



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Nelson Simões Silva

**ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLO DE
ILUMINAÇÃO E VENTILAÇÃO NUM EDIFÍCIO
ESCOLAR**

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado integrado em Engenharia Mecânica do ramo de energias e ambiente orientada pelo Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar e apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2019

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Análise de estratégias de controlo de iluminação e ventilação num edifício escolar

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente.

Analysis of lighting and ventilation control strategies in a school building

Autor

Nelson Simões Silva

Orientador

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Júri

Presidente Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Marco Alexandre dos Santos
Fernandes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2019

Agradecimentos

Durante a realização do presente trabalho contei com o apoio de imensas pessoas e instituições e as quais quero expressar o meu agradecimento. Ao Professor Doutor Adélio Gaspar, pela sua orientação, por todo o apoio prestado em todas as ocasiões e por todos ensinamentos passados. Ao engenheiro projetista Nuno Fernandes pela disponibilidade de materiais para o estudo e esclarecimentos de dúvidas do software. Aos meus pais, irmão, familiares, e amigos que ao longo destes anos sempre me apoiaram em todas as decisões tomadas.

Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo estudar várias estratégias de controlo de iluminação e ventilação num edifício escolar. Importa, portanto, compreender formas de cumprir a regulamentação, assegurar o conforto térmico e visual, a qualidade do ar interior e minimizar o custo de exploração dos sistemas de climatização.

No campo de iluminação, partindo de uma situação de sobredimensionamento das luminárias, realizou-se um estudo de influência da iluminação no conforto visual dos ocupantes e, evidentemente da sua cota parte nos consumos energéticos do edifício.

No âmbito da climatização eficiente dos espaços, dimensionaram-se, no programa de simulação energética DesignBuilderTM, sistemas de climatização com funcionamento VAC (Volume de Ar Constante) e VAV (Volume de Ar Variável). No primeiro caso consideraram-se duas situações, uma em que a QAN (quantidade de ar novo) é constante e determinada recorrendo a duas metodologias previstas na regulamentação, método prescritivo e método analítico, e uma segunda em que a QAN é variável e dependente da ocupação dos espaços. No segundo caso, considerou-se duas situações, uma com QAN constante, e outra com a QAN variável em função da carga térmica. O restante caudal para garantir o volume de insuflação pretendido fica ao encargo do ar de recirculação.

Para terminar, analisaram-se os consumos energéticos de cada um dos sistemas descritos de forma a avaliar qual seria a melhor solução para o caso em estudo, quer a nível de eficiência energética, quer a nível de proporcionar conforto térmico, e visual, aos ocupantes e garantir a qualidade do ar interior.

Palavras-chave: AVAC, Iluminação, Ventilação, QAI, Conforto térmico.

Abstract

The main goal of this work is to study several lighting and ventilation control strategies in a school building. Therefore, is crucial to understand how to ensure thermal and visual comfort and indoor air quality, all while minimizing the HVAC systems costs and comply with all legal regulations applied.

In the lighting field, starting from a situation of oversized lamps, a lighting influence study, on the visual comfort of the occupants, was conducted, and, naturally its influence on the energy consumption of the building.

To ensure the climatization on the occupied areas, several systems were dimensioned on the energy simulation program DesignBuilder™, with different functioning principles, one with CAV (Constant Air Volume) and another with VAV (Variable Air Volume). In the first case two different situations were considered, one where the outdoor air volume is constant and determined by two methodologies present in legislation, the prescriptive method and the analytic method, and a second one where the outdoor air volume is variable and function of the space occupation rate. In the second case, two distinct cases applied, one where the outdoor air is constant and another where the outdoor air is dependent on the thermal load of the space. Recirculation air is in charge of ensuring the remaining air volume to achieve the pretended insufflation volume.

Last, the energy consumption of every system was analyzed in order to evaluate the best solution to achieve a good energy efficiency, deliver thermal and visual comfort to the occupants e ensure a good indoor air quality.

Keywords HVAC, Lighting, Ventilation, Indoor Air Quality, Thermal Comfort.

Índice

[Índice de Figuras] [(remover se não aplicável)].....	ix
[Índice de Tabelas] [(remover se não aplicável)]	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Siglas e acrónimos	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Consumo de Energia	14
1.2. Qualidade do ambiente interior (QEI)	16
1.3. Qualidade do ar interior (QAI)	16
1.3.1. Método analítico	18
1.4. Conforto térmico.....	19
1.4.1. Temperatura e humidade relativa	23
1.5. Conforto visual	23
1.6. Sistemas de climatização de volume de ar variável (VAV)	25
1.7. Programa DesignBuilder.....	26
1.8. Objetivos.....	27
2. Modelo do edifício e critérios de simulação.....	28
2.1. Descrição do edifício e espaços	28
2.1.1. Identificação das salas a climatizar	29
2.2. Modelo do Edifício	31
2.2.1. Características das salas e dos elementos construtivos	31
2.3. Critérios de projeto	35
2.3.1. Dados Climáticos.....	35
2.3.2. Controlo da temperatura e humidade interior.....	36
2.3.3. Ganhos internos	36
2.3.4. Sistemas de Apoio	43
2.3.5. Sistema de climatização.....	44
2.4. Modelação de sistemas de climatização	49
3. Análise e discussão de Resultados.....	51
3.1. Iluminação	52
3.2. Qualidade do ar Interior	56
3.2.1. Método analítico	56
3.3. Cargas térmicas.....	57
4. [Conclusões].....	60
[REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS]	61
ANEXO A	65
ANEXO B	67
ANEXO C – Projeto de iluminação	68

ANEXO D – Calendarização Ano LECTIVO 2018/2019 da FCTUC.....	70
APÊNDICE A - Características dos elementos construtivos das envolventes.....	74
.....	81
Apêndice b.....	82
Apêndice C – método Analítico	83

[ÍNDICE DE FIGURAS] [(REMOVER SE NÃO APLICÁVEL)]

Não foi encontrada nenhuma entrada do índice de ilustrações.

[Remover se necessário para garantir que o Índice de Tabelas inicia numa página ímpar]

[ÍNDICE DE TABELAS] [(REMOVER SE NÃO APLICÁVEL)]

Tabela 1.1 - PMV e sensações térmicas correspondentes, de acordo com o modelo de Fanger [13]	20
Tabela 2.2 – Descrição da aplicabilidade do tipo de categoria de conforto para edifícios [14]	21
Tabela 3.3 – Valores de PMV e do PPD recomendados para edifícios com ventilação mecânica [14]	22

[Remover se necessário para garantir que a Simbologia e Siglas inicia numa página ímpar]

[Remover se não aplicável.]

SIMBOLOGIA E SIGLAS

CO₂ – dióxido de Carbono

0 – Tensor nulo

a, ..., z – Escalares no espaço de reais \mathbb{R}

a, ..., z – Tensores no espaço de reais \mathbb{R}^n

E – Módulo de Elasticidade

Siglas e acrónimos

AVAC – Aquecimento, ventilação e ar condicionado

VAC – Volume de ar constante

DB – DesignBuilder

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

PMV – Voto médio estimado

PPD – Percentagem de pessoas insatisfeitas

QAI – Qualidade de ar interior

QAN – Caudal Ar novo

QEI – Qualidade do ambiente interior

SBS – Síndrome do Edifício doente

SCE – Sistema Nacional de Certificação de Edifícios

VAV – Volume de ar variável

VC – Ventilador-convetores

[Remover se necessário para garantir que o Primeiro Capítulo inicia numa página ímpar]

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se uma breve introdução dos vários temas desenvolvidos durante a dissertação evidenciando a importância do consumo de energia, a influência da qualidade do ar interior e do conforto térmico na qualidade de vida das pessoas. A importância de intervenções nos edifícios de serviços também é destacada, especialmente nas universidades. Também se define os objetivos em que este estudo se baseia, e apresenta-se a estrutura deste documento.

1.1. Consumo de Energia

Os edifícios são responsáveis por um grande compartilhamento do consumo de energia em todo o mundo. Sendo que os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) não só representam uma parte significativa do consumo de energia, como também são altamente influentes no clima interior dos edifícios e na satisfação dos ocupantes.

Existem várias estratégias de ventilação que devem ser avaliadas por meio de simulações para obter a solução mais adequada de modo a fornecer um nível aceitável de qualidade do ar interior e conforto térmico (sensibilidade térmica), usando a menor quantidade de energia possível [1].

Para um melhor ambiente de aprendizagem, os edifícios educacionais exigem condições ambientais interiores otimizadas, incluindo conforto térmico, qualidade do ar interior, iluminação e um ambiente silencioso. Claro que estas imposições têm altos custos de energia, e os edifícios educacionais devem tentar gerenciar de modo a ter em consideração as medidas de eficiência energética para reduzir os custos operacionais e proporcionar as melhores condições interiores aos ocupantes.

A avaliação do clima interior identifica medidas corretivas para problemas relacionados à qualidade do ar interior e ao conforto térmico. Resultados de um estudo [2] mostraram que a redução esperada do consumo de energia foi cerca de 11,2% devido a um melhor uso da luz natural e 4,5% devido à redução dos fluxos de ar novo, mesmo

prolongando o tempo de operação da ventilação. Os autores demonstram que uma das soluções tem como base a metodologia de redução dos fluxos de ar novo, isto de possíveis sistemas de climatização. É evidente que o aumento da produtividade e do bem-estar de alunos e professores deriva diretamente de uma coexistência entre economia de energia e melhoria das condições ambientais interiores em edifícios escolares.

Um estudo realizado por Sait [3] de uma auditoria detalhada de energia elétrica de um edifício educacional elucidou recomendações relacionadas com aquecimento, ventilação e ar condicionado, iluminação, isolamento térmico e dispositivos de sombreamento que alcançam até 35,3% da economia de energia. Essas recomendações surgiram-se através de programas de simulação de modo a encontrar projetos alternativos de sistemas, em que um dos projetos mais relevantes nos sistemas AVAC foi um ajuste do termostato, dependendo da estação do ano, de modo a ter um bom conforto térmico e menor consumo. Uma outra recomendação é ter as unidades de Ar condicionado (AC) em locais com sombreamento, uma vez que o sombreamento em unidades AC das luzes diretas do sol pode aumentar a sua eficiência. Neste presente trabalho a maioria das unidades encontra-se em locais sombreados. Relativamente à iluminação, uma das recomendações é a análise da iluminação artificial em função das luminárias da intensidade de iluminação (lux).

O alto consumo de energia e as elevadas emissões de dióxido de carbono (CO₂) no ambiente tornaram a eficiência energética e as estratégias de poupança um objetivo prioritário. Hoje em dia, os sistemas de AVAC são essenciais para o conforto térmico e a qualidade do ar interior. No entanto, apresentam algum consumo de energia e é neste momento o sistema que apresenta o maior uso final de energia tanto no setor residencial como não residencial [1].

Este consumo de AVAC nos países desenvolvidos representa metade do uso de energia nos edifícios. Previsões indicam um enorme crescimento do consumo de energia e na área condicionada da União Europeia durante os próximos 15 anos, aumentando aproximadamente em 50% [4].

1.2. Qualidade do ambiente interior (QEI)

Um dos fatores chave para a obtenção de ambientes saudáveis em edifícios é o fornecimento de um alto nível de qualidade do ambiente no interior, tendo como referência níveis aceitáveis de conforto térmico, visual, acústico e da qualidade do ar interior (QAI). Os impactos causados por más condições ambientais têm sido estudados em várias áreas de investigação científica, demonstrando as suas numerosas consequências em termos de saúde e de construção. Tanto nos edifícios existentes como nos novos, existe uma maior abordagem na eficiência energética subsequente à diretiva relativa ao seu desempenho, mas não garantindo uma melhor qualidade ambiental, particularmente nos edifícios de serviço existentes. Essa falta de compreensão pode ter efeitos negativos nos ocupantes a longo prazo, com problemas de saúde e respiratórios que consequentemente afetam a sua produtividade.

Os edifícios de serviço, tais como escritórios, edifícios educacionais, comerciais e institucionais têm uma maior complexidade relativamente aos ambientes internos: maior número de ocupantes, maior diversidade de contaminantes, sistemas mecânicos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), e controlo reduzido sobre as condições térmicas e de ventilação [5]. Mihai e Iordache [6] demonstraram que a QAI é um bom indicador de conforto, saúde e custos operacionais de um edifício.

A manutenção de condições de conforto térmico e qualidade ambiental é um dos principais desafios nos edifícios existentes. A análise destes estudos indica que há uma forte associação da QEI com o conforto e satisfação do ocupante, desempenho do estudo/trabalho, condições de construção e consumo de energia [5].

1.3. Qualidade do ar interior (QAI)

A qualidade do ar interior está diretamente relacionada com as taxas de ventilação e concentração de poluentes, que por sua vez estão relacionados com a Síndrome do Edifício doente (SBS), que por sua definição é um conjunto de doenças causadas ou estimuladas pela poluição do ar em espaços fechados. As causas químicas e físicas derivadas de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), fumo de tabaco, compostos orgânicos voláteis, taxa de ventilação, temperatura, humidade, radiação são fatores que podem causar a SBS. A organização Mundial da Saúde (OMS) publicou diretrizes de

qualidade do ar interior para os respectivos poluentes e seus efeitos sobre a saúde com o objetivo de garantir uma boa qualidade do ambiente interior.

A taxa de ventilação e infiltração tem como funcionalidade a QAI em termos de concentração de CO₂ e ventilação necessária para reduzir a concentração de poluentes do ar em ambientes fechados. O cálculo das taxas de ventilação e infiltração nos espaços ocupados é imprescindível nos edifícios, uma vez que afetam diretamente a QAI [5].

Vários estudos sobre QAI em edifícios educacionais evidenciaram que muitas das salas de aula não estão adequadamente ventiladas, causando graves sintomas na saúde, devido à elevada concentração de CO₂, exposição a compostos orgânicos voláteis, fungos, entre outros. Sendo que vários estudos investigaram a influência do CO₂ em ambientes fechados na saúde dos ocupantes e na qualidade do ar em que a concentração de CO₂ foi considerada como um indicador da taxa de ventilação por ocupante, pode ser expresso em termos de ventilação necessária (método prescritivo) ou concentração de CO₂ (método analítico). Os requisitos para o ar novo interior estão especificados no regulamento do diário da república pela diretiva da portaria 353-A/2013 de dezembro de 2013 [12]. Esta legislação permite o uso de um método prescritivo baseado em valores de referência estabelecidos de uma simplificação do método analítico detalhado [5].

A legislação permite o uso de dois métodos, um deles que considera as emissões de contaminantes dos materiais de construção, bem como o nível de atividade e as características físicas dos ocupantes para cada espaço. O método analítico detalhado leva em conta a evolução do CO₂ previsto ao longo de um dia de ocupação, de acordo com o perfil de ocupação, método de ventilação e características físicas dos ocupantes, limitando o nível médio de proteção da concentração de CO₂ a 1250 ppm (2250 mg/m³), em que resulta em desconforto e problemas relacionados com a saúde. Se os valores máximos de concentração de CO₂ forem muito altos durante a ocupação, estes serão prejudiciais à qualidade do ar interior no tempo restante de ocupação. Vários estudos indicam que os valores obtidos na maioria das escolas estão ligeiramente acima dos valores médios limites recomendados de concentração de CO₂ [2].

1.3.1. Método analítico

O regulamento do diário da república pela diretiva da portaria 353-A/2013 [12] apresenta a equação geral e estimativa da emissão da concentração de CO₂, sendo prevista em ambientes interiores a evolução temporal da concentração de CO₂ de acordo com a seguinte expressão:

$$C_{int}(t_i) = C_{ext} + \frac{G_{CO_2}}{Q_{AN}} + \left(C_{int}(t_{i-1}) - C_{ext} - \frac{G_{CO_2}}{Q_{AN}} \right) \cdot e^{-\frac{Q_{AN}}{V} \cdot (t_i - t_{i-1})} \quad [\text{mg/m}^3] \quad (1.1)$$

Em que:

t – Instante genérico, ou instante final de cada incremento de tempo considerado no cálculo numérico, [h];

$C_{int}(t_i)$ – Concentração de CO₂ no ar interior no instante t_i , [mg/m³] ou [m³/m³];

Q_{AN} - Valor do caudal de ar novo, [m³/h];

C_{ext} - Valor médio típico da concentração do CO₂ no ar exterior para a zona onde se insere o edifício, [mg/m³] ou [m³/m³];

G_{CO_2} - Taxa total de geração de CO₂ no espaço, [mg/m³] ou [m³/m³];

V – Volume de ar no interior do espaço, [m³];

$C_{int}(t_{i-1})$ – Valor da concentração de CO₂ no ar interior no instante inicial (t_{i-1}) de cada intervalo de tempo considerado no cálculo numérico, [mg/m³] ou [m³/m³].

Para efeitos de aplicação do método analítico, o valor da concentração de CO₂ no exterior (C_{ext}) deve corresponder a 702 mg/m³, correspondente a 390 ppm à pressão atmosférica normal e a 25 °C.

O valor da taxa total de geração de CO₂ (G) é função do nível de atividade metabólica, da corpulência e do número de ocupantes do espaço em causa, sendo calculado de acordo com as seguintes expressões:

Ou,

$$G_{CO_2} = (17000 \cdot A_{Du} \cdot M) \cdot N \quad [\text{mg/h}] \quad (1.2)$$

$$G_{CO_2} = (0,0094 \cdot A_{Du} \cdot M) \cdot N \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (1.3)$$

em que,

M – Taxa de metabolismo dos ocupantes [met], em função da atividade desenvolvida;

N – Número de ocupantes do espaço;

A_{Du} – Área de de *DuBois* da superfície corporal [m²], para adultos tem o valor de 1,8 m².

No método analítico, o caudal mínimo de ar novo é determinado através de um processo de cálculo da concentração média de CO₂ durante o período de ocupação, no qual o valor do caudal de ar novo (Q_{AN}) é ajustado até ser assegurado que não é excedido o limiar de proteção para a concentração de CO₂. Para cada valor de Q_{AN} é calculada a evolução temporal prevista da concentração interior de CO₂ ao longo de um dia, sendo que o caudal mínimo de ar novo será aquele para o qual se verifique que a concentração média de CO₂ é inferior aos limiares de proteção definidos para aquele parâmetro no ar interior, durante o período de ocupação.

Para atender às variações existentes ao longo do dia, o cálculo da evolução temporal referida deve ser efetuado considerando intervalos de tempo não superiores a 60 minutos na definição dos perfis de ocupação, sendo que o passo temporal do processo de integração usado para o cálculo da média temporal das concentrações durante o período de ocupação deve ser de 1 minuto.

Para efeito da determinação dos valores de caudal de ar novo pelo presente método, são disponibilizadas pela entidade gestora do SCE, aplicações, do tipo folha de cálculo [27], que têm por base a evolução da concentração média de CO₂ no interior, durante o período de ocupação. Em que o perfil horário de ocupação, num dado período horário só será contabilizável se a ocupação for, pelo menos, de 50% [12].

1.4. Conforto térmico

O conforto térmico está relacionado com os fatores ambientais físicos em ambientes naturalmente e mecanicamente ventilados. As condições físicas e psicológicas dos ocupantes expressam a condição do ambiente térmico. A temperatura do ar, temperatura radiante média, a velocidade do ar e humidade relativa são parâmetros ambientais físicos que afetam o conforto térmico, enquanto o isolamento térmico das roupas usadas e a taxa metabólica são parâmetros ambientais pessoais, ou seja, índices de conforto térmico. Estes índices relacionam o consumo de energia e os padrões de conforto térmico estabelecidos para os edifícios. São assim usados na avaliação de edifícios existentes para determinar os valores de conforto térmico a longo prazo, sendo mais relevante na avaliação do conforto interior em comparação com o conforto visual, acústico e qualidade do ar interior [5].

O modelo mais conhecido para análise do conforto, dentro dos que representam neste tipo de estudos, é o proposto por Fanger [7]. A base teórica do modelo de Fanger é a interação térmica entre o ocupante e o seu ambiente, em que se considera o conforto obtido quando há equilíbrio entre os ganhos e as perdas de calor do corpo humano. Fanger deduziu uma equação de conforto térmico que foi derivada e expandida para um cálculo de uma escala de sensação térmica pela norma ASHRAE 55 [13], conhecida como índice de “Voto Médio Estimado” (PMV) que tem o seguinte intervalo de sensação térmica (ver tabela 1.1).

Tabela 1.1 - PMV e sensações térmicas correspondentes, de acordo com o modelo de Fanger [13]

Voto médio previsto	Sensação térmica [ASHRAE]
-3	Insuportavelmente frio
-2	Frio
-1	Ligeiramente frio
0	Neutro
1	Ligeiramente quente
2	Quente
3	Insuportavelmente quente

A equação de PMV é função de variáveis como:

$$PMV = f(t_a, t_{mrt}, v, p_a, M, I_{cl}) \quad (1.1)$$

em que, t_a é a temperatura do ar [$^{\circ}$ C], t_{mrt} é a temperatura radiante média [$^{\circ}$ C], v é a velocidade relativa do ar [m / s], p_a é a humidade relativa (pressão de vapor) [kPa], M é a taxa metabólica [W / m^2], e I_{cl} é o isolamento de roupas [clo] (1 clo = 0.155m² °C/W).

Foi também desenvolvido uma relação empírica de PMV com a “Percentagem de pessoas insatisfeitas” (PPD) que expõe uma estimativa de percentagem de pessoas que se sentem mais ou menos ligeiramente quentes ou frias. A relação entre PMV e PPD é representada:

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0,03353xPMV^4 - 0,219xPMV^2) \quad (1.2)$$

O método PMV-PPD é aplicado na avaliação do conforto térmico.

Os resultados de PMV, estimados a partir de parâmetros medidos, parâmetros físicos da taxa metabólica e uma estimativa do vestuário de cada estação do ano em função dos votos de sensação térmica (TSV) (que tem os mesmos valores de índice de PMV).

Os critérios de para o ambiente térmico são baseados nos índices de conforto térmico PPV-PPD definidos pela norma EN 15251 [14] para ventilação mecânica (ver tabela 1.3) em função da categoria do edifício para o tipo de construção e expectativa dos ocupantes [14] (ver tabela 1.2).

Tabela 2.2 – Descrição da aplicabilidade do tipo de categoria de conforto para edifícios [14]

Categoria	Descrição
I	Mais exigente. Elevado nível de expectativa. Recomendada na conceção de edifícios onde se pretenda atingir um nível de conforto térmico muito elevado ou em edifícios com requisitos especiais (com ocupantes sensíveis ou frágeis: doentes, crianças ou idosos).
II	Nível de expectativa normal. Recomendada na conceção de novos edifícios e na reabilitação.
III	Nível de expectativa aceitável e moderado. Pode ser usado em edifícios existentes.
IV	Valores fora dos critérios descritos nas categorias anteriores. A gama de temperaturas caracteriza-se por um elevado número de pessoas descontentes. Só será aceitável durante uma pequena parte do ano.

Tabela 3.3 – Valores de PMV e do PPD recomendados para edifícios com ventilação mecânica [14]

Categoria	PPD (%)	PMV
I	<6	$-0,2 < PMV < +0,2$
II	<10	$-0,5 < PMV < +0,5$
III	<15	$-0,7 < PMV < +0,7$
IV	>15	$PMV < -0,7$ ou $+0,7 < PMV$

As preferências térmicas individuais (valores de temperatura que provavelmente resultam em conforto térmico) têm sido usadas para o controlo de sistemas de AVAC para fornecer melhor satisfação térmica e melhorar a eficiência energética, evitando o excesso de condicionamento. Os índices de conforto térmico, na generalidade têm feito esforços de pesquisa para melhorar as operações de AVAC.

Criar uma condição coletivamente aceitável tem sido um objetivo durável no campo das operações do sistema de climatização. Assim, o objetivo do modelo PMV, no momento do seu desenvolvimento, era identificar as características do sistema para as quais os fatores ambientais e humanos resultam num sentimento de conforto térmico pela maioria dos ocupantes. ASHRAE afirma que pelo menos uma variação de 3°C é necessária para provocar uma mudança na sensação térmica [8].

Estas análises podem ser realizadas com programas de simulação dinâmica.

1.4.1. Temperatura e humidade relativa

A temperatura e a humidade relativa são dos vários parâmetros que afetam o conforto térmico. A norma ASHARE Standard 55 “The Environmental COnditions for Human Occupancy” [13], apresenta que pretendem alcançar condições térmicas que pelo menos 80% dos ocupantes achariam aceitáveis ou confortáveis.

A humidade relativa inferior a 25% está associada ao aumento do desconforto e da secagem da pele, que podem levar a formação da irritação. Valores de humidade relativa baixos também aumentam a eletricidade estática, que causa desconforto e pode dificultar o uso de computadores e outros equipamentos. Níveis de humidade relativa elevados, podem resultar na condensação nas superfícies interiores do edifício e exteriores [30].

1.5. Conforto visual

O conforto visual é responsável pela eficiência do trabalho do ocupante, pois uma má iluminação pode causar desconforto. O conforto visual é dependente de certos fatores como iluminação, luminância, e brilho que proporcionam um risco de encadeamento. A presença de um bom ambiente luminoso pode aumentar o conforto e a produtividade dos ocupantes. A norma EN 12464-1 [15] identifica os valores de requisitos de iluminância que se devem cumprir para os locais de trabalho em edifícios para satisfazer o conforto visual e o seu desempenho [5]. O conforto visual nos edifícios tem influência nas atitudes psicológicas, sociais na ocupação, físicas na luz solar e contextuais na orientação. Devido à facilidade e ao baixo custo, a iluminância (lux) no local de trabalho deve ser imposta como uma fonte imprescindível no local dos ocupantes [9].

Segundo o regulamento da portaria nº17-A/2016 [16] para efeitos de aplicação deste regulamento, os valores máximos admissíveis de iluminação não poderão exceder em mais de 30% dos valores presentes no ponto 5.3 “Requisitos de iluminação para espaços interiores, tarefas e atividades” da Norma EN 12464-1 [15], na tabela 1.4 estão os valores indicados para os casos de estudo deste trabalho.

Tabela 1.4 - Recomendações de projeto de iluminação [15]

Tipo de edifício	Espaço	Iluminância (lux)	Índice de brilho
Edifícios educacionais	Salas de aula, salas tutoriais	300	19
	Salas de aula para aulas noturnas e educação de adultos	500	19
	Auditório	500	19

Para as potências dos sistemas de iluminação a instalar nos edifícios de comércio e serviço os valores não podem exceder aos indicados na tabela 1.5, na qual são também indicados os valores dos fatores de correção a utilizar pela existência de sistemas de controlo [16].

Tabela 1.5 – Valores máximos de densidade de potência de iluminação (DPI) [16]

Tipo de espaço segundo a função	DPI [(w/m ²)/100lux]		Fator de controlo	
	Entrada em vigor	31 dez 2015	Ocupação FO	Disponibilidade de luz natural FD
Salas de aula, salas de leitura, bibliotecas, salas de trabalho de apoio, salas de reuniões/conferências/auditórios	2,8	2,4	0,9	0,8

Para determinação do valor máximo de DPI/100 lux deverá ser usada a seguinte metodologia de cálculo:

$$DPI = \frac{(P_n \cdot F_o \cdot F_D) + P_c}{A} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1.3)$$

$$\frac{DPI}{100 \text{ lux}} = \frac{DPI}{E_m} \cdot 100 \quad (\text{W/m}^2/100\text{lux}) \quad (1.4)$$

Em que:

P_n – potência total dos sistemas de luminárias instaladas, $P_n = \sum P_i$

P_i – potência do sistema lâmpada + balastro

F_o – fator de controlo por ocupação, conforme tabela 1.5

F_D – fator de controlo por disponibilidade de luz natural, conforme tabela 1.5

A – área interior útil da zona, (m²)

E_m – iluminância média mantida, [lux]

Para os casos em que não exista sistema de controlo e regulação de fluxo, os valores apresentados na tabela 1.5 tomam valor 1 [16].

1.6. Sistemas de climatização de volume de ar variável (VAV)

A temperatura do ar e a taxa de ventilação de insuflação são os melhores parâmetros que podem ser otimizadas num sistema VAV, pois minimizam muito o consumo de energia. O controlo do fluxo de ar em sistemas VAV podem ser obtidos através do controlo da pressão estática.

Os sistemas VAV, por definição, são simplesmente sistemas de ar condicionado projetados para promover a existência de temperatura constante num espaço, variando o volume de ar fornecido de modo a ter um controlo mais otimizado na concentração de CO₂ do ar interior, em vez da temperatura do ar fornecido. Estes sistemas funcionam em torno da variação da carga de calor no espaço.

Um dos fatores para economizar energia prende-se com a diminuição do fluxo de ar, o que resulta na redução da potência do ventilador. Para redução de requisitos de energia: a maioria dos sistemas VAV utiliza o ar de retorno para reduzir o uso de energia quando a temperatura exterior é maior que a temperatura do ar de exaustão. Em sistemas de ar condicionado VAV, geralmente há várias variáveis que podem ser controladas durante a operação para alcançar as condições desejadas do sistema. Tais como: velocidade do

ventilador, pressão estática, temperatura do ar da zona, humidade, ventilação, caudal de ar insuflado.

Estes sistemas têm várias vantagens sobre outros sistemas de AVAC. Estes incluem, menos capacidade de ventilação em comparação com sistemas de volume constante (VAC), já que nos sistemas de VAV apenas o ar necessário é usado; maior flexibilidade em relação a cargas variáveis; ambiente interior melhorado, o sistema pode incorporar um economizador para utilizar o ar exterior para fornecer resfriamento quando a temperatura for apropriada. Como estratégia de otimização do sistema, parte do ar de retorno é misturado com o ar novo exterior [10]. Pode-se afirmar que os sistemas de ar condicionado VAV são os sistemas mais eficientes em energia atualmente em uso.

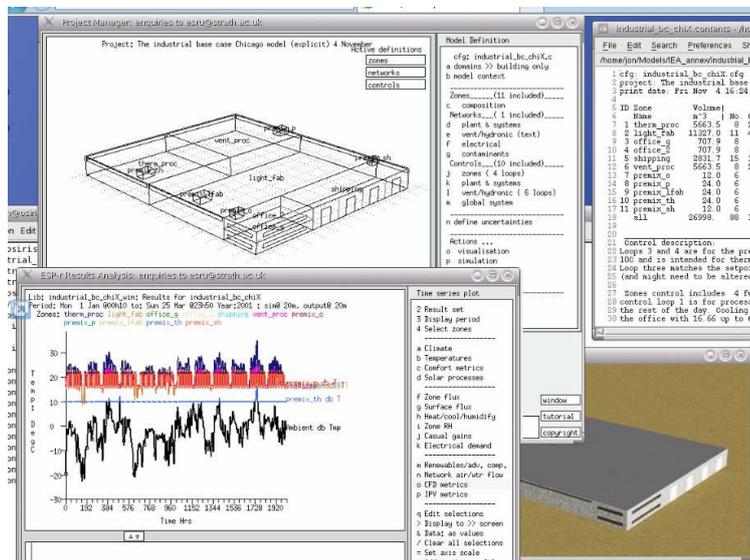
Em termos de modelação e simulação é um processo de criação de um modelo computacional, neste caso, de sistemas VAV existentes ou propostos, de forma que possamos conhecer os fatores que afetam os sistemas e o comportamento futuro do ambiente real. A simulação é uma ferramenta importante uma vez que fornece um meio de avaliar os sistemas VAV sem ter que realizar experiências no sistema real. Assim, ela fornece um método conveniente e barato de testar e avaliar o desempenho de vários. A simulação dinâmica é uma ferramenta conveniente e adequada para estudar o desempenho dinâmico, ambiental e energético dos sistemas de ar condicionado.

1.7. Programa DesignBuilder

Numa fase inicial para uma melhor compreensão da utilização de energia por parte de qualquer edifício, torna-se essencial conhecer a quantidade de energia consumida e a forma como esta se distribui pelos vários consumos. Assim, surge cada vez mais a necessidade de desenvolver e usar ferramentas baseadas em métodos computacionais que simulam, detalhadamente, os fluxos de energia num edifício ao longo de períodos de tempo consideráveis.

O DesignBuilder (DB) é uma ferramenta de software baseada em EnergyPlus usada para a modelação de simulações dinâmicas de edifícios, no qual pode-se trabalhar com modelos de construção virtual. É considerado uma ferramenta de software exclusiva para criar e avaliar projetos de construção, pois fornece uma série de dados de desempenho ambiental: tais como consumo de energia, emissões de carbono, condições de conforto,

iluminância, temperaturas e dimensionamento de componentes AVAC. O DesignBuilder permite que edifícios complexos sejam modelados de maneira simples [24] [25].



1.8. Objetivos

Nesta tese pretende-se, em primeiro lugar, uma aprendizagem de vários métodos e soluções para uma construção de um modelo de estudo, no qual recorreu-se a ferramentas de folhas de cálculo EXCEL e ao programa DesignBuilder. Aplicou-se a legislação em vigor para uma intervenção de um projeto de AVAC, especificamente na qualidade do ar interior e conforto térmico.

Neste projeto de AVAC foram previstas unidades ventilo-convetores e pretendeu-se analisar os vários tipos de sistema de climatização para chegar a uma conclusão discriminada relativamente ao conforto térmico, à qualidade de ar interior, às potências das cargas térmicas e ao seu consumo. A avaliação dos resultados fundamentou-se nos perfis de ocupação, nas taxas de renovação horária das salas em estudo e das cargas térmicas necessárias para cumprir os requisitos mínimos de ar novo.

2. MODELO DO EDIFÍCIO E CRITÉRIOS DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo é descrito o edifício em estudo para construção de um modelo de simulação. Com o apoio de normas, das folhas de cálculo e levantamentos em que foram adaptadas para um esforço sintonizado para definir os elementos mínimos a considerar no levantamento e caracterização para efeitos de aplicação para o método de simulação dinâmica para a modelação do comportamento térmico e consumo energético sob a portaria nº 17-A/2016 [16].

Trata-se de um edifício de serviços em que se pretende garantir as condições aconselháveis/exigidas ao bem-estar de todos os utilizadores. Os espaços são identificados para nestes serem asseguradas condições interiores de conforto térmico pela portaria 17-A/2016 [16] e qualidade de ar adequada recorrendo à Portaria nº 353 – A/2013 [12].

2.1. Descrição do edifício e espaços

O modelo de estudo escolhido corresponde ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, localizado na Rua Luís Reis Santos, do Pólo II, na Região Centro e sub-região Mondego, cujo coordenadas são: 40,19° N 8° 4,41° W com uma atitude de 46 m. Este edifício está perfeitamente orientado a Sul.

O DEM ocupa desde 1995 instalações próprias no Polo II da UC, contando hoje com um corpo docente exclusivamente constituído por Professores doutorados (em número de 41). A investigação que se faz no DEM é enquadrada em dois Centros de I&D da Fundação para a Ciência e Tecnologia (CEMUC e ADAI), muito bem classificados por painéis internacionais. É atualmente uma escola com elevados padrões de excelência e exigência, desenvolvendo uma cultura de ensino e investigação muito própria, que nos distingue e nos orgulha.

Em 2012, o DEM é um dos mais importantes departamentos da FCTUC sob todos os pontos de vista. É responsável pela gestão e coordenação de diversos cursos de engenharia de 1º, 2º e 3º ciclos de ensino universitário, com um universo de alunos que ronda um milhar. Leciona disciplinas a 23 cursos da UC. Destaca-se pelo seu elevado número de publicações científicas, projetos de investigação em curso e volume das receitas próprias geradas. Nestes quarenta anos passaram pelo DEM mais de 3.500 alunos, tendo concluído formações iguais ou superiores a 5 anos cerca de 1.500 alunos, com excelente taxa de empregabilidade. Dados do último inquérito disponível mostraram que 90% dos nossos licenciados obtinham emprego relacionado com a área de formação em menos de seis meses após o término dos seus estudos. A maioria dos alunos conseguiram um contrato de trabalho assinado antes de terminarem os respetivos cursos [17].”



Figura 2.1 – Vista aérea do Departamento de Engenharia Mecânica de Coimbra (Fonte: GoogleEarth)

2.1.1. Identificação das salas a climatizar

Após uma reunião dos órgãos superiores do DEM sobre uma anomalia no sistema de aquecimento central por radiadores a água em algumas partições do departamento, propôs-se um projeto de climatização nas salas de aula assinaladas na figura 2.2. designadas pelos números (3.2 a 3.5): o Núcleo de estudantes do departamento de Engenharia Mecânica da associação académica de Coimbra (3.1) e a zona de refeitório dos funcionários (3.6) no piso 3 e o anfiteatro II do piso 2. O objetivo consiste na elaboração de

um projeto para um sistema de climatização destes espaços com soluções eficientes e que cumpra os atuais requisitos de qualidade do ambiente interior.



Figura 2.2 – Parte das plantas dos pisos 2 e 3 do DEM, com identificação das salas em estudo [18]

No estudo, todas as salas são consideradas como salas de aula, uma vez que será essa a sua utilidade no futuro.

A figura 2.3 apresenta várias fotografias das salas que se encontram em estudo.



Figura 2.3 – fotografia das salas de aula

2.2. Modelo do Edifício

O edifício modelado pelo programa DesignBuilder é apresentado na figura 4.1.

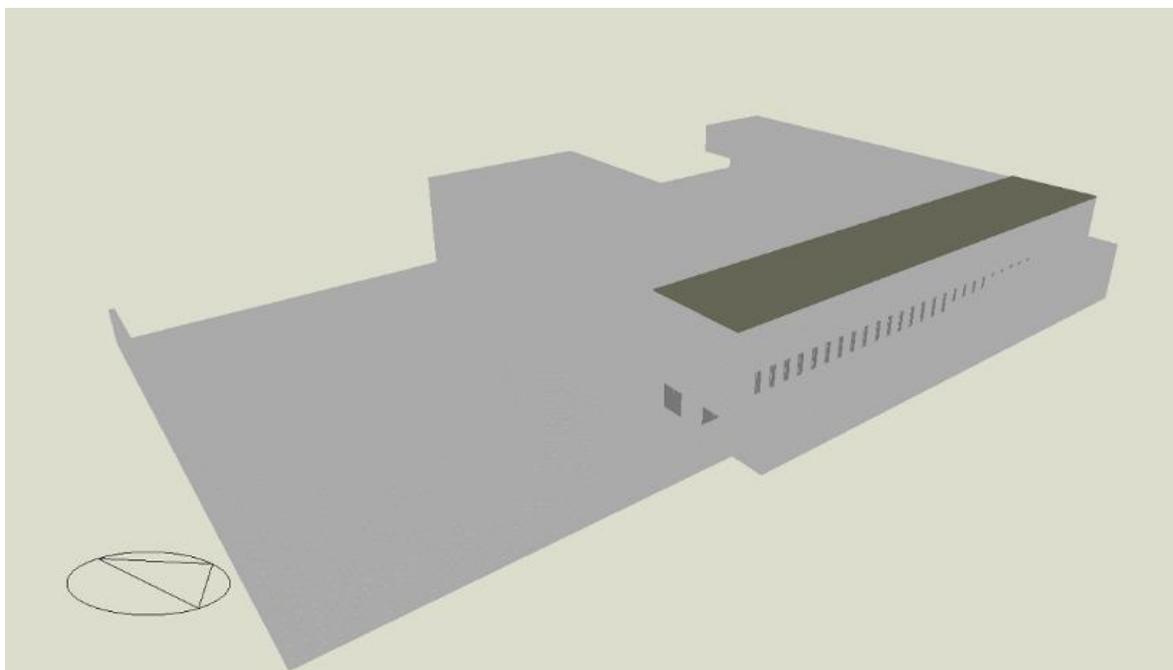


Figura 2.4 - Visualização do modelo geométrico do Edifício obtido pelo programa DesignBuilder.

2.2.1. Características das salas e dos elementos construtivos

As características construtivas foram obtidas pela consulta de um trabalho de levantamento anterior do DEM [18], as plantas em formato Autocad do DEM (digital e papel) foram disponibilizadas nas reuniões de equipa (aluno, orientador e projetista). Recorreu-se também a levantamentos e medições no local.

No anexo A apresentam-se as plantas das salas para intervenção.

No apêndice A podem ser consultadas as tabelas dos elementos construtivos das envolventes com os dados utilizados para a determinação do coeficiente térmico de acordo com o documento de apoio das propriedades térmicas dos elementos construtivos dos edifícios do curso de formação especializada no âmbito do SCE [19], do ITE 50 [20], recorreu-se também à base de dados do programa DesignBuilder.

Nas seguintes figuras (2.5 e 2.6) é apresentado parte dos blocos dos pisos 2 e 3 das salas em estudo, bem como tabelas (2.1 e 2.2) com as características mais relevantes das salas e as respetivas soluções construtivas para uma caracterização mais pormenorizada.

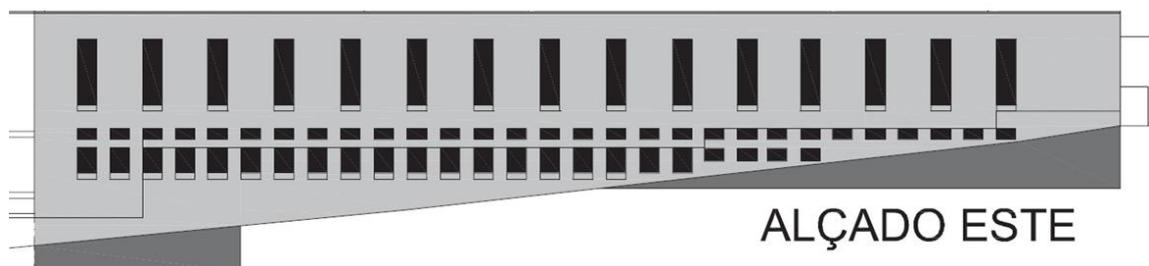


Figura 2.5 – Parte da envolvente exterior do alçado “Este” do edifício [18]

Relativamente à envolvente exterior “Este” do edifício, como tal demonstrado, o declive do passeio exterior tem um desnível acentuado, parte das fachadas exteriores das salas está enterrada no solo. Estes dados foram usados para a construção do modelo em estudo.

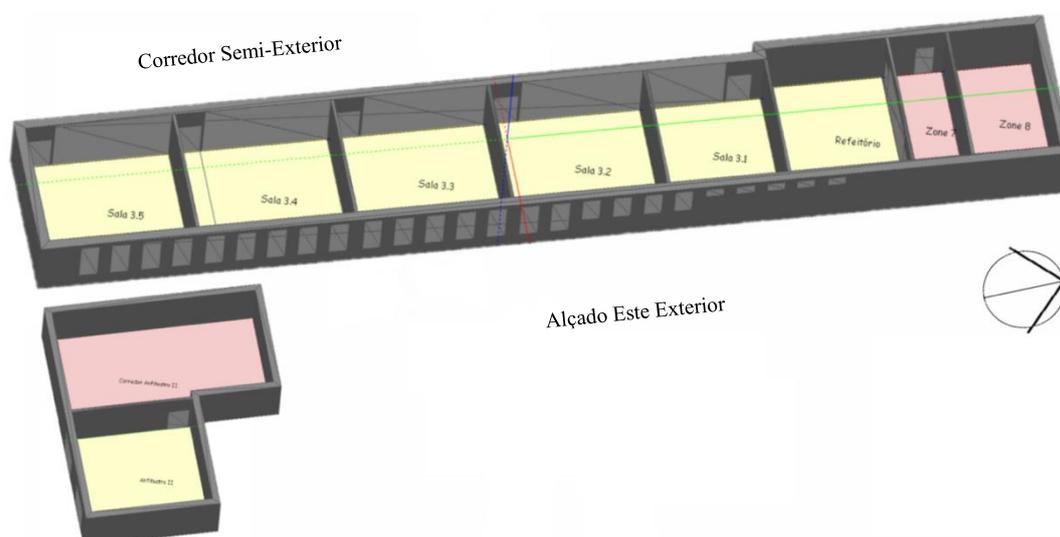


Figura 2.6 - Visualização parte do modelo geométrico DB do Piso 2 e 3

Tabela 2.1 – Características das salas e orientação dos elementos construtivos

Designação do espaço	Área de pavimento (m ²)	Pé direito (m)	Orientação das soluções construtivas			
			Norte	Sul	Oeste	Este
Sala 3.1	39,41	3,07	PI1	PI1	PSE	PE1
Sala 3.2	51,32	3,07	PI1	PI1	PSE	PE1
Sala 3.3	51,32	3,07	PI1	PI1	PSE	PE1
Sala 3.4	52,09	3,07	PI1	PI1	PSE	PE1
Sala 3.5	49,14	3,07	PI1	PE1	PSE	PE1
Sala 3.6	43,85	3,07	PI2	PI1	PI3	PE1
Anfiteatro II	73,11	3,25	PE2	PE1	PI3	PE2

Tabela 2.2 – Características dos elementos construtivos das envolventes

Descrição dos elementos construtivos		Transmissão Térmica (W/m ² .°C)	
Parede Exterior	Pano duplo de alvenaria de tijolo furado (PE1)	0,44	
	Blocos de Betão (PE2)	0,33	
Parede interior	Pano simples de tijolo furado 0,11 m (PI1)	1,67	
	PI1 + Cacifos de 0,60 m (PI2)	0,7	
	Pano simples de tijolo furado 0,15 m (PI3)	1,34	
Parede Semi-Exterior	PI3 + Cacifos de 0,60 m (PSE)	0,68	
Pavimento	Térreo (PAVT)	Ascendente	2,62
		Descendente	2,22
	Não térreo (PAVNT)	Ascendente	2,06
		Descendente	1,6
Porta		4,06	
Envidraçado Exterior	Vidro Simples 6 mm	5,74	
	Factor Solar		0,83
	Caixilharia Metálica sem corte térmico tipo giratória		

No geral, o tipo de construção das salas 3 é similar como se pode visualizar na tabela 2.1. Os aspetos mais relevantes são:

- Confinadas a Este pelo arruamento exterior e a Oeste por um corredor semi-exterior com contacto com o ar exterior;
- Sala 3.5 confinada a Sul pelo exterior e as restantes salas a Sul e Norte pelas salas seguintes;
- Pavimento não térreo (PAVNT) em contato com a sala Anfiteatro II da sala 3.5 e cerca de 25% da sala 3.4;
- Pavimento térreo (PAVT) nas restantes salas do piso 3 em contato com o solo;
- Cobertura do piso 3 é caracterizada como pavimento não térreo (PAVT);
- Envidraçados exteriores ao longo da envolvente Exterior Este (PE1);
- Porta em cada sala na fachada Oeste.

Relativamente à estrutura do Anfiteatro II:

- Confinada a Este e a Norte pelo solo por uma envolvente exterior de betão (PE2);
- Confinada a Sul pelo jardim do DEM e a Oeste por um corredor interior e casas-de-banho;
- Pavimento térreo (PAVT) em contato com o solo;
- Cobertura da sala é o pavimento não térreo (PAVNT) das salas do Piso 3;
- Portas de envidraçados exteriores ao longo da envolvente exterior Sul (PE1);
- Porta na fachada Oeste.

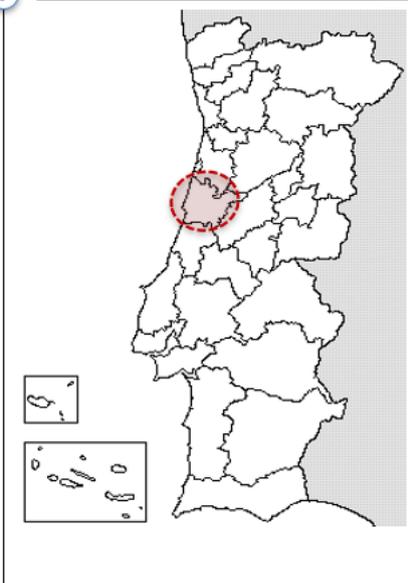
2.3. Critérios de projeto

2.3.1. Dados Climáticos

As necessidades dos sistemas de climatização são ditas em função das condições atmosféricas expectáveis. Na figura 2.7 representa-se as condições previstas de projeto recorrendo ao sistema nacional de certificação de Edifícios: Decreto-Lei 118/2013 de agosto [22] da Nomenclatura das unidades Territoriais para fins Estatísticos de nível III (NUTS III) [29] em que foi gerado um ficheiro climático para a modelação do projeto em que os resultados dependem dessa informação de entrada.

Anos Meteorológicos de Referência para simulação dinâmica versão 1.05 (13 fevereiro 2014)

Seleção por município: Coimbra



Zona climática

NUTS 3: Baixo Mondego
 Latitude: 40,3 °N (nominal)
 Longitude: 8,6 °W (nominal)
 Altitude: 67 m (referência)

Local específico

Município: Coimbra
 Altitude: 46 m

Dados climáticos

	Referência	Neste local
Estação de aquecimento		
Período:	6,3	6,3 meses
T média:	9,7	9,8 °C
Graus-dia:	1304	1283 °C
Estação de arrefecimento		
T média:	20,9	20,9 °C

preparar ficheiro
 EPW (formato EnergyPlus Weather)

Zonas de verão e inverno

V 2 I 1

LNEG Software para Políticas Públicas
 Sistema Nacional de Certificação de Edifícios
 Decreto-Lei 118/2013 de 20 agosto

Figura 2.7 – Condições atmosféricas previstas de projeto [22]

A estação de aquecimento (Inverno) decorre nos meses de outubro a maio e a estação de arrefecimento (Verão) decorre nos restantes meses (junho a setembro).

2.3.2. Controlo da temperatura e humidade interior

Para cálculo das necessidades energéticas, os valores de temperatura do ar interior capazes de satisfazer as exigências de conforto térmico são usados como referência de acordo com a portaria 17-A/2016 [16], compreendidas no intervalo de 20°C a 25°C, inclusive. Assim, as condições do ar interior consideradas de operação para temperatura em período de aquecimento é de 20°C e para temperatura em período de arrefecimento é de 25°C [5], e será alvo de análise dos resultados considerando o intervalo de temperatura usado como referência.

Relativamente à humidade do ar interior, não se prevê um controlo efetivo, apenas o resultante do tratamento térmico a que o ar é sujeito, uma vez que se considera suficiente para garantir valores de humidade do ar dentro de valores aceitáveis de conforto térmico, e será alvo de verificação na discussão de resultados.

2.3.3. Ganhos internos

2.3.3.1. Ocupação

A ocupação máxima a considerar em cada espaço foi determinada de acordo com a capacidade de lugares disponíveis em cada zona e a sua densidade e carga térmica de ocupação, informação apresentada na tabela 2.3. A sala 3.1 e Refeitório (3.6) são consideradas como salas de aula e são consideradas com ocupação idêntica às outras salas (com uma relação de áreas).

Neste tipo de atividade de sala de aula, todos os ocupantes são adultos, considerando uma área de *DuBois* de 1,8 m² e assumiu-se uma atividade metabólica tipo sedentária (1,2 met = 58,15 W/m²), tanto o docente da aula como os alunos. Cada ocupante na sala tem um valor de atividade média de 125,6 W, aproximadamente.

Tabela 2.3 – Ganhos internos de ocupação e equipamentos

Designação	Área (m ²)	Nº Lugares	Carga térmica Ocupação (W)	Densidade de ocupação (pessoa/m ²)	Carga térmica equipamentos (W)	Densidade equipamento (w/m ²)
Sala 3.1	39,41	31	3894	0,8	286	7,3
Sala 3.2	51,32	41	5150	0,8	286	5,6
Sala 3.3	51,32	41	5150	0,8	286	5,6
Sala 3.4	52,09	41	5150	0,8	286	5,5
Sala 3.5	49,14	41	5150	0,8	286	5,8
Sala 3.6	43,85	31	3894	0,7	286	6,5
Anfiteatro II	73,11	67	8416	0,9	286	3,9

2.3.3.1.1. Perfis de Ocupação

A ocupação a considerar em cada espaço foi determinada em termos de ocupação anual, a partir do calendário escolar do ano letivo 2018/2019 (ver anexo D). Para uma análise mais detalhada, realizou-se o levantamento da semana que apresenta maior taxa de ocupação das salas em estudo. Essa semana, ausente de feriados, realizou-se um levantamento da semana 22 a 28 de outubro de 2018, 1º Semestre. Uma vez que é fulcral fazer um estudo na situação mais desfavorável. Foi efetuado o levantamento de uma das salas 3 que serviu como modelo de taxa de ocupação para todas as outras, uma vez que estas têm taxas de ocupação idênticas, exceto o Anfiteatro II. Na sala Anfiteatro II também foi realizado um levantamento, sendo que a sua ocupação não é similar às outras salas. Ou seja, no geral a ocupação das salas 3 é máxima, enquanto que no Anfiteatro II tal não acontece (ver apêndice B).

Para a definição dos perfis de ocupação foi considerado que no mês de agosto o edifício se encontra fechado, tal como todos os fim-de-semanas e feriados foram tidos em conta para a simulação dinâmica. Nos meses de janeiro, junho e julho, uma vez que não são realizadas aulas, foi criado um tipo de perfil de ocupação onde se estimou uma ocupação máxima nesses meses de 50% das 9h até 18h, com uma 1 hora de almoço para o perfil das salas, considerando que são usadas para apresentações, palestras, reuniões, realização de exames e como sala de estudo.

Foram gerados 3 tipos de perfis de ocupação que serão usados na análise do estudo para comparação das cargas necessárias e avaliação dos consumos de energia - a modelação da percentagem de ocupação foi calculada em incrementos de 5% de hora em hora, para uma aproximação máxima:

- Perfil 1: Perfil com taxa de ocupação máxima das salas sem a consideração dos intervalos entre as aulas, e na hora de almoço desocupada;
- Perfil 2: Perfil com taxa de ocupação máxima das salas em consideração os intervalos (intervalo académico) de 15 minutos do início das aulas (desocupadas), e na hora de almoço desocupada;
- Perfil 3: Perfil para os meses de janeiro, junho e julho com uma taxa máxima de ocupação estimada de 50%, e na hora de almoço desocupada (figura 2.8).

Nas figuras 2.9 e 2.10 representam os perfis 1 e 2 das salas 3 e do Anfiteatro II, respetivamente.

De modo a contabilizar os intervalos no final de cada aula, modelou-se uma redução de ocupação nas horas dos intervalos no início de cada aula (ver figuras 2.9 e 2.10).



Figura 2.8 – Perfil 3 da taxa de ocupação máxima das salas para os meses janeiro, junho e julho

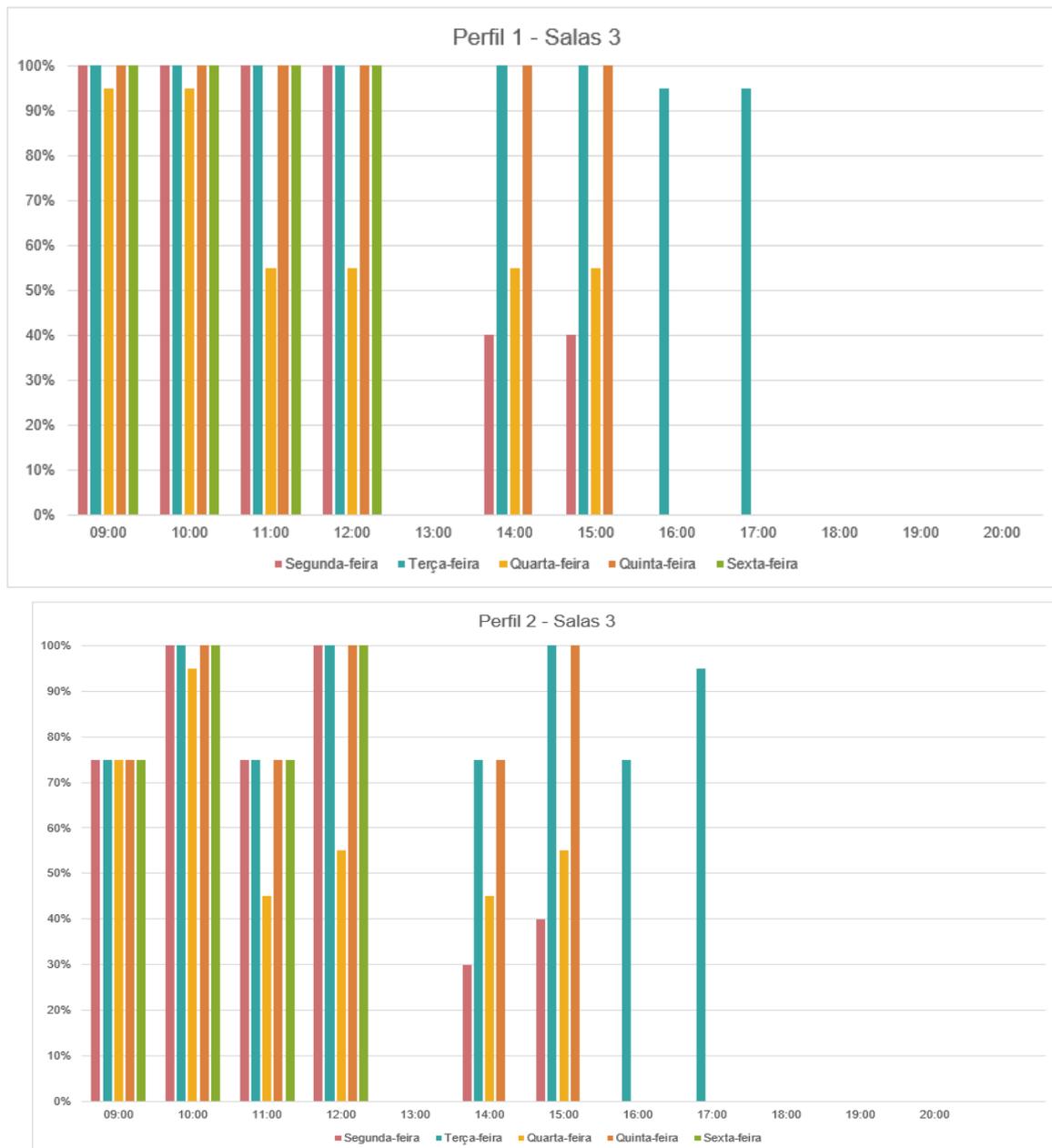


Figura 2.9 – Perfis da taxa de ocupação máxima da sala Anfiteatro

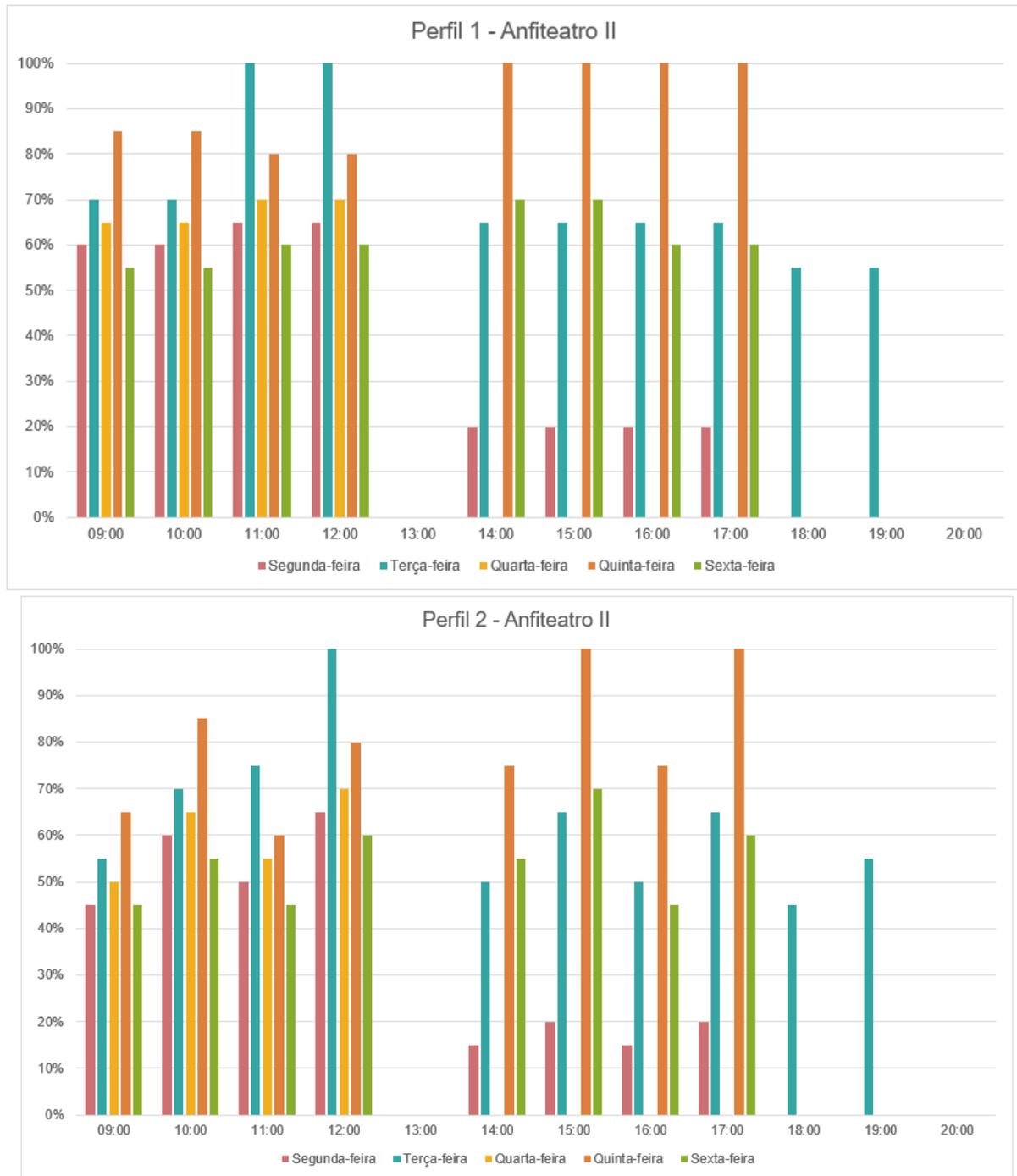


Figura 2.10 – Perfis da taxa de ocupação máxima da sala Anfiteatro II

2.3.3.2. Equipamentos

Em termos de equipamentos, durante a utilização da sala, foi calculado que um computador de trabalho gera potência de cerca de 36 W [21] e um projetor de aproximadamente 250 W (obtido no levantamento das características dos equipamentos existentes nas salas). Na tabela 2.3 também é apresentada a carga e densidade dos equipamentos.

2.3.3.2.1. Perfil de funcionamento dos equipamentos

Utilizou-se um perfil do equipamento computador como 100% de utilização durante o período de perfil de ocupação. No que diz respeito aos projetores estimou-se um perfil de utilização de 50%, uma vez que nem sempre no período do perfil de ocupação se encontra em funcionamento.

2.3.3.3. Iluminação

Os edifícios escolares exigem iluminação de alta qualidade, com impacto nos custos de energia, na saúde e produtividade. A iluminação é um dos maiores consumidores de energia, principalmente devido aos sistemas de iluminação nas salas de aula. Uma das soluções seria a utilização da iluminação natural durante as horas de luz solar e a utilização de luminárias mais eficientes [6].

Consultando o projeto de iluminação do edifício (ver anexo B), foi possível determinar o número e potência elétrica das luminárias de cada espaço. Determinou-se, deste modo, a densidade de iluminação em cada zona.

Todas as luminárias presentes são equipadas com lâmpadas fluorescentes tubulares com balastro de ferro magnético. As salas em estudo são equipadas com lâmpadas de 36 W. O refeitório, tendo um projeto de iluminação desigual, foi considerado com uma iluminação semelhante às restantes, tendo em contra as salas de aula. Os números de luminárias de iluminação dos quadros das salas foram desprezados para os cálculos.

Uma das intervenções que está prevista a ser efetuada são as alterações das luminárias para tecnologia LED - um tipo de luminária LED sem balastro de 19 W, de modo a que haja um consumo menor e com ganhos internos (ver tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Características de iluminação interior das salas e proposta de iluminação LED

Designação	Área (m ²)	Nº Luminárias	Luminárias fluorescentes		Luminárias LED	
			Carga total Iluminação (W)	Densidade Iluminação (W/m ²)	Carga total Iluminação (W)	Densidade Iluminação (W/m ²)
Sala 3.1	39,41	12	583,2	14,8	228	5,8
Sala 3.2	51,32	15	729	14,2	285	5,6
Sala 3.3	51,32	15	729	14,2	285	5,6
Sala 3.4	52,09	15	729	14	285	5,5
Sala 3.5	49,14	15	729	14,8	285	5,8
Sala 3.6	43,85	12	583,2	13,3	228	5,2
Anfiteatro II	73,11	16	777,6	10,6	304	4,2
Total			4860		1900	61%

Em termos de carga total de iluminação, a substituição para luminárias para LED, verifica-se uma redução de 61%, uma percentagem bastante significativa, que revela uma solução bastante eficiente e económica.

Posto isto, nas simulações foram considerados este tipo de iluminação LED, que será alvo de comparação das cargas térmicas e consumos.

2.3.3.3.1. Perfil e controlo da Iluminação artificial

A disponibilidade de iluminação artificial das salas segue os perfis de ocupação das respetivas salas, apresentados na secção 2.3.3.1.1. Quanto ao controlo da iluminação natural e artificial fez-se uma modelação do sombreamento dos envidraçados, atuando sobre as persianas de refletividade média interiores e exteriores das salas, rolos de meio opaco interiores do Anfiteatro II existentes, controlando deste modo a carga térmica solar e os níveis de iluminação e encadeamento. Nesta operação de dispositivos de sombreamento o controlo é executado por encandeamento (índice de brilho), algo que afeta a leitura no plano

das secretárias e do quadro. Assim, na modelação do edifício optou-se pelas recomendações da norma europeia EN 12464-1 [15] (ver secção 1.5 – tabela 1.4) e foram consideradas para uma situação desfavorável, que a existência de aulas a partir das 18h, o ambiente se encontrar noturno, assumiu-se um valor de iluminância entre os valores de 300 a 500 lux. Foi assumido um valor de 500 lux, uma vez que pela recomendação de projeto de iluminação: Salas de aula para aulas noturnas e educação de adultos. Este valor de iluminância não pode exceder os 650 lux. iluminâncias de 500 lux para um tipo de espaço de salas de aula. Relativamente ao índice de encandeamento, foi utilizado o valor de índice máximo de 19.

O acionamento da iluminação artificial visa a manutenção de 500 lux e efetua-se em 3 incrementos, uma vez que as salas de aula têm 3 circuitos independentes de luminárias dispostas paralelamente à fachada com envidraçados.

O tipo de controlo que foi assumido no modelo baseia-se no efeito da iluminação natural conforme um dos métodos de controlo do DB (ver tabela 2.7) [28].

Tabela 2.7 – Controlo de iluminação [28]

Iluminação natural	Fração das luzes acesas
0 – 166,67 lux	1
166,67 – 333,33 lux	2/3
333,33 – 500 lux	1/3
> 500 lux	0

Este tipo de controlo permite ativar e/ ou desativar a iluminação de acordo com a disponibilidade da luz natural do dia em etapas, neste caso, em 3 pontos de medição associados a 3 circuitos independentes de luminárias, apesar de não corresponder à realidade, este tipo de controlo é uma aproximação da ação do interveniente.

2.3.4. Sistemas de Apoio

Uma das motivações deste projeto é também o aproveitamento dos sistemas de apoio sobredimensionadas. Estes sistemas do DEM são constituídos por uma caldeira a gás e dois chillers.

Em termos de perfil de funcionamento, estas funcionam de acordo com a operação de aquecimento ou arrefecimento.

2.3.5. Sistema de climatização

Originalmente parte do DEM é ventilado naturalmente e com aquecimento centralizado por um sistema de radiadores por uma caldeira a gás do edifício, cujo programação de aquecimento é controlada centralmente para o edifício e mantida por válvulas de radiador termostático locais. Um dos problemas que este sistema apresentava era o descontrolo e funcionamento contínuo na programação predefinida de todo o edifício, independentemente da ocupação de todas as zonas.

Com a entrada em vigor dos regulamentos da QAI, é cada vez mais obrigatório o cumprimento de requisitos mínimos em termos de qualidade de ar interior.

Para um controlo mais preciso do modelo impôs-se que o piso 4 do edifício se encontrasse como zona climatizada; e as zonas 1 e 2, bem como o corredor do Anfiteatro II como zonas não climatizadas.

2.3.5.1. Novo Sistema de climatização

O novo sistema de climatização que está previsto é um sistema de AVAC (Aquecimento, ventilação e ar condicionado) de um sistema de funcionamento de 4 tubos existente nas instalações do departamento, de água quente (aquecimento) e água fria (arrefecimento) que seria beneficiante deste tipo de aproveitamento, uma vez que as capacidades do sistema estão sobredimensionadas.

A implementação de equipamentos da unidade ventilo-convetores foi então decidida a ser implementada uma vez que seria a solução mais prática e eficiente para este projeto.

No anexo A encontra-se parte do projeto previsto de Instalações e Equipamentos Mecânicos/AVAC, para as salas de aula do Piso 3 e auditório do Piso 2 do Departamento de

Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra do projetista Nuno Fernandes da empresa MECLOAD, engenharia de projetos e instalações técnicas [23].

Os ventilo-convetores, assegurarão a climatização das diversas salas. Estas unidades para além das baterias de água fria e quente, são providas de um ventilador. O controlo e comando destas unidades receberá um sinal enviado pela sonda colocada na zona.

Na figura 2.11 apresenta-se as especificações dos ventilo-convetores da entidade *Trane* previstos.



DF - Unidades de alta pressão estática
TIPO DE MOTOR: Motor EC
Esquerda - Filtro Std

Condições de funcionamento em arrefecimento

Velocidade: 1 v 2 v ... 9 v 10 v
Pressão estática disponível Pa: 30
Temp. entrada ar (BS) °C: 25,0
Humidade do ar %: 50
Temp. entrada água °C: 7,0

Condições de funcionamento em aquecimento

Velocidade: 1 v 2 v ... 9 v 10 v
Pressão estática disponível Pa: 30
Temp. entrada ar (BS) °C: 20,0
Temp. entrada água °C: 80,0

Modelo	Velocidade	Total [W]	Sensível [W]	Lp [dB(A)]	Lw [dB(A)]	Lpod	Lwod	Lpir	Lwir	Água (l/s)	Água (kPa)	Água (LWT°C)	Air (m³/h)	Ar INS (°C)	Mot. Watt
Arrefecimento															
DFE 4P-341LX	10,0 V	5964	4653	56	65	49	58	56	65	0,292	15,2	12	1310	14	141
DFE 4P-341LX	9,0 V	5906	4602	56	65	48	57	55	64	0,288	14,9	12	1289	13,9	131
DFE 4P-341LX	8,0 V	5733	4450	55	64	48	57	55	64	0,279	14	12	1230	13,8	116
DFE 4P-341LX	7,0 V	5373	4139	54	63	46	55	53	62	0,261	12,4	12	1118	13,6	95
DFE 4P-341LX	6,0 V	4969	3792	53	62	45	54	52	61	0,241	10,8	12	996	13,3	77
DFE 4P-341LX	5,0 V	4474	3376	50	59	43	52	49	58	0,217	8,9	12	859	12,9	61
DFE 4P-341LX	4,0 V	3969	2960	47	56	40	49	46	55	0,192	7,1	12	729	12,6	47
DFE 4P-341LX	3,0 V	3277	2412	45	54	38	47	44	53	0,158	5	12	571	12,1	35
DFE 4P-341LX	2,0 V	2438	1770	45	54	38	47	44	53	0,118	3	12	401	11,5	25
Aquecimento															
DFE 4P-341LX	10,0 V	6256		56	65	49	58	56	65	0,075	3,7	60	1310	34,2	141
DFE 4P-341LX	9,0 V	6193		56	65	48	57	55	64	0,074	3,7	60	1289	34,3	131
DFE 4P-341LX	8,0 V	6006		55	64	48	57	55	64	0,072	3,5	60	1230	34,5	116
DFE 4P-341LX	7,0 V	5656		54	63	46	55	53	62	0,068	3,1	60	1118	35,1	95
DFE 4P-341LX	6,0 V	5267		53	62	45	54	52	61	0,063	2,7	60	996	35,7	77
DFE 4P-341LX	5,0 V	4788		50	59	43	52	49	58	0,057	2,3	60	859	36,6	61
DFE 4P-341LX	4,0 V	4307		47	56	40	49	46	55	0,051	1,9	60	729	37,6	47
DFE 4P-341LX	3,0 V	3671		45	54	38	47	44	53	0,044	1,4	60	571	39,1	35
DFE 4P-341LX	2,0 V	2883		45	54	38	47	44	53	0,034	0,92	60	401	41,4	25

Figura 2.11 – Especificação dos ventilo-convetores considerados para o estudo

Estas especificações serão alvo de análise das cargas e consumos comparativamente aos resultados, de modo a compreender se este modelo de unidade será adequado para este caso de estudo.

2.3.5.2. Infiltrações/ventilação natural

A ventilação natural funciona com recurso às ações naturais do vento e a diferença de temperatura é baseada em soluções que permitam o escoamento natural do ar nos espaços interiores do edifício, através de aberturas permanentes ou controláveis, sendo que o caudal de ar novo nos espaços está dependente dos efeitos naturais e da atuação dos ocupantes. A troca de ar só é possível através de janelas (ventilação) e lacunas (infiltrações) nas envolventes do edifício, no entanto os valores das infiltrações apresentam uma grande incerteza.

Para verificação do valor mínimo de taxa de renovação de ar de infiltração, foi definido pela portaria nº 349-B/2013 do diário da república [29] para efeitos de cálculo, que não deverá ser utilizado um valor de Rph inferior a $0,4 \text{ h}^{-1}$.

Quando a ventilação mecânica se encontra em funcionamento, assume-se que as salas se encontram em sobrepressão pelo que não irão ocorrer infiltrações nos períodos de funcionamento.

Para uma modelação dos sistemas só com aquecimento e sem arrefecimento (situação atual), mantém-se o valor de infiltração assumido enquanto os níveis de concentração de CO_2 estiverem abaixo do limite de proteção para ventilação natural e as 3 rph se for superior.

2.3.5.3. Ventilação mecânica

Na determinação do caudal de ar novo a insuflar em cada espaço [12], é importante ter em consideração a eficiência do sistema de ventilação. Neste trabalho, os valores de eficácia têm o valor de 1 (Insuflação e extração junto ao teto e na mesma parede) para os diferentes métodos de ventilação.

Utilizou-se como folha de cálculo e manual de apoio do laboratório nacional de engenharia civil [27] destinada a determinar o caudal mínimo de ar novo de cada espaço de acordo com o método analítico definido no ponto 2 da portaria 353-A/2013 [12]. De forma complementar, também foi determinado o valor mínimo de caudal de ar novo pelo método prescritivo.

Como mencionado na secção 2.3.3.1 o tipo de atividade e o espaço, o caudal mínimo de ar novo pelo método prescritivo é determinado em função da carga poluente devida à ocupação a prever para cada espaço é de $24 \text{ m}^3/(\text{hora.ocupante})$ e o caudal mínimo de ar novo determinado em função da carga poluente devida ao edifício é de $3 \text{ m}^3/(\text{hora.m}^2)$.

Usando o método analítico para cálculo do caudal mínimo de ar novo, é necessário que o critério seja aplicado pela evolução temporal da concentração de CO_2 previsível no espaço (ver secção 1.3.1). O valor do caudal de ar novo é obtido de forma iterativa, para que a concentração média interior de CO_2 durante a ocupação não exceda os limiares de proteção (1250 ppm), aplicáveis ao espaço.

Realizou-se um estudo para o caudal mínimo de ar novo para o período de maior taxa de ocupação dos perfis descritos semanais (ver secção 2.3.3.1). Com um limiar de proteção CO_2 de 1250 ppm conforme o RECS [12], específica para o caso de sistemas com ventilação mecânica. No apêndice B encontram-se as tabelas dos resultados dos 3 tipos de perfil descritos.

A tabela 2.8 apresenta-se os valores de caudal mínimo de ar novo para cada zona. Utilizou-se, para cada espaço, o maior dos caudais de ar novo determinado por ambos os métodos, método prescritivo (método baseado na ocupação e componentes do edifício) e o método analítico para o dia mais desfavorável da semana.

Tabela 2.8 – Caudais de ar novo a insuflar, segundo a Portaria nº 353-A/2013 [12]

Designação	Nº Ocupantes	Método prescritivo	método analítico						
			Perfil 1				Perfil 2		
			QAN Mín. (m^3/h)	QAN Mín. (m^3/h)	Variação (%)	CO_2 máx. (ppm)	QAN Mín. (m^3/h)	Variação (%)	CO_2 máx. (ppm)
Sala 3.1	31	744	700	-6%	1289	604	-19%	1431	11%
Sala 3.2	41	984	927	-6%	1288	799	-19%	1430	11%
Sala 3.3	41	984	927	-6%	1288	799	-19%	1430	11%
Sala 3.4	41	984	926	-6%	1289	799	-19%	1431	11%
Sala 3.5	41	984	929	-6%	1286	801	-19%	1427	11%
Sala 3.6	31	744	697	-6%	1294	599	-19%	1437	11%
Anfiteatro II	67	1608	1382	-14%	1374	1195	-26%	1527	11%

Utilizou-se o método analítico para se verificar a diferença do caudal mínimo necessário com o método prescritivo para as salas conseqüente com a taxa de ocupação previstas.

Entre o método prescritivo e o método analítico do perfil 1, este sem a consideração dos intervalos de 15 minutos entre as aulas de 2 horas:

- Nas salas 3 a diferença do caudal de ar novo mínimo é insignificante, cerca de 6%, tal como o valor máximo de pico de concentração de CO₂ (limiar de proteção de 1250 ppm), isto se confirma porque maioritariamente as salas têm taxas de ocupação máximas de 100%;
- No anfiteatro II, como o perfil de taxa de ocupação tem uma maior variação de ocupação, visto isto, a diferença do caudal de ar novo mínimo já começa a ter algum significado, cerca de 14%, mesmo tendo um maior valor máximo de pico de concentração de CO₂.

Entre o método prescritivo e o método analítico do perfil 2, este com a consideração dos intervalos de 15 minutos entre as aulas de 2 horas:

- Nas salas 3 e no Anfiteatro II existe uma diferença já relativamente significativa do caudal de ar novo mínimo, cerca de 19% e 26%, mesmo em comparação pelo método analítico do perfil 1, cerca de 14%, e os picos de concentração de CO₂ estão minimamente mais altos do limiar de proteção da concentração de CO₂.
- A concentração de CO₂ entre o perfil 1 e 2 têm um acréscimo de 10%;
- Notar que esta redução e acréscimo é em função dos intervalos académicos das aulas.

Nas simulações foram considerados os seguintes critérios de simulação:

- Caudal mínimo de ar novo pelo método prescritivo;
- Caudal mínimo de ar novo pelo método analítico;
- Sonda de concentração de CO₂ para controlo do caudal de ar novo.

A implementação de uma sonda de concentração de CO₂ poderá ser uma solução eficiente, de modo a minimizar a energia de ventilação desnecessária, uma vez que a ocupação diária poderá ser bastante variável.

2.4. Modelação de sistemas de climatização

Na introdução dos dados para a modelação das condições das salas de aulas pelo programa de simulação DesignBuilder, assumiu-se alguns sistemas modelados do DB para este estudo:

- i) ventilação natural, sem qualquer sistema de aquecimento e arrefecimento;
- ii) sistema de aquecimento central por radiadores (sistema presente);
- iii) Sistema CAV com caudal constante;
- iv) Sistema VAV com caudal variável.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Descritas as metodologias adotadas e os materiais utilizados dos modelos validados, realizaram-se as simulações e verificações de regulamentos de maneira a obter os dados que permitam tirar conclusões sobre os objetivos propostos, nomeadamente sob o ponto de vista do conforto térmico e visual, qualidade do ar interior, cargas térmicas e consumos.

Neste capítulo apresentam-se:

- Verificação dos projetos de substituição das luminárias;
- Análise de vários tipos de perfil pelo método analítico pela folha de calculo (SCE);
- Percentagem de horas com concentrações de CO₂ acima de 1250 ppm (2250 mg/m³);
- Percentagem de horas com temperaturas abaixo (20°C) e acima (25°C) da temperatura operativa para períodos com ocupação;
- Valores de humidade relativa do ar interior para verificação dos valores aceitáveis de conforto térmico, com ventilação mecânica;
- Índices de Conforto térmico PMV e PPD pelo programa DB;
- Análise das cargas térmicas necessárias hora a hora das salas relativamente às especificações das unidades ventilo-convetores previstas; (períodos das semanas com maiores cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento);
- Potência máxima e mínima anual para aquecimento, arrefecimento e ventilação;
- Consumo anual total, para aquecimento, arrefecimento e ventilação.

3.1. Iluminação

De modo a encontrar uma solução para reduzir os gastos energéticos de energia elétrica e diminuir a contribuição do calor gerado pelas luminárias na carga de arrefecimento, recomenda-se ajustar a intensidade de iluminação para um valor médio necessário de iluminação pelo regulamento da portaria nº 17-A/2016 [16] tendo em conta a exigência da iluminação (ver secção 1.5) em que os valores máximos admissíveis de iluminação não poderão exceder em mais de 30% dos valores do regulamento.

Na tabela 3.1 e 3.2 apresenta-se uma proposta de iluminação em função da intensidade de iluminação (lux) para as luminárias fluorescentes (situação atual) e para as luminárias LED previstas, respetivamente.

Tabela 3.1 – Proposta de Iluminação Fluorescente

Luminárias fluorescentes											
Designação	Área (m ²)	Nº Luminárias	Cada luminária	Iluminação máxima recomendada	Iluminação recomendada	Iluminação total proposta			Carga total Iluminação atual	Carga total Iluminação proposta	Variação (%)
			3350 lm	650 lux	500 lux	Nº Luminárias necessárias	Nº Luminárias (unidade)	Lux	Variação (%)	(W)	
Sala 3.1	39,41	12	85	1020	5,9	6	510	-50%	583,2	291,6	-50%
Sala 3.2	51,32	15	65	975	7,7	8	520	-47%	729	388,8	-47%
Sala 3.3	51,32	15	65	975	7,7	8	520	-47%	729	388,8	-47%
Sala 3.4	52,09	15	64	960	7,8	8	512	-47%	729	388,8	-47%
Sala 3.5	49,14	15	68	1020	7,4	8	544	-47%	729	388,8	-47%
Sala 3.6	43,85	12	76	912	6,6	7	532	-42%	583,2	340,2	-42%
Anfiteatro II	73,11	16	46	736	10,9	11	506	-31%	777,6	534,6	-31%
Total			Média	975		Média	520	-47%	4860	2721,6	-44%

Verifica-se que:

- A intensidade de iluminação excede o valor da recomendação máxima pelo regulamento, sendo que este fator está sobredimensionado, que não é necessária uma intensidade tão elevada;
- O número de luminárias reduzida para cerca de metade para as salas 3, e 1/3 para o Anfiteatro II;
- Carga total de iluminação com uma redução significativa de 44%.

Conclui-se que o projeto de iluminação atual não é uma solução que se deve permanecer, mas ser substituída. A proposta de reduzir do número de luminárias nas salas é uma das soluções a ponderar, uma vez que cumprirá as recomendações regulamentadas e uma redução bastante significativa na carga de iluminação, e conseqüentemente uma redução nos custos.

Tabela 3.2 – Proposta de Iluminação LED

Luminárias LED												
Designação	Área (m2)	Nº Luminárias	Cada luminária	Iluminação máxima recomendada	Iluminação recomendada	Iluminação total proposta			Carga total Iluminação prevista	Carga total Iluminação proposta	Variação (%)	
			100 lm/W	recomendada	500 lux	Nº Luminárias necessárias	Nº Luminárias (unidade)	Lux	Variação (%)	(W)		(W)
			1900 lm	650 lux	500 lux							
Sala 3.1	39,41	12	48	576	10,4	11	528	-8%	228	209	-8%	
Sala 3.2	51,32	15	37	555	13,5	14	518	-7%	285	266	-7%	
Sala 3.3	51,32	15	37	555	13,5	14	518	-7%	285	266	-7%	
Sala 3.4	52,09	15	36	540	13,9	14	504	-7%	285	266	-7%	
Sala 3.5	49,14	15	39	585	12,8	13	507	-13%	285	247	-13%	
Sala 3.6	43,85	12	43	516	11,6	12	516	0%	228	228	0%	
Anfiteatro II	73,11	16	26	416	19,2	20	520	25%	304	380	25%	
Total			Média	555		Média	518	-7%	1900	1862	-2%	

Nesta proposta da iluminação por tecnologia LED verifica-se que:

- A iluminação LED prevista está dentro do intervalo da recomendação, exceto o Anfiteatro II que está abaixo do valor da recomendação, mesmo assim é considerado aceitável;
- O número de luminárias com uma redução mínima, exceto o Anfiteatro II que devia-se aumentar o número de luminárias para cumprir a recomendação;
- Carga total de iluminação com uma redução de cerca de 2%, valor muito insignificativo.

Conclui-se que o projeto de iluminação previsto é uma boa solução para implementar, sendo que pode ser melhorado em termos de conforto visual. Com uma redução mínima de luminárias nas salas 3, e um aumento das luminárias do Anfiteatro II será uma proposta a ponderar.

Para efetuar essa instalação, foi verificado se as luminárias propostas e previstas cumpriam ou não o atual regulamento (ver secção 1.5).

Para o caso presente, em que não existe qualquer sistema de controlo, os valores apresentados na tabela 1.5 tomam valor 1. Pela equação (1.4), a iluminação média mantida (lux) assumiu-se uma média dos valores da iluminação pelas recomendações da norma europeia EN 12464-1 [15] para um tipo de espaço de salas de aula (ver tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Verificação dos valores de DPI [16] e variação das cargas das luminárias LED

Designação	Área (m ²)	Luminárias fluorescentes	Luminárias LED				Luminárias LED		Luminárias LED	
		Proposta	Prevista		Proposta		Prevista		Proposta	
		Carga total Iluminação (W)	Carga total Iluminação (W)	Variação (%)	Carga total Iluminação (W)	Variação (%)	Densidade Iluminação (W/m ²)	DPI [(W/m ²)/100 lux]	Densidade Iluminação (W/m ²)	DPI [(W/m ²)/100 lux]
Sala 3.1	39,41	291,6	228	-22%	209	-28%	5,8	1,2	5,3	1,1
Sala 3.2	51,32	388,8	285	-27%	266	-32%	5,6	1,1	5,2	1
Sala 3.3	51,32	388,8	285	-27%	266	-32%	5,6	1,1	5,2	1
Sala 3.4	52,09	388,8	285	-27%	266	-32%	5,5	1,1	5,1	1
Sala 3.5	49,14	388,8	285	-27%	247	-36%	5,8	1,2	5	1
Sala 3.6	43,85	340,2	228	-33%	228	-33%	5,2	1	5,2	1
Anfiteatro II	73,11	534,6	304	-43%	380	-29%	4,2	0,8	5,2	1
Total		2721,6	1900	-30%	1862	-32%				

Verificou-se que:

- Pelo regulamento as luminárias de tecnologia LED a instalar cumprem os valores máximos exigidos pelo DPI;
- Comparativamente os valores das cargas de iluminação da prevista e proposta das luminárias fluorescentes, apresentam-se com uma diferença de 2%, que se considera como desprezável;

Conclui-se que a melhor solução eficiente e económica será, tanto a prevista como a proposta das luminárias LED a instalar. Escolheu-se a iluminação prevista LED para as simulações, uma vez que o projeto está em vigor.

Mesmo assim, verificou-se através das simulações, para o dia mais desfavorável, terça-feira, para obter as maiores cargas térmicas que decorrem no ano, a influência que poderá ter nas cargas térmicas das salas.

Tabela 3.4 – Cargas de arrefecimento para o dia mais desfavorável das propostas de iluminação

Designação	Carga de arrefecimento [KW]						
	Iluminação Fluorescente atual	Iluminação Fluorescente proposta	Variação (%)	Iluminação LED prevista	Variação (%)	Iluminação LED proposta	Variação (%)
Sala 3.1	4,21	4,04	-4,0%	3,99	-5,2%	3,97	-5,7%
Sala 3.2	5,5	5,49	-0,2%	5,5	0,0%	5,5	0,0%
Sala 3.3	5,77	5,76	-0,2%	5,77	0,0%	5,77	0,0%
Sala 3.4	6,12	6,11	-0,2%	6,12	0,0%	6,12	0,0%
Sala 3.5	6,26	6,24	-0,3%	6,24	-0,3%	6,24	-0,3%
Sala 3.6	3,95	3,82	-3,3%	3,74	-5,3%	3,74	-5,3%
Anfiteatro II	7,78	7,76	-0,3%	7,74	-0,5%	7,75	-0,4%
Total:	39,59	39,22	-0,9%	39,1	-1,2%	39,09	-1,3%

Em termos de cargas térmicas, a iluminância poderá ser afetada pelo calor libertado durante a utilização destas.

Verificou-se que com as supostas alterações da iluminância, as variações são mínimas, até mesmo nulas. Podemos afirmar que basicamente não irá ter influência nas cargas térmicas de arrefecimento. De notar que com a aplicação das propostas de iluminância tem-se uma redução de cerca de 1% nas cargas térmicas.

A motivação desta alteração realça-se nas reduções das cargas de potências de iluminação.

3.2. Qualidade do ar Interior

3.2.1. Método analítico

Para auxiliar a compreensão da importância do método analítico na qualidade do ar interior, apresenta-se através de gráficos, os resultados para os diversos dias, da situação mais desfavorável e favorável dos perfis de ocupação lecionados.

Para uma análise graficamente das salas 3, foi escolhida a sala com maior dimensão, a sala 3.4, uma vez que todas elas são similares em termos de caudal de ar novo e na evolução temporal graficamente.

Realizou-se uma comparação para a situação mais desfavorável, para um caudal mínimo de 926 m³/h do perfil 1, sem a consideração dos intervalos, e um caudal mínimo de 799 m³/h do perfil 2, com a consideração dos intervalos (ver figura 3.1).

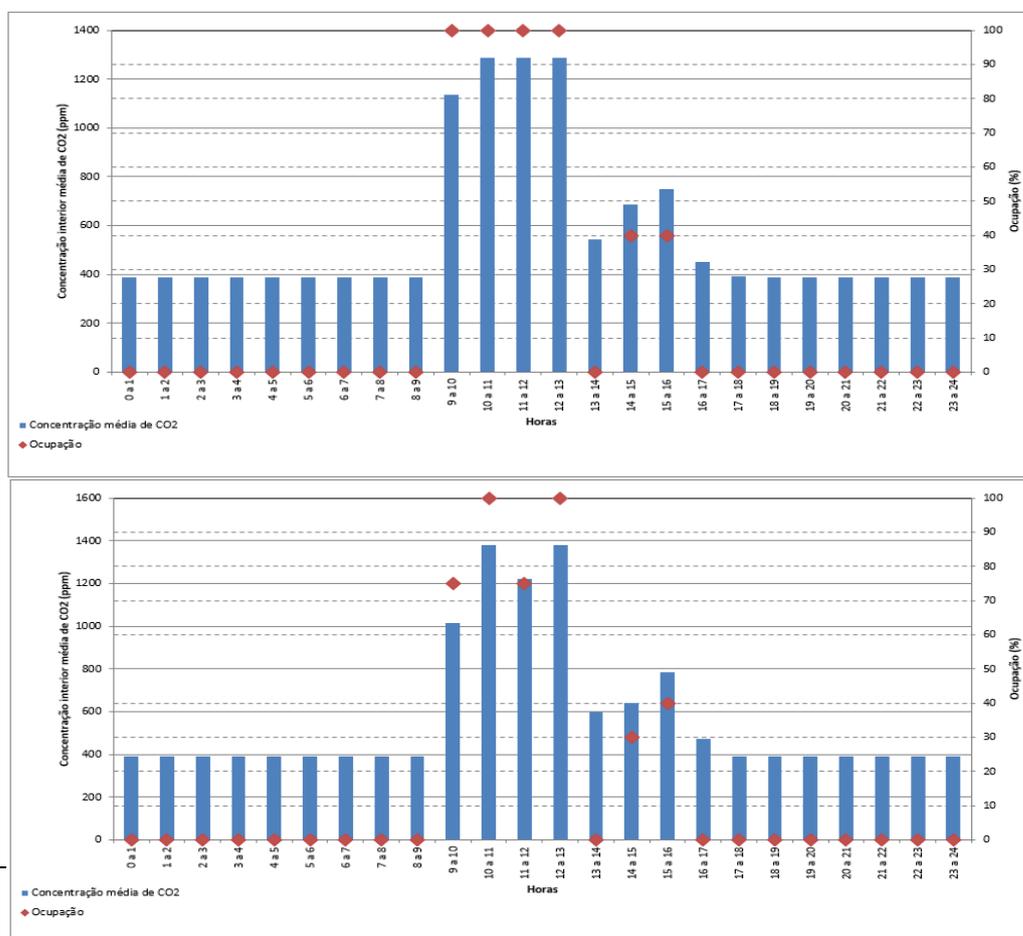


Figura 3.1 – Evolução temporal da concentração de CO₂ a) perfil 1 b) perfil 2

3.3. Cargas térmicas

Tendo em conta que o software DesignBuilder não permite a modelação de pontes térmicas, foi posteriormente incrementada uma majoração global, em 5%, das necessidades de aquecimento do edifício de acordo com a Portaria 17-A/2016 [16].

Tabela 3.5 – Cargas térmicas das salas a climatizar

Perfil 1	Carga de Arrefecimento											
	Designação	Carga de Aquecimento [KW]	majoração 5%	[KW]								
Segunda				Carga Sensível [KW]	Terça	Carga Sensível [KW]	Quarta	Carga Sensível [KW]	Quinta	Carga Sensível [KW]	Sexta	Carga Sensível [KW]
Sala 3.1	1,74	1,83	3,91	2,04	3,99	2,16	3,6	1,84	3,96	2,12	3,87	2
Sala 3.2	2,51	2,64	5,41	2,93	5,5	3,01	5,12	2,8	5,43	2,95	5,2	2,87
Sala 3.3	2,66	2,79	5,68	3,19	5,77	3,28	5,41	3,07	5,71	3,22	5,48	3,14
Sala 3.4	2,78	2,92	6,02	3,49	6,12	3,58	5,76	3,37	6,06	3,52	5,82	3,44
Sala 3.5	2,47	2,59	6,14	3,77	6,24	3,88	5,89	3,65	6,18	3,82	5,96	3,72
Sala 3.6	2,05	2,15	3,61	1,85	3,74	1,97	3,32	1,66	3,7	1,93	3,58	1,81
Anfiteatro II	3,16	3,32	5,17	2,73	7,74	3,92	5,51	2,88	7,5	3,91	4,53	2,7
Total:	17,37	18,24	35,94		39,1		34,61		38,54		34,44	

Erro! A origem da referência não foi encontrada.

4. [CONCLUSÕES]

[REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS]

[1] - Chenari B., Lamas F. B., Gaspar A. R., da Silva M. G., “Simulation of Occupancy and CO₂-based Demand-controlled Mechanical Ventilation Strategies in na Office Room Using EnergyPlus”, *Enrgy Procedia*, Volume 113, maio 2017

[2] – Bernardo H., Antunes C. H., Gaspar A. R., Pereira L.D., da Silva M. G., “An approach for energy performance and indoor climate assessment in a Portuguese school building”, *sustainable Cities and Society*, Volume 30, Abril 2017

[3] - Sait H.H., “Auditing and analysis of energy consumption of an educational building in hot and humid área”, *Energy Conversion and Management*, 66 (2013)

[4] - Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout C., “A review on buildings energy consumption information”, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 3, 2008

[5] - Zuhaib S., Manton R., Griffin C., Hajdukiewicz M., Keane M. M., Goggins J., “An Indoor Environmental Quality (IEQ) assessment of a partially-retrofitted university building“, *buiding and Environment*, Volume 139 (2018)

[6] - Mihai T., Iordache V., “Determining the indoor environment quality for an educational building”, *Energy Procedia*, 89 (2016)

[7] - Fanger, P. O., “Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering”, *Mc Graw-Hill*, 1970.

[8] - Jung W., Jazizadeh F., “Comparative assessment of HAVC control strategies using personal termal Comfort and sensitivity models”, *Building and Environment*, Volume 158, julho 2019

[9] - Fabi V., Andersen R., Corgnati S., “Accounting for the uncertainty related to building occupants with regards to visual comfort: a literature survey on drivers and models”, *Buildings*, 6 (2016)

[10] - Okochi G. S., Yao Y., “A review of recent developments and technological advancements of variable-air-volume (VAV) air- conditioning systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 59, junho 2016

[11] - Kapalo P., Domnita F., Lojkovics J., “Methodology for calculating the fresh air ventilation airflow rate based on CO2 concentration”, *Pollack Period.*, 9 (2014)

[12] – Portaria nº 353-A/2013 de 4 de dezembro. “Diário da República nº 235 – I Série”. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. Lisboa.

[13] - ASHRAE, “ANSI/ASHRAE 55:2013 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, Ashrae, Atlanta, GA (2013)

[14] -EN15251, “Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings – Addressing Indoor air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics”, English version, 2007

[15] – EN 12464-1:2002 (E). “Light and lighting – Lighting of work places – Part 1: Indoor work places”. Comité Europeu de Normalização – CEN, Bruxelas – Bélgica

[16] – Portaria nº 17-A/2016 de 4 de fevereiro. “Diário da República nº 24 - 1º série”. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. Lisboa.

[17] - Universidade de Coimbra (2019): “40 anos das Engenharias na UC”.
Acedido em 21 de julho de 2019, em:
https://www.uc.pt/fctuc/dem/40_anos_das_Engenharias_na_UC

[18] – Bettencourt, A.A.F. (2012), “O processo de projecto como prenúncio de sustentabilidade, análise de um conjunto de instalações do ensino superior da década de noventa do século XX – Volume III”, Caso de estudo 4 – Departamento de Engenharia mecânica. Departamento de Arquitetura, Faculdade de ciências e tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

[19] – Raimundo, A.M.M., “Propriedades térmicas dos elementos construtivos dos edifícios”. Curso de formação especializada no âmbito do SCE, Sistema nacional de certificação energética e da qualidade do Ar Interior nos Edifícios. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra

[20] – Santos, C.A. Pina dos e Matias, L. M. Cordeiro. Coeficiente de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios – ITE 50. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 2006.

[21] – Hosni and Beck (2008), “Nonresidential cooling and heating load calculations”. 2009 ASHRAE Handbook – Fundamentals.

[22] – Decreto-Lei 188/2013 de 20 agosto – Sistema Nacional de Certificação de Edifícios – SCE, Lisboa: Diário da República, 2013.

[23] – Fernandes, N. (2019), “Projecto de Instalações e Equipamentos Mecânicos/AVAC, para as salas de aulas do Piso 3 e Auditório do Piso 2 do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra”, MECLOAD, Engenharia de Projectos e Instalações Técnicas, Coimbra.

[24] – DesignBuilder, Software, “Welcome to DesignBuilder v3.4”, Conteúdo - DesignBuilder Software Limited (2002), London, Reino Unido, em: <https://designbuilder.co.uk/helpv3.4/>

[25] – Altensis, 2015, “Serviços: Software DesignBuilder”, Altensis İnşaat Enerji San. ve Tic. Ltd. Şti, Istanbul, turquia, Acedido em 10 de Agosto de 2019 em: <https://www.altensis.com/en/services/designbuilder-software/>

[26] – Weather Spark (2019), “Condições meteorológicas médias em Coimbra, Portugal”, Acedido em 27 de julho de 2019, em: <https://pt.weatherspark.com>”

[27] – Pinto, Armando (2013-12-10), “Aplicação LNEC para determinar o caudal mínimo de ar novo de acordo com o método analítico do RECS V01B”, Laboratório Nacional de Engenharia civil, Lisboa.

[28] - DesignBuilder, “Building Models: Lighting Control”, Conteúdo - DesignBuilder Software Limited (2002), London, Reino Unido, em: https://designbuilder.co.uk/helpv3.4/#_Lighting_control.htm

[29] – Portaria nº 353-B/2013 de 29 de novembro. “Diário da República nº 232 – I Série”. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social. Lisboa

[30] – Agência Portuguesa do Ambiente, ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional “Qualidade do Ar em espaços interiores- Um guia Técnico” -Amadora, janeiro de 2009, Portugal

ANEXO A

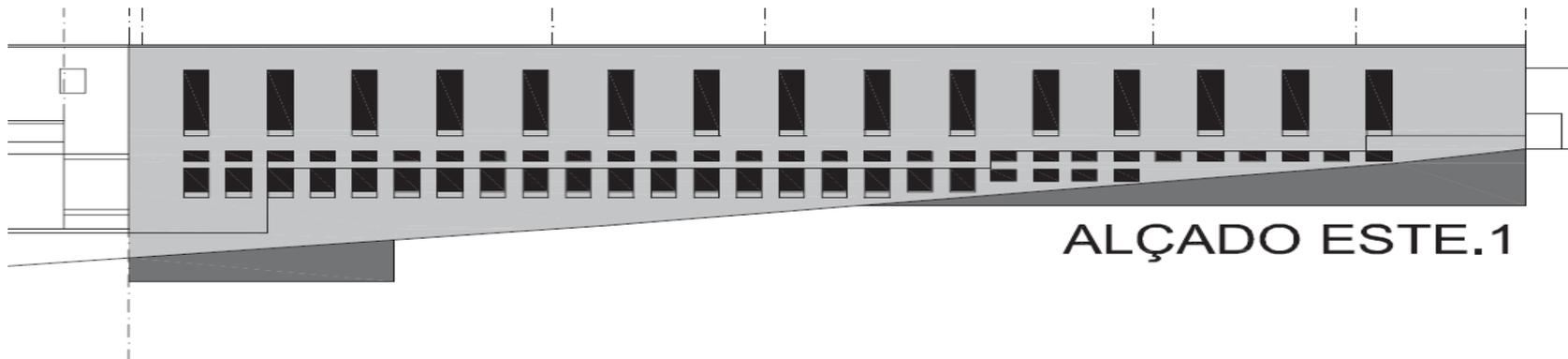


Figura A.1 – Planta das salas em perspectiva horizontal e vertical (fonte: Planta Autocad DEM e [2])

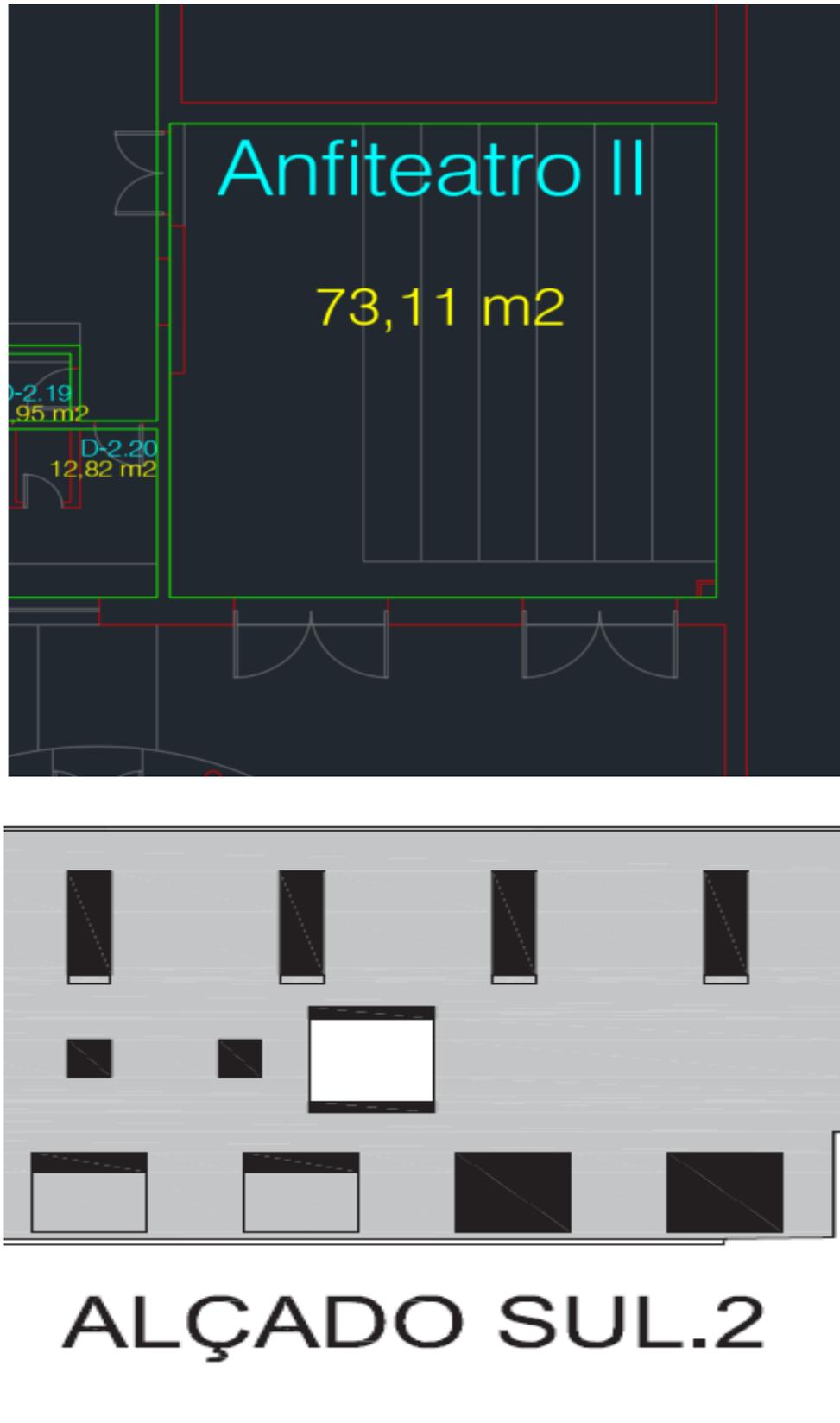


Figura A.2 – Planta da sala em perspetiva horizontal e vertical (fonte: Planta Autocad DEM e [2])

ANEXO B

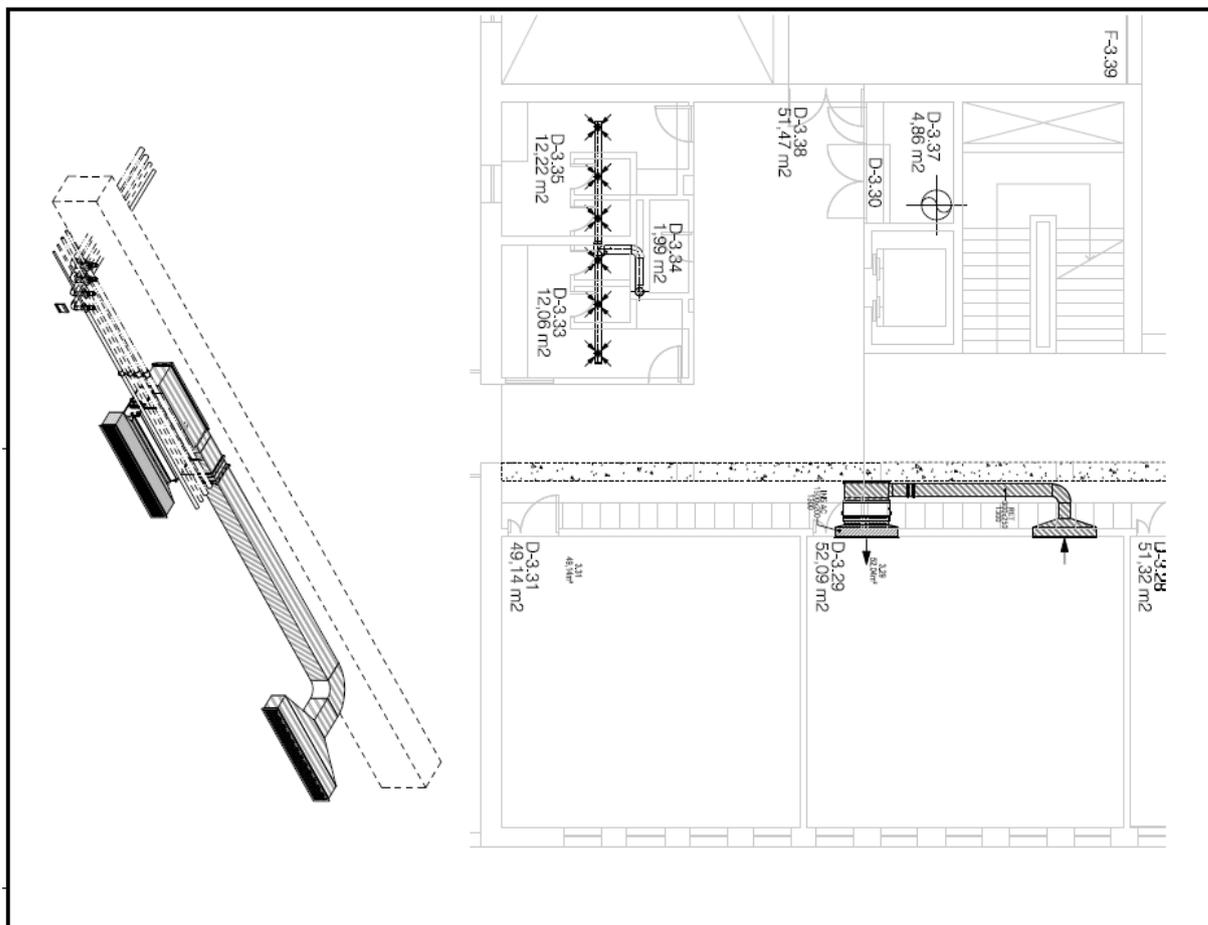


Figura B.1 – Parte do projeto de AVAC das salas [23]

ANEXO C – PROJETO DE ILUMINAÇÃO

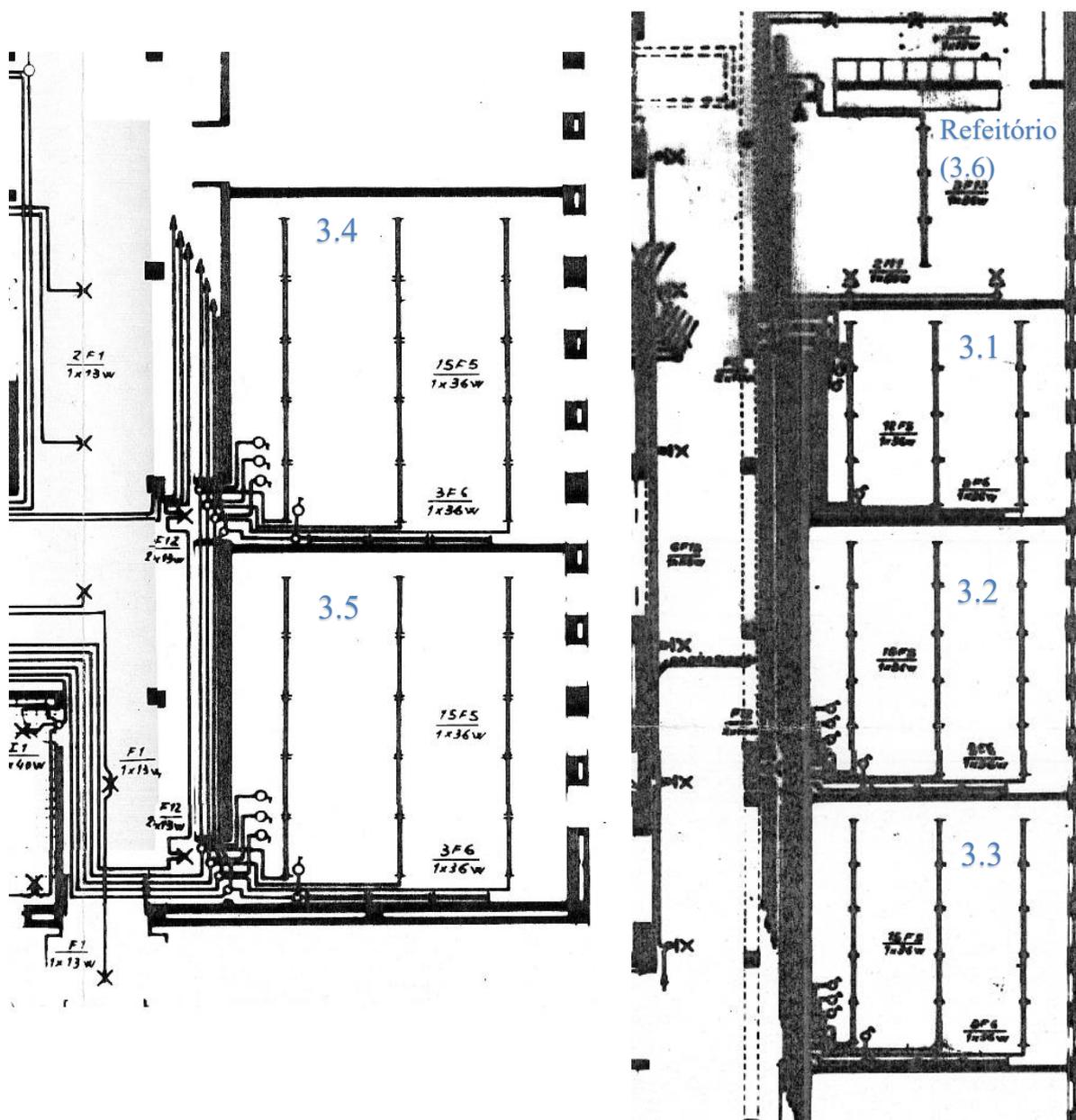


Figura C.1 - Planta de iluminação natural - Salas 3 (Fonte: Projeto de iluminação do DEM)

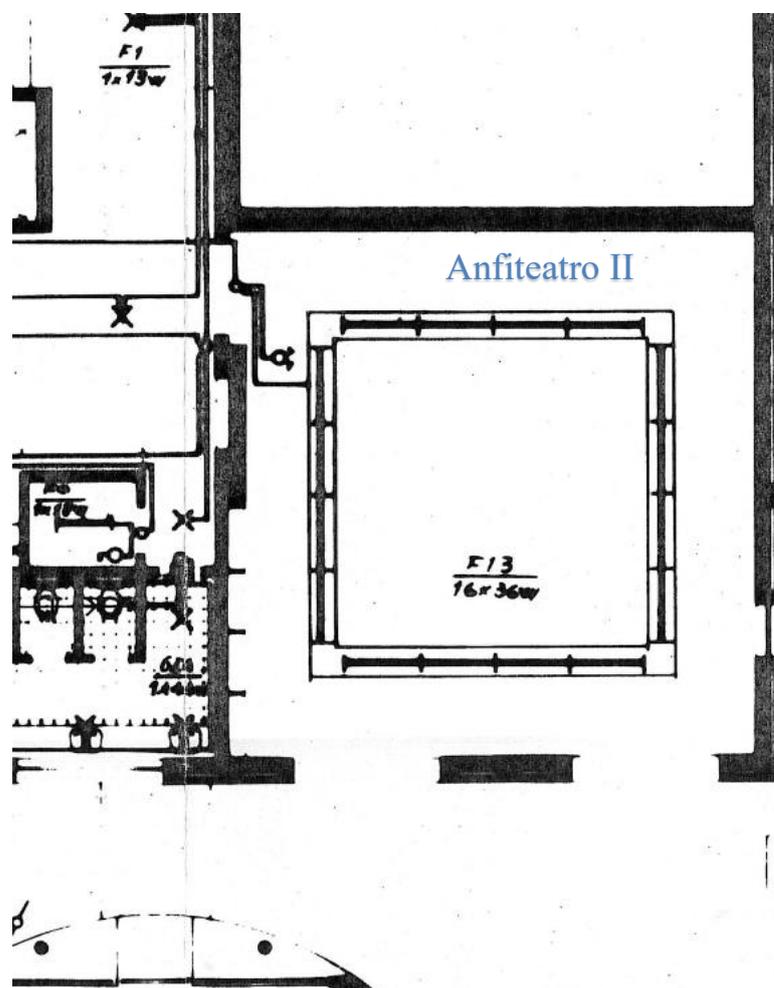


Figura C.2 - Planta de iluminação natural – Anfiteatro II (Fonte: Projeto de iluminação do DEM)

ANEXO D – CALENDARIZAÇÃO ANO LECTIVO 2018/2019 DA FCTUC

1° Semestre	Início	Fim
Aulas [1]	10.09.2018	20.12.2018
Suspensão Aulas Latada [2]	04.10.2018	06.10.2018
Férias do Natal	21.12.2018	02.01.2019
Exames (épocas normal e de recurso)	03.01.2019	03.02.2019
Defesas de dissertação de mestrado/projeto/relatório de estágio	03.01.2019	28.02.2019
Exames (época especial apenas para ciclos de estudos com n.º ímpar de semestres)	01.03.2019	24.03.2019
2° Semestre	Início	Fim
Aulas	04.02.2019	30.05.2019
Férias da Páscoa	15.04.2019	22.04.2019
Pausa letiva (Queima das Fitas)	06.05.2019	11.05.2019
Exames (épocas normal, de recurso e especial)	03.06.2019	26.07.2019
Defesas de dissertação de mestrado/projeto/relatório de estágio	03.06.2019	30.07.2019
Férias de Verão	01.08.2019	31.08.2019
Defesas de dissertação de mestrado/projeto/relatório de estágio (época especial) [3]	02.09.2019	30.09.2019
Épocas Extraordinárias [4]	outubro	março
Provas de Doutoramento e de Agregação [5]	01.09.2018	31.07.2019

Erro! A origem da referência não foi encontrada.

APÊNDICE

APÊNDICE A - CARACTERÍSTICAS DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DAS ENVOLVENTES

Os levantamentos das envolventes foram adaptadas pelas folhas de cálculo do Engenheiro Projetista Nuno Fernandes para a modelação do comportamento térmico e consumo energético sob a portaria nº 17-A/2016. Estes levantamentos e cálculos foram definidos pelo documento imposto pelo Professor Raimundo “Curso de formação especializada no âmbito do SCE – Sistema Nacional de certificação Energética e da Qualidade do Ar interior nos edifícios: Propriedades térmicas dos elementos construtivos dos edifícios - DEM” de acordo com a compilação ITE50, ITE11 e ITE12, entre outros e por modelos de elementos construtivos da biblioteca do programa design builder.

APÊNDICE

Tabela A.1 - Solução construtiva da Parede Exterior 1

Camadas	Descrição - Parede Exterior 1	Espessura [m]	Massa Volúmica [kg/m³]	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Resistência Térmica [m².°C/W]	Calor específico [J/Kg.K]	Transmissão Térmica [W/m².°C]
1	Resistência térmica superficial interior	-	-	-	0,130	-	
2	Revestimento interior (Estuque sintético projectado tipo "Seral")	0,02	1350	0,560	0,036	1000,000	
3	Pano simples de alvenaria de tijolo de 22	0,22	750	0,420	0,524	936,000	
4	Argamassa Hidrofugada - assentamento (tradicional)	0,01	1900	1,300	0,008	1000,000	
5	Poliestireno extrudido (XPS)	0,04	32	0,037	1,081	1450,000	
6	caixa de ar	0,05	-	-	0,180	-	
7	Pano simples de alvenaria de tijolo de 11	0,11	873	0,410	0,268	936,000	
8	Revestimento Exterior (Sapisco, emboço e reboco tradicional)	0,02	1900	1,300	0,015	1000,000	
9	Resistência térmica superficial exterior	-	-	-	0,040	-	
		0,47 [m]	6805 [kg/m3]		2,282 [W/m².°C]		U = 0,44 [W/m².°C]

Tabela A.2 - Solução construtiva da Parede Exterior 2

Camadas	Descrição - Parede Exterior 2	Espessura [m]	Massa Volúmica [kg/m³]	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Resistência Térmica [m².°C/W]	Calor específico [J/Kg.K]	Transmissão Térmica [W/m².°C]
1	Resistência térmica superficial interior	-	-	-	0,130	-	
2	Revestimento interior (Estuque sintético projectado tipo "Seral")	0,02	1350	0,560	0,036	1000,000	
3	Pano simples de alvenaria de tijolo de 11	0,11	873	0,410	0,268	936,000	
4	Argamassa Hidrofugada - assentamento (tradicional)	0,01	1900	1,300	0,008	1000,000	
5	Poliestireno extrudido (XPS)	0,04	32	0,037	1,081	1450,000	
6	Caixa de ar	0,03	-	-	0,180	-	
7	Parede de blocos de betão normal de 20 cm	0,2	1100	0,670	0,299	940,000	
8	Poliestireno expandido (EPS)	0,04	14	0,042	0,952	1450,000	
9	Revestimento exterior ("Capoto viero")	0,02	1900	1,300	0,015	1000,000	
10	Resistência térmica superficial exterior	-	-	-	0,040	-	
		0,47 [m]	7469 [kg/m3]		2,000 [W/m².°C]		U = 0,22 [W/m².°C]

Tabela A.3 - Solução construtiva da Parede interior 1

Camadas	Descrição - Parede interior 1	Espessura [m]	Massa Volúmica [kg/m³]	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Resistência Térmica [m².°C/W]	Calor específico [J/Kg.K]	Transmissão Térmica [W/m².°C]
0	Resistência térmica superficial interior	-	-	-	0,130	-	
1	Revestimento (Estuque sintético projectado tipo "Seral")	0,02	1350	0,560	0,036	1000,000	
2	Pano simples de alvenaria de tijolo de 11	0,11	873	0,410	0,268	936,000	
3	Revestimento (Estuque sintético projectado tipo "Seral")	0,02	1350	0,560	0,036	1000,000	
4	Resistência térmica superficial interior	-	-	-	0,130	-	
		0,15 [m]	3573 [kg/m3]		0,6 [W/m².°C]		U = 1,67 [W/m².°C]

Tabela A.4 - Solução construtiva da Parede interior 2

Camadas	Descrição - Parede interior 2 (PI1 + Cacifos)	Espessura [m]	Massa Volúmica [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Resistência Térmica [m ² .°C/W]	Calor específico [J/Kg.K]	Transmissão Térmica [W/m ² .°C]
1	Resistência térmica superficial interior	-	-	-	0,130	-	
2	Revestimento (Estuque sintético projectado tipo "Seral")	0,02	1350	0,560	0,036	1000,000	
3	Pano simples de alvenaria de tijolo de 11	0,11	873	0,410	0,268	936,000	
4	Revestimento (Estuque sintético projectado tipo "Seral")	0,02	1350	0,560	0,036	1000,000	
5	Madeira Cacifo Aglomerado	0,02	350	0,087	0,230	1590,000	
6	Cacifos (caixa de ar)	0,28	-	-	0,180	-	
7	Cacifos (caixa de ar)	0,28	-	-	0,180	-	
8	Madeira Cacifo Aglomerado de fibras de madeira	0,02	350	0,087	0,230	1590,000	
9	Resistência térmica superficial interior	-	-	-	0,130	-	
		0,75 [m]	4273 [kg/m³]		1,42 [W/m².°C]		U = 0,7 [W/m².°C]

Tabela A.5 - Solução construtiva da Parede interior 3

Camadas	Descrição - Parede interior 3	Espessura [m]	Massa Volúmica [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Resistência Térmica [m ² .°C/W]	Calor específico [J/Kg.K]	Transmissão Térmica [W/m ² .°C]
0	Resistência térmica superficial interior	-	-	-	0,130		
1	Revestimento (Estuque sintético projectado tipo "Seral")	0,025	1350	0,560	0,045	1000,000	
2	Pano simples de alvenaria de tijolo de 15	0,15	840	0,380	0,395	936,000	
3	Revestimento (Estuque sintético projectado tipo "Seral")	0,025	1350	0,560	0,045	1000,000	
4	Resistência térmica superficial interior	-	-	-	0,130		
		0,2 [m]			0,744 [W/m².°C]		U = 1,34 [W/m².°C]

Tabela A.6 - Solução construtiva da Parede Semi-exterior

Camadas	Descrição - Parede Semi-exterior	Espessura [m]	Massa Volúmica [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Resistência Térmica [m ² .°C/W]	Calor específico [J/Kg.K]	Transmissão Térmica [W/m ² .°C]
1	Resistência térmica superficial interior	-	-	-	0,130	-	
2	Revestimento interior (Estuque sintético projectado tipo "Seral")	0,025	1350	0,560	0,045	1000,000	
3	Pano simples de alvenaria de tijolo de 15	0,15	840	0,380	0,395	920,000	
4	Revestimento exterior (Estuque sintético projectado tipo "Seral")	0,025	1350	0,560	0,045	1000,000	
5	Madeira Cacifo Aglomerado	0,02	350	0,087	0,230	1590,000	
6	Cacifos (caixa de ar)	0,28	-	-	0,180	-	
7	Cacifos (caixa de ar)	0,28	-	-	0,180	-	
8	Madeira Cacifo Aglomerado de fibras de madeira	0,02	350	0,087	0,230	1590,000	
9	Resistência térmica superficial exterior	-	-	-	0,040	-	
		0,8 [m]	4240 [kg/m³]		1,474 [W/m².°C]		U = 0,68 [W/m².°C]

Tabela A.7 - Solução construtiva do Pavimento Térreo

Camadas	Descrição - Pavimento Térreo	Espessura [m]	Massa Volúmica [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Resistência Térmica [m ² .°C/W]		Calor específico [J/Kg.K]	Transmissão Térmica [W/m ² .°C]
					Ascendente	Descendente		
1	Resistência térmica superficial exterior	-	-	-	0,040	0,040	-	
2	Terreno Compacto	-	-	-		-	-	
3	Manta geotêxtil (Desprezado-espessura não significativa)	0,0022	-	-	-	-	-	
4	Caixa de brita	0,25	1950	2,000	0,125	0,125	800,000	
5	Manga plástica (Desprezado-espessura não significativa)	0,0002	-	-	-	-	-	
6	Betão B30 Armado com malha de aço A-500 (1-2%)	0,15	2400	2,300	0,065	0,065	1000	
7	Betonilha	0,04	1800	1,300	0,031	0,031	1000	
8	Acabamento (Mosaico cerâmico "cincasolo" - Ladrilho normal	0,007	2300	0,350	0,020	0,020	936	
9	Resistência térmica superficial interior	-	-	-	0,100	0,170	-	
		0,447 [m]	8450 [kg/m³]		0,381 [W/m².°C]	0,451 [W/m².°C]		
							Ascendente	U = 2,62 [W/m².°C]
							Descendente	U = 2,22 [W/m².°C]

Tabela A.8 – Solução construtiva do Pavimento Não Térreo

Camadas	Descrição - Pavimento Não Térreo	Espessura [m]	Massa Volúmica [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Resistência Térmica [m ² .°C/W]		Calor específico [J/Kg.K]	Transmissão Térmica [W/m ² .°C]
					Ascendente	Descendente		
0	Resistência térmica superficial "exterior" (inferior)	-	-	-	0,100	0,170	-	
1	Revestimento interior (estruque sintético projectado)	0,02	1350	0,560	0,036	0,036	1000,000	
2	Laje de betão normal 40 cm	0,4	2450	2,000	0,200	0,200	1000,000	
3	Betonilha	0,04	1800	1,300	0,031	0,031	1000	
4	Acabamento (Mosaico cerâmico "cincasolo" - Ladrilho normal	0,007	2300	0,350	0,020	0,020	936	
5	Resistência térmica superficial interior (superior)	-	-	-	0,100	0,170	-	
		0,467 [m]	7900 [kg/m³]		0,487 [W/m².°C]	0,627 [W/m².°C]		
							Ascendente	U = 2,06 [W/m².°C]
							Descendente	U = 1,6 [W/m².°C]

APÊNDICE

Tabela A.9 – características das Portas

Camadas	Descrição - Porta	Espessura [m]	Massa Volúmica [kg/m³]	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Resistência Térmica [m².°C/W]	Calor específico [J/Kg.K]	Transmissão Térmica [W/m².°C]
1	madeira compensada (pesado)	0,005	700	0,150	0,033	1420,000	Fonte: DesignBluider - biblioteca
2	caixa de ar	0,025	-	-	0,180	-	
3	madeira compensada (pesado)	0,005	700	0,150	0,033	1420,000	Fonte: DesignBluider - biblioteca
		0,035 [m]	1400 [kg/m3]		0,247 [W/m².°C]		U = 4,06 [W/m².°C]

Tabela A.10 – características dos envidraçados

Envidraçado exterior		Fonte
Vidro Simples 6 mm (<i>generic CLEAR 6 MM</i>)		DesignBluider - glazing - pane ISO 10292/EN 673
Coefficiente de transmissão Térmica do vidro U [W/m².°C] - Norma	5,739	
Factor Solar	0,828	
Transmissão Solar directa	0,79	
Transmissão de luz	0,881	

Descrição - Caixilharia Metálica (ferro) sem corte térmico tipo giratória	Espessura [m]	Massa Volúmica [kg/m³]	Condutibilidade Térmica [W/m.°C]	Resistência Térmica [m².°C/W]	Calor específico [J/Kg.K]	Transmissão Térmica [W/m².°C]
Plataforma de metal - <i>Metal deck</i>	0,01	7824	45,280	0,170	500,000	Fonte: DesignBluider - Materiais Wood U = 5,875 [W/m².°C]

Nels

Tabela A.11 – características da caixilharia

APÊNDICE B

Tabela B.1 – Horário semanal das salas 3

Horário	Segunda		Terça		Quarta		Quinta		Sexta	
09:00	EPM - 38p	60%	TMI - 46p	70%	EPM - 42p	65%	MF - 56p	85%	CMM - 34p	55%
10:00										
11:00	EPM - 42p	65%	PF1 - 66p	100%	EPM - 44p	70%	MSE - 50p	80%	CMM - 38p	60%
12:00										
13:00										
14:00	GEA - 13p	20%	EGI - 40p	65%			GF - 64p	100%	IM - 46p	70%
15:00										
16:00	GEA - 13p	20%	EGI - 40p	65%			GF - 64p	100%	IM - 39p	60%
17:00										
18:00			EGI - 34p	55%						
19:00										
20:00										

Tabela B.2 – Horário semanal da sala Anfiteatro II

Horário	Segunda		Terça		Quarta		Quinta		Sexta	
09:00	EME - 40p	100%	AMI - 39p	100%	FG - 38p	95%	AMI - 39p	100%	AMI - 39p	100%
10:00										
11:00	TCM - 40p	100%	AMI - 39p	100%	RI - 22p	55%	AMI - 39p	100%	AMI - 39p	100%
12:00										
13:00										
14:00	FG - 15p	40%	ALGA - 40p	100%	RI - 21p	55%	ALGA - 40p	100%		
15:00										
16:00			ALGA - 37p	95%						
17:00										
18:00										
19:00										
20:00										

Tabela C.1 – Caudais de ar novo do perfil 1 pelo método analítico, segundo RSECE folha de cálculo [27]

Semana - perfil 1										
QAN Mín.										
[m ³ /h]										
Designação	Segunda	CO ₂ máx. (ppm)	Terça	CO ₂ máx. (ppm)	Quarta	CO ₂ máx. (ppm)	Quinta	CO ₂ máx. (ppm)	Sexta	CO ₂ máx. (ppm)
Sala 3.1	700	1289	692	1300	466	1674	689	1303	700	1289
Sala 3.2	927	1288	915	1299	617	1672	912	1302	927	1288
Sala 3.3	927	1288	915	1299	617	1672	912	1302	927	1288
Sala 3.4	926	1289	915	1300	616	1674	911	1303	926	1289
Sala 3.5	929	1286	917	1298	619	1668	915	1300	929	1286
Sala 3.6	697	1294	688	1305	462	1684	684	1310	697	1294
Anfiteatro II	922	1349	1092	1635	1002	1340	1382	1374	907	1439

Tabela C.1 – Caudais de ar novo do perfil 2 pelo método analítico, segundo RSECE folha de cálculo [27]

Semana - perfil 2										
QAN Mín.										
[m ³ /h]										
Designação	Segunda	CO ₂ máx. (ppm)	Terça	CO ₂ máx. (ppm)	Quarta	CO ₂ máx. (ppm)	Quinta	CO ₂ máx. (ppm)	Sexta	CO ₂ máx. (ppm)
Sala 3.1	604	1431	600	1437	457	1691	591	1454	604	1431
Sala 3.2	799	1430	794	1436	606	1689	782	1452	799	1430
Sala 3.3	799	1430	794	1436	606	1689	782	1452	799	1430
Sala 3.4	799	1431	794	1437	605	1691	781	1453	799	1431
Sala 3.5	801	1427	796	1434	609	1683	785	1449	801	1427
Sala 3.6	599	1437	596	1443	450	1707	585	1463	599	1437
Anfiteatro II	894	1374	969	1788	874	1473	1195	1527	855	1497

Tabela C.3 – Caudais de ar novo do perfil 3 pelo método analítico, segundo RSECE folha de cálculo [27]

Semana - perfil 3		
Designação	QAN mín. [m ³ /h]	CO ₂ máx. (ppm)
Sala 3.1	334	1333
Sala 3.2	442	1331
Sala 3.3	442	1331
Sala 3.4	442	1333
Sala 3.5	444	1328
Sala 3.6	330	1343
Anfiteatro II	728	1324