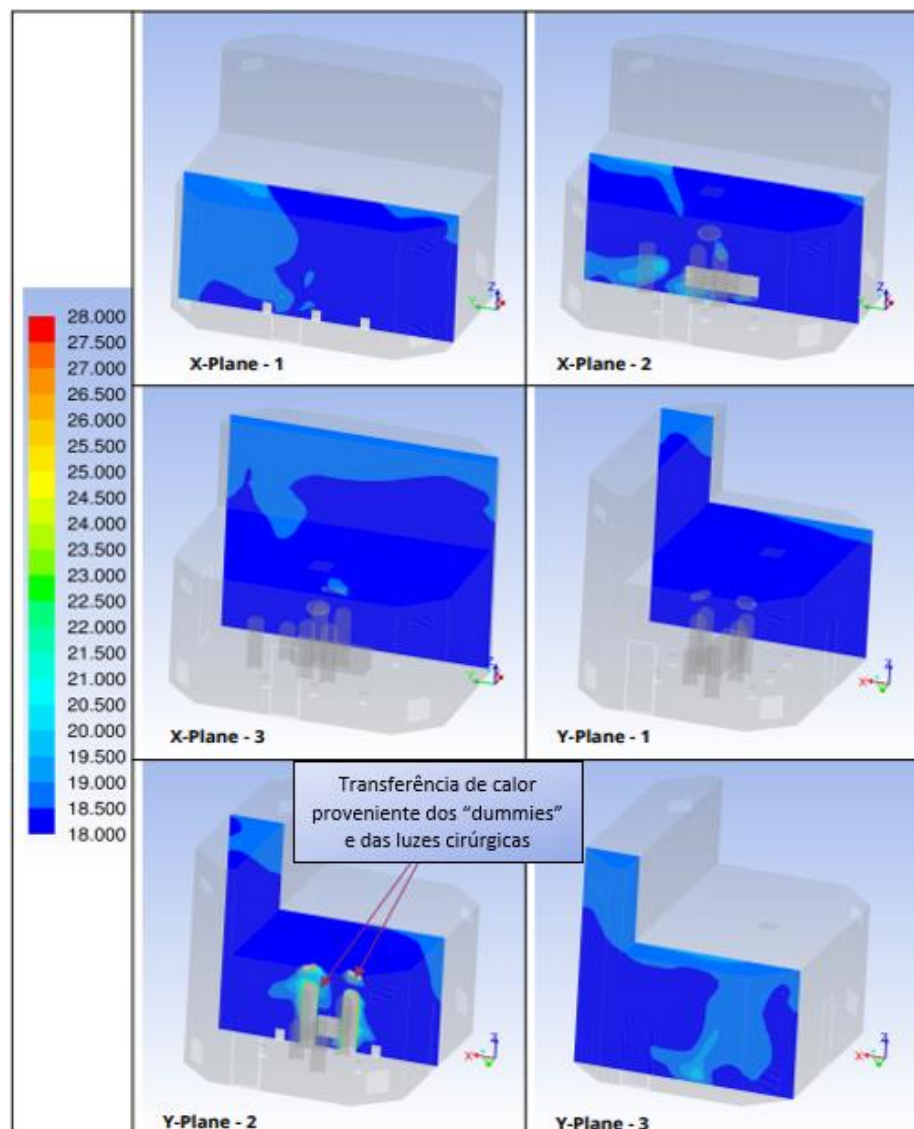


Figura 34 - Perfil da Temperatura do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

Pelos perfis de temperatura, pode observar-se que as zonas em que a temperatura se encontra mais elevada são a zona dos “dummies”, que simula a transferência de calor por parte do pessoal médico e do equipamento cirúrgico, e a zona das luzes cirúrgicas.

4.5.1.3 Perfis de Humidade Relativa nos planos X, Y e Z para penetração de partículas externas

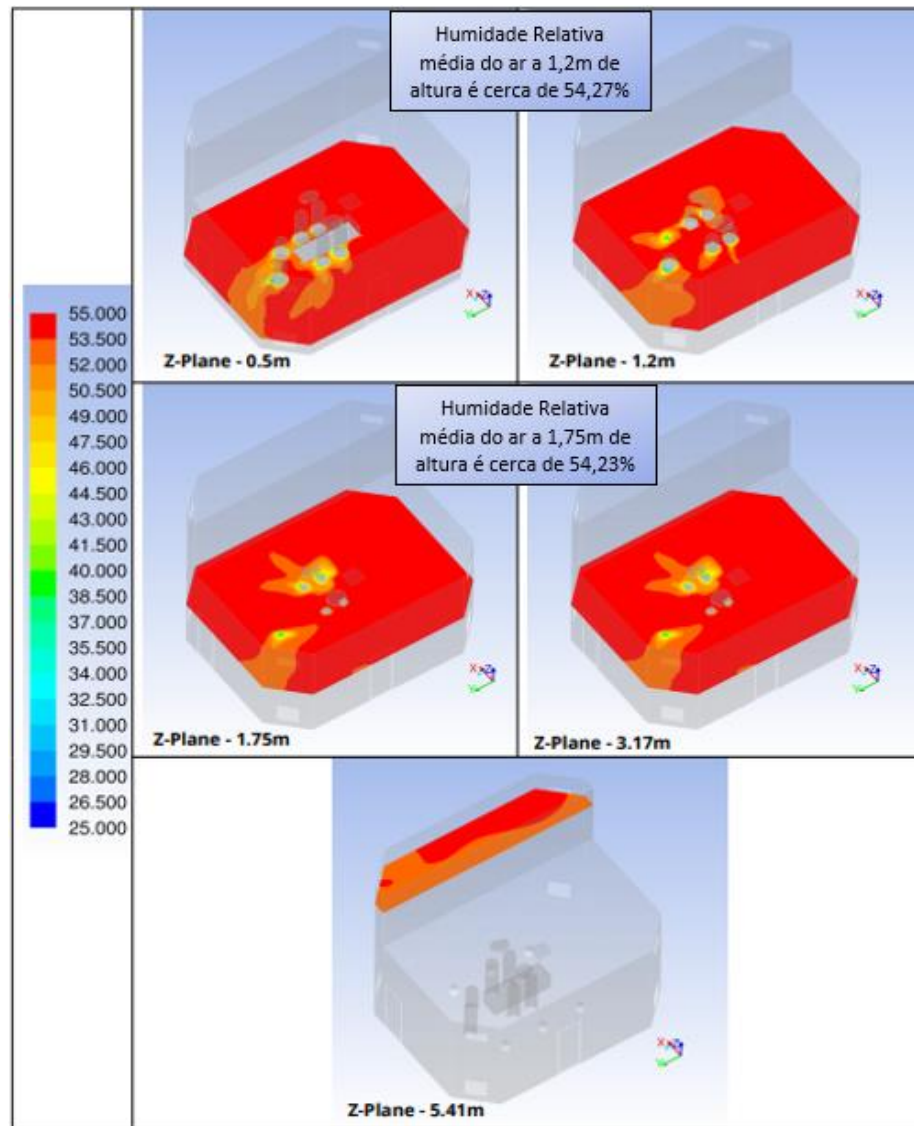


Figura 35 - Perfil da Humidade Relativa do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

A humidade relativa mantém-se aproximadamente constante ao longo de todo o bloco operatório. Para as cotas de 1,2m e 1,75m, foram obtidas humidades relativas médias do ar de 54,3%.

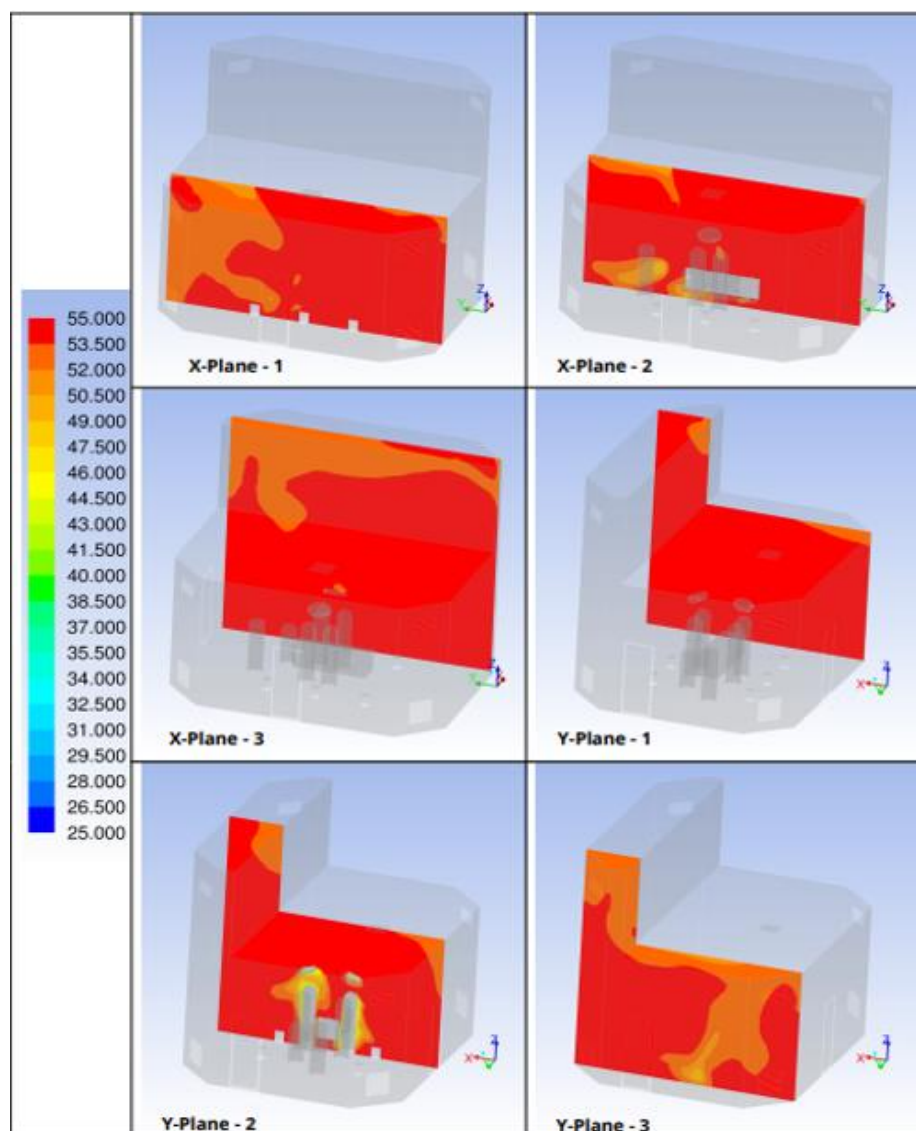


Figura 36 - Perfil da Humidade Relativa do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

Através da análise do plano Y dos perfis de humidade relativa verifica-se que a zona das luzes cirúrgicas representa uma das zonas do bloco operatório em que o valor da humidade relativa é mais baixo.

4.5.2 Resultados CFD dos perfis de Velocidade, Temperatura e Humidade Relativa para a entrada de partículas internas

4.5.2.1 Perfis de Velocidade nos planos X, Y e Z para penetração de partículas internas

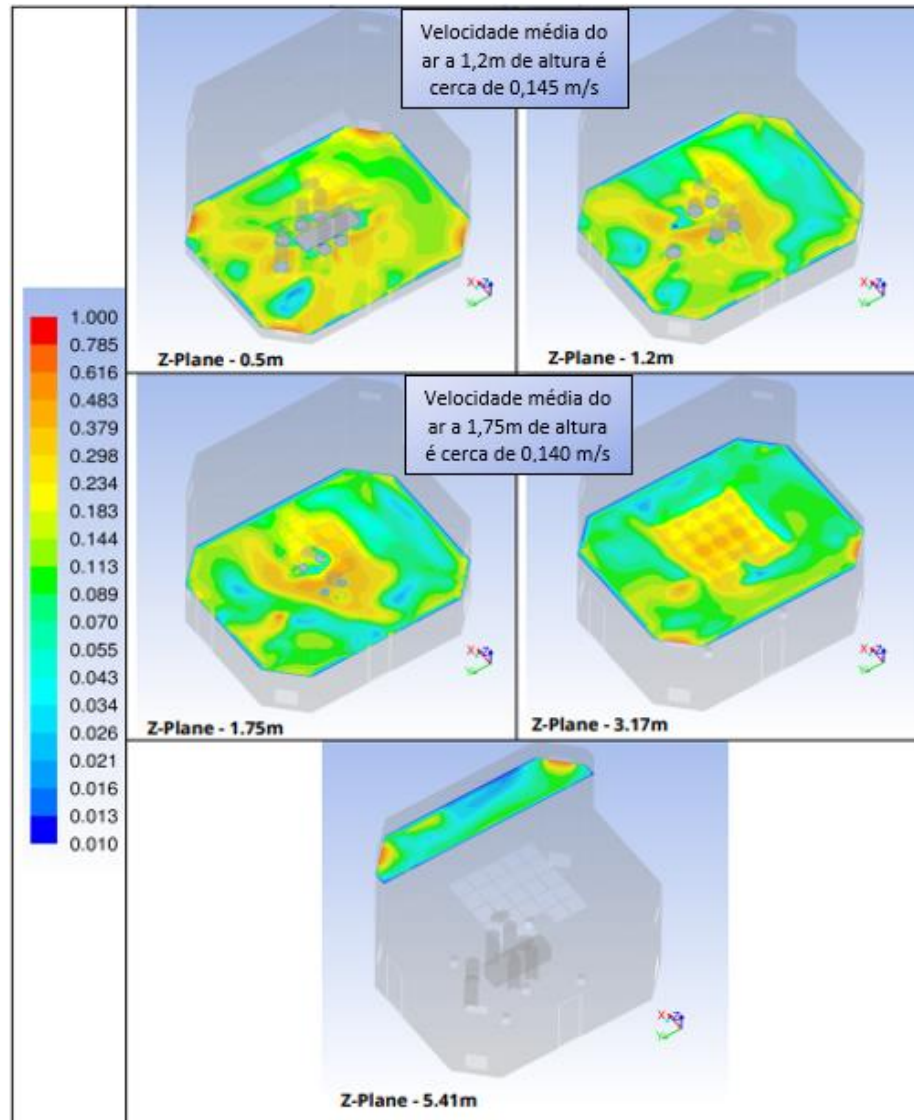


Figura 37 - Perfil da Velocidade do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

Para as cotas de 1,2m e 1,75m, foram obtidas velocidades médias do escoamento do ar de 0,145 m/s e 0,140 m/s, respetivamente. A velocidade do ar de insuflação num bloco operatório deve rondar em média os 0,25 m/s e os 0,35 m/s (NF S 90-351, 2013). Tratando-se de um teto filtrante de fluxo diferencial garantimos como se pode constatar através da escala de cores das Figuras 37 e 38, que as velocidades de escoamento do ar dentro da área protegida, estão dentro destes limites.

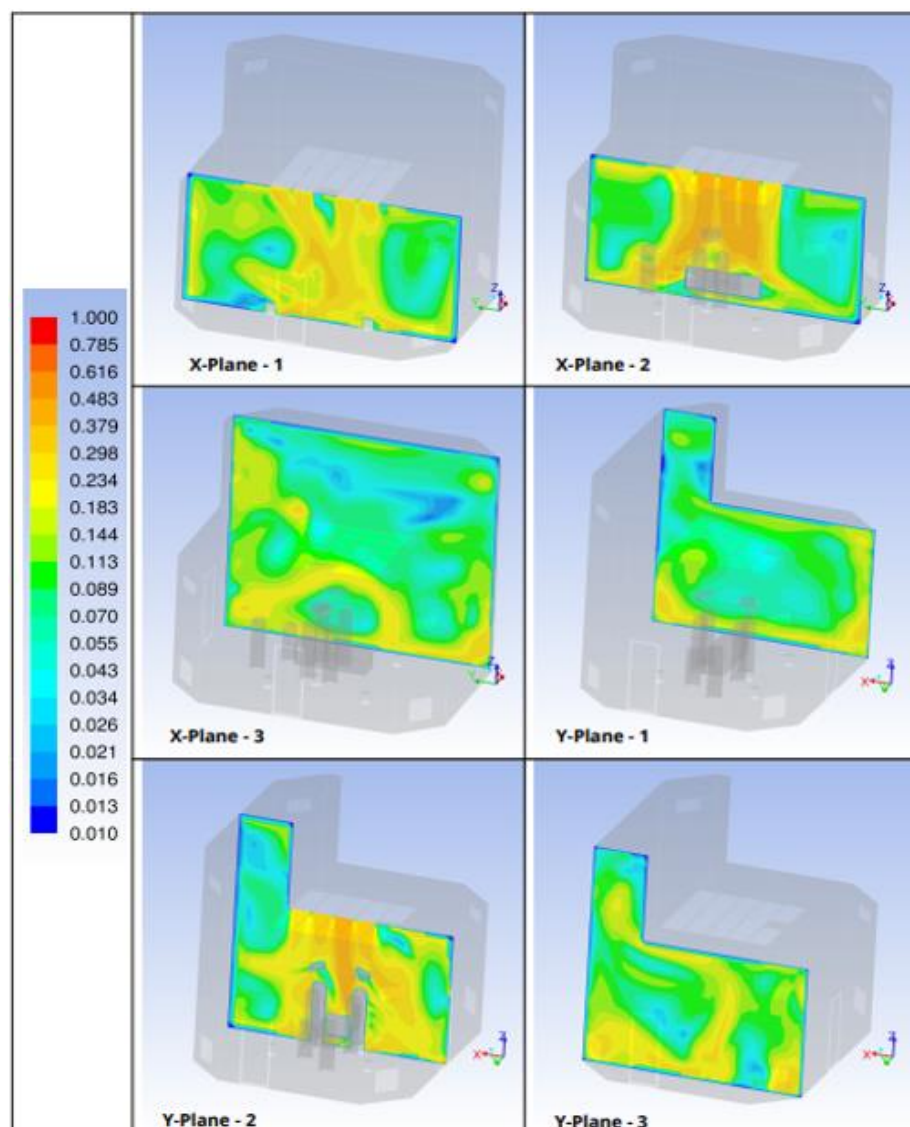


Figura 38- Perfil da Velocidade do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

Uma vez mais, verifica-se que o ar à saída do teto filtrante é das zonas do bloco operatório em que o ar apresenta uma maior velocidade.

4.5.2.2 Perfis de Temperatura nos planos X, Y e Z para penetração de partículas internas

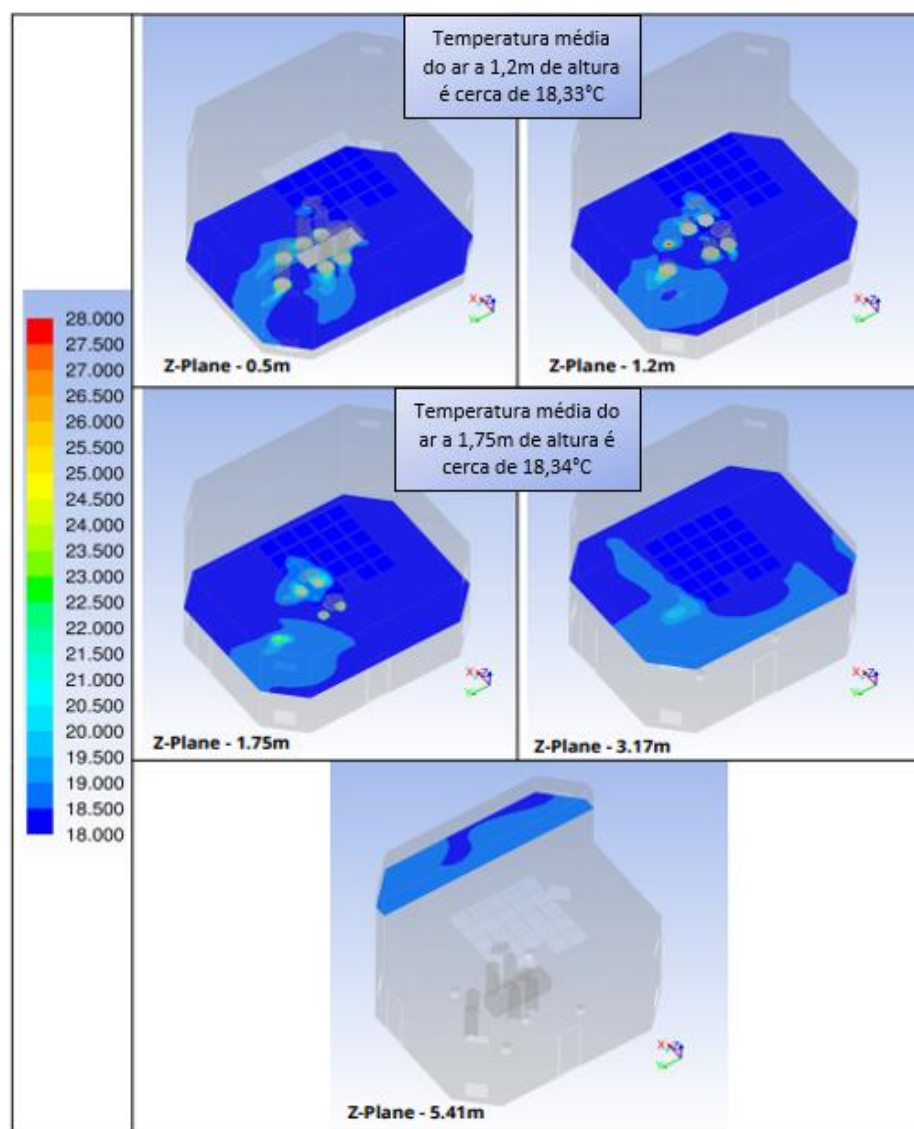


Figura 39 - Perfil da Temperatura do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

Para as cotas de 1,2m e 1,75m, foram obtidas temperaturas médias do ar de 18,3°C. O valor de temperatura obtido encontra-se abaixo do intervalo de temperatura solicitado pelo projetista (20°C a 25°C). Para cumprir com o intervalo de temperatura pedido, seria necessário aumentar a temperatura do ar de insuflação, a partir do aumento da capacidade da bateria de aquecimento.

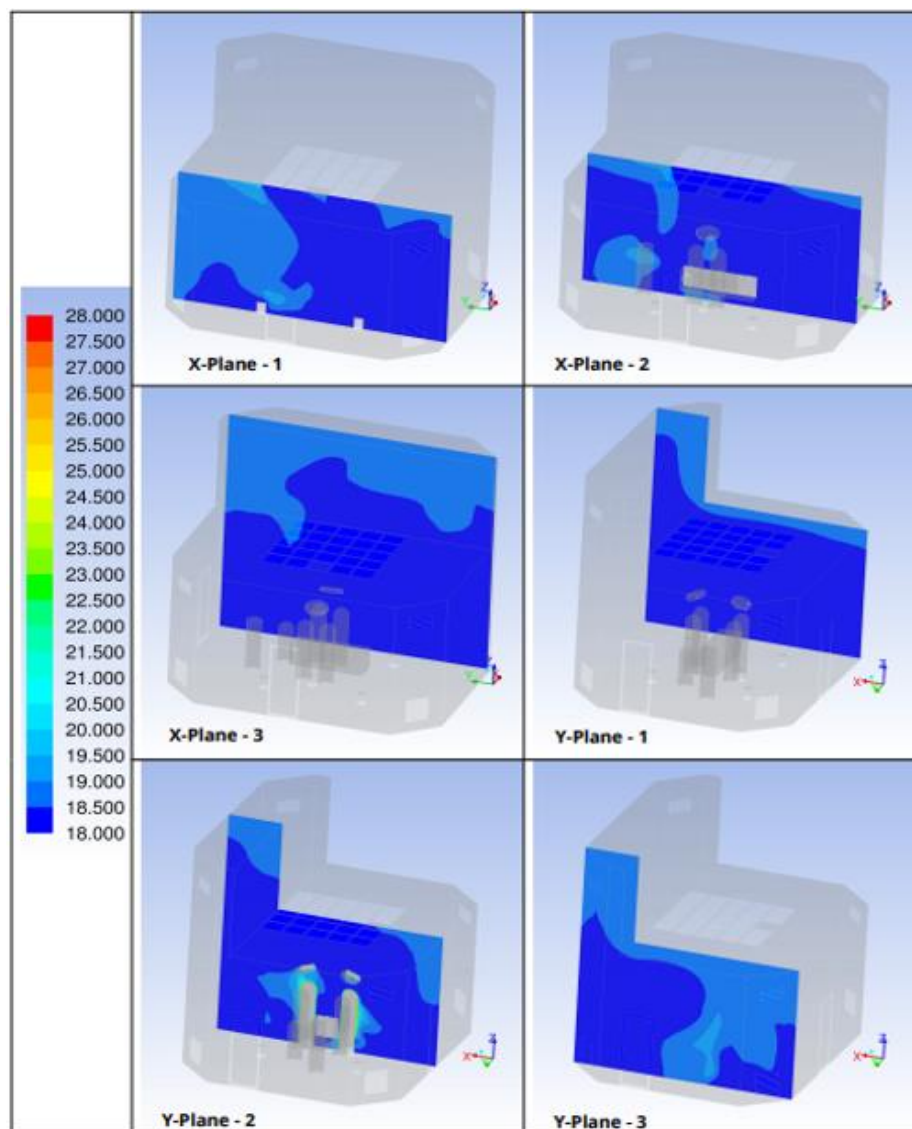


Figura 40 - Perfil da Temperatura do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

Através da análise do plano Y, verifica-se que a zona dos “dummies” e das luzes cirúrgicas apresenta uma temperatura mais elevada comparando com as restantes áreas do bloco operatório.

4.5.2.3 Perfis de Humidade Relativa nos planos X, Y e Z para penetração de partículas internas

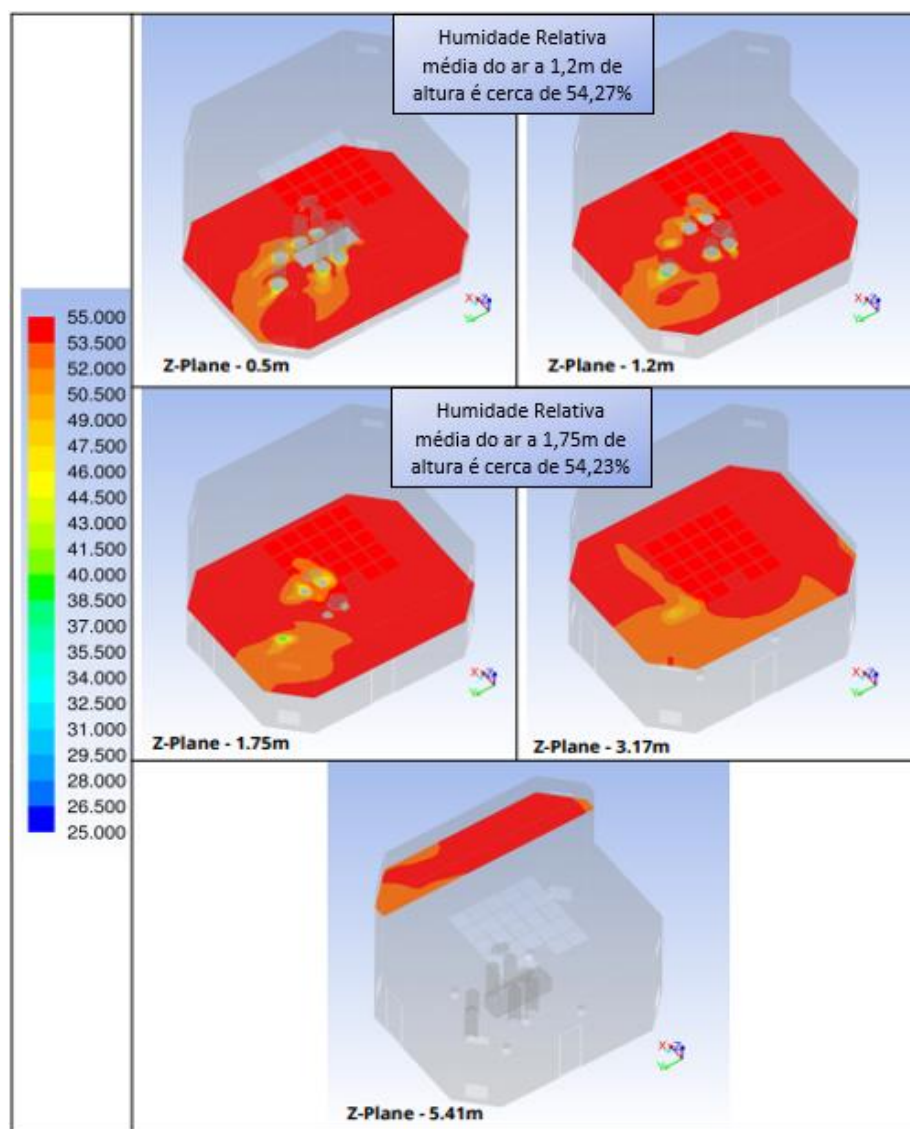


Figura 41 - Perfil da Humidade Relativa do ar em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

Para as cotas de 1,2m e 1,75m, foram novamente obtidas humidades relativas médias do ar de 54,3%. Pode-se dizer que o valor da humidade relativa do bloco operatório é adequado, uma vez que se encontra dentro do intervalo definido pelo projetista (40% a 60%).

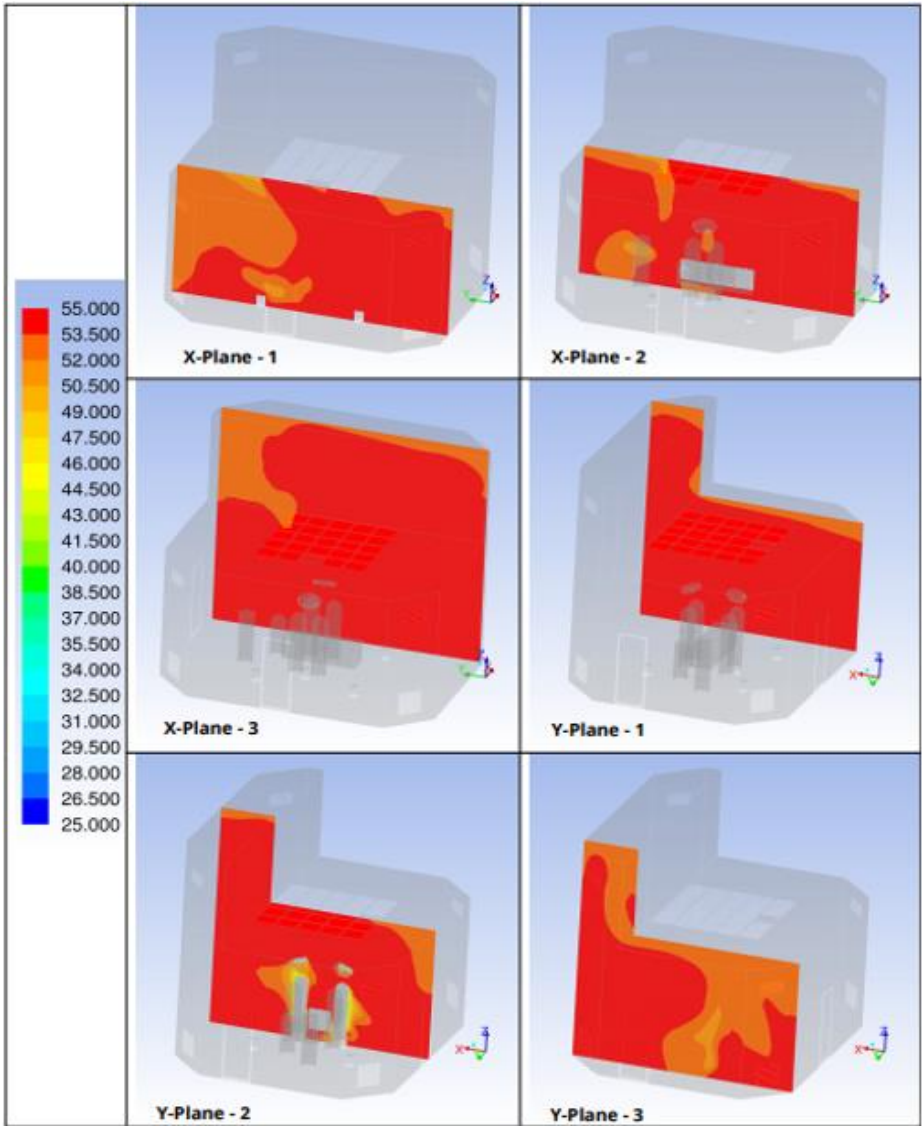


Figura 42 - Perfil da Humidade Relativa do ar em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

4.5.3 Resultados CFD dos perfis de Concentração de Partículas para a entrada de partículas externas

4.5.3.1 Perfis de Concentração de Partículas (tamanho $0,3\mu\text{m}$) nos planos X, Y e Z para penetração de partículas externas

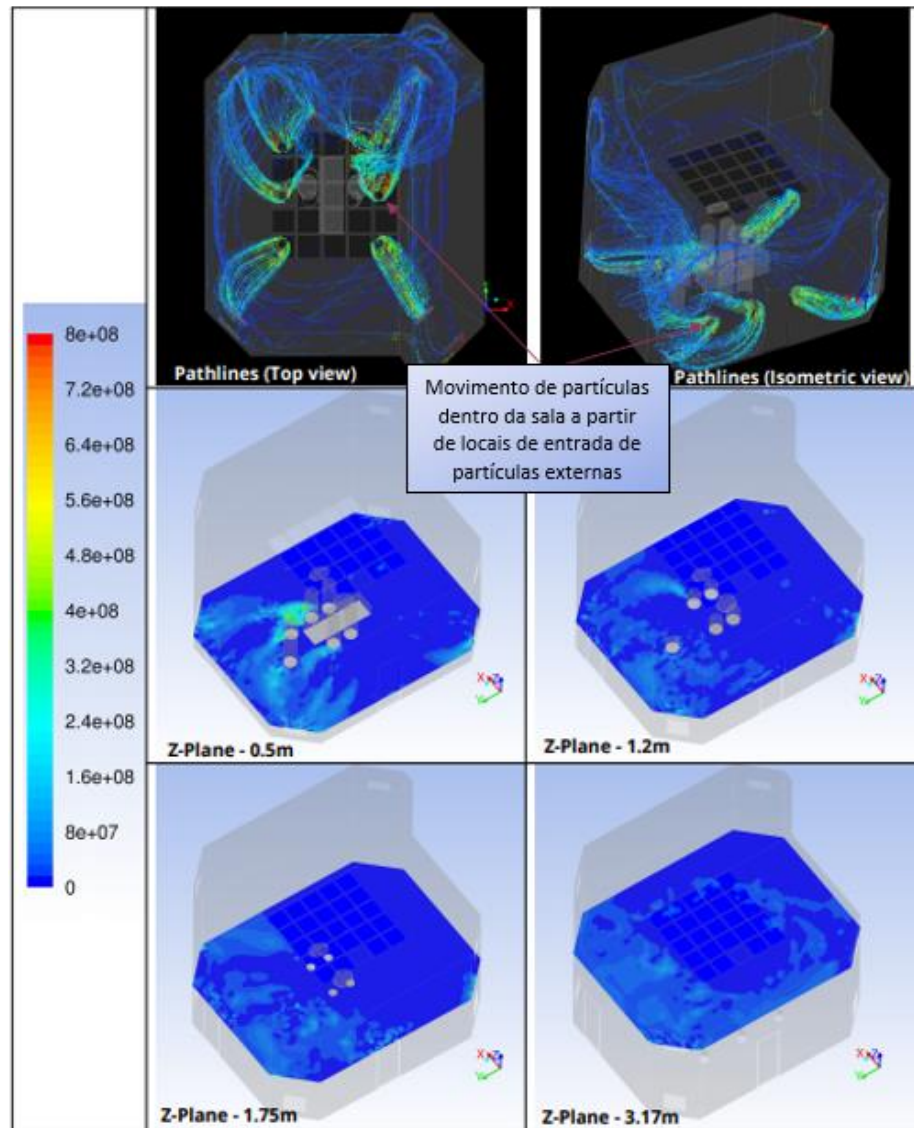


Figura 43 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $0,3\mu\text{m}$ em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

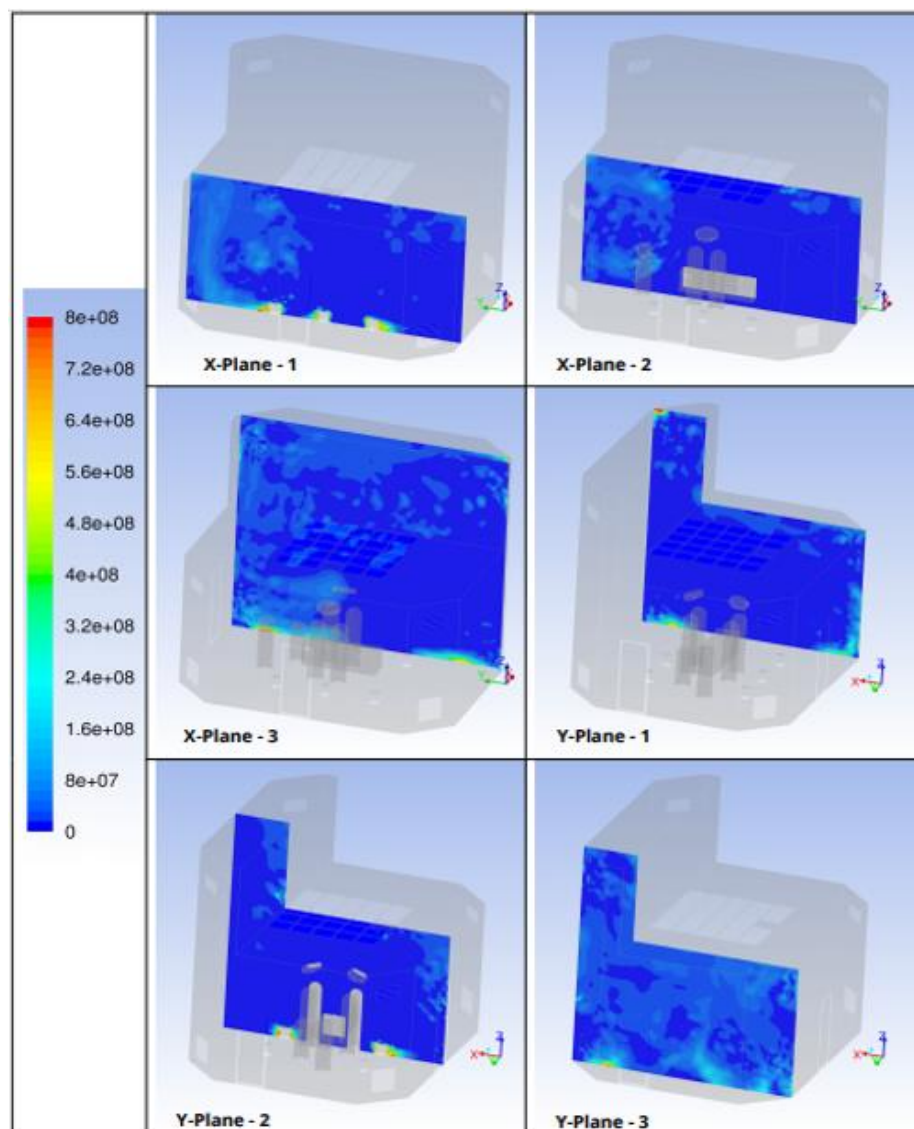


Figura 44 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $0,3\mu\text{m}$ em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

4.5.3.2 Perfis de Concentração de Partículas (tamanho $0,5\mu\text{m}$) nos planos X, Y e Z para penetração de partículas externas

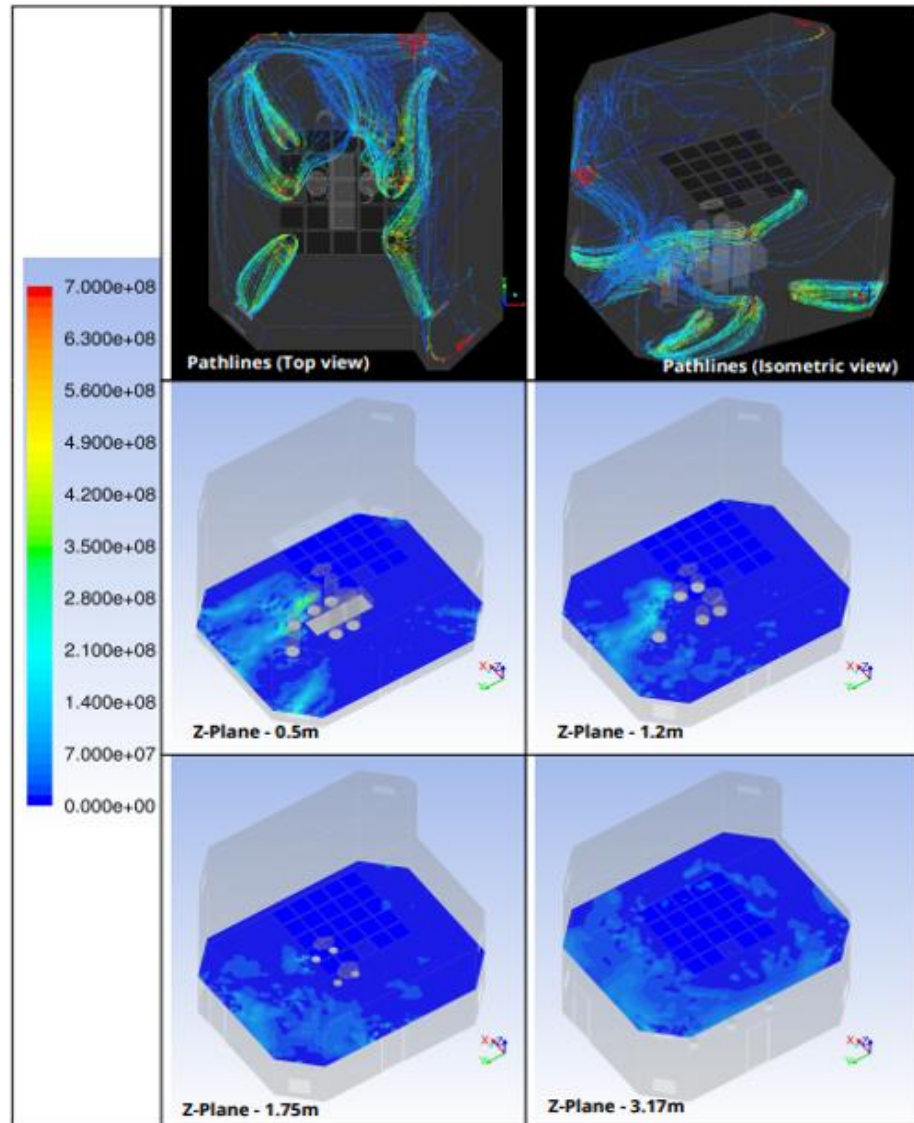


Figura 45 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $0,5\mu\text{m}$ em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

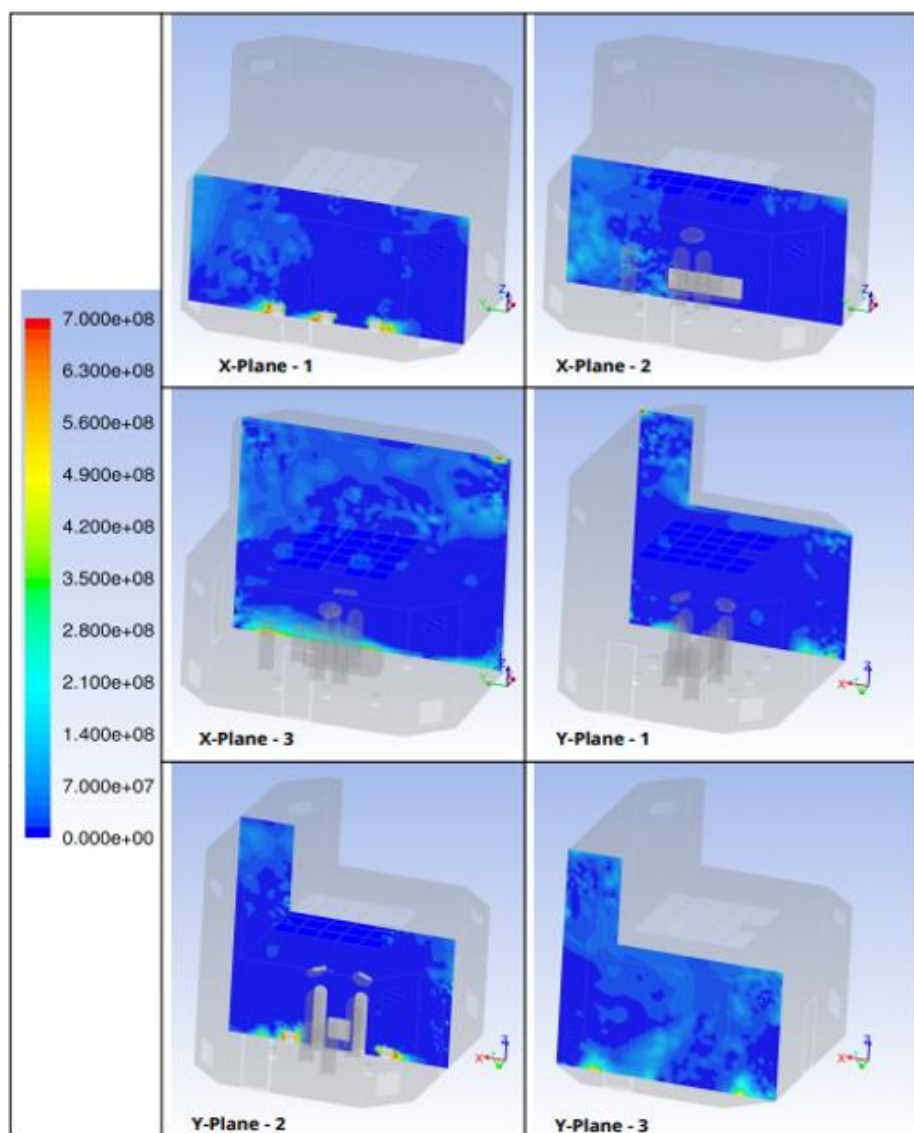


Figura 46 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $0,5\mu\text{m}$ em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

4.5.3.3 Perfis de Concentração de Partículas (tamanho $1\mu\text{m}$) nos planos X, Y e Z para penetração de partículas externas

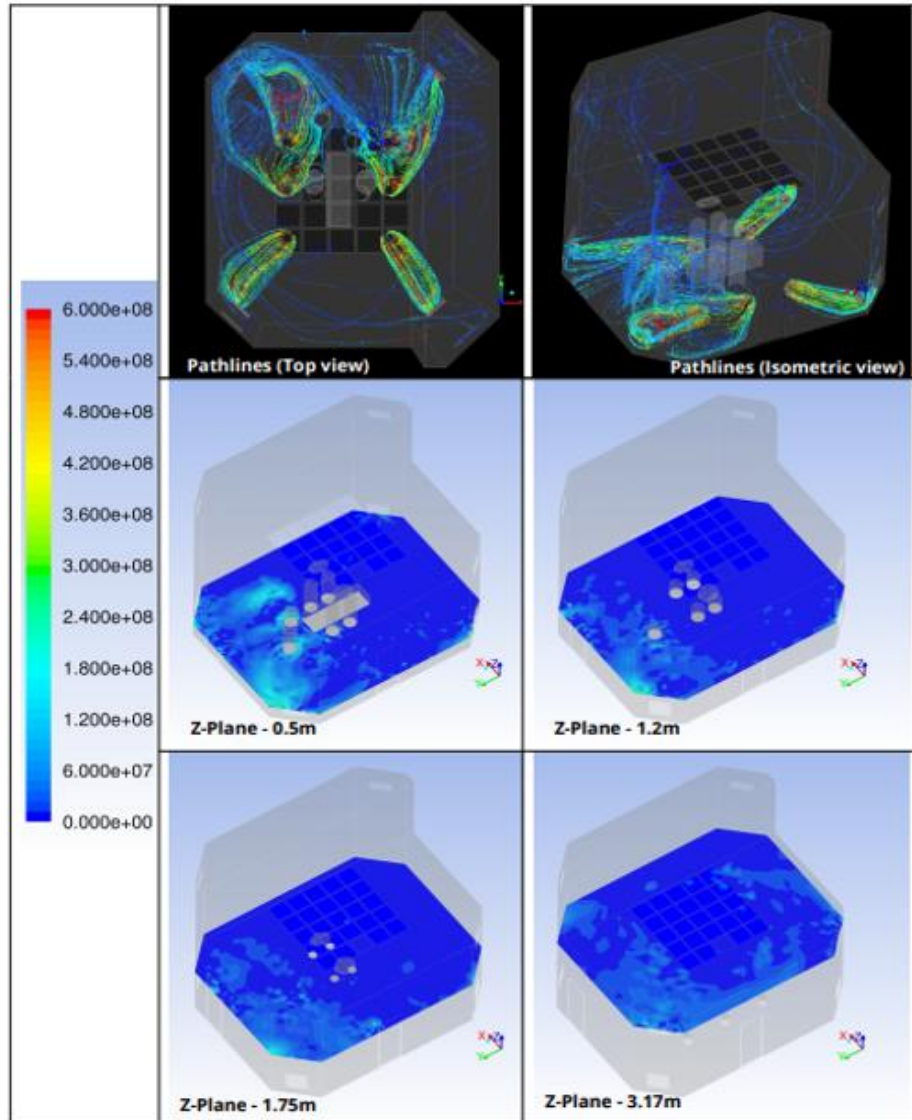


Figura 47 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $1\mu\text{m}$ em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

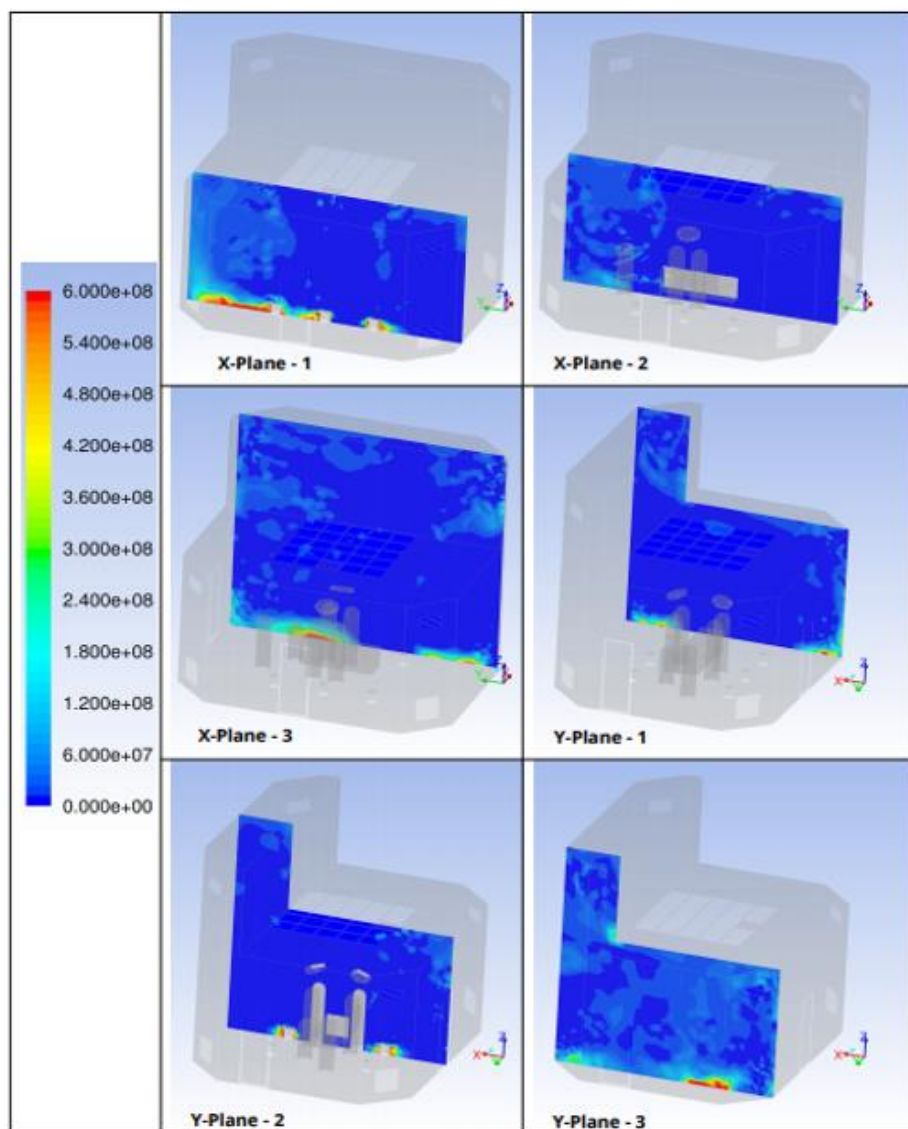


Figura 48 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $1\mu\text{m}$ em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

As Figuras 43 a 48 ilustram o efeito de proteção contra a entrada de carga contaminante de tamanhos $0,3\mu\text{m}$, $0,5\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$, provenientes do exterior, tal como a norma DIN 1946-4:2015 demonstra (Figura 29) (DIN 1946-4, 2015).

Pode afirmar-se que existe efetivamente um efeito protetor a partir da análise das figuras anteriores, uma vez que as partículas ao sair dos aerossóis não circulam em direção à marquesa, mas sim para os cantos inferiores do bloco operatório onde se localizam as grelhas de retorno.

4.5.4 Resultados CFD dos perfis de Concentração de Partículas para a entrada de partículas internas

4.5.4.1 Perfis de Concentração de Partículas (tamanho $0,3\mu\text{m}$) nos planos X, Y e Z para penetração de partículas internas

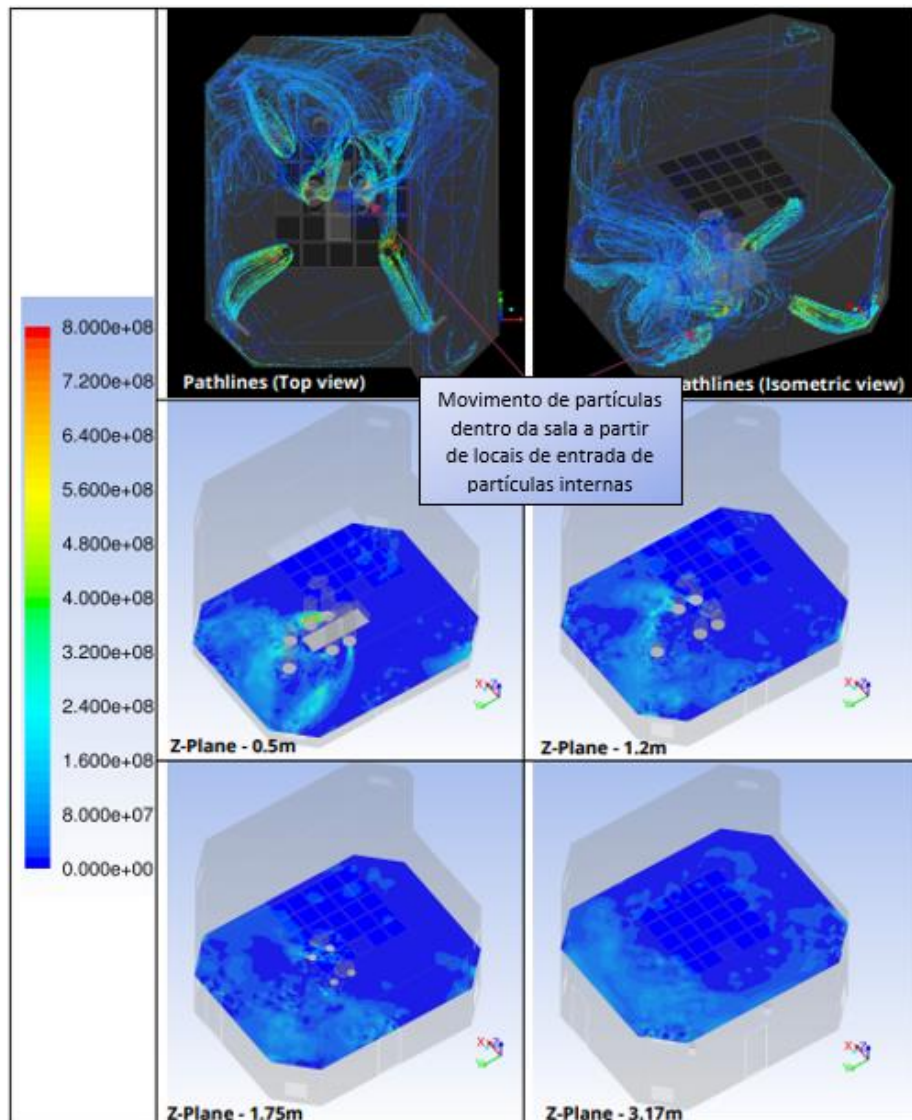


Figura 49 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $0,3\mu\text{m}$ em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

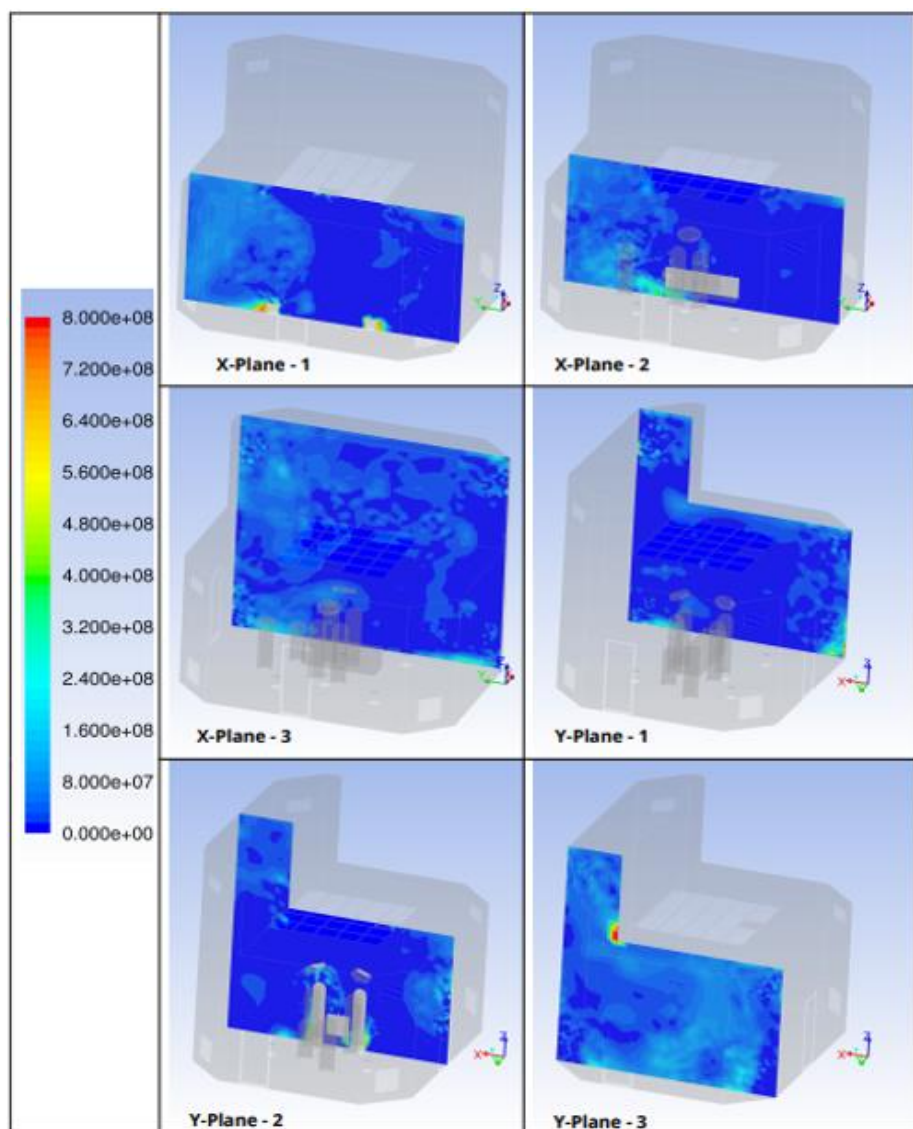


Figura 50 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $0,3\mu\text{m}$ em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

4.5.4.2 Perfis de Concentração de Partículas (tamanho $0,5\mu\text{m}$) nos planos X, Y e Z para penetração de partículas internas

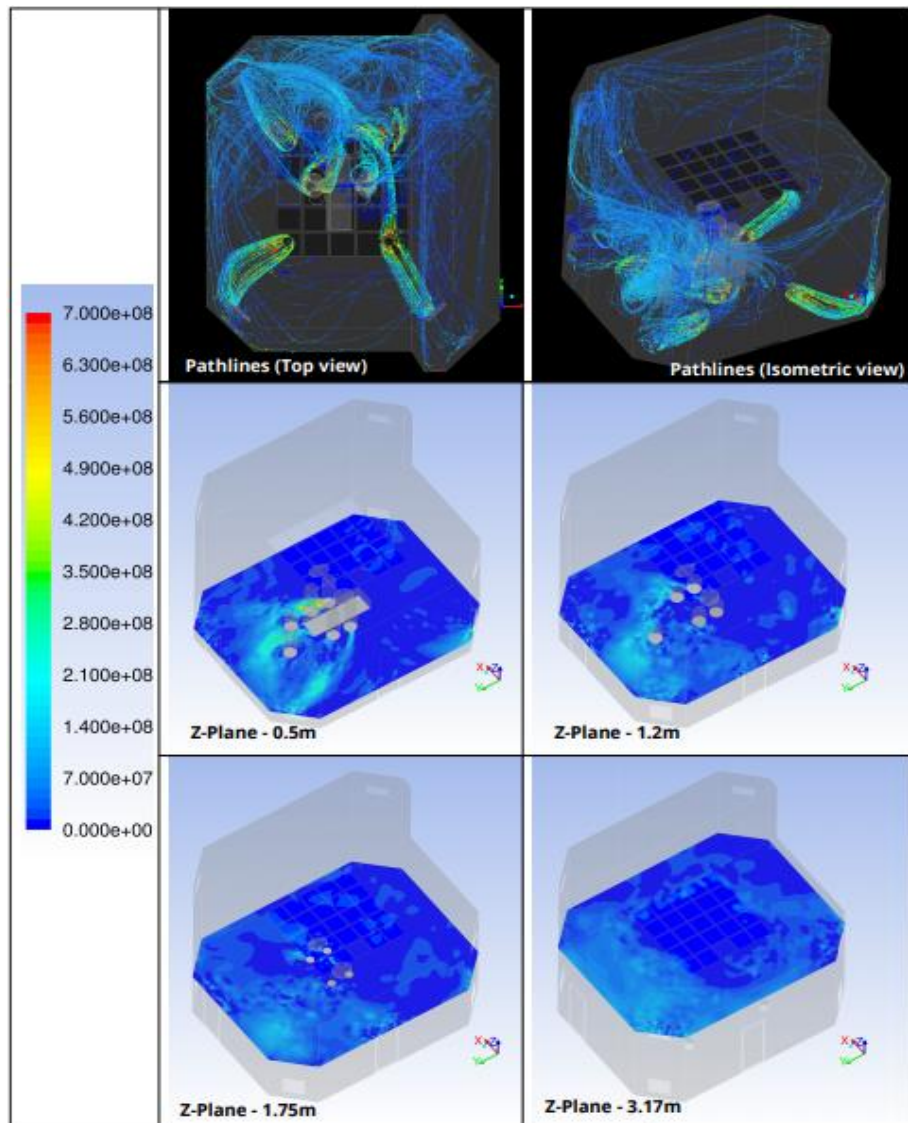


Figura 51 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $0,5\mu\text{m}$ em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

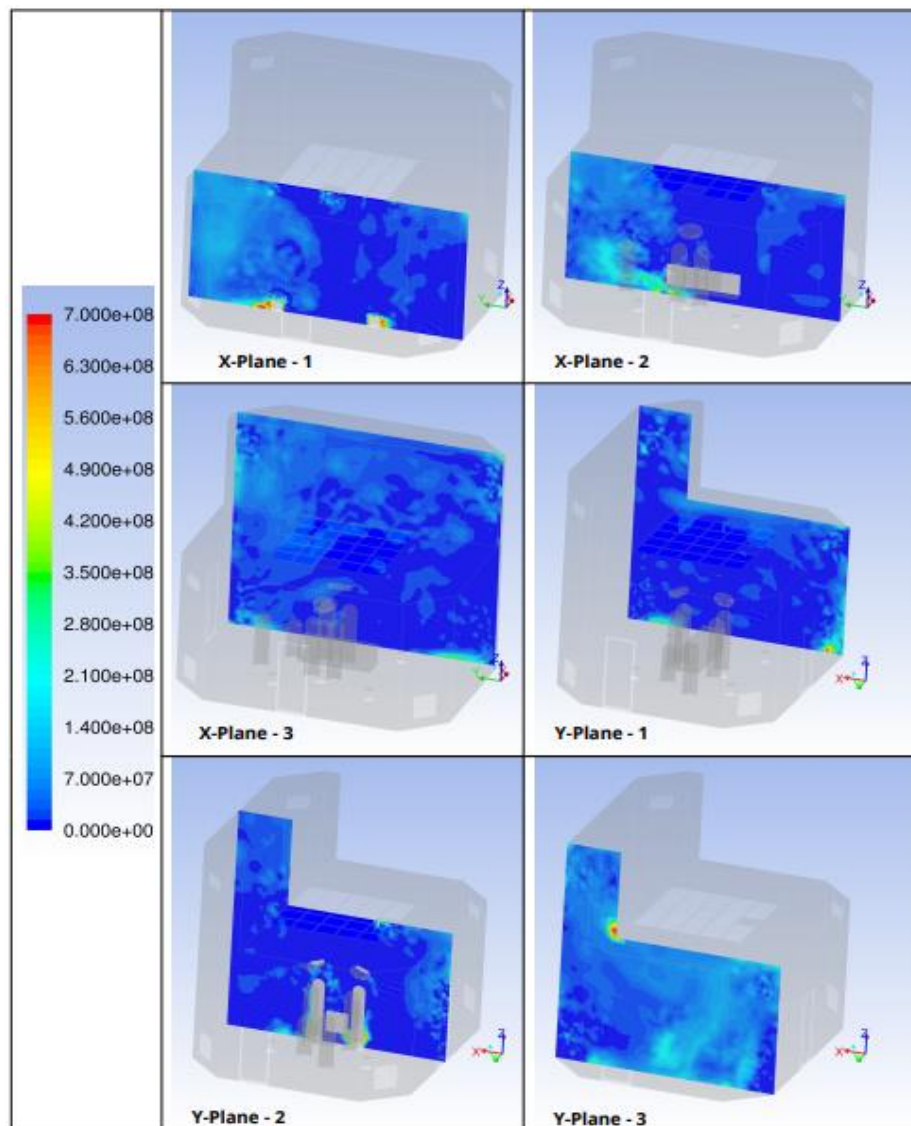


Figura 52 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $0,5\mu\text{m}$ em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

4.5.4.3 Perfis de Concentração de Partículas (tamanho $1\mu\text{m}$) nos planos X, Y e Z para penetração de partículas internas

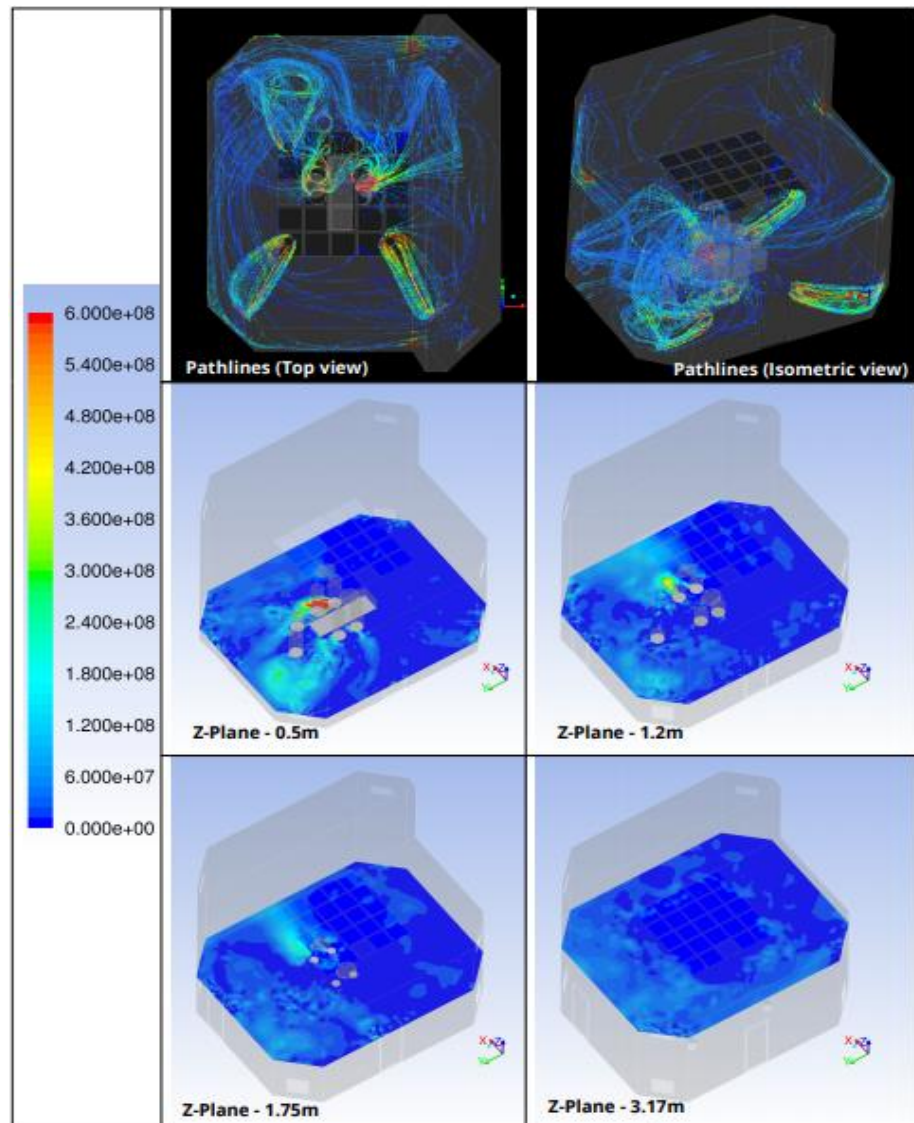


Figura 53 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho $0.5\mu\text{m}$ em função da altura do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Plano Z).

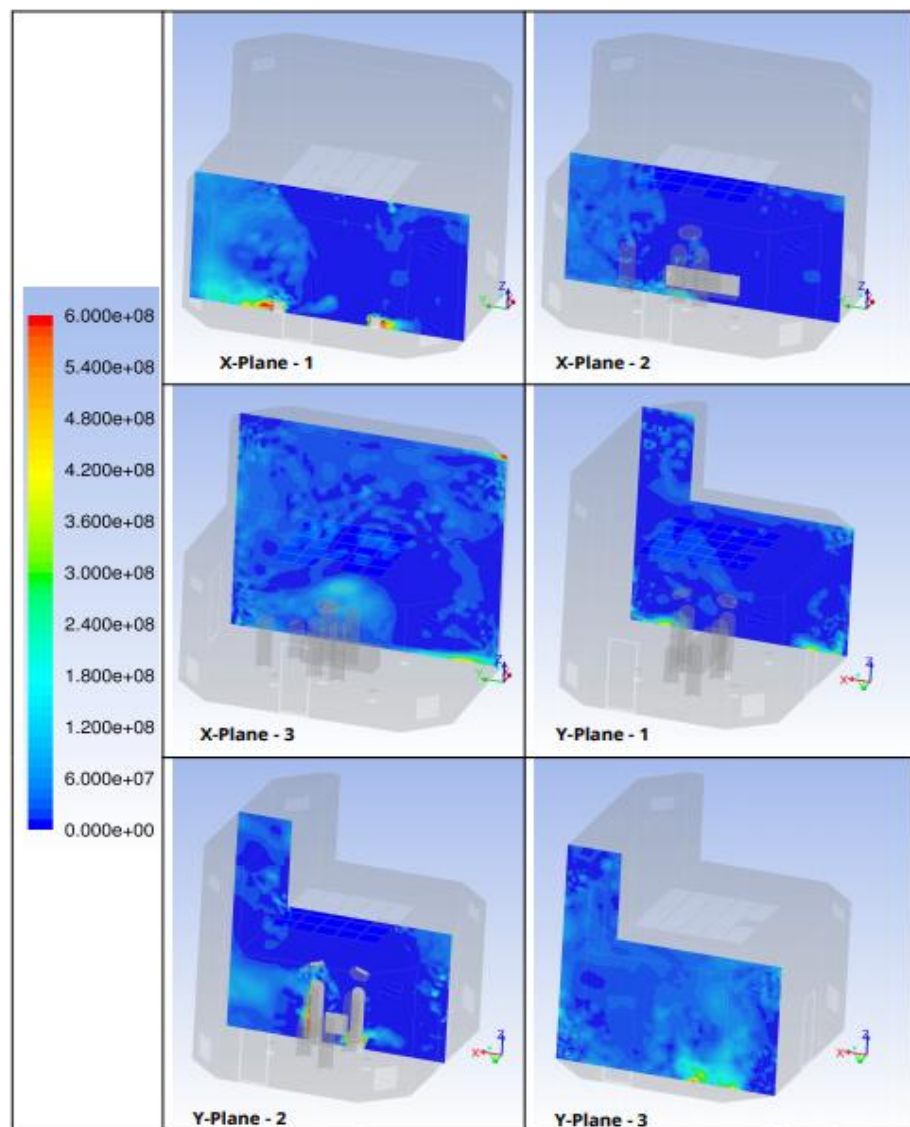


Figura 54 - Perfil da Concentração de Partículas de tamanho 1µm em função de diferentes secções transversais do Bloco Operatório do Hospital CUF Tejo, Lisboa (Planos X e Y).

As Figuras 49 a 54 ilustram o efeito de proteção contra a entrada de carga contaminante de tamanhos 0,3µm, 0,5µm e 1µm, provenientes do interior, tal como a norma DIN 1946-4:2015 demonstra (Figura 28) (DIN 1946-4, 2015).

As cargas contaminantes que circulam de volta da mesa cirúrgica, mais propriamente na zona do tórax do paciente, correspondem às partículas geradas durante a cirurgia pelo pessoal médico e pelo próprio paciente.

4.6 Conclusões da análise CFD

A análise CFD foi realizada para a Sala de Operações do Hospital CUF Tejo Lisboa, com o objetivo de verificar se o sistema de tratamento de ar foi corretamente dimensionado e ainda verificar se o bloco operatório atinge ou não a classe de limpeza ISO 5 com base na norma DIN 1946-4:2015 (DIN 1946-4, 2015).

A partir da análise dos perfis de velocidade, temperatura e humidade relativa, é possível retirar algumas conclusões sobre as condições do ar no interior da sala cirúrgica. Relativamente aos perfis de velocidade, verifica-se que não existem regiões de baixa velocidade na mesa cirúrgica nem na área protegida abaixo do teto filtrante. Apenas é possível verificar uma baixa velocidade abaixo das luzes cirúrgicas, o que era previsível devido ao fluxo de ar descendente que acaba por atingir as duas luzes. Através da análise das Figuras 31, 32, 37 e 38 pode concluir-se que as zonas em que existe uma maior velocidade de partículas são os cantos inferiores e superiores do bloco, onde se encontram as grelhas de retorno de ar, e ainda a zona à saída do teto filtrante, responsável pela insuflação do ar.

No que diz respeito aos perfis de temperatura, a análise CFD mostra que para as cotas de 1,2m e 1,75m a temperatura média é de 18,3°C. Este valor está abaixo do intervalo de temperatura pretendido pelo projetista (20°C a 25°C). Para corrigir este défice de temperatura, seria necessário aumentar a temperatura do ar de insuflação, a partir do aumento da capacidade da bateria de aquecimento. Os resultados obtidos nas Figuras 33, 34, 39 e 40 mostram que as zonas em que a temperatura é mais elevada são, como era expectável, a zona dos “dummies” que simula a transferência de calor por parte do pessoal médico e do equipamento cirúrgico e a zona das luzes cirúrgicas.

Relativamente à humidade relativa, a análise CFD apresenta o valor de 54,3% para as cotas de 1,2m e 1,75m. Este valor é adequado, uma vez que se encontra no intervalo que o projetista tinha definido para este parâmetro no interior do bloco operatório (40% a 60%). Uma das zonas do bloco operatório onde esta propriedade apresenta valores mais baixos corresponde à zona mais próxima das luzes cirúrgicas pelo facto de ocorrer libertação de calor sensível para o ar envolvente, levando a uma diminuição da humidade relativa. O mesmo não se verifica na zona dos “dummies” onde, com o objetivo de simular o efeito da respiração do paciente e pessoal médico, ocorre libertação de calor latente provocando assim um aumento da humidade relativa.

4.7 Resultados do Grau de Proteção

Tal como foi abordado anteriormente, o grau de proteção é um parâmetro de grande importância, visto que, a partir do seu cálculo é possível ter a noção do nível de proteção do bloco operatório contra a entrada de cargas de contaminação externas e internas.

Os valores de Grau de Proteção (SG) foram medidos para vários cenários a partir de três pontos de medição (M1, M2 e M3), usando a equação (6) de acordo com a norma DIN 1946-4:2015 (DIN 1946-4, 2015):

$$SG_x = -\log(C_x / C_{Ref}) \quad (6)$$

Onde:

C_x – Concentração média de partículas no ponto de medição X [P/m^3]

C_{Ref} – Concentração de partículas de referência [$35,3 \times 10^6 P/m^3$]

Tabela 12 – Determinação do Efeito Protetor.

Tipo de carga de contaminação	Localização da sonda	Concentração [P/m^3]			Grau de Proteção (SG)			Efeito Protetor
		0.3 μm	0.5 μm	1 μm	0.3 μm	0.5 μm	1 μm	
Exterior	M1 (Cabeça)	1270	197	21	4,44	5,25	6,23	4,44
	M2 (Toráx)	-	-	-	-	-	-	
	M3 (Pés)	-	-	-	-	-	-	
Interior	M1 (Cabeça)	58478	15186	2863	2,78	3,37	4,09	2,60
	M2 (Toráx)	89231	22430	320	2,60	3,20	5,04	
	M3 (Pés)	-	-	-	-	-	-	

Lembrando que se trata de um bloco operatório que possui duas luzes cirúrgicas, de acordo com a norma DIN 1946-4:2015, para alcançar uma classe ISO 5 é necessário que o Efeito Protetor seja ≥ 2 (DIN 1946-4:2015). O efeito de proteção corresponde ao valor mais baixo de todos os graus de proteção medidos, ou seja, para este bloco operatório o efeito protetor será de 2,60. Desta forma, como $2,60 \geq 2$, pode afirmar-se que a classe de limpeza ISO 5 é alcançada pela sala cirúrgica.

4.8 Resultados do Tempo de Recuperação

As análises CFD foram realizadas por 30 minutos para os três tamanhos de partículas, de modo a verificar quando tempo seria necessário para reduzir a concentração de partículas para que a classe de limpeza ISO 5 fosse alcançada pelo bloco operatório.

Tabela 13 - Tempo de recuperação em função do tamanho das partículas.

Tipo de carga de contaminação	Tempo de recuperação (min)		
	0.3µm	0.5µm	1µm
Exterior	9,5	11,5	12,5
Interior	10,5	12,5	15

De acordo com a Tabela 13, pode verificar-se que o maior tempo de recuperação obtido foi de 15 minutos e está associado à penetração de cargas de contaminação interiores de 1µm.

Segundo a norma DIN 1946-4:2015, para que uma sala de operações alcance a classe de limpeza ISO 5, é necessário que reduza a sua concentração de partículas em 99% dentro de um intervalo de tempo não superior a 25 minutos após a geração de partículas ter sido interrompida (DIN 1946-4, 2015). Como o maior tempo de recuperação obtido é inferior a 25 minutos, pode afirmar-se que o Bloco Operatório cumpre com a norma, alcançando assim a classe de limpeza ISO 5.

5. CONCLUSÃO

No âmbito da unidade curricular de Projeto/Estágio/Dissertação do Mestrado em Engenharia Mecânica do ISEC, foi possível executar, com sucesso, o projeto de um sistema de tratamento de ar para um bloco operatório na unidade de saúde CUF Tejo – Lisboa.

Através da execução do referido projeto, proposto pela empresa Systemair, foi possível perceber a importância e a necessidade de dimensionar corretamente um sistema de tratamento de ar para um bloco operatório. O correto dimensionamento não só contribui para o sucesso das intervenções cirúrgicas, através do elevado grau de limpeza e higiene que proporciona ao ar envolvente, como também contribui para um ambiente de conforto para os pacientes e pessoal médico. Adicionalmente, demonstrou-se que através do dimensionamento proposto, o bloco operatório atingiu uma classe de limpeza ISO 5, tal como havia sido solicitado pelo projetista.

De salientar, finalmente, que a realização deste projeto contribuiu para a aquisição e aprofundamento de conhecimentos por parte do candidato na área do AVAC, em particular em contexto hospitalar, promovendo ainda a aproximação do candidato ao mercado de trabalho, o qual se encontra cada vez mais competitivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACSS. (2014). Especificações técnicas para Instalações de AVAC. Unidade de Instalações e Equipamentos. ET 06/2008. V.2014.
- AESOP. (2017). Práticas Recomendadas para Bloco Operatório. Prevenção e controlo da hipotermia perioperatória inadvertida.
- Ansys (2021). Ansys Fluent software, v2021 R2, Ansys, Inc., Canonsburg, Pennsylvania.
- ASHRAE. (2002). Handbook of Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE. (2012). ASHRAE HANDBOOK: Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment.
- ASHRAE. (2016). Handbook – HVAC Systems and Equipment (SI).
- Decreto Regulamentar n.º 63/64 (02/11/1994). Anexo II. Instalações e equipamentos mínimos a considerar na urgência, para os efeitos do artigo 14º.
- Decreto Regulamentar n.º 63/64 (02/11/1994). Anexo III. Instalações e equipamentos mínimos a considerar na urgência, para os efeitos do artigo 15º.
- Decreto Regulamentar n.º 63/64 (02/11/1994). Anexo VI. Requisitos mínimos das unidades de ar condicionado e condições ambientais a considerar, para os efeitos do nº2 do artigo 25º.
- Decreto Regulamentar nº14. (2020). COVID-19. Prevenção e Controlo de Infecção por SARS-COV-2: Blocos Operatórios e Procedimentos Cirúrgicos.
- DGS. (2015). Avaliação Da Situação Nacional Dos Bloco Operatórios. Grupo de Trabalho criado pelo Despacho Nº 4321/2013 de Sua Excelência o Secretário de Estado Adjunto do Ministro da Saúde, publicado em Diário da República Nº 59, 2ª Série, de 25 de Março de 2013.
- DIN 1946-4. (2015). Ventilation and air conditioning – Part 4: VAC systems in buildings and rooms used in the health care sector.
- EN 1822-1. (2019). High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) – Part 1: Classification, performance testing, marking.
- EUROVENT 4/23. (2017). Selection of EN ISO 16890 Rated Air Filter Classes For General Ventilation Applications. First Edition (Update 1).
- ISO 14644-1. (2015). Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air Cleanliness by particle concentration. Second Edition 2015-12-15.

ISO 14644-3. (2019). Cleanrooms and associated controlled environments – Part 3: Test methods.

ISO 14644-4. (2001). Cleanrooms and associated controlled environments – Part 4: Design, construction and start-up. First edition 2001-04-01.

ISO 16890-1. (2016). Air filters for general ventilation – Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM). First edition 2016-12-01.

Marcelo Luiz Pereira. Arlindo Tribess. (2004). A review of air distribution patterns in surgery rooms under infection control focus. Proceedings of ENCIT 2004 – ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 29 – Dec. 03, 2004, Paper CIT04-0573.

NASA. (2021). <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>. National Aeronautics And Space Administration. Navier-Stokes Equations (página internet oficial).

NF S 90-351. (2013). Établissements de santé – Zones à environnement maîtrisé – Exigences relatives à la maîtrise de la contamination aéroportée. Version de 2013-04-F.

SagiCofim. Comfort Filtration Engineering. Ecoefficiency for Indoor Air Quality. Ceiling filtration system for operating theatres.

SystemairCAD 2.0 Geniox-2/C2021-09.17.G3.

Zhang, John. (2004). ASHRAE Journal. Understanding Pharmaceutical Cleanroom Design.

ANEXO I

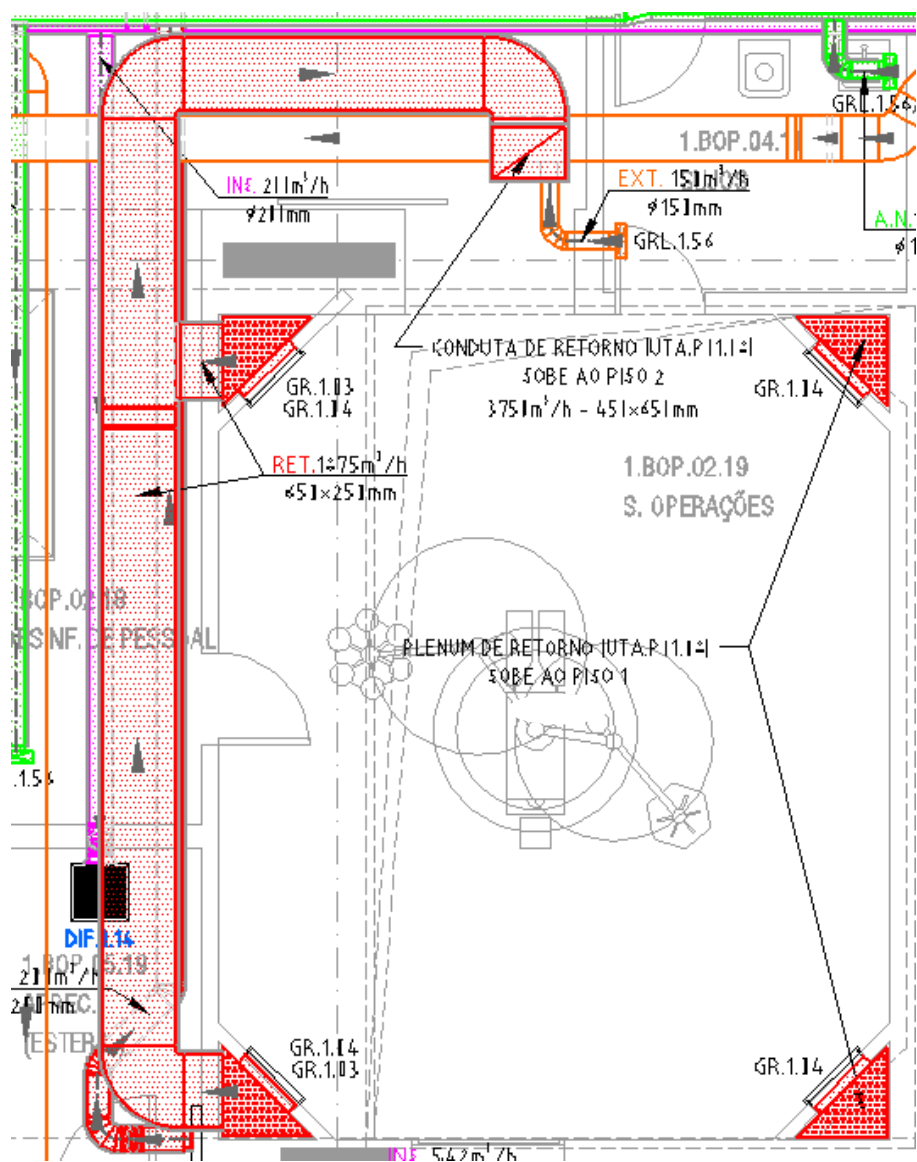


Figura 55 - Esquema de circulação de ar com recurso a condutas (Piso 0).

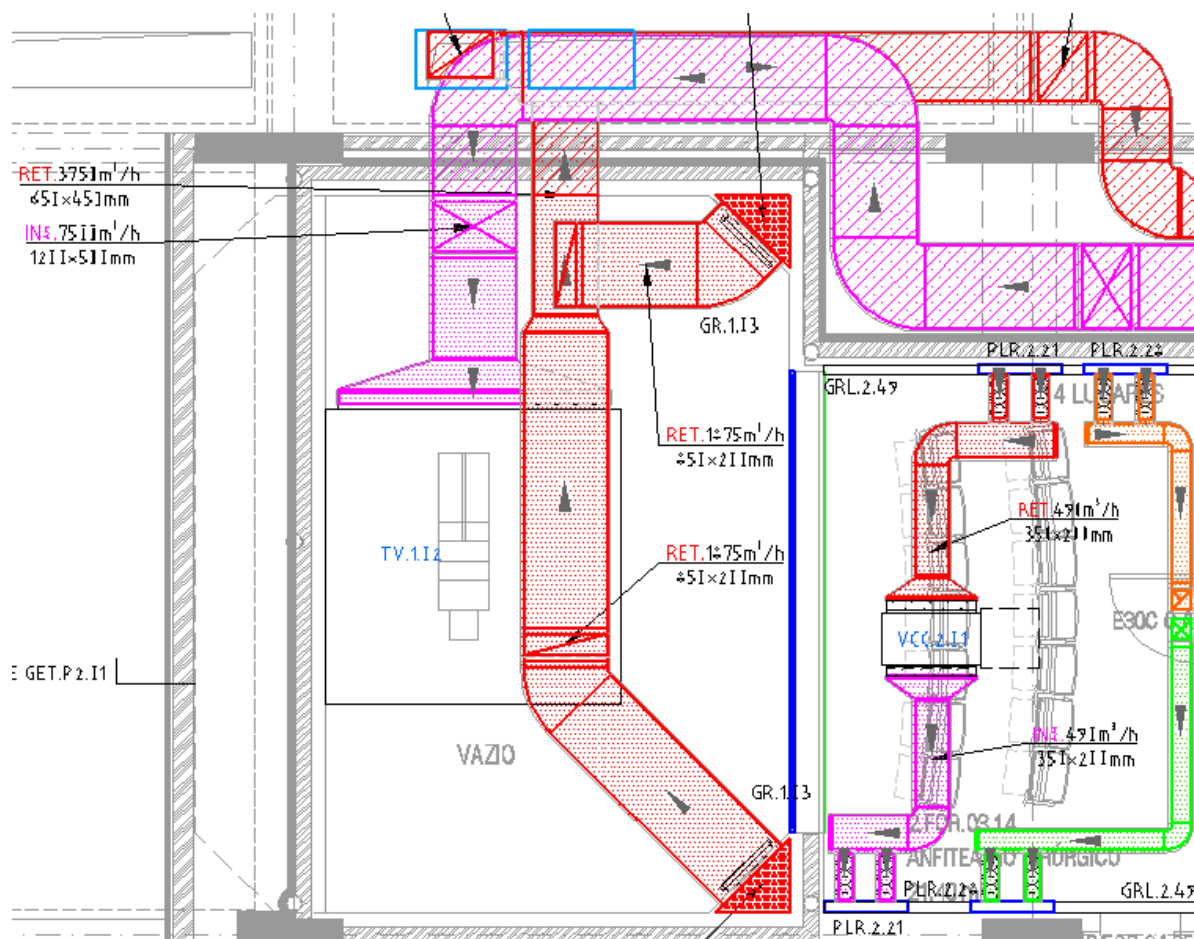


Figura 56 - Esquema de circulação de ar com recurso a condutas (Piso 1).

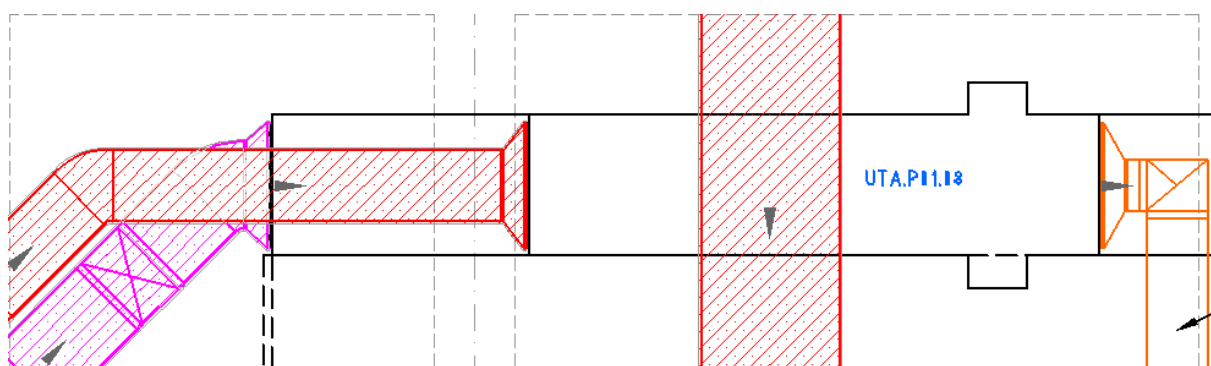


Figura 57 - Esquema de circulação de ar com recurso a condutas (Área técnica Piso 1).

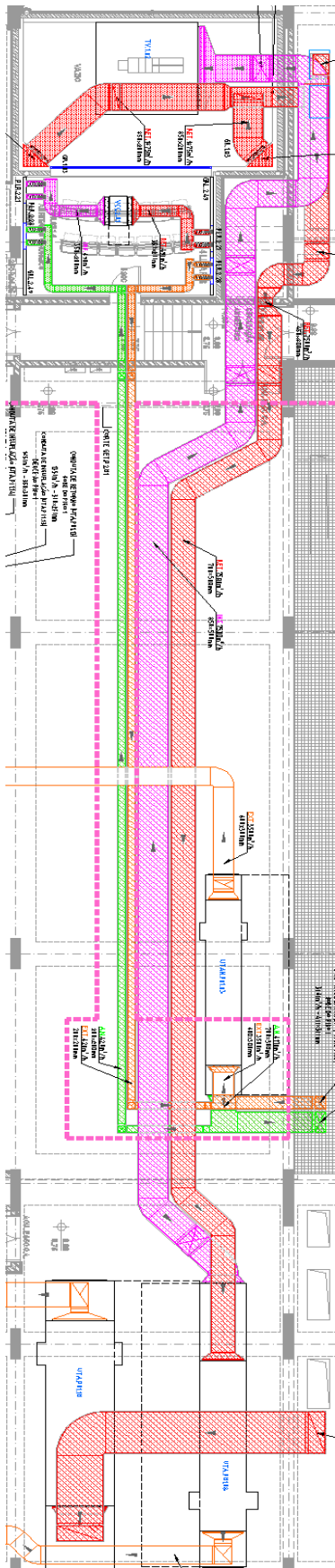


Figura 58 – Esquema completo de circulação de ar com recurso a condutas (Piso 1).

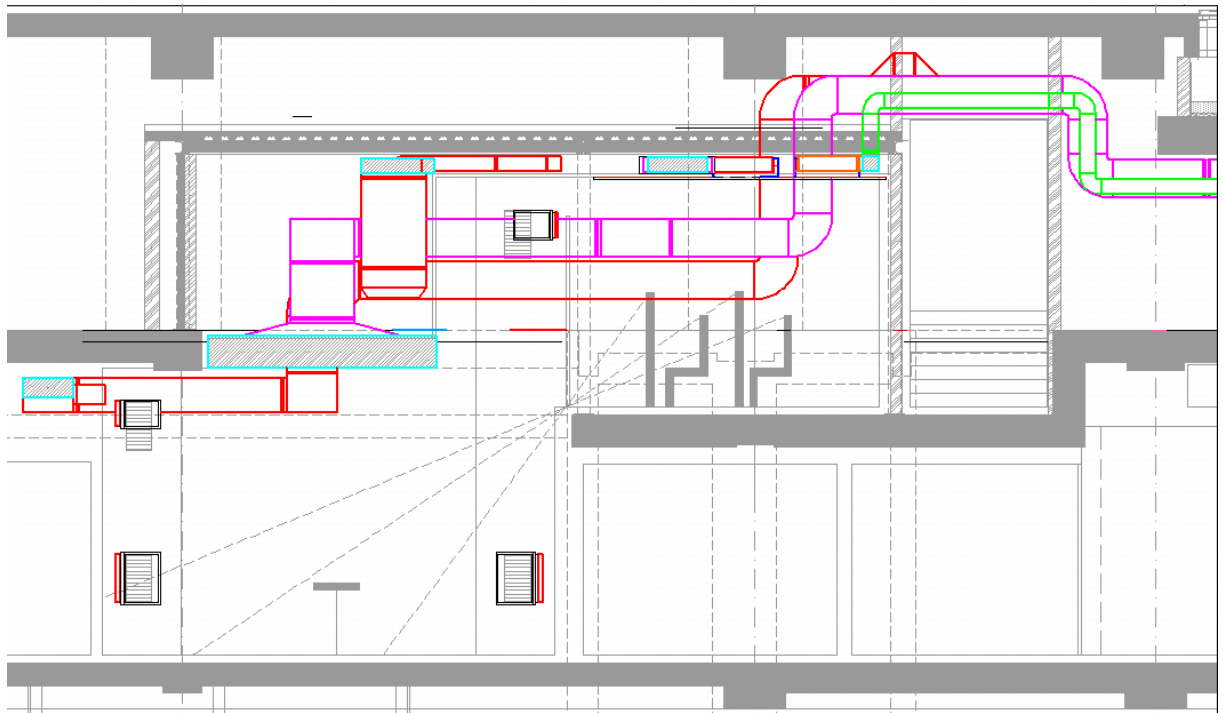
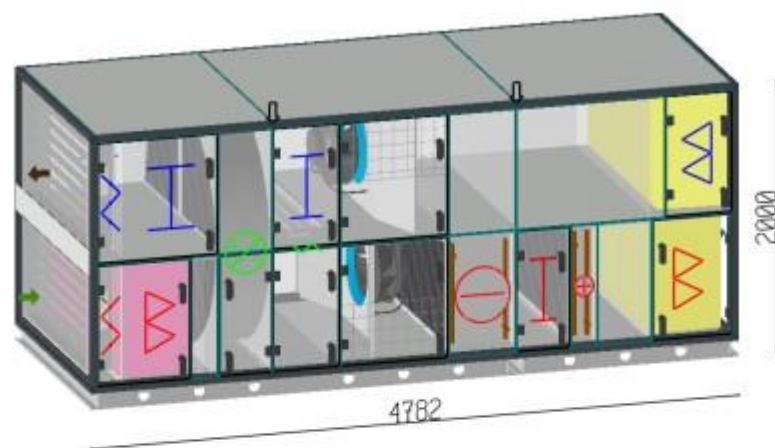


Figura 59 – Vista lateral do esquema de circulação de ar com recurso a condutas.

ANEXO II

Geniox 18 H
Peso: 1795 kg
Largura da unidade: 1882 mm



Dados ventilador	Insuflação	Retorno	Unidades
Caudal de ar (1,205 kg/m³)	7500	7100	m³/h
Vel. de passagem na secção	1.40	1.33	m/s
Pressão externa	600	250	Pa
Velocidade ventilador	1698	1190	r.p.m.
Motor; Tensão; Corrente, Amp., nominal	5.20; 3x400; 8.20	3.40; 3x400; 5.40	kW/V/A
Ruído radiado	66 dB(A)		
Filtro Admissão / Extração	F7 - ePM1 60% + F9 - ePM1 85% / M6 - ePM2.5 50%		
Aquecimento, água	20.1 kW; 9.5/17.5°C		
	Fluido 45/40°C; 15.6 kPa; 0.99 l/s; 1 1/4" / 1 1/4" Ligações da tubagem		
Bateria água fria	35.0 kW; 20.3/9.5°C		
	Fluido 7/12°C; 19.5 kPa; 1.88 l/s; 1 1/2" / 1 1/2" Ligações da tubagem		

Energia	Dimensionamento	Médio	Ventilador [kWh/ano 8760 horas]
Recuperação (húmida/seca)	82.1 % / 84.2 %	82.1 % / 84.2 %	
SFP, filtros limpos, incluindo controlo de velocidade	2.27 kW/(m³/s)	2.27 kW/(m³/s)	41453 kWh
SFPe with dimensional filter press. incl. speed contr.	2.48 kW/(m³/s)	2.48 kW/(m³/s)	44053 kWh
	2018		
Ecodesign aprovado	Sim		
Localização da unidade de tratamento de ar	Lisboa Geof, Portugal		
	(t _{dry-bulb} 33.5 °C, t _{dew-point} 12.7 °C, t _{dry-bulbW} 6.6 °C)		



Figura 60 - Folha de seleção da UTA.

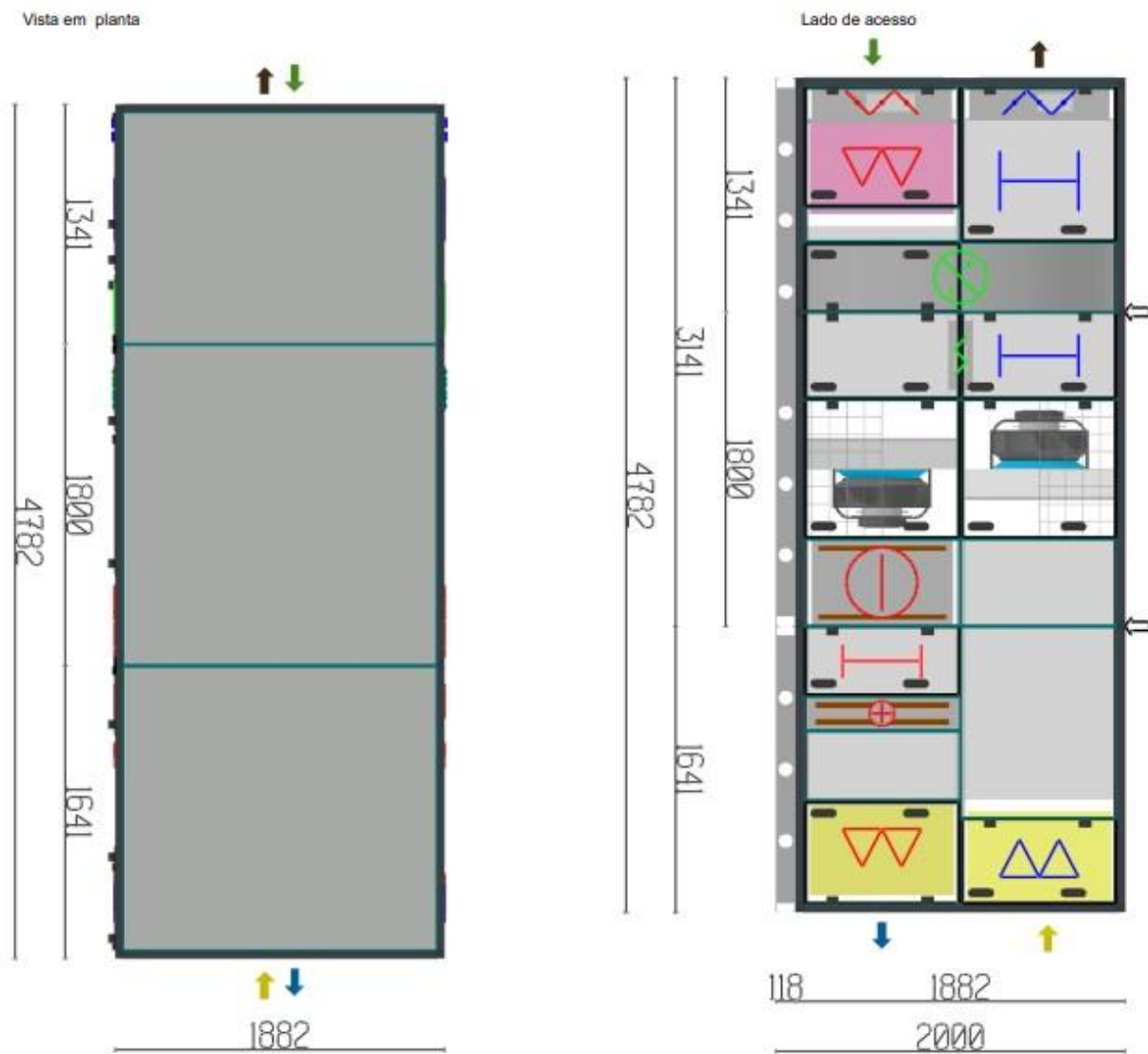


Figura 61 - Dimensões da UTA.

Permutador de calor rotativo			
	Admissão	Extração	
Caudal de ar	7500	7100	m³/h
Perda de carga	130	123	Pa
INVERNO			
Temperatura do ar antes/depois	3.0/17.0	20.0/5.3	°C
Humidade relativa do ar antes/depois	90/53	55/99	%
Capacidade	49.20		kW
Eficiência da temperatura	82.1		%
Eficiência seca Segundo (EN 308) 7500 m³/h	84.2		%
Eficiência de recuperação de humidade	57.0		%
Energy class for heatrecovery (EN13053)		H1	
VERÃO			
Temperatura do ar antes/depois	34.0/22.5	20.0/32.1	°C
Humidade relativa do ar antes/depois	40/79	55/26	%
Capacidade	30.50		kW
Eficiência da temperatura		82.1	%
Eficiência de recuperação de humidade		-0.2	%

Figura 62 - Seleção do Permutador de calor

Bateria de arrefecimento, Fluido			
Caudal de ar	7500	m³/h	
Perda de carga no ar, bateria de água com gotículas de condensado	139	Pa	
Pressure drop air, dry coil	100	Pa	
Temperatura do ar antes/depois	20.3/9.5	°C	
Humidade relativa do ar antes/depois	58/100	%	
Potência total de arrefecimento	35.02	kW	
Rácio de calor sensível	78	%	
Vel. de passagem na bateria	1.69	m/s	
Condensação	0.2	l/min	
Tipo de fluido	Água		
Temperatura do fluido, entrada/saída	7.0/12.0	°C	
Caudal do fluido	1.68	l/s	
Perda de carga do fluido	19.5	kPa	
Velocidade do fluido	0.63	m/s	
Volume da bateria	41.1	l	
Lado de ligação	Lado de serviço		
Diâmetro ligação admissão/descarga	1 1/2" / 1 1/2"		
Material do tubo	Cu		
Material da alheta	Al		
Espessura da alheta	0.10	mm	
Espaçamento entre alhetas	2.5	mm	
N.º de fiadas	10		
Tipo de tabuleiro de condensados	Aço inoxidável		
Diâmetro do tudo de esgoto	40	mm	
Código da bateria	GXX-18-W-3-10-39-775-1613-2.5-CU-AI10-H-1 1/2		

Figura 63 - Seleção da bateria de arrefecimento.

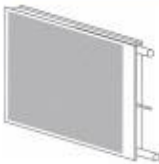
Bateria de aquecimento, Fluido			
	Caudal de ar	7500	m³/h
	Perda de carga	7	Pa
	Temperatura do ar antes/depois	9.5/17.5	°C
	Humidade relativa do ar antes/depois	100/59	%
	Capacidade	20.08	kW
	Vel. de passagem na bateria	1.68	m/s
	Tipo de fluido	Água	
	Temperatura do fluido, entrada/saída	45.0/40.0	°C
	Caudal do fluido	0.99	l/s
	Perda de carga do fluido	15.6	kPa
	Velocidade do fluido	1.14	m/s
	Volume da bateria	7.1	l
	Lado de ligação	Lado de serviço	
	Diâmetro ligação admissão/descarga	1 1/4" / 1 1/4"	
	Material do tubo	Cu	
	Material da alheta	Al	
	Espessura da alheta	0.11	mm
	Espaçamento entre alhetas	2.5	mm
	N.º de fiadas	1	
	Código da bateria	GXH-18-W-4-1-8-750-1615-2.5-CU-AL11-H-1 1/4	
	Bainha para sonda anti-congelação	1	peças

Figura 64 - Seleção da bateria de aquecimento.