

• U



C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Proposta de alteração do sistema de AVAC do edifício da FFUC – um contributo para a racionalização dos consumos de energia e melhoria do ambiente interior**

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

**Autor**

**Miguel António Ferreira Peres Lopes**

**Orientadores**

**Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar**

**Professor Doutor José Joaquim da Costa**

**Júri**

**Presidente Professor Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva**

**Professor Doutor António Manuel Oliveira Gomes Martins**

**Vogais**

**Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar**

**Engenheiro Francisco José Craveiro Bispo Pocinho Lamas**

FCTUC

Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra

**Coimbra, Setembro, 2016**



*Look, if you had one shot, or one opportunity  
To seize everything you ever wanted in one moment  
Would you capture it or just let it slip?*  
Marshall Bruce Mathers, 2002



## **Agradecimentos**

Curto são os verdes anos... Findado mais um capítulo deste livro de aventuras que é a vida, é agora altura de agradecer às pessoas que para ele contribuíram. Em primeiro lugar à Família, sempre! Em especial aos meus pais e irmão que me aturam e me apoiam desde sempre. Agradeço também aos meus amigos, parceiros de aventuras incontáveis e inesquecíveis que ficarão para sempre na memória Coimbrã. Um obrigado muito especial ao meu Privilégio, que tive a sorte de conseguir conquistar. À Favela e às vizinhas! Ao Henrique e ao Pedro, não podia ter melhores padrinhos. Ao Tiago e ao Machado, que além de noites de festa, também me acompanharam em longas noitadas de volta de livros e folhas e trabalhos e estudos. Muitas cadeiras se fizeram, nas madrugadas à volta daquela mesa.

Agradeço também aos meus Professores do Mestrado de Energia e Ambiente por todo o apoio e disponibilidade demonstrado, e em especial ao Prof. Dr. José Costa e ao Prof. Dr. Adélio Gaspar pelo acompanhamento e orientação da presente dissertação.

Obrigado a eles, a elas, e ao espírito académico. Obrigado Coimbra, “só nós dois é que sabemos”! Curto são os verdes anos...



## Resumo

O desenvolvimento tecnológico que se tem verificado, paralelamente com as preocupações ambientais, leva a uma constante evolução dos sistemas de climatização. Procura-se essencialmente o conforto térmico em edifícios, com sistemas cada vez mais eficientes e menos dispendiosos.

Deste modo, uma parceria entre os Departamentos de Engenharia Mecânica e de Electrotécnica e de Computadores da Universidade de Coimbra (UC), no âmbito da estratégia Campus Sustentável promovida pela iniciativa Energia para a Sustentabilidade (EfS) da UC, surge com o objectivo de colmatar os problemas energéticos e de qualidade do ambiente interior verificados na Faculdade de Farmácia da Universidade de Coimbra (FFUC).

Depois de ser feito um estudo das características do edifício e o levantamento de todos os problemas, esta dissertação foca-se maioritariamente ao nível do sistema de climatização, da qualidade do ar interior e dos sistemas de ventilação, especificamente no piso 2 do edifício da FFUC, onde se espera obter uma redução significativa no consumo energético e um aumento do conforto térmico por parte dos seus utilizadores.

Procura-se conceber e dimensionar um sistema centralizado de climatização, independente do original já existente, através de um *chiller*/bomba de calor e controlando o sistema de ventilação com a implementação de registos de caudal e controlo por demanda de CO<sub>2</sub>. Espera-se, com esta medida, tornar o sistema de AVAC mais eficiente, com baixa emissão carbónica e eficaz para as salas de aula e anfiteatros da FFUC.

Com um investimento inicial de cerca de 31.500€, estima-se que o consumo anual relativo ao sistema de AVAC ronde os 14.500€. Deste modo espera-se atingir condições de conforto num conjunto de espaços que actualmente carecem de qualidade de climatização e ventilação.

**Palavras-chave:** Conforto térmico, QAI, AVAC, eficiência energética, racionalização dos consumos de energia.



## Abstract

The technological development that we are seeing combined with the environmental awareness, leads to a constant evolution of the HVAC systems. We are primarily looking for thermal comfort in buildings, with systems more and more efficient and less expensive. Thus, a partnership between the Department of Mechanical Engineering and the Department of Electrical and Computer Engineering of the University of Coimbra, in the context of the Sustainable Campus strategy, promoted by the EfS initiative of UC, appears with the objective of address energetic problems and internal air quality that were found on the Faculty of Pharmacy of the University of Coimbra.

After a study of the building characteristics and collect all the problems, this dissertation focus, mainly, on the HVAC system, on the indoor air quality and on the ventilation system. Inside the Faculty of Pharmacy of the University of Coimbra was chosen the 2nd floor of the building on which is expected to obtain a significant reduction the energy consumption and a raise of the thermal comfort felt by the users.

We are looking to conceive and resize a central HVAC system, unattached from the original already installed, with the installation of one chiller/heat pump and the implementation of demand control ventilation through CO<sub>2</sub>. It's expected that the new system will be efficient, with low carbon emission and effective for the classrooms and auditoriums of the FFUC.

With an initial investment of 31.500€, the annual consumption of the HVAC system is expect to be around 14.500€. This way, is expected to obtain comfort conditions in a set of spaces that at this moment, lack of heating, cooling and ventilation quality.

**Keywords** Thermal Comfort, IAQ, HVAC, energy efficiency, energy consumption reduction.



## Índice

Índice de Figuras .....	xiii
Índice de Tabelas .....	xv
Siglas .....	xvii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. Breve revisão bibliográfica .....	3
1.2.1. Sistema de produção térmica .....	3
1.2.2. Requisitos de Ventilação .....	5
• Método Prescritivo .....	6
• Método Analítico .....	6
• Sistema de ventilação variável (DCV) .....	8
1.3. Objectivos e Metodologia .....	12
1.4. Estrutura da dissertação .....	13
2. CASO DE ESTUDO .....	15
2.1. Caracterização do edifício da FFUC .....	15
2.2. Identificação de Problemas .....	17
2.3. Consumos Energéticos .....	20
2.4. Particularidades do Piso 2 .....	22
2.5. Notas conclusivas .....	25
3. METODOLOGIA E FERRAMENTAS DE ANÁLISE .....	27
3.1. Instalações actuais .....	27
3.2. HAP – <i>Hourly Analysis Program</i> .....	28
3.2.1. Funções e Considerações .....	28
3.2.2. Descrição dos sistemas .....	32
3.3. Resultados .....	36
4. PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AVAC INDEPENDENTE .....	39
4.1. Produção de energia térmica de aquecimento e arrefecimento .....	39
4.1.1. Descrição do circuito hidráulico .....	40
4.2. Requisitos de ventilação .....	41
4.3. Estratégia e esquema do sistema de climatização .....	46
4.4. Notas conclusivas .....	49
5. CONCLUSÃO .....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
APÊNDICE A .....	55
APÊNDICE B .....	57
APÊNDICE C .....	59
APÊNDICE D .....	61

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Utilização de Energia nos Edifícios de Serviços em Portugal. Fonte: EcoAP.ADENE, 2010.....	2
Figura 1.2. Evolução legislativa em Portugal. Fonte: ADENE,2016.....	3
Figura 1.3. Bomba de Calor reversível (Delgado 2007). ....	4
Figura 1.4. Diferenças entre os requisitos de ar novo pelos métodos prescritivo e analítico, e evolução prevista da concentração interior, segundo o método analítico. Adaptado: Prof. Adélio Gaspar .....	8
Figura 1.5. Funcionamento do sensor CO <sub>2</sub> . Fonte: Siemens 2010.....	9
Figura 1.6. Sistema DOAS-DCV típico para salas de aula. Fonte: ASHRAE 2011.....	10
Figura 1.7. Sistema DCV com recuperação de calor por mistura de ar. Fonte: Siemens 2010.....	11
Figura 2.1. (a) UTA do Anfiteatro 2; (b) UTA da Sala de Conferências.....	16
Figura 2.2. Degradação nas condutas dos ventiladores de extracção.....	17
Figura 2.3. Cortina de ar na Recepção. ....	18
Figura 2.4. Entrada principal do edifício da FFUC.....	19
Figura 2.5. <i>Deepfreezer</i> no corredor da FFUC.....	20
Figura 2.6. Consumo de Gás Natural na FFUC nos últimos 3 anos. ....	21
Figura 2.7. Consumo de energia eléctrica em período lectivo durante um ano. Fonte: (da Silva, 2016).....	22
Figura 2.8. Anfiteatro 2 – Garcia Orta. ....	23
Figura 2.9. Espaço comum no Piso 2. ....	24
Figura 3.1. Ventiladores da UTA dos anfiteatros.....	31
Figura 3.2. Esquema do sistema de VAV. Adaptado: HAP.....	33
Figura 3.3. Esquema do sistema <i>CAV-Single Zone</i> . Adaptado: HAP .....	34
Figura 3.4. Esquema do sistema com unidade terminal. Adaptado: HAP .....	35
Figura 3.5. Esquema do <i>chiller</i> /bomba de calor. Fonte: HAP .....	36
Figura 4.1. <i>Chiller</i> /Bomba de calor Ecolean 1003.....	39
Figura 4.2. Esquema de princípio do circuito hidráulico primário. Fonte: Catálogo Lennox, 2016.....	40
Figura 4.3. Requisitos de ventilação segundo os métodos analítico e prescritivo. ....	42
Figura 4.4. Sistema de ventilação por DCV multizona. Fonte: Catálogo S&P DCV,2016	44
Figura 4.5. Esquema de condutas com reguladores de caudal de ar. Fonte: Catálogo Trox, 2016.....	45

Figura 4.6. Inserção de quatro válvulas de 3 vias na tubagem da rede hidráulica no ducto A.....	46
Figura 4.7. Inserção de quatro válvulas de 3 vias na tubagem da rede hidráulica no ducto B. ....	47
Figura 4.8. Instalação de tubagem na rede hidráulica entre as salas 2E.02 e 2E.03. ....	47
Figura 4.9. Localização e ligação do <i>Chiller</i> /Bomba de calor. ....	48
Figura 4.10. Esquema do traçado de condutas dos anfiteatros do piso 2. ....	48
Figura 4.11. Esquema do traçado de condutas das salas de aula do piso 2.....	49
Figura 4.12. Relação de consumo de electricidade entre AVAC e não-AVAC.....	49

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Diferença de consumo de energia entre uma caldeira a gás e uma bomba de calor, num prédio de quatro andares. Adaptado de (Jenkins et al., 2008). .....	5
Tabela 2.1. Regimes de funcionamento de Hottes/Extractores na FFUC.....	16
Tabela 3.1. Potência das unidades terminais de climatização no piso 2. ....	27
Tabela 3.2. Características dos ventiladores de insuflação nas UTAs do piso 2. ....	28
Tabela 3.3. Valores do caudal de ar novo efectivo para cada espaço e seu agrupamento por zonas.....	30
Tabela 3.4. Potências em kW, calculadas através do HAP .....	37
Tabela 3.5. Potência do <i>chiller</i> /bomba de calor, em kW, calculadas através do HAP .....	37
Tabela 4.1. Legenda do esquema de princípio do circuito hidráulico da Figura 4.2. Adaptação do catálogo Lennox, 2016.....	40
Tabela 4.2. Consumo anual respeitante ao sistema AVAC.....	50



## SIGLAS

ADENE – Agência para a Energia

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CAV – Caudal de Ar Constante

COP – Coeficiente de Performance

DCV – “*Demand Control Ventilation*”

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DOAS – “*Dedicated Outdoor Air System*”

EER – Relação de Eficiência Energética

EPBD – “*Energy Performance of Buildings Directive*”

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FFUC – Faculdade de Farmácia da Universidade de Coimbra

HAP – “*Hourly Analysis Program*”

QAI – Qualidade do Ar Interior

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RPH – Renovações por Hora

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

SCE – Sistema Certificação Energética dos Edifícios

UTA – Unidade de Tratamento de Ar

VAV – Caudal de Ar Variável

$A_{du}$  – Área DuBois

$C_{ext}$  – Concentração média de CO<sub>2</sub> no ar exterior

$C_{lp}$  – Limiar de protecção de CO<sub>2</sub>

G – Taxa de geração de CO<sub>2</sub>

M – Actividade metabólica

N – Número de ocupantes

$Q_{ANf}$  – Caudal de ar novo final

$Q_{AN}$  – Caudal de ar novo

$\varepsilon_v$  – Eficiência de remoção de poluentes

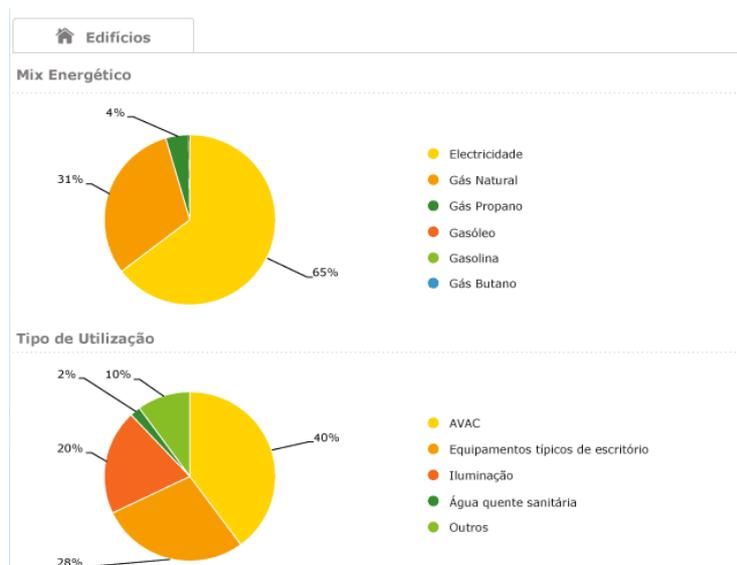
# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Actualmente existe uma preocupação social, ambiental e económica acrescida em relação ao consumo de energia e à emissão de poluentes a ele associada. Verifica-se, nos países desenvolvidos, e ainda mais nos países em desenvolvimento, um aumento constante do uso de energia em edifícios suportada pela necessidade de conforto térmico, que há não muito tempo era considerado um luxo. O aumento da dependência de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) tem levado à procura de sistemas de climatização mais eficientes, que garantam a qualidade do ar interior, aliados a uma vertente ecológica, com o objectivo de reduzir a emissão de gases com efeito de estufa (Pérez-Lombard 2008). De modo a incentivar a eficiência energética e reduzir o impacto ambiental, foram implementadas leis, normas, regulamentos e certificações nos países mais desenvolvidos, aumentando a responsabilidade do Ministério do Ambiente e das entidades reguladoras de energia.

Para além da eficiência energética, a presente dissertação tem como foco central a garantia de conforto térmico no interior dos edifícios. Segundo a norma ISO-7730, o conforto térmico é a satisfação expressa pelo Homem em relação ao ambiente térmico num determinado espaço. As condições de conforto são normalmente consideradas satisfatórias quando 90% dos ocupantes se sentem confortáveis nesse espaço.

Na Figura 1.1 verifica-se que, nos edifícios de Administração Pública em Portugal, 40% do consumo energético, que representa a maior fatia, está directamente ligado aos sistemas de AVAC. Nesse sentido, através da Resolução do Conselho de Ministros n.º2/2011 foi lançado o Programa de Eficiência Energética na Administração Pública (ECO.AP), com o objectivo de atingir melhorias de eficiência energética em edifícios públicos na ordem dos 30% até 2020 (ADENE, 2016). Procura-se com isto reduzir a factura energética do Estado, aliada à mitigação do uso ineficiente da energia e ao aumento do conforto e das condições de trabalho.



**Figura 1.1.** Utilização de Energia nos Edifícios de Serviços em Portugal. Fonte: EcoAP.ADENE, 2010.

A Universidade de Coimbra (UC), que possui um vasto património edificado, está também fortemente empenhada em semelhantes objectivos tendo sido aprovado um Plano Estratégico em 2015, com um prazo de acção para 4 anos. Com base na Iniciativa Energia para a Sustentabilidade da UC, surgiu uma parceria entre o Departamento de Engenharia Mecânica, o Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computacional e a direcção da Faculdade de Farmácia da UC (FFUC) destinada a elaborar um plano de racionalização dos consumos energéticos do edifício da FFUC. Através da realização de teses de Mestrado, com a contribuição específica de cada área de especialização, é proposto alcançar melhorias na eficiência energética do edifício. Isto é, pretende-se reduzir o consumo energético e as emissões carbónicas, e ao mesmo tempo, alcançar melhorias do conforto térmico dos utentes do edifício.

Todo o projecto dos sistemas de AVAC do edifício da FFUC foi realizado seguindo os regulamentos que vigoravam a partir de 2006 (RSECE, RCCTE e SCE). Contudo, em 2010, a União Europeia emitiu uma revisão do *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD), o que levou a Agência para a Energia (ADENE) a alterar os Decretos-Lei 78,79 e 80/2006. Surgiu, assim, em 2013, a legislação que suporta os actuais Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). A Figura 1.2 dá uma perspectiva geral da evolução da legislação em Portugal.



Figura 1.2. Evolução legislativa em Portugal. Fonte: ADENE,2016

A reabilitação dos sistemas de AVAC pode ser aplicada essencialmente em três vertentes: tipo de equipamento, redução das necessidades de aquecimento e arrefecimento, e alteração dos padrões de consumo de energia. O tipo de equipamento pode ser alterado por tecnologias de apoio de energia renovável, como painéis solares e fotovoltaicos, sistemas de produção de energia eólica ou geotérmica. Pode-se ainda aumentar a qualidade de controlo dos sistemas, melhorar o tipo de iluminação, armazenar ou recuperar energia ou trocar equipamentos velhos por novos, mais eficientes. As necessidades de aquecimento e arrefecimento podem ser reduzidas através da alteração de envidraçados, ou de sistemas de sombreamento no período de aquecimento. Os padrões de consumo de energia, estão directamente relacionados com factores humanos. Controlar os regimes de ocupação de cada espaço, facilitar o acesso aos controlos do sistema de climatização e efectuar um plano de manutenção regular são alguns exemplos de uma possível reabilitação num edifício (Ma et al., 2012).

## 1.2. Breve revisão bibliográfica

### 1.2.1. Sistema de produção térmica

Actualmente, e de acordo com o projecto original, o sistema de climatização do edifício da FFUC é totalmente centralizado, sendo a produção térmica garantida por uma caldeira a

gás natural e por um *chiller* de condensação a ar instalados na cobertura. Além disso, a distribuição do fluido térmico é dividida apenas por dois ramais que percorrem todos os pisos do edifício, dispondo cada um deles apenas das bombas primárias, situadas também na cobertura. Este elevado nível de centralização implica dificuldades ao nível da gestão e do consumo energético do sistema, com impacto negativo para o conforto térmico e a qualidade do ar interior. Em particular, é difícil e onerosa a sua operacionalização para o piso das salas de aulas e anfiteatros – espaços com perfis de ocupação bastante distintos (entre si e dos restantes) e, para além disso, muito distantes das unidades de produção e de distribuição térmica.

Com o desenvolvimento tecnológico que se tem verificado ao longo dos anos, e com a crescente preocupação ambiental, existem actualmente equipamentos de produção térmica mais versáteis, com melhores eficiências, menores gastos e menos poluentes. É o caso do *chiller*/bomba de calor ar-água, que podem produzir calor ou frio. No modo de aquecimento, estas máquinas transferem (“bombeiam”) calor de uma zona a baixa temperatura (do ambiente) para temperaturas mais elevadas (até cerca de 40°C). Esta transferência ocorre através do ciclo de refrigeração por compressão de vapor, aproveitando o calor rejeitado pelo condensador.

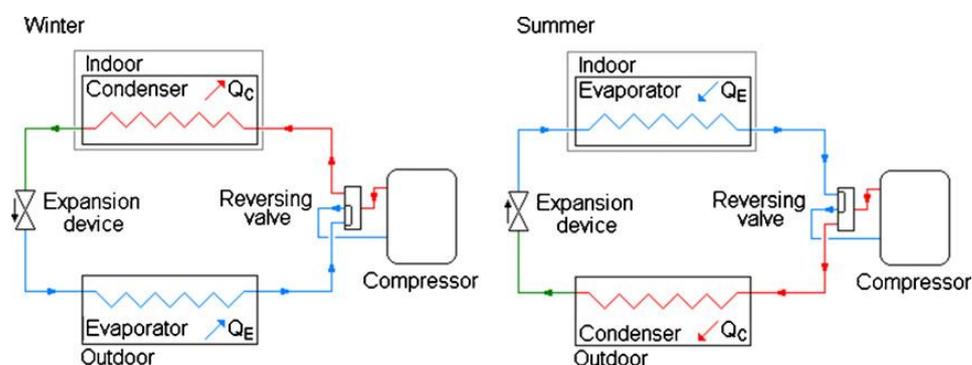


Figura 1.3. Bomba de Calor reversível (Delgado 2007).

O contrário também pode ocorrer, através da inversão de ciclo, sendo aproveitado o calor absorvido pelo evaporador como é esquematizado na Figura 1.3. Têm-se então uma máquina que pode fazer o trabalho de duas, *i.e.*, aquecimento e arrefecimento, com melhor *coefficient of performance* (COP) e menos poluente (Delgado, 2007).

Um estudo realizado em escritórios no Reino Unido (Jenkins et al., 2008) demonstra que a troca de uma caldeira a gás por uma bomba de calor é vantajoso tanto a nível de consumo

de energia como na redução de emissões de CO<sub>2</sub> na ordem dos 20% anuais. A Tabela 1.1 mostra a discrepância entre o consumo anual de energia entre a caldeira a gás e a bomba de calor. Verifica-se que, apesar do consumo eléctrico aumentar ligeiramente o consumo de gás diminui substancialmente.

**Tabela 1.1.** Diferença de consumo de energia entre uma caldeira a gás e uma bomba de calor, num prédio de quatro andares. Adaptado de (Jenkins et al., 2008).

Consumo energético anual num prédio de quatro andares						
Consumo de energia anual [kWh/ano]						
	Aquecimento	Ventilação	Iluminação	AQS	Electricidade	Gás
Caldeira	55319	11760	213800	48000	495415	103319
Bomba de calor	14514	9141	213800	48000	501113	48000

O problema destas máquinas surge quando as temperaturas no Inverno são muito baixas. Para as condições deste projecto, este problema não é crítico, já que o Inverno em Coimbra não é de todo rigoroso, e além disso a FFUC não funciona durante a noite, altura do dia em que se registam as temperaturas mais baixas.

Assim, é possível adquirir uma máquina com um investimento parecido com um *chiller*, mas que consiga colmatar as necessidades climáticas todo o ano (aquecimento e arrefecimento) (Delgado, 2007).

### 1.2.2. Requisitos de Ventilação

Ventilação é o processo destinado à renovação do ar no interior dos espaços, fornecendo ar novo proveniente do exterior e extraíndo o ar viciado. Esta renovação pode ser feita através de infiltrações, abertura de janelas, grelhas de porta, etc. (ventilação natural), ou de modo forçado (ventilação mecânica) através de ventiladores que promovem a insuflação de ar novo, tratado em Unidades de Tratamento de Ar (UTA). É um requisito para alcançar uma boa qualidade do ar interior, e o caudal mínimo de ar novo a considerar pode ser calculado através de dois métodos descritos na Portaria n.º 353-A/2013:

- **Método Prescritivo**

O método prescritivo determina o valor mínimo do caudal de ar novo que garante o controlo da concentração de poluentes emitidos, quer pelos ocupantes, quer pelo próprio edifício e seus componentes (revestimentos, mobiliário, materiais de construção). O caudal mínimo de ar novo a ter em conta é o maior dos dois requisitos mínimos, calculados para cada um destes tipos de fonte de poluentes, afectado pela eficácia de ventilação. Esta eficácia depende do método de distribuição do ar insuflado no espaço, dependendo das posições da insuflação e da extracção do ar, e da temperatura do ar insuflado relativamente à desejada na zona ocupada. Este método considera que os espaços são ocupados somente por adultos com uma corpulência média equivalente ao percentil 50 e que estão sempre ocupados na sua máxima capacidade. A equação (1.1) mostra como se calcula o requisito final de caudal de ar novo  $Q_{ANf}$  (geralmente expresso em  $m^3/h$ ) de um dado espaço utilizando o método prescritivo:

$$Q_{ANf} = \frac{Q_{AN}}{\varepsilon_v}, \quad (1.1)$$

em que  $Q_{AN}$  é o maior de dois valores:  $Q_{AN,oc}$ , resultante do produto da lotação do espaço pelo caudal mínimo de ar novo por pessoa; e  $Q_{AN,edif}$ , obtido pelo produto da área útil do espaço pelo requisito de ar novo por metro quadrado (para remover a carga poluente emitida pelo próprio edifício). Os valores dos caudais mínimos encontram-se tabelados na Portaria n.º 353-A/2013, tais como os valores recomendados para a eficiência de remoção de poluentes  $\varepsilon_v$ .

- **Método Analítico**

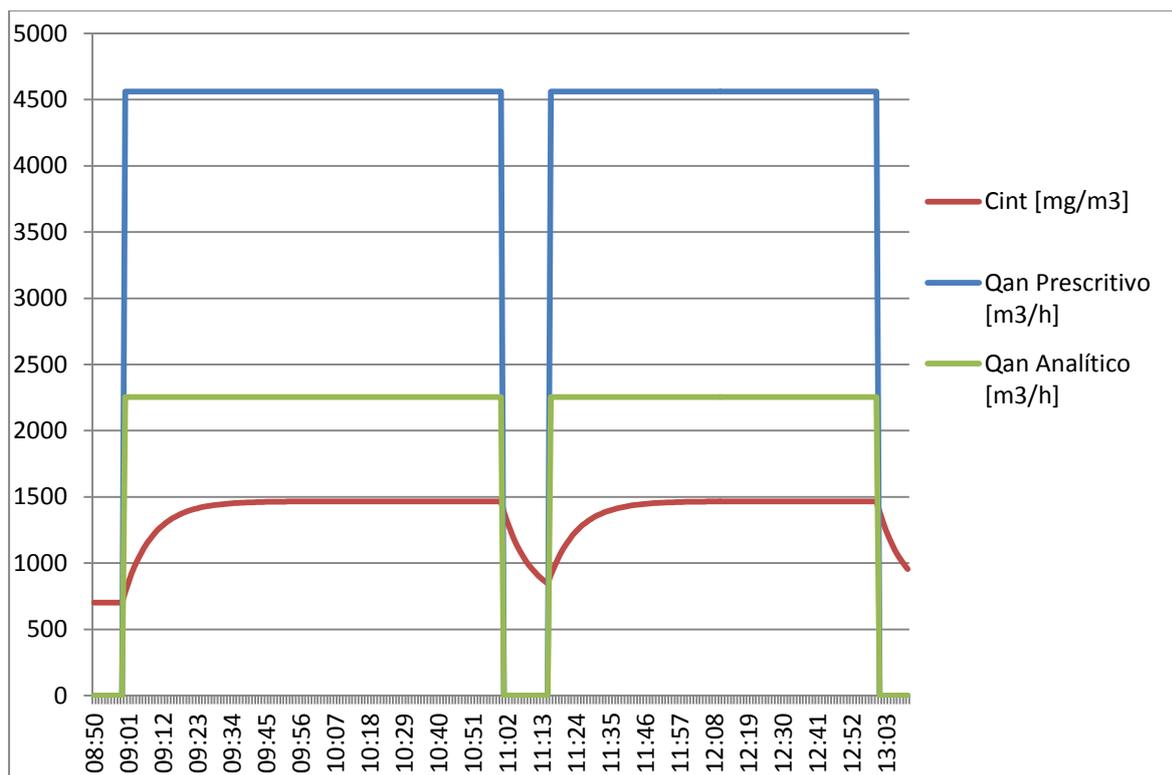
O método analítico, por sua vez, tem em conta a evolução da concentração de  $CO_2$  no espaço, podendo ser estimada em ordem ao tempo consoante o perfil de ocupação e as características físicas dos ocupantes, e o perfil de ventilação. É, portanto, um método mais preciso do que o prescritivo. O caudal de ar novo  $Q_{AN}$  em  $m^3/h$  é calculado através de:

$$Q_{AN} = \frac{G}{C_{lp} - C_{ext}}, \quad (1.2)$$

onde  $C_{lp}$  é o limiar de protecção de CO<sub>2</sub> no ar interior (2250 mg/m<sup>3</sup>),  $C_{ext}$  é a concentração média de CO<sub>2</sub> no ar exterior da zona onde está inserido o edifício (considera-se 702 mg/m<sup>3</sup>) e  $G_{CO_2}$  é a taxa de geração de CO<sub>2</sub> em mg/h em função da corpulência  $A_{Du}$ , da actividade metabólica  $M$  e do número de ocupantes  $N$ , como se representa na equação (1.3).

$$G_{CO_2} = 17000 \cdot A_{Du} \cdot M \cdot N. \quad (1.3)$$

Para uma melhor percepção das diferenças de caudais mínimos de ar novo entre cada método, a Figura 1.4 mostra, para um espaço com ocupação máxima de 190 pessoas, mas com um perfil de ocupação média de 50% (95 pessoas), a evolução temporal de CO<sub>2</sub> no interior  $C_{int}$ , e os requisitos de caudal de ar novo mínimo consoante cada método. Note-se que a ocupação é 0% num intervalo de 15 min a meio da manhã, como acontece habitualmente em salas de aula. Nesse intervalo, a concentração de CO<sub>2</sub> no interior ( $C_{int}$ ) decresce, voltando a subir com a reentrada dos ocupantes, como seria expectável. É de salientar que, neste caso, a  $C_{int}$  é diluída com cerca de metade do caudal de ar novo que é requerido segundo o método prescritivo, mostrando que o método analítico é mais eficiente e detalhado.



**Figura 1.4.** Diferenças entre os requisitos de ar novo pelos métodos prescritivo e analítico, e evolução prevista da concentração interior, segundo o método analítico. Adaptado: Prof. Adélio Gaspar

- **Sistema de ventilação variável (DCV)**

É sabido que salas de aula e auditórios têm frequentemente perfis de ocupação bastante distintos e horários que variam de semestre para semestre, tornando-se difícil caracterizar, de forma racional, a quantidade de ar novo necessária para garantir uma boa qualidade de ar interior e, simultaneamente, o conforto térmico dos utentes. A Portaria n.º 353-A/2013 indica que, para salas de aula, o caudal mínimo de ar novo é de  $24 \text{ m}^3/(\text{hora.pessoa})$ . Os cálculos das cargas térmicas são realizados para a capacidade máxima das salas e para funcionamento contínuo. Estas considerações levam a que, na maioria dos edifícios, exista sobre-ventilação dos espaços e consequentemente desperdício de energia (Nassif, 2012).

Uma maneira de contornar este problema é através de um sistema de ventilação com caudal de ar novo variável, controlado pelo nível de  $\text{CO}_2$ , mais conhecido pela sua designação em inglês: *Demand Control Ventilation* (DCV). Este tipo de estratégia permite reduzir significativamente os custos de ventilação do edifício. Um estudo realizado em 157 escolas primárias na Noruega concluiu que a utilização de um sistema de DCV controlado

por nível de CO<sub>2</sub> (DCV-CO<sub>2</sub>) em detrimento de um sistema de Volume de Ar Constante (CAV) reduz em cerca de 40% a despesa relativa à ventilação (Mysen et al., 2005).

Uma das melhores maneiras de estimar a ocupação de um dado espaço é através da taxa de CO<sub>2</sub> libertada por cada pessoa, relacionando-a com a concentração de CO<sub>2</sub> no exterior. É um sistema vantajoso na medida em que reduz os custos energéticos frequentemente relacionados com a sobre-ventilação, quando o espaço não se encontra totalmente ocupado e tem ocupação variável. Assegura a qualidade do ar interior com base no número de ocupantes que realmente se encontram na sala, e diminui a quantidade de ar novo tratado pela UTA se houver infiltrações naturais (portas ou janelas abertas). Pode-se até ajustar o caudal a insuflar por pessoa independentemente do valor previamente programado, e ainda é capaz de controlar o conforto e as condições térmicas do espaço consoante as necessidades (Schell, Turner, and Shim, 1998).

O sistema DCV-CO<sub>2</sub> consiste em utilizar um sensor de CO<sub>2</sub> em cada um dos espaços com perfis de ocupação distintos e, assim, ajustar as necessidades de caudal de ar novo de maneira correcta. Este equipamento é capaz de determinar a concentração de CO<sub>2</sub> no espaço com base na interferência das moléculas destes elementos com a radiação infravermelha. O ar entra no dispositivo e é exposto à luz infravermelha direccionada para um sensor com um filtro óptico que garante um comprimento de onda de 4,2 µm (o CO<sub>2</sub> absorve a radiação nesta gama de comprimento de onda). Quanto maior for a concentração de CO<sub>2</sub> na câmara, menos luz é recebida pelo sensor. Pode-se ver esquematizado este processo através da Figura 1.5 (Siemens, 2010).

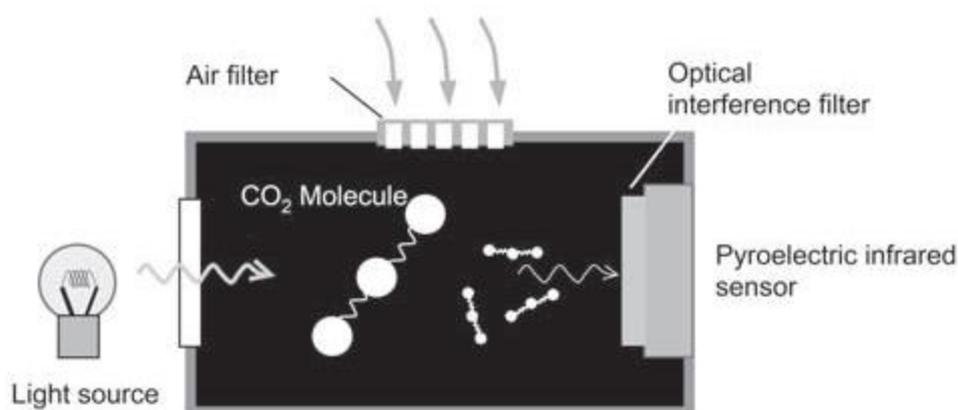


Figura 1.5. Funcionamento do sensor CO<sub>2</sub>. Fonte: Siemens 2010

Este método funciona bem e é aconselhável para auditórios, salas de conferências ou ginásios, quando tratados como uma monozona, como acontece nos Anfiteatros A e B e na

Sala de Conferências do edifício da FFUC. Contudo, se a UTA fizer recirculação de ar e alimentar várias zonas, como é o caso das salas de aula, torna-se mais complicado garantir o caudal adequado de ar novo em cada espaço. Para estes casos, é mais aconselhável um sistema de ventilação com 100% de ar novo (ASHRAE, 2011). Na Figura 1.6 pode-se ver o esquema de um sistema típico para salas de aula com controlo digital directo. A UTA com *dedicated outdoor air system* (DOAS UNIT) efectua ventilação com 100% de ar novo e utiliza unidades terminais para o aquecimento (radiadores ou ventilo-convectores). Na sala encontra-se um sensor de CO<sub>2</sub> para actuar nos registos de caudal motorizados das condutas de insuflação e um termóstato para regular a temperatura na unidade terminal. Os ventiladores têm reguladores de frequência variável, permitindo um funcionamento modulado consoante as necessidades de caudal de ar novo.

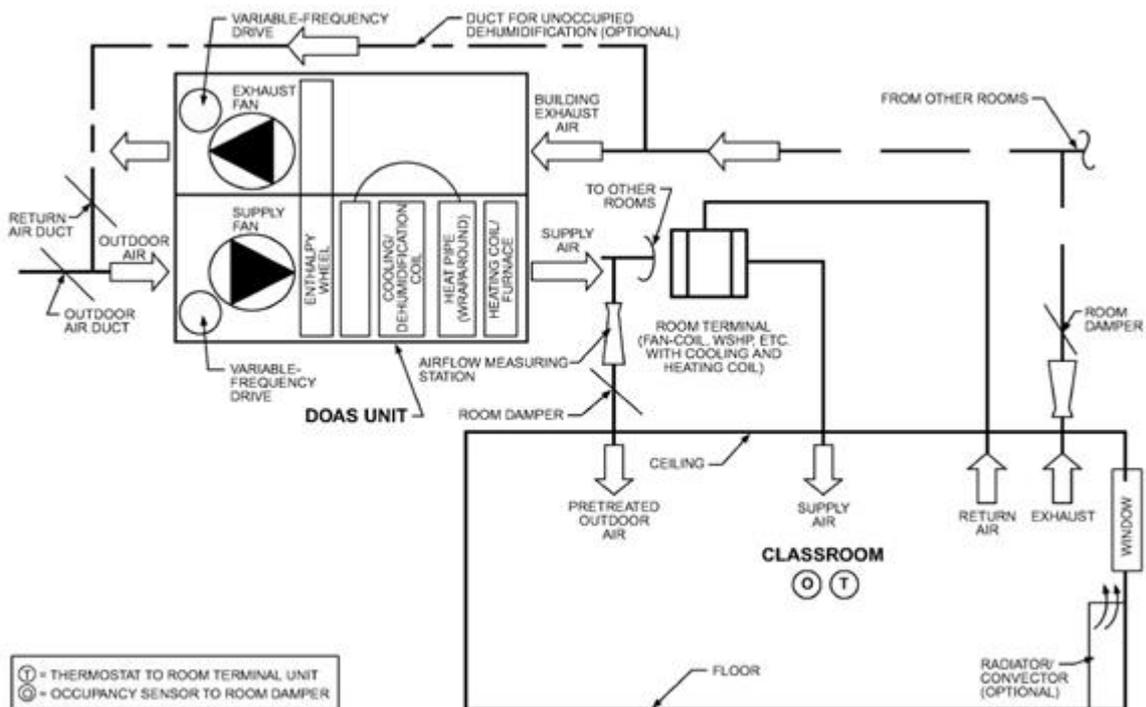


Figura 1.6. Sistema DOAS-DCV típico para salas de aula. Fonte: ASHRAE 2011

O controlo da ventilação pode ser feito de três maneiras. O ventilador pode ter um funcionamento do tipo *On/Off*, pode funcionar por estágios (níveis de velocidade), ou ainda, por controlo de velocidade variável (visível na Figura 1.6). Para aumentar a eficiência do sistema de ventilação pode-se fazer recuperação de calor através de permutadores de fluxos cruzados, com mistura de ar controlada por *dampers* (Figura 1.7)

ou por permutadores rotativos (rodas entálpicas) com escoamentos em contra corrente (conforme consta no exemplo da Figura 1.6) (Siemens, 2010).

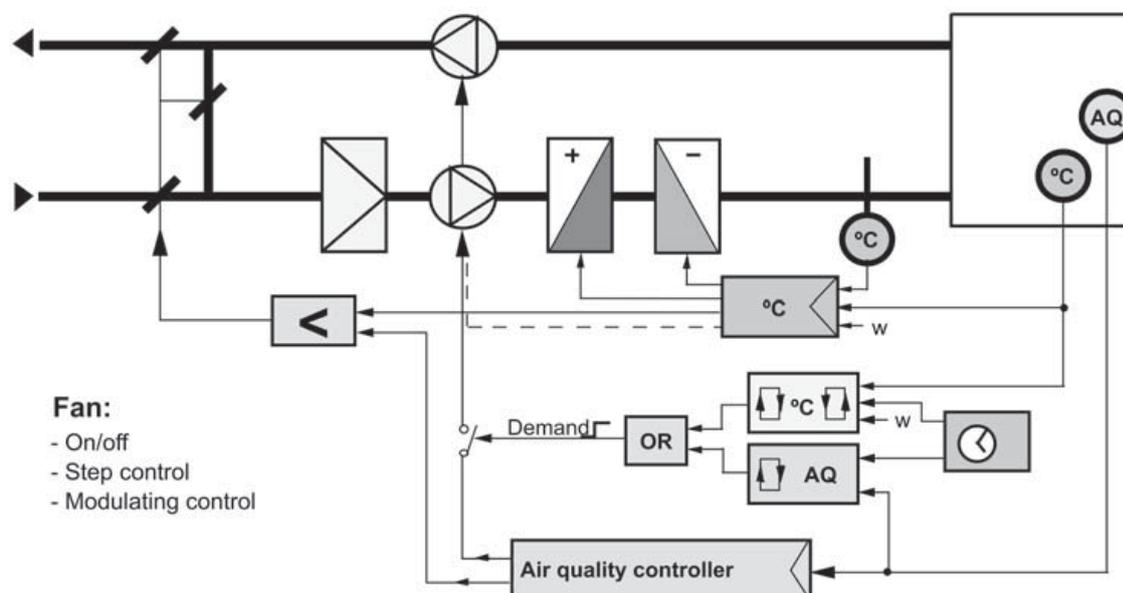


Figura 1.7. Sistema DCV com recuperação de calor por mistura de ar. Fonte: Siemens 2010

Na Figura 1.7 a qualidade do ar interior é controlada não só pelos ventiladores (através do seu modo de operação) como também pelos reguladores de caudal (*dampers*). Tendo em conta que toda esta metodologia visa reduzir o consumo energético garantindo a qualidade do ar interior, deve existir alguma coerência e controlo nas estratégias aplicadas; isto é, o caudal de ar novo deve depender tanto da temperatura como da concentração de CO<sub>2</sub> (o que tiver necessidades mais elevadas). Sempre que a temperatura exterior permitir aquecimento ou arrefecimento “gratuito” (*free cooling*), o sistema deve operar com 100% de ar novo, fechando o registo de caudal de recirculação. Do mesmo modo se deve proceder se a qualidade do ar interior não cumprir os requisitos mínimos. Se o ar interior se mantiver poluído quando o sistema operar com 100% de ar novo, deve-se aumentar a velocidade dos ventiladores para o máximo, até o ar interior estar limpo. É essencial a criação de um *loop* que controle a QAI e a temperatura, com o recurso aos sensores de CO<sub>2</sub> e de temperatura, actuando nos registos de caudal motorizados e nos ventiladores.

### 1.3. Objectivos e Metodologia

Inicialmente, é fundamental realizar um estudo preliminar do edifício da FFUC, ao nível do sistema de climatização e ventilação. O levantamento dos problemas encontrados e das debilitações do sistema é o primeiro passo para decidir qual necessita de intervenção mais premente.

Após o estudo inicial, foi decidido que esta dissertação tem como objectivo colmatar a deficiente climatização no piso 2, aliada à excessiva ventilação dos espaços. Propõe-se a criação de um sistema centralizado de climatização dedicado, independente do existente para todo o edifício. Este sistema baseia-se numa bomba de calor reversível para a produção de energia térmica, capaz de aquecer e arrefecer várias zonas, consoante as necessidades. Pretende-se ainda implementar um sistema de ventilação de caudal de ar variável em cada espaço, controlado por recurso a sensores de CO<sub>2</sub> que, traduzindo a taxa de ocupação dos espaços, permitem ventilar eficientemente cada zona, fazendo apenas a renovação de ar na medida do necessário e, assim, garantir uma boa qualidade de ar interior.

É feito um estudo das necessidades de ventilação nos espaços a climatizar no piso 2, seguindo o método prescritivo e o método analítico publicados na Portaria nº353-A/2013, comparando os respectivos resultados. Este estudo baseia-se na determinação de caudais de ar novo necessários para atingir uma boa qualidade do ar interior (QAI). O primeiro dos métodos é menos preciso, sendo útil principalmente para determinar os requisitos de ventilação nas situações nominais mais desfavoráveis. Por seu turno, o método analítico representa com maior fiabilidade a situação real do espaço a ventilar. Implementar-se-á nestes espaços um sistema de ventilação de caudal variável, controlado por nível de CO<sub>2</sub>, expondo as suas vantagens.

A criação do sistema independente de climatização para o piso 2 da FFUC passa por calcular as necessidades térmicas de cada espaço, recorrendo ao programa *Hourly Analyzys Program* (HAP) da *Carrier*, com o objectivo de determinar a potência necessária do *chiller*/bomba de calor a instalar e a potência solicitada às baterias das UTAs. Introduce-se no HAP as características de cada espaço a tratar, tais como o caudal de ar novo, o tipo de envolvente (paredes, janelas e portas, com a respectiva orientação), o perfil de ocupação, os ganhos internos (equipamentos eléctricos e iluminação), a taxa de infiltração e as

temperaturas dos espaços adjacentes. Depois de estarem definidos todos os espaços a climatizar, criam-se sistemas de ar (UTAs) para cada zona (conjunto de espaços com perfis de ocupação, necessidades térmicas e de ventilação semelhantes), onde se define o tipo de equipamento, as suas características e os seus componentes. Nesta etapa é possível gerar um relatório para cada sistema, onde se encontram discriminadas todas as trocas de calor decorrentes das características dos espaços anteriormente definidos, e onde é indicada a potência térmica de aquecimento e de arrefecimento a especificar para as baterias das UTAs, a fim de colmatar as necessidades térmicas dos espaços. Posteriormente, define-se o sistema de produção de energia térmica que se pretende usar e as suas características, como o coeficiente de performance (COP) e a relação de eficiência energética (EER). Depois de tudo isto definido, é possível determinar a potência necessária para o equipamento de produção térmica. O HAP é ainda capaz de gerar um relatório final, onde é feita uma análise económica dos consumos energéticos anuais, especificando o tipo de energia e o tipo de consumidor, diferenciando o consumo do sistema de AVAC e não-AVAC.

Os circuitos hidráulico e aeráulico serão adaptados, aproveitando os já existentes e tentando reduzir, tanto quanto possível, as alterações dentro do edifício.

Será feita uma análise económica sucinta, tendo em conta o investimento que será necessário efectuar para aplicar as alterações propostas. Com o auxílio do HAP, é ainda possível prever o consumo de energia aliado ao respectivo custo que se verificará com a implementação da estratégia apresentada na presente dissertação. A leitura e a facturação dos consumos de energia eléctrica e de gás natural não estão repartidas por pisos, sendo referentes a todo o edifício da FFUC. Deste modo, torna-se difícil estimar a quantidade de energia despendida apenas para o piso 2, no cenário actual, tornando-se difícil realizar uma comparação mais pormenorizada dos consumos do sistema actual com os previstos, depois de implementado o sistema de climatização independente que aqui se propõe.

#### **1.4. Estrutura da dissertação**

No primeiro capítulo desta dissertação é feito o enquadramento do problema, referindo sucintamente a importância dos sistemas de AVAC em Portugal e o seu peso no consumo energético do país. Refere-se ainda a relevância da reabilitação de edifícios e

contextualiza-se o tipo de legislação aplicada para estes casos. Segue-se uma breve revisão bibliográfica do tipo de equipamento de produção térmica que se terá por base no desenvolvimento da presente dissertação, revelando as suas principais vantagens. Abordam-se dois métodos distintos de cálculo das necessidades de caudal de ar novo para dimensionar o sistema de ventilação e justifica-se, ainda, a importância da utilização de um sistema de ventilação variável, consoante as necessidades (em inglês, *demand control ventilation*, DCV), revelando algumas das suas principais características e aplicações. Seguidamente, são referidos quais os objectivos pretendidos no presente trabalho e qual a metodologia que se pretende seguir. O capítulo encerra com a apresentação da estrutura do documento, neste mesmo subcapítulo.

No segundo capítulo apresenta-se o caso de estudo, descrevendo sucintamente as características do edifício da FFUC, identificando os principais problemas encontrados no estudo preliminar, e referindo os consumos energéticos dos últimos dois anos. Faz-se também uma análise mais detalhada do Piso 2, a zona mais específica do edifício a ser tratada nesta dissertação.

O terceiro capítulo é relativo ao programa utilizado no cálculo das cargas térmicas, HAP – *Hourly Analyzis Program* da Carrier. Aqui apresenta-se o programa, as suas funcionalidades, o procedimento seguido e os seus resultados.

No quarto capítulo é apresentado o projecto e o dimensionamento do sistema de AVAC independente desenvolvido especificamente para o piso 2. São referidas as suas características – as inerentes ao sistema centralizado actual e as das alterações a implementar – bem como os cálculos necessários para o seu desenvolvimento.

Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as principais conclusões e as sugestões para trabalhos futuros relacionados com o tema.

## 2. CASO DE ESTUDO

### 2.1. Caracterização do edifício da FFUC

O edifício da Faculdade de Farmácia da Universidade de Coimbra está dividido em 7 pisos, com uma área útil total de 10965,8 m<sup>2</sup>. A climatização do edifício é feita através de um sistema centralizado, com uma caldeira (aproximadamente 1 MW) para aquecimento e dois *chillers* (estando actualmente apenas um em funcionamento) para o arrefecimento. Estes equipamentos estão situados na cobertura, assim como os restantes da central térmica (bombas de circulação, depósitos de inércia, UTAs, ventiladores de extracção...).

Do piso 3 ao 6 existem laboratórios, gabinetes e espaços administrativos que são climatizados (aquecidos) através de ventilo-convectores. A renovação de ar é feita de forma mecânica, através das UTAs situadas na cobertura. Os corredores, zonas comuns e instalações sanitárias não estão sujeitas a climatização, já que são espaços de circulação e de ocupação rápida. O conforto térmico mínimo nestes espaços é assegurado pelos processos de transferência de calor através da envolvente dos espaços adjacentes climatizados.

Os laboratórios são um caso particular do edifício. Devido a todos os compostos poluentes que lá se encontram, estão sujeitos a condições especiais de qualidade do ar interior, sendo necessário efectuar o varrimento do ar através da extracção realizada pelas *hottes*. Na secção 2.2 explica-se com mais detalhe o problema que daqui advém. A Faculdade de Farmácia contém 57 Laboratórios, com um total de 114 extractores com três regimes de funcionamento distintos.

Em regime contínuo funcionam 51 extractores, que trabalham 24h por dia, todos os dias do ano. Actualmente, 45 extractores encontram-se permanentemente desligados, e 18 deles funcionam consoante as necessidades, sendo desligados durante as férias escolares, como se pode constatar na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1.** Regimes de funcionamento de Hottes/Extractores na FFUC.

Laboratórios FFUC					
Piso	Número de Laboratórios	Funcionamento Contínuo	Funcionamento a Pedido	Sempre Desligados	Total de Hottes/Extractores
P.3	7	4	12	3	19
P.4	17	12	3	19	34
P.5	17	13	3	14	30
P.6	16	22	0	9	31
Total	57	51	18	45	114

No piso 2, os dois anfiteatros, a sala de conferências e o centro de cópias são dotados de aquecimento, arrefecimento e renovação forçada de ar. As salas de aula só têm aquecimento mas o sistema está preparado para fazer arrefecimento. É de salientar que o tratamento de ar dos anfiteatros e da sala de conferências é feito de forma independente do resto do edifício. Cada anfiteatro é dotado de uma UTA de baixo perfil, como se vê na Figura 2.1 (a) e a insuflação é feita através de difusores lineares. A sala de conferências atua do mesmo modo mas com uma UTA horizontal, como mostra a Figura 2.1 (b).



(a)



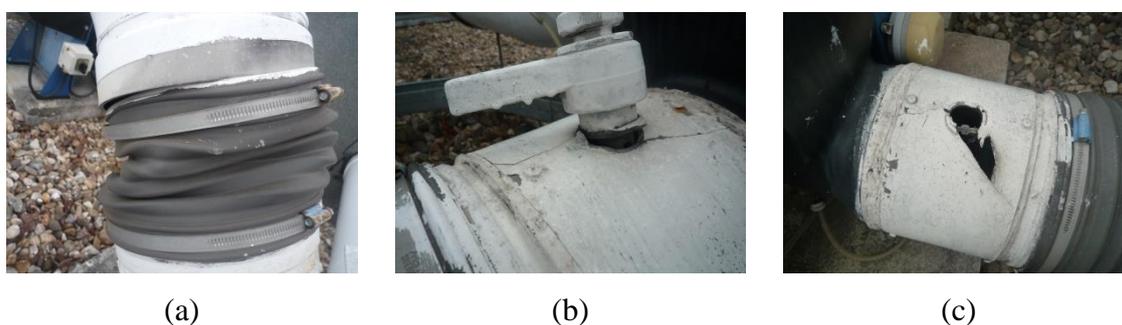
(b)

**Figura 2.1.** (a) UTA do Anfiteatro 2; (b) UTA da Sala de Conferências

## 2.2. Identificação de Problemas

Foi feita uma análise cuidada de todo o edifício da FFUC para perceber quais são os maiores problemas, os mais críticos e os mais urgentes.

Começando pela cobertura, onde se situa a zona técnica de toda a maquinaria relativa ao sistema de AVAC, verifica-se que o projecto não foi concebido da melhor forma. Isto porque é um sistema excessivamente centralizado, proporcionando uma deficiente racionalização de energia, impedindo flexibilidade de controlo para zonas com requisitos térmicos distintos. Apesar de haver um Sistema de Gestão Centralizado para o sistema de climatização e ventilação, não é utilizado porque todos os equipamentos que não são considerados estritamente necessários estão desligados para contenção de despesas. A maioria dos equipamentos carecem de manutenção (não existe manutenção periódica de técnicos especializados) o que leva à degradação e consequente avaria dos mesmos, como acontece com o *chiller* e muitos ventiladores de extracção das *hottes* como se pode ver na Figura 2.2 (a) (b) e (c).



**Figura 2.2.** Degradação nas condutas dos ventiladores de extracção

Obviamente todos estes factores contribuem para um consumo energético excessivo relacionado com o sistema de AVAC, o que faz com que este só seja utilizado em casos extremos. Contudo isso acarreta outros problemas, maioritariamente ao nível do conforto térmico, afectando a capacidade de trabalho e concentração dos utilizadores da FFUC. Verifica-se ainda outra situação, em que são ligados equipamentos de climatização individuais (aquecedores), sem qualquer tipo de controlo, factor que contribui para o aumento da factura eléctrica nos meses mais frios do ano.

Nos laboratórios encontra-se outro factor problemático relacionado com a circulação de ar. Devido ao funcionamento constante das *hottes* e ao não funcionamento das UTAs, os laboratórios encontram-se maioritariamente em subpressão. Isto é, as *hottes* retiram um certo caudal de ar ao espaço, que deveria ser repostado através das grelhas de insuflação para manter o equilíbrio. O que acontece, é que as UTAs só estão ligadas quando se liga a caldeira ou o *chiller* (em dias de muito frio ou muito calor). O ar extraído pelas *hottes* raramente é compensado pelo sistema de ventilação, provocando uma enorme depressão em todo o edifício. Além disso, para alterar o funcionamento das *hottes*, não existe nenhum método de controlo no local. Isto é, sempre que é preciso ligar ou desligar, principalmente as 18 *hottes*/extractores que funcionam a pedido dos docente consoante as necessidades, como se pode ver na Tabela 2.1, recorre-se a um funcionário que tem que se dirigir à cobertura do Edifício para efectuar tal procedimento.

No piso 3 onde é a entrada principal do edifício e onde se encontra a recepção, foram instaladas duas cortinas de ar nas portas (uma das quais está sempre fechada), para tentar combater as diferenças de temperatura entre o exterior e o interior, como mostra a Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Cortina de ar na Recepção.

Apesar de se notar alguma melhoria, comprovada pelos funcionários que mais tempo se encontram no local, a cortina de ar não é suficiente para climatizar uma zona tão ampla e com um pé direito tão elevado. Uma possível solução, seria a construção de uma antecâmara na entrada principal, exposta na Figura 2.4, criando assim um espaço com uma temperatura média entre o exterior e o interior. Contudo é uma obra que requer um parecer de um Arquitecto, além de existirem questões de segurança que devem ser cumpridas.



**Figura 2.4.** Entrada principal do edifício da FFUC.

O piso 2 é o mais frequentado pelos alunos da FFUC, onde são leccionadas as aulas e onde o desconforto térmico é maior. É o piso mais afastado de toda a rede hidráulica e aerúlica proveniente da cobertura, à excepção dos Anfiteatros e Sala de Conferências que têm as próprias UTAs. É um piso naturalmente frio, devido à fraca exposição solar, já que se encontra parcialmente soterrado.

Além dos problemas já referidos, existem ainda outros como a falta de controlo automatizado do sistema de climatização e os *deepfreezers* que se encontram a 80°C negativos. Estes deveriam estar em espaços com temperaturas a rondar os 0°C para minimizar as perdas de transferência de calor por convecção. Em vez disso, estão em espaços não climatizados (corredores), sem qualquer tipo de protecção ou cuidado específico como mostra a Figura 2.5.



Figura 2.5. Deepfreezer no corredor da FFUC.

### 2.3. Consumos Energéticos

Através de diálogos com os funcionários da FFUC e numa reunião com o Vice-Presidente Prof. Dr. Rui Barbosa, obteve-se a informação de que a caldeira apenas funciona normalmente não mais que 5h por dia, nos dias mais frios do ano. Devido aos consumos excessivos verificados em 2015, a utilização da caldeira foi cada vez menos frequente. A Figura 2.6 mostra o consumo mensal de gás natural registado em 3 anos na estação de aquecimento. Mesmo não ultrapassando o limite de 10000 m<sup>3</sup> anuais, dado que não se consegue atingir o conforto térmico, principalmente nos pisos inferiores, pode-se afirmar que o sistema carece de eficácia e eficiência.

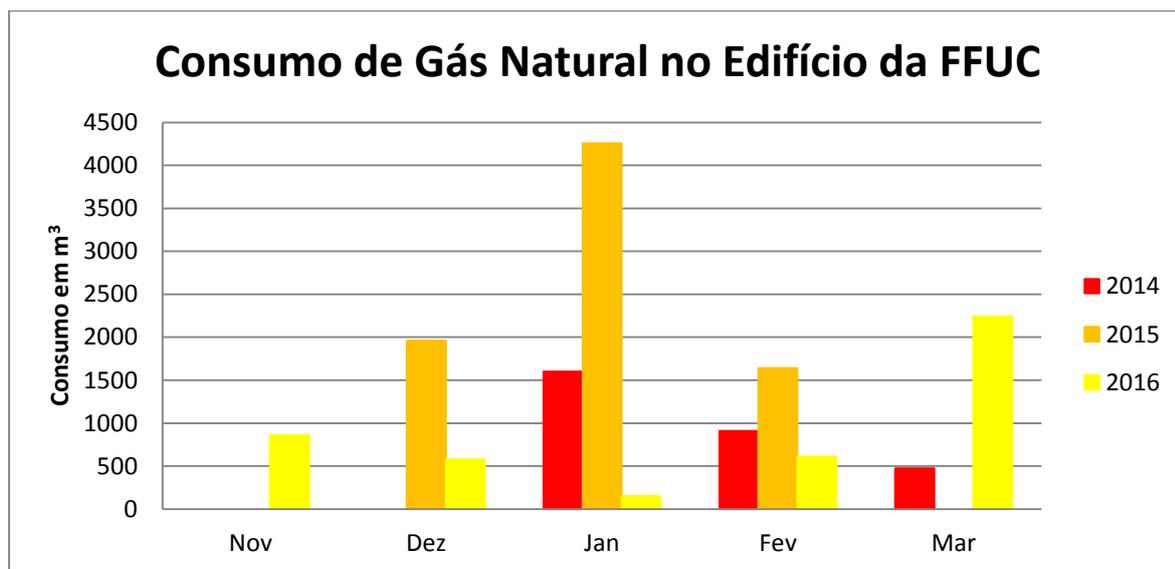
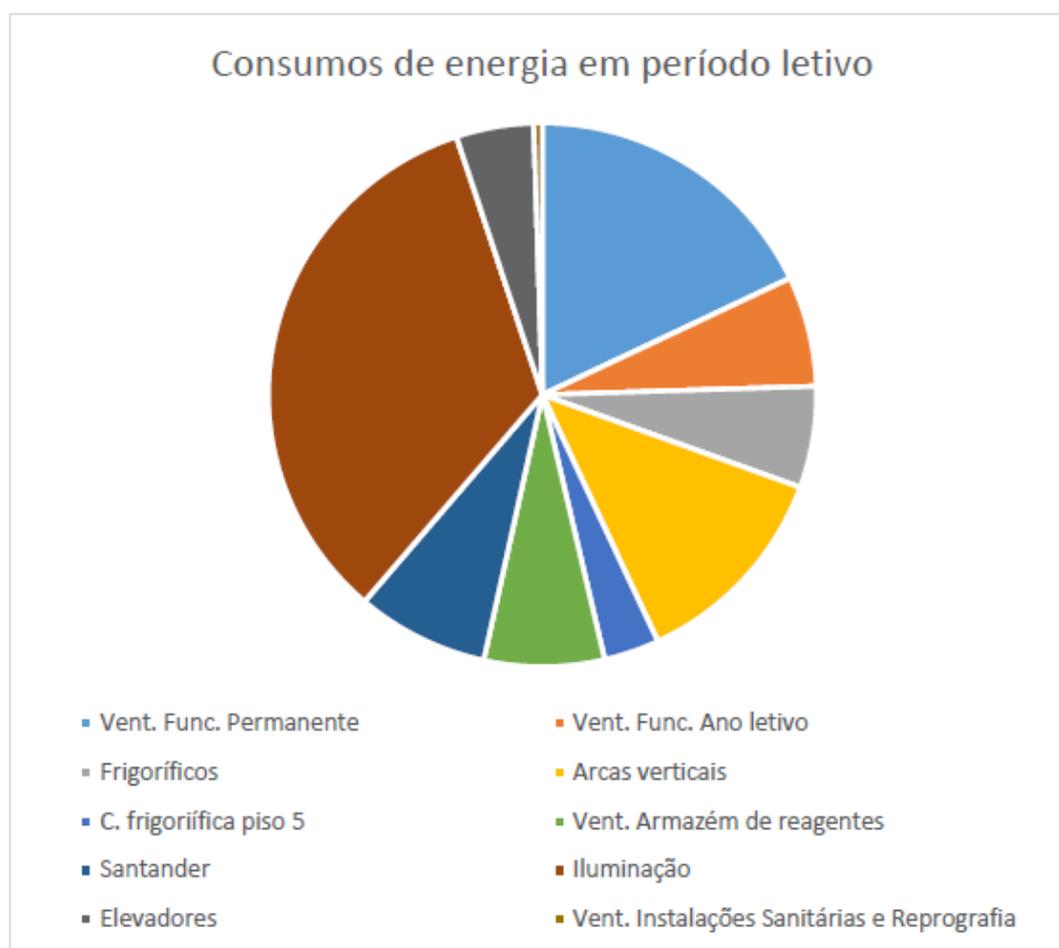


Figura 2.6. Consumo de Gás Natural na FFUC nos últimos 3 anos.

Em Janeiro de 2015 registou-se o maior pico com 4256 m<sup>3</sup> de gás natural consumidos, valor atípico que nunca mais se verificou, sendo que a média dos meses mais frios é cerca de 1400 m<sup>3</sup>.

Em relação à energia eléctrica, como o contador não está segregado e não se conhece o tempo de utilização dos sistemas de ventilação e climatização, é difícil saber ao certo a desagregação da quantidade de energia consumida. Apresenta-se na Figura 2.7 uma estimativa realizada na dissertação de mestrado do Filipe Silva, onde separou os consumos mais significativos (da Silva, 2016).

Devido ao facto das UTAs e do *chiller* não terem um perfil de utilização definido, é impossível identificar o período de funcionamento e os respectivos consumos energéticos sem monitorização específica ao longo do ano.

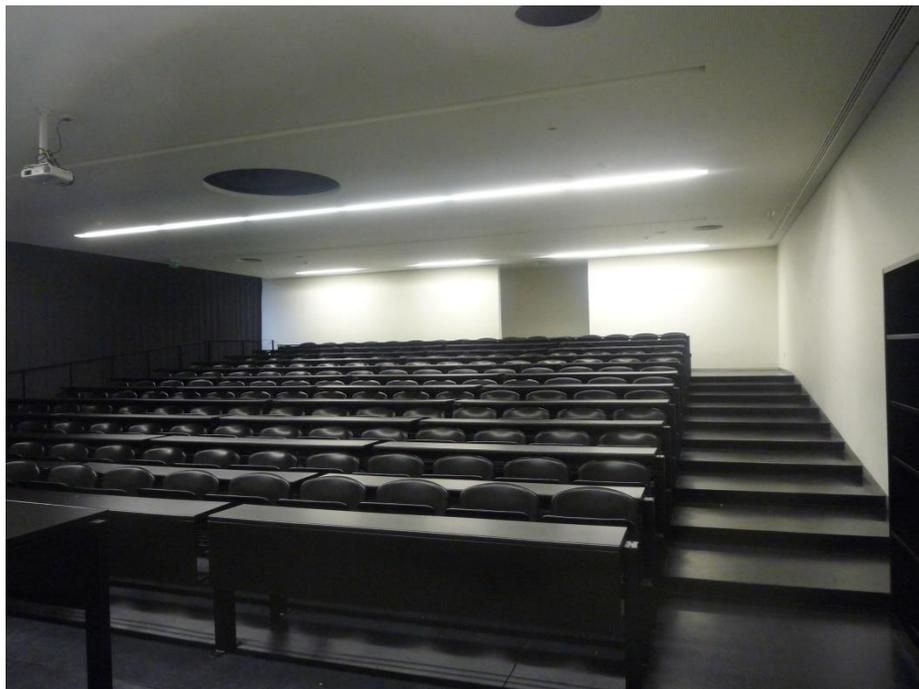


**Figura 2.7.** Consumo de energia eléctrica em período lectivo durante um ano. Fonte: (da Silva, 2016)

## 2.4. Particularidades do Piso 2

Um dos maiores problemas apontados pelos responsáveis da FFUC é exactamente neste piso 2. A falta de eficácia do sistema de climatização aliada ao consumo excessivo registado por este sistema centralizado, torna este espaço apetecível de ser estudado e melhorado.

Os dois anfiteatros e a sala de conferências têm um sistema de climatização tudo-ar, proveniente de UTAs dedicadas, climatizando o espaço através de 12 difusores lineares, em cada lado, no tecto como se pode ver na Figura 2.8.



**Figura 2.8.** Anfiteatro 2 – Garcia Orta.

O controlo da climatização, nestes três casos, está programado para ser feito manualmente, no local, pelos docentes.

Os restantes espaços climatizados, as salas de aula, a sala de estudo, a sala de informática para alunos, a sala de funcionários, o museu e o centro de cópias, são dotados de um sistema ar-água, climatizados através de ventilo-convectores, com controladores nos locais. Um sistema *multi-split* foi instalado para a sala do gestor informático e a sala do vigilante: a primeira conta com dois aparelhos de ar-condicionado de expansão directa, com potências térmicas de 3 kW, e a segunda sala com um de 2 kW.

O espaço comum deste piso é amplo, não climatizado, sem exposição solar, e directamente ligado ao piso 3, onde se encontra a recepção como mostra a Figura 2.9. Isto faz com que no Inverno, seja um espaço sem conforto térmico e bastante difícil de aquecer.



**Figura 2.9.** Espaço comum no Piso 2.

O problema do sistema de climatização do edifício ser totalmente centralizado prejudica especialmente este piso, onde o perfil de ocupação é distinto dos demais. O Natal, a Páscoa, a semana da queima e as épocas de exames deixam este piso praticamente desocupado. Os docentes e estudantes de mestrado/doutoramento, utilizadores dos laboratórios, deixam de frequentar os seus espaços apenas quando a Faculdade encerra, durante quinze dias em Agosto. Outro cenário com ocupação claramente distinta, ocorre durante os fins-de-semana, no caso de haver conferências, encontros ou palestras. Neste caso, apenas o piso em estudo necessitará de climatização, enquanto todos os outros estão desocupados. Para ambas as situações, fazer actuar o sistema de climatização e ventilação actual, gera automaticamente desperdício energético. Isto é, todo o edifício é sujeito a tratamento térmico mas nem todo está a ser utilizado.

Outro pormenor importante é que neste piso, todos os espaços têm perfis de ocupação distintos e de um certo modo aleatórios de ano para ano. É maioritariamente constituído por salas de aula, com horários diferentes, e diferentes do horário de funcionamento do centro de cópias e do espaço reservado ao gestor do sistema informático. Deste modo, é fundamental ter especial atenção ao modo de operação do sistema de climatização e ventilação.

## 2.5. Notas conclusivas

Depois de ter sido realizada uma investigação e uma análise cuidada a todo o edifício da FFUC, conclui-se que para um edifício relativamente novo, foram identificados problemas em excesso. O sistema centralizado, subdividido em duas secções verticais (ducto A e B) deixa pouca margem de manobra para adaptações de climatização e ventilação consoante as necessidades de cada piso, e mais particularmente de cada espaço. A falta de manutenção regular leva ao deterioramento dos equipamentos, principalmente na cobertura, onde estão menos protegidos contra intempéries.

Apesar de haver bastantes factores para melhorar, os problemas de climatização e ventilação verificados no piso 2, das salas de aula e anfiteatros, aliado ao problema da depressão em todo o edifício provocado pelas *hottes* dos laboratórios, representam os dois casos com mais urgência de serem solucionados.

A actual dissertação foca-se essencialmente nos problemas verificados no piso 2 onde se espera que depois de implementado o projecto de um sistema de climatização e ventilação, autónomo e independente do resto do edifício, mais eficiente do que o actual, se alcance um maior conforto térmico, uma melhor qualidade do ar interior e uma redução significativa do valor a pagar na factura energética (electricidade e gás natural).



### 3. METODOLOGIA E FERRAMENTAS DE ANÁLISE

#### 3.1. Instalações actuais

Actualmente o piso 2 já é servido pelo sistema centralizado de climatização e ventilação do edifício como foi referido anteriormente na secção 2.1. Os principais componentes terminais estão identificados na Tabela 3.1 com as respectivas potências de aquecimento, arrefecimento e caudais de insuflação. Os espaços administrativos e os espaços reservados para o ensino teórico-prático estão dotados de um sistema tudo-água com utilização de ventilo-convectores, à excepção dos anfiteatros e da sala de conferências, em que a climatização é efectuada através de um sistema tudo-ar. Os espaços com climatização individual são aquecidos ou arrefecidos por unidades ar-condicionado (vulgo split) e assim permanecerão.

**Tabela 3.1.** Potência das unidades terminais de climatização no piso 2.

Nº	Espaço	Área [m <sup>2</sup> ]	Unidade	Potência Aqueci- mento	Potência Arrefeci- mento	Caudal de ar	
			Terminal				Nº
<b>Ensino Teórico-Prático</b>				[kW]	[kW]	[l/s]	
2E.01	Sala Prática de Farmácia	37,4	VCA 40	1	3,2	4	220
2E.02	Sala de aula Teórica	37,4	VCA 40	1	3,2	4	220
2E.03	Sala de aula Teórica	37,4	VCA 40	1	3,2	4	220
2E.04	Sala de aula Teórica	37,4	VCA 40	1	3,2	4	220
2E.05	Sala de estudo	73,1	VCA 40	2	3,2	4	220
2E.06	Sala de Informática p/ alunos	50,6	VCA 50	1	4	5	290
2E.07	Anfiteatro 192 lugares	228,5	DL Trox VSD	24	31	24	1620
2E.08	Anfiteatro 192 lugares	228,5	DL Trox VSD	24	31	24	1620
2E.09	Sala de Conferências 90 lugares	95,5	DL Trox VSD	20	18	12	890
<b>Espaços Administrativos, Apoio</b>							
2A.01	Sala de Funcionários	19,35	VCA20	1	1,6	2	170
2A.02	Sala Museu	73,1	VC 40	2	3,2	4	220
2A.05	Centro de Cópias	58,6	VC 40	2	3,2	4	220
<b>Espaços com climatização individual</b>							
2A.03	Sala do Hardware	16,5	CMU 30	1	2,4	3	
2A.04	Sala do Gestor do Sistema Informático	16	CMU 30	1	2,4	3	
2A.06	Sala do Vigilante	10,3	CMU 20	1	1,9	2	

É de salientar que as potências indicadas nos espaços servidos pelo sistema tudo-ar representam as potências das baterias de aquecimento/arrefecimento das respectivas UTAs, já que são elas as responsáveis por tratar o ar que serve para climatizar as salas. A Tabela 3.2 mostra as principais características dos ventiladores das UTAs presentes no piso 2. O objectivo deste projecto passa por adaptar o sistema de modo que estas UTAs sirvam todo o piso, tornando não só a climatização, mas também a ventilação independente do resto do edifício. A justificação para este objectivo é simples: os laboratórios têm requisitos de ventilação completamente distintos das salas de aulas teóricas e dos restantes espaços do piso em estudo, fortalecendo a ideia de que não devem estar associados à mesma UTA.

**Tabela 3.2.** Características dos ventiladores de insuflação nas UTAs do piso 2.

Ventiladores de Insuflação das UTAs			
Espaços	Potência [kW]	RPM	Caudal Insuflação [l/s]
Anfiteatro A	0,55(x3)	1330	1700(x3)
Anfiteatro B	0,55(x3)	1330	1700(x3)
Sala de Conferências	5,2	4700	5000

Para isso acontecer, algumas adaptações terão de ser efectuadas. Este assunto será desenvolvido com mais pormenor na secção 4.2.

## 3.2. HAP – *Hourly Analysis Program*

### 3.2.1. Funções e Considerações

O HAP é um programa de cálculo de simulação dinâmica para a obtenção de cargas térmicas, capaz de definir sistemas de climatização e centrais de produção de frio e calor. É ainda capaz de fazer análises energéticas de estimativa dos consumos para o sistema definido.

Através dos relatórios gerados, é possível saber qual a potência térmica máxima necessária para o sistema de climatização, isto é, a potência térmica máxima para as baterias das UTAs serem capazes de vencer as cargas térmicas para tratamento do ar exterior. É possível, ainda, saber qual a potência térmica para dominar as cargas térmicas dos espaços,

ou seja, a potência que as unidades terminais precisam para cada espaço. Os relatórios fornecem também a informação da potência térmica total, de aquecimento e arrefecimento, para a climatização, permitindo, assim, dimensionar o *chiller*/bomba de calor para a produção de energia térmica necessária.

O primeiro passo é definir a localização, Coimbra, que está directamente relacionada com a informação climática, respeitando assim as variações de temperatura que se registam ao longo do ano. Como o ficheiro original relativo a esta matéria não é fiável, já que, por exemplo em Dezembro, registava valores de temperatura máxima de 35°C, recorreu-se aos dados climáticos disponíveis da estação meteorológica do DEM, procedendo às respectivas alterações (ADAI@DEM, 2016). Seguidamente introduzem-se os perfis de ocupação base e as características da envolvente (o tipo de parede exterior e janelas). Por falta de informação, e para simplificar, foram tomadas algumas considerações:

- Não se contabilizam trocas de calor com o interior, considerando todos os espaços à mesma temperatura, excepto o piso inferior (garagem);
- Todas as paredes exteriores têm espessura de 0,25m e um coeficiente de transmissão térmica de 0,55 W/m<sup>2</sup> °C;
- A parede exterior dos anfiteatros, em vidro, está orientada a Norte, já que não tem ganhos solares;
- Os envidraçados dos anfiteatros têm um coeficiente de transmissão térmica de 3,3 W/m<sup>2</sup> °C e os restantes 3,9 W/m<sup>2</sup> °C;
- Para o cálculo das potências térmicas das baterias das UTAs foram definidas três zonas: (i) anfiteatro A e B, (ii) sala de conferências e (iii) os restantes espaços climatizados;
- Os cálculos são realizados para a condição mais desfavorável em que a ocupação é de 100% durante todo horário de funcionamento;
- O horário de funcionamento é das 9h00 às 19h00 com intervalo de 1h durante o almoço (às 13h00);

- Foram consideradas infiltrações para todos os espaços de 0,6 renovações por hora (RPH).

Os caudais de ar novo, apresentados na Tabela 3.3, foram calculados através do método prescritivo, o mais desfavorável, considerando sempre o nível de ocupação máxima nos espaços. As tabelas mais detalhadas do cálculo dos caudais estão disponíveis no APÊNDICE A e APÊNDICE B para o método prescritivo e analítico, respectivamente. Na realidade, é provável que tal não aconteça, mas deve-se dimensionar o sistema de modo a que esteja preparado para a situação mais severa. Na prática, espera-se que esse sobre-dimensionamento não tenha efeito significativo no consumo de energia com a actuação do sistema DCV-CO<sub>2</sub> em cada espaço. Os valores dos caudais calculados são introduzidos nos requisitos de ar novo para cada espaço, de modo a finalizar a sua caracterização.

**Tabela 3.3.** Valores do caudal de ar novo efectivo para cada espaço e seu agrupamento por zonas.

Nº	Espaço	Área	Zona	Q <sub>AN</sub> efectivo
<b>Ensino Teórico-Prático</b>		[m <sup>2</sup> ]		[l/s]
2E.01	Sala prática de farmácia	37,4	Zona 1	250
2E.02	Sala de aula teórica	37,4		250
2E.03	Sala de aula teórica	37,4		250
2E.04	Sala de aula teórica	37,4		250
2E.05	Sala de estudo	73,1		250
2E.06	Sala de informática p/ alunos	50,6		160
2E.07	Anfiteatro A	228,5	Zona 2	1300
2E.08	Anfiteatro B	228,5		1300
2E.09	Sala de conferências	95,5	Zona 3	600
<b>Espaços Administrativos, Apoio</b>				
2A.01	Sala de funcionários	19,35	Zona 1	20
2A.02	Sala museu	73,1		250
2A.05	Centro de cópias	58,6		60

O passo seguinte é definir os sistemas de ventilação (UTAs) através da especificação do tipo de actuação, do tipo de componentes e do seu funcionamento. Para cada zona assinalada na Tabela 3.3 é atribuída uma UTA.

- **UTAs das zonas 2 e 3**

Para as zonas 2 e 3, dado que o sistema de climatização é tudo-ar, sem unidade terminal própria para climatização, define-se um equipamento do tipo “*chilled water air handling unit*”. Este equipamento é composto por um ventilador de insuflação (três, no caso da já existente, como se pode ver na Figura 3.1), uma bateria de aquecimento e uma de arrefecimento alimentadas por um circuito hidráulico proveniente do centro de produção térmica.



**Figura 3.1.** Ventiladores da UTA dos anfiteatros.

O tipo de sistema de ar é definido como “*CAV-Single Zone*”. Apesar de não ser a opção mais correcta para o dimensionamento pretendido, é a mais adequada de todas as possibilidades disponibilizadas no programa HAP, como está justificado na subsecção 3.2.2.

- **UTA da zona 1**

A UTA da zona 1 – com os respectivos espaços identificados na Tabela 3.3 – possui uma bateria de aquecimento e uma de arrefecimento, à semelhança das restantes, mas a climatização dos espaços é garantida pela utilização de unidades terminais do tipo ventilo-convector. Assim sendo, o equipamento é do tipo “*Terminal Unit*” e o sistema de ar “*4-pipe fan coil*”.

Os componentes de cada UTA e as configurações de projecto serão explicadas mais detalhadamente na subsecção 3.2.2. Depois de ter os sistemas de ventilação todos definidos, é possível gerar relatórios pormenorizados das simulações energéticas em cada espaço. Os resultados desses relatórios serão apresentados e discutidos na secção 3.3.

De modo a finalizar todo o dimensionamento do projecto de climatização, define-se na opção “*plant*” o tipo de unidade produtora de energia térmica, com função de aquecer ou arrefecer a água do circuito hidráulico que alimenta as baterias das UTAs e os ventilo-convectores da zona 1. Como já foi referido em 1.2.1, o sistema de produção térmica vai ter como base um *chiller*/bomba de calor, definido no HAP como “*changeover plant*”. Tal como para o sistema de ventilação, as características deste equipamento serão referidas em 3.2.2 e os resultados apresentados e debatidos na secção 3.3.

### **3.2.2. Descrição dos sistemas**

Ao nível dos sistemas de ventilação, para as zonas 2 e 3 – anfiteatros e sala de conferências – opta-se por um sistema CAV-Single Zone em detrimento de um VAV. Segue-se uma breve explicação do funcionamento de cada um destes sistemas, de modo compreender o motivo desta opção. Posteriormente será feita a descrição do funcionamento e do modo de operação do sistema “*4-pipe fan coil*” que serve a zona 1.

#### **Sistema VAV**

No caso de se optar por um sistema de caudal de ar variável (VAV), o programa HAP automaticamente exclui a opção de existir uma bateria de aquecimento na UTA, e obriga a que a variação do caudal de ar seja feita através de uma unidade terminal, uma caixa VAV, controlada por um termóstato inserido na zona a climatizar como mostra a Figura 3.2.

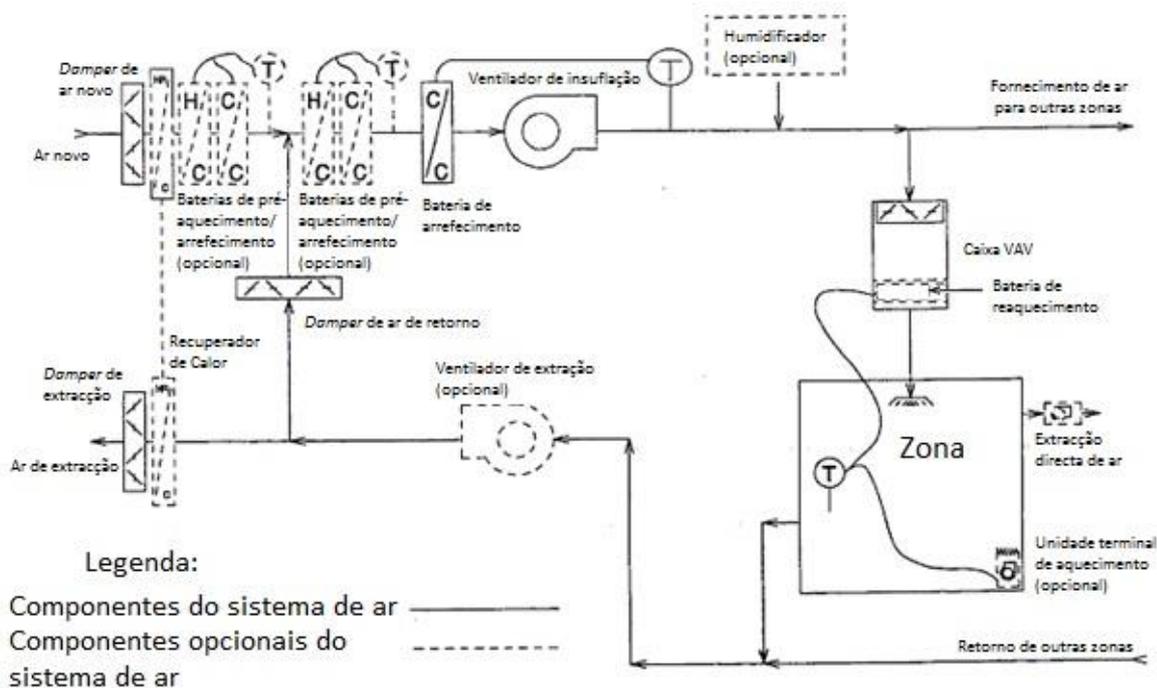


Figura 3.2. Esquema do sistema de VAV. Adaptado: HAP

Durante o período de funcionamento, os ventiladores de insuflação da UTA operam em regime contínuo, sendo a variação do caudal de ar para cada zona assegurada através da(s) respectiva(s) terminais VAV. O caudal de ar é regulado de acordo com as especificações de projecto e pode ser pré-tratado se existirem baterias de pré-aquecimento/arrefecimento. Quando o termóstato localizado num espaço da zona envia o sinal de que é necessário fazer arrefecimento, a bateria para esse fim actua e a caixa VAV regula o caudal de modo a que sejam mantidas as condições de conforto. Se a sala necessita de aquecimento, o controlador opera na caixa VAV fechando a passagem de ar para as condições de caudal mínimo de insuflação. Assim, a climatização só pode ser garantida se houver uma unidade de aquecimento terminal, independente das necessidades de ventilação. Por conseguinte, este tipo de sistema não se adequa ao caso prático em estudo, para as zonas em questão, já que a climatização tem de ser garantida pela insuflação do ar tratado proveniente da UTA, sem auxílio de unidades terminais.

**Sistema CAV**

Neste sistema, apresentado na Figura 3.3, o ar proveniente da UTA, já tratado (em condições de climatizar o espaço), é insuflado continuamente, de modo a ventilar ou climatizar consoante as necessidades. Quando o termóstato do espaço indica a necessidade de arrefecer, a bateria de arrefecimento entra em funcionamento e o ar é insuflado à temperatura de 15°C, definida em projecto. O movimento do ar é forçado pelo ventilador de insuflação da UTA e é projectado nos espaços através de difusores lineares. No caso do termóstato “pedir” aquecimento, o funcionamento do sistema é semelhante, mas utilizando a bateria de aquecimento e a temperatura de insuflação é de 35°C. Se não for necessário climatizar o espaço, as baterias da UTA ficam desactivadas até ordem em contrário e o ventilador de insuflação funciona para tratar o ar, de acordo com as exigências do sistema DCV associado.

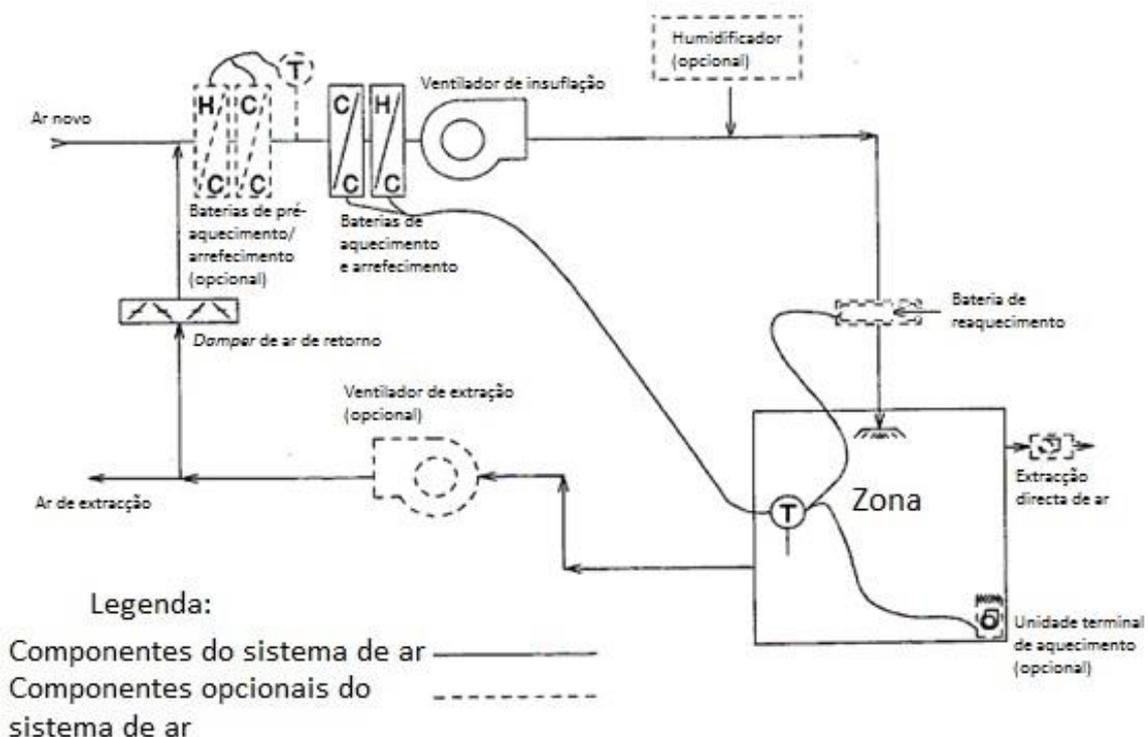


Figura 3.3. Esquema do sistema CAV-Single Zone. Adaptado: HAP

Tendo em conta as breves descrições do modo de funcionamento de cada sistema, realça-se que o CAV-Single Zone se adequa melhor aos espaços em estudo, estando sujeitos a menos alterações no local.

### Sistema com unidade terminal de aquecimento

As unidades terminais de climatização para a zona 1 são ventilo-convectores nus, com as potências indicadas na Tabela 3.1. O funcionamento deste sistema é semelhante ao *CAV-Single Zone*, mas com auxílio de uma unidade terminal de climatização. Quando o termóstato da sala indica que é necessário arrefecimento, o ventilo-convector liga e fornece ar à temperatura de 14,4°C, indicada em projecto. O ventilador está ligado até a sala atingir as condições de conforto. O processo para as necessidades de aquecimento é semelhante, mas com uma temperatura do ar de insuflação de 35°C. Se a sala estiver com condições de temperatura dentro dos parâmetros definidos entre 20°C e 25°C, o ventilo-convector não opera até haver alterações e o termóstato o indicar. O esquema do sistema pode-se ver na Figura 3.4.

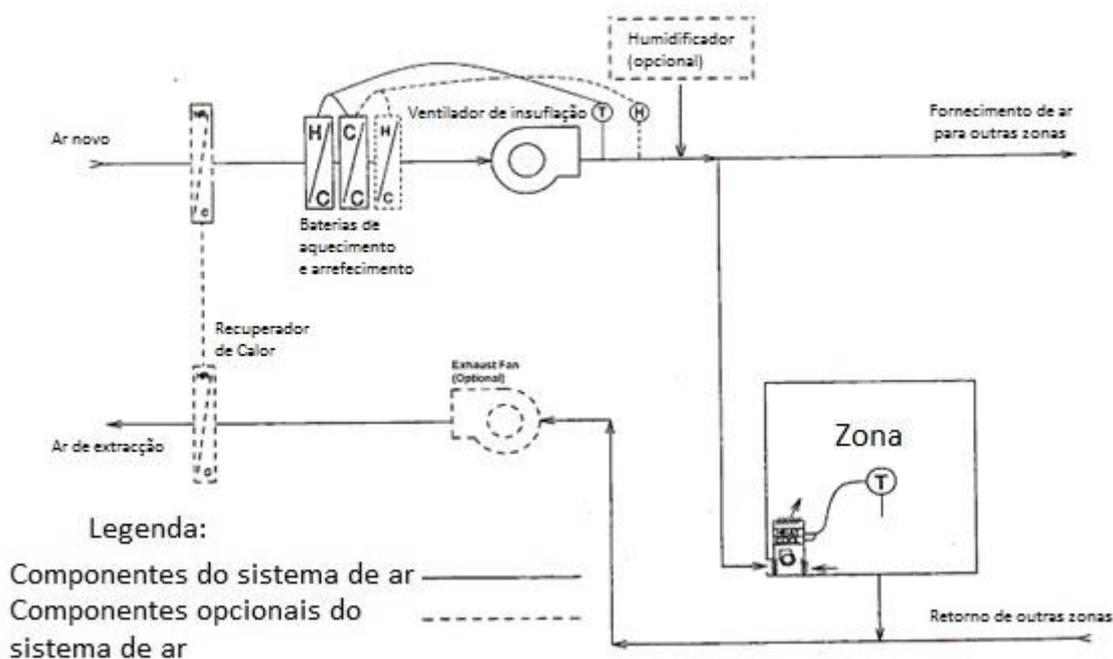


Figura 3.4. Esquema do sistema com unidade terminal. Adaptado: HAP

Ao nível da ventilação, o HAP considera que a UTAN trata 100% de ar novo. A bateria de arrefecimento da UTAN actua quando a temperatura medida no retorno de recirculação da unidade terminal ultrapassa o *setpoint* de 23,9°C, arrefecendo o ar. A bateria de aquecimento actua do mesmo modo, mas com um *setpoint* de 21,1°C.

### Chiller/Bomba de Calor

Para finalizar, dimensiona-se a unidade de produção de energia térmica capaz de alimentar as baterias das UTAs e os ventilo-convectores. O esquema está representado na Figura 3.5 e mostra o circuito primário de arrefecimento, com opção para o aquecimento. É importante referir que, apesar de estarem representadas duas unidades produtoras de energia, a que se espera utilizar é apenas uma, acumulando as duas funções (não em simultâneo).

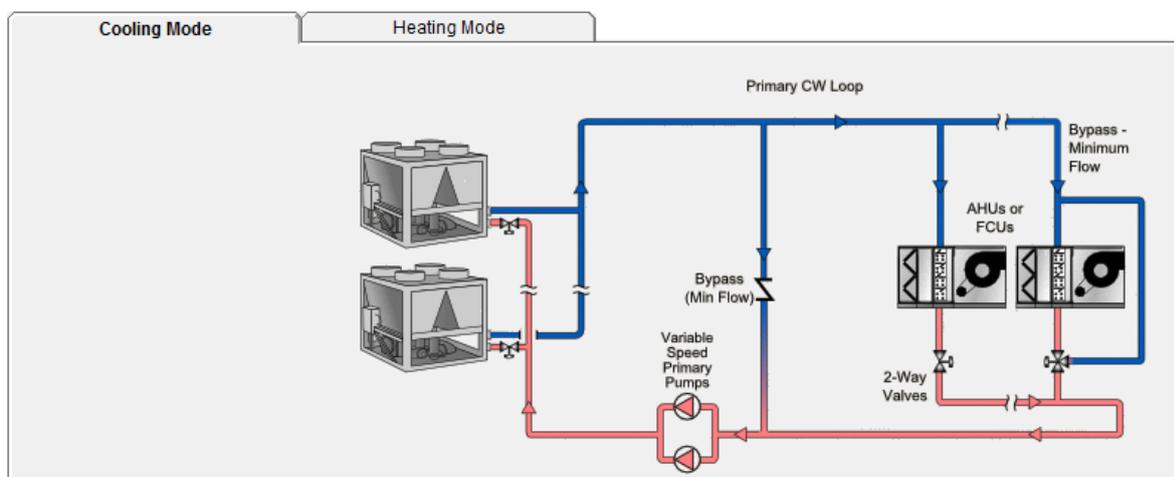


Figura 3.5. Esquema do *chiller*/bomba de calor. Fonte: HAP

### 3.3. Resultados

Os resultados obtidos através do HAP permitem estimar a potência necessária das baterias das UTAs para que os espaços permaneçam sempre dentro das condições de conforto definidas. Foram efectuadas simulações para três situações diferentes ao nível do controlo das baterias e do ventilador de insuflação. O controlo pode ser feito pela temperatura exterior, a temperatura constante e ventilação variável ou a temperatura variável e ventilação constante para as zonas 2 e 3. Para a zona 1, o ventilador pode funcionar em regime constante ou automático, não havendo qualquer diferença na potência associada à bateria da UTA. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4.** Potências em kW, calculadas através do HAP

		Zona 1	Zona 2	Zona 3
<i>Reset</i> por controlo da temperatura exterior	Pot. aquecimento	-	38	12,4
	Pot. arrefecimento	-	65	18,2
Temperatura constante, ventilador automático	Pot. aquecimento	21	19	1,7
	Pot. arrefecimento	11,5	58	14,3
Temperatura variável, ventilador constante	Pot. aquecimento	-	37	12,2
	Pot. arrefecimento	-	55	14,7

As potências de arrefecimento expostas na Tabela 3.4 resultam das perdas/ganhos através da envolvente dos espaços, da ventilação, da iluminação, do equipamento eléctrico, das infiltrações e da ocupação. Para as potências de aquecimento contabiliza-se apenas as trocas de calor pela envolvente e através da ventilação, como indicam as boas práticas de projecto, de modo a realizar o cálculo para a situação mais desfavorável.

Nota-se uma grande discrepância na potência de aquecimento entre a ventilação variável e os outros métodos de controlo. É uma potência demasiado inferior ao expectável, visível tanto para a zona 2 como para a zona 3, o que exclui automaticamente esta opção. Como um dos principais objectivos desta dissertação é garantir o conforto térmico com o equipamento disponível, opta-se pelo controlo de temperatura variável e ventilação constante para ambas as zonas, já que requer menos potência e assegura do mesmo modo a climatização eficiente. A zona 1, por ser dotada de um sistema diferente dos demais, funciona com ventilador automático, ou seja, apenas funciona quando é realmente necessário.

De modo a assegurar as necessidades térmicas das três zonas, o *chiller*/bomba de calor tem que ter as características apresentadas na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5.** Potência do *chiller*/bomba de calor, em kW, calculadas através do HAP

<i>Chiller</i> / Bomba de calor	
Potência Aquecimento [kW]	85
Potência Arrefecimento [kW]	115

Os valores da Tabela 3.5 seriam os ideais para uma instalação original, com resultados que garantem uma boa ventilação e climatização dos espaços, com boa margem de segurança. Como se trata de um projecto de reestruturação, e tendo em conta que as baterias das UTAs e os ventilo-convectores já estão instalados (e terão sido dimensionados com outras premissas), algumas alterações terão de ser efectuadas. A explicação, a selecção e as características do equipamento responsável pelo fornecimento de energia térmica para o piso 2 serão mais aprofundadas no subcapítulo 4.1.

## 4. PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AVAC INDEPENDENTE

### 4.1. Produção de energia térmica de aquecimento e arrefecimento

Por se tratar de um estudo académico, o investimento inicial não é tão relevante, dando mais ênfase à eficiência energética e à qualidade do ar interior. Assim, para o piso 2, a produção de energia térmica deixa de contar com a caldeira a gás, tornando-se um sistema totalmente eléctrico. Esta alteração, além de proporcionar uma maior flexibilidade ao nível do sistema de climatização, aumenta a eficiência energética, reduzindo assim a factura energética e a carga poluente para a atmosfera.

Tendo em conta a potência instalada nas baterias das UTAs do piso 2, não se justifica ter um *chiller*/bomba de calor sobredimensionado. Assim, para satisfazer os requisitos de produção de energia térmica selecciona-se o equipamento Ecolean 1003 da Lennox (Figura 4.1), com uma potência de aquecimento de 95 kW e de 88,2 kW em arrefecimento. Esta máquina tem um COP de 3,05 e um EER de 2,83, e funciona com o fluido frigorigéneo R410A.



Figura 4.1. Chiller/Bomba de calor Ecolean 1003.

Este equipamento é caracterizado pela sua boa eficiência, pelo baixo ruído e por ser conjugado com um módulo hidrónico incorporado (possui um vaso de expansão de 35 L e

um depósito de inércia de 240 L). O esquema de princípio do circuito hidráulico primário está representado na Figura 4.2 e conta com os equipamentos enumerados, que constam na Tabela 4.1.

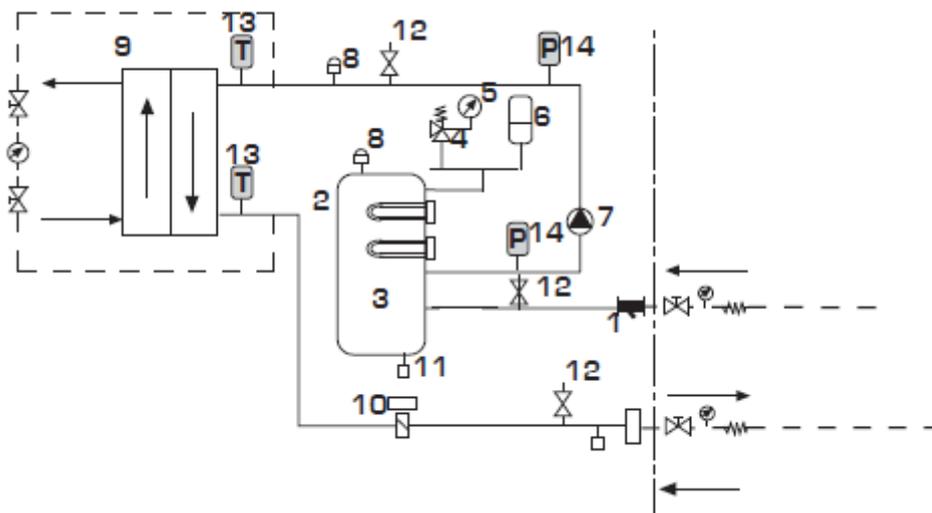


Figura 4.2. Esquema de princípio do circuito hidráulico primário. Fonte: Catálogo Lennox, 2016

Tabela 4.1. Legenda do esquema de princípio do circuito hidráulico da Figura 4.2. Adaptação do catálogo Lennox, 2016

Componentes do circuito hidráulico primário			
1 Filtro de água	6 Vaso de expansão	11 Válvula de drenagem	
2 Depósito de inércia	7 Bomba de água	12 Tomadas de pressão	
3 Bateria de aquecimento eléctrico (opcional)	8 Válvula de purga do ar	13 Sonda de temperatura da água	
4 Válvula de segurança	9 Permutador de calor de placas	14 Transdutor de pressão da água	
5 Manómetro	10 Fluxostato		

É feito o controlo das bombas de água através do equilíbrio do tempo de funcionamento e de troca automática em caso de avaria (bomba dupla). Além disso, a bomba tem controlo de caudal variável, assegurando uma poupança energética anual no que concerne a este equipamento. Futuramente poderão ser instalados até 8 *chillers*/bomba de calor a funcionarem em paralelo.

#### 4.1.1. Descrição do circuito hidráulico

O circuito hidráulico (secundário) instalado no piso 2 é um sistema a quatro tubos, permitindo aquecimento e arrefecimento em simultâneo consoante as necessidades dos

espaços. Actualmente a rede hidráulica é alimentada pela caldeira e pelo *chiller* situados na cobertura, dividindo-se em dois ductos, A e B, sendo que para o piso 2, o primeiro alimenta as UTAs dos anfiteatros e os ventilo-convectores da ala sul (parte esquerda do edifício na vista em planta) e o segundo alimenta a UTA da sala de conferências e os ventilo-convectores da ala norte. As alterações propostas para a autonomia do sistema de climatização no que concerne ao circuito hidráulico estão expostas na secção 4.3. Na ligação às baterias das UTAs, cada circuito é dotado de um pressóstato e um termóstato para fazer o controlo da pressão e da temperatura, respectivamente, e de válvulas de seccionamento, que permitem isolar o troço em caso de avaria ou para manutenção. Os circuitos de avanço são ainda providos de válvulas reguladoras de caudal. Nos ventilo-convectores há válvulas de duas vias do tipo “tudo ou nada”, e válvulas de seccionamento. O comprimento total da tubagem é de cerca de 620m, sendo que 300m são relativos à tubagem de aquecimento (ida e retorno) e 320m relativos à tubagem de arrefecimento (ida e retorno). O circuito hidráulico primário será munido de componentes indispensáveis ao seu funcionamento como bombas de circulação, depósitos de inércia, vasos de expansão e vários tipos de válvulas.

## **4.2. Requisitos de ventilação**

Para se perceber a diferença entre os dois métodos de cálculo de caudal de ar novo referidos na subsecção 1.2.2, faz-se a comparação dos requisitos mínimos para cada espaço, ilustrada na Figura 4.3. O método prescritivo é aplicado considerando sempre a máxima ocupação, enquanto que no método analítico os requisitos variam consoante a taxa de geração de CO<sub>2</sub> (directamente dependente da ocupação). A comparação é feita para 50% e 100% de ocupação em cada espaço, de modo que sejam mais notórias as vantagens que advêm da utilização de um sistema de volume de ar variável (DCV-CO<sub>2</sub>).

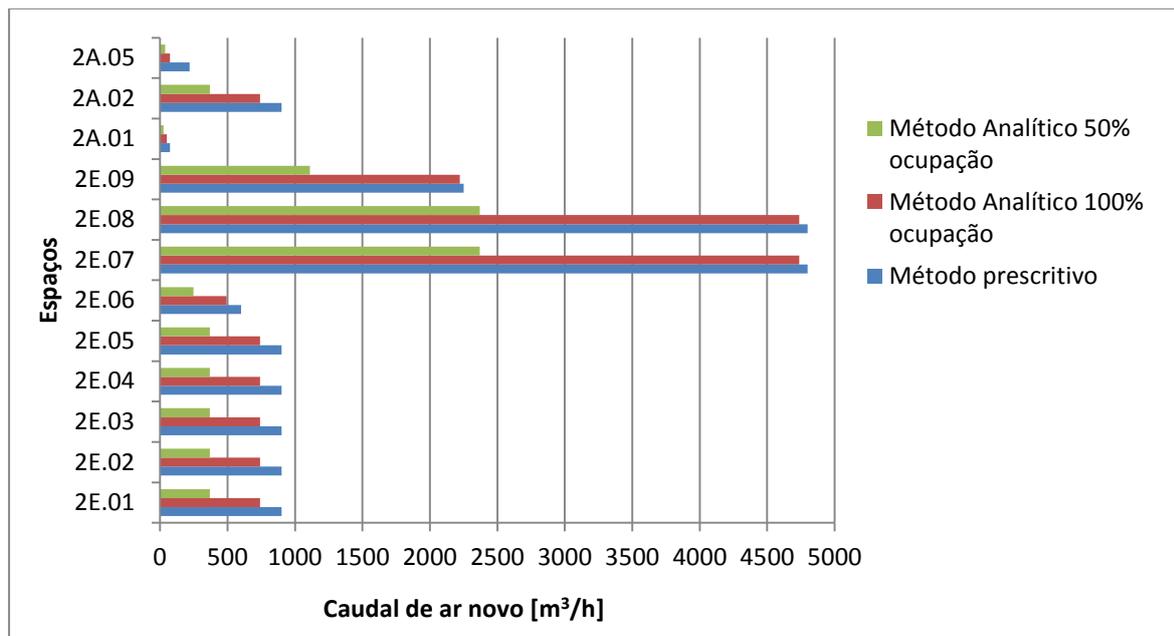


Figura 4.3. Requisitos de ventilação segundo os métodos analítico e prescritivo.

A diferença entre métodos para caudal de ar novo a insuflar, principalmente reduzindo a ocupação para metade, é evidente. As despesas relativas ao consumo energético dos ventiladores reduz-se substancialmente com a aplicação do processo que permite adequar e regular o caudal apenas ao necessário. Tomando como exemplo a sala de conferências (2E.09 na Figura 4.3), para uma ocupação de 50%, o caudal de ar novo insuflado seria de 2250 m<sup>3</sup>/h, quando na realidade só precisa de 1110 m<sup>3</sup>/h para satisfazer as condições mínimas de qualidade do ar interior. O esforço e a potência empregue pelo ventilador é significativamente menor, o que no final do ano leva a uma poupança considerável na factura energética, garantindo do mesmo modo a qualidade do ar necessária.

Actualmente, a parte norte da zona 1 é servida por uma UTA e a parte sul por outra, ambas situadas na cobertura do edifício. Idealmente, se o projecto fosse realizado de raiz, existiria uma UTA própria para a zona 1 no piso 2. Como tal não acontece, algumas adaptações deverão ser feitas para adaptar as UTAs existentes neste piso para as três zonas. Assim, a zona 1 passa a ser servida pela UTA destinada ao anfiteatro A, sendo que a UTA que serve o Anfiteatro B é agora incumbida de ventilar a zona 2 (ambos os anfiteatros). Teoricamente, esta última alteração não proporciona a melhor climatização para cada espaço; contudo, as cargas de aquecimento são calculadas na situação mais desfavorável (sem considerar ocupação) e as necessidades de arrefecimento não são muito significativas, já que durante o verão os anfiteatros são ocupados apenas esporadicamente para realização

de exames e não terão as exigências térmicas mais desfavoráveis em simultâneo durante tempo suficiente que cause desconforto. Como já foi referido, não é a situação ideal, mas é a mais favorável tendo em conta o contexto do problema.

A implementação do DCV-CO<sub>2</sub> passa por instalar em cada espaço com requisitos de ventilação um sensor de CO<sub>2</sub>, ligado a um controlador. O funcionamento deste processo difere para as três zonas: a zona 1 fica sujeita a 100% de ar novo, não havendo recirculação, como sugerem as normas da ASHRAE para salas de aula, e os ventiladores funcionam em dois estágios; a zona 2 é sujeita a recirculação e os ventiladores funcionam do mesmo modo que os da zona 1 (as UTAs são iguais); a zona 3 admite recirculação e o ventilador é de correias, sendo necessário instalar um controlador de frequência variável. Segue-se a explicação do funcionamento para cada zona.

### **Zona 1**

Em cada espaço, será instalado um sensor de CO<sub>2</sub>, preferencialmente à altura da zona de respiração, perto das grelhas de extracção situadas nas portas. Para manter o equilíbrio do sistema e controlar o ar que é insuflado em cada espaço, é imperativo instalar reguladores de caudal nas condutas de insuflação (Figura 4.5). Isto faz com que para cada espaço apenas seja insuflado o caudal de ar necessário, sem correr o risco de não haver caudal de ar novo suficiente para garantir a boa ventilação do espaço mais afastado da UTA. Assegura-se, assim, a uniformidade de ventilação do sistema para esta zona. Dependendo da ocupação de cada espaço, o sensor de CO<sub>2</sub> emite um sinal aos reguladores de caudal para abrirem ou fecharem consoante as necessidades de ventilação. Dado que, originalmente, os ventiladores da UTA funcionam em dois estágios, programa-se o primeiro nível para um caudal de ar novo mínimo, e o segundo nível para o caudal de ar novo máximo. O sensor de pressão do ventilador controla a alteração de estágio. Isto é, depois dos reguladores de caudal estarem abertos a pressão diminui – e conseqüentemente a velocidade do ventilador, em rpm – o caudal de ar aumenta, situando-se no estágio dois. Se os *dampers* reduzirem a passagem de ar, o sensor do ventilador sente a variação de pressão (aumenta), reduzindo a velocidade e o caudal de ar novo insuflado (estágio 1). O processo está representado na Figura 4.4. O ar insuflado pela UTA é pré-aquecido/arrefecido, ficando a climatização dos espaços propriamente dita a cargo das unidades terminais (ventilo-convectores), regulados manualmente nas salas.

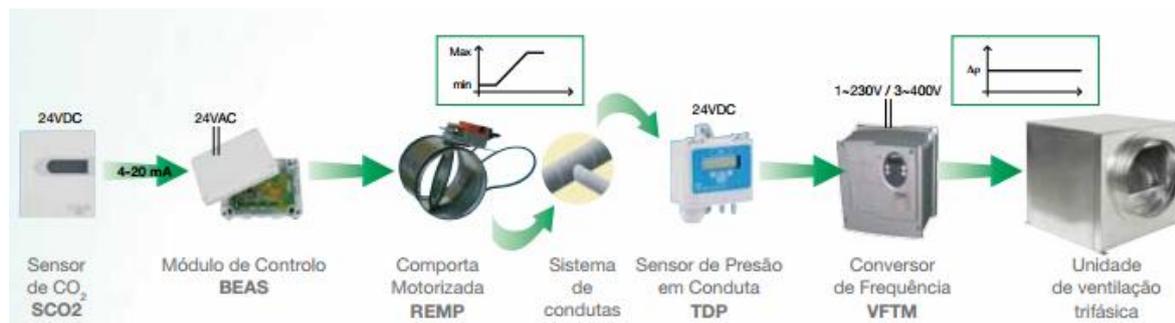


Figura 4.4. Sistema de ventilação por DCV multizona. Fonte: Catálogo S&P DCV,2016

## Zona 2

A colocação dos sensores de  $\text{CO}_2$  é feita de maneira idêntica à zona 1, assim como o funcionamento dos ventiladores de insuflação a nível dos estágios. A particularidade desta zona é que, fazendo recirculação do ar, controla-se a quantidade de ar novo através de *dampers* nas condutas. Deste modo, a energia despendida para a climatização é menor já que se aproveita algum ar de retorno dos espaços. De salientar que, ao contrário do que se passa na zona 1, a climatização é do tipo “tudo ar”, pelo que além de a UTA controlar a qualidade do ar, também controla a sua temperatura. Um termóstato será instalado junto ao sensor de  $\text{CO}_2$  e a maior das exigências controla o funcionamento da UTA. Se a temperatura exterior estiver situada entre os  $20^\circ\text{C}$  e os  $25^\circ\text{C}$ , não há necessidade de actuação das baterias das UTAs, pelo que apenas será realizado o tratamento da qualidade do ar. Se o sensor emitir o sinal de que o ar interior está poluído, o *damper* da conduta de recirculação fecha até o sistema funcionar com 100% de ar novo. Se esta medida não for suficiente, actua-se no ventilador através do método explicado para a zona 1. No caso de ser imperativo climatizar os espaços (informação dada pelo termóstato colocado no espaço), actua a bateria que for necessária, fazendo-se recirculação do ar. A velocidade do ventilador é controlada pela maior das necessidades entre a climatização e a ventilação dos espaços. Nas condutas de insuflação de cada anfiteatro serão instalados reguladores de caudal para garantir o equilíbrio do sistema de ventilação (Figura 4.5).

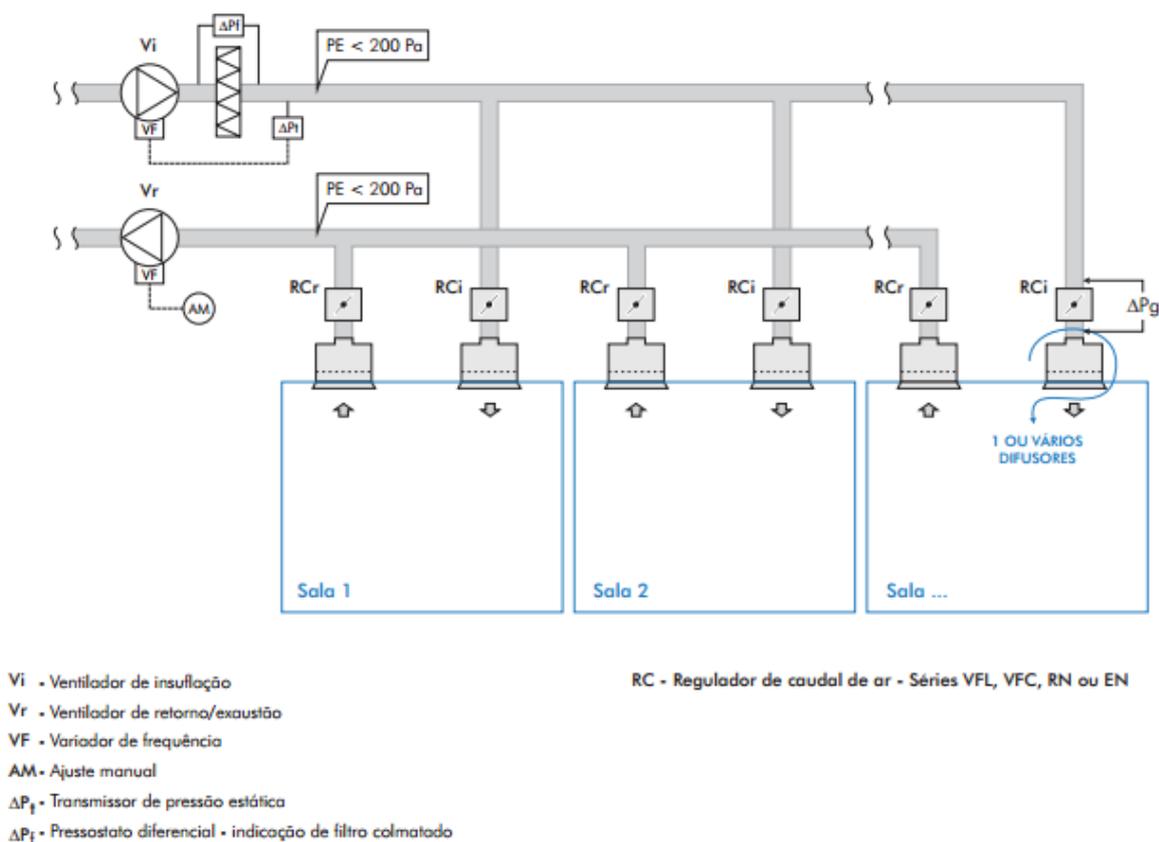


Figura 4.5. Esquema de condutas com reguladores de caudal de ar. Fonte: Catálogo Trox, 2016.

### Zona 3

Este é o caso mais simples para implementar o sistema de ventilação controlada por CO<sub>2</sub>, já que a UTA é dedicada a um espaço só. Neste caso a UTA também faz recirculação do ar, funcionando o controlo de ar insuflado através da regulação dos *dampers* utilizando o mesmo método da zona 2. O espaço será dotado de um termóstato e de um sensor de CO<sub>2</sub>, que fornecem informação da temperatura e da concentração de dióxido de carbono, respectivamente, à UTA e aos reguladores de caudal. Assim como na zona 2, esta é dotada de um sistema do tipo “tudo ar”, pelo que se deve dar atenção não só à carga poluente mas também à temperatura. A principal diferença relativamente à zona 2 é o funcionamento do ventilador de insuflação da UTA. Neste caso será necessário instalar um controlador de velocidade variável, actuando no ventilador, de modo que seja insuflado o ar tendo em conta as necessidades de ventilação consoante a carga poluente (dependente da ocupação) em cada momento.

De modo a pôr em prática o sistema individualizado de climatização e aplicar o controlo de demanda por concentração de CO<sub>2</sub>, algumas alterações terão de ser feitas nas redes de condutas e tubagens do sistema original, conforme se descreve na secção seguinte.

### 4.3. Estratégia e esquema do sistema de climatização

De modo a individualizar o sistema e torná-lo independente do resto do edifício, é necessário adaptar a rede de tubagem hidráulica. As modificações verificam-se em quatro pontos: no ducto A, no ducto B, entre as salas de aula 2E.02 e 2E.03, e na ligação da fonte de produção térmica ao circuito. Para as ligações nos ductos, a solução passa pela instalação de oito válvulas de 3 vias, como se mostra na Figura 4.6 e na Figura 4.7 para o ducto A e B, respectivamente. Deste modo o circuito fica fechado para o piso superior, contudo possibilita que o sistema volte à configuração de funcionamento original, caso ocorra uma avaria ou algum problema pontual no sistema de climatização aqui proposto.

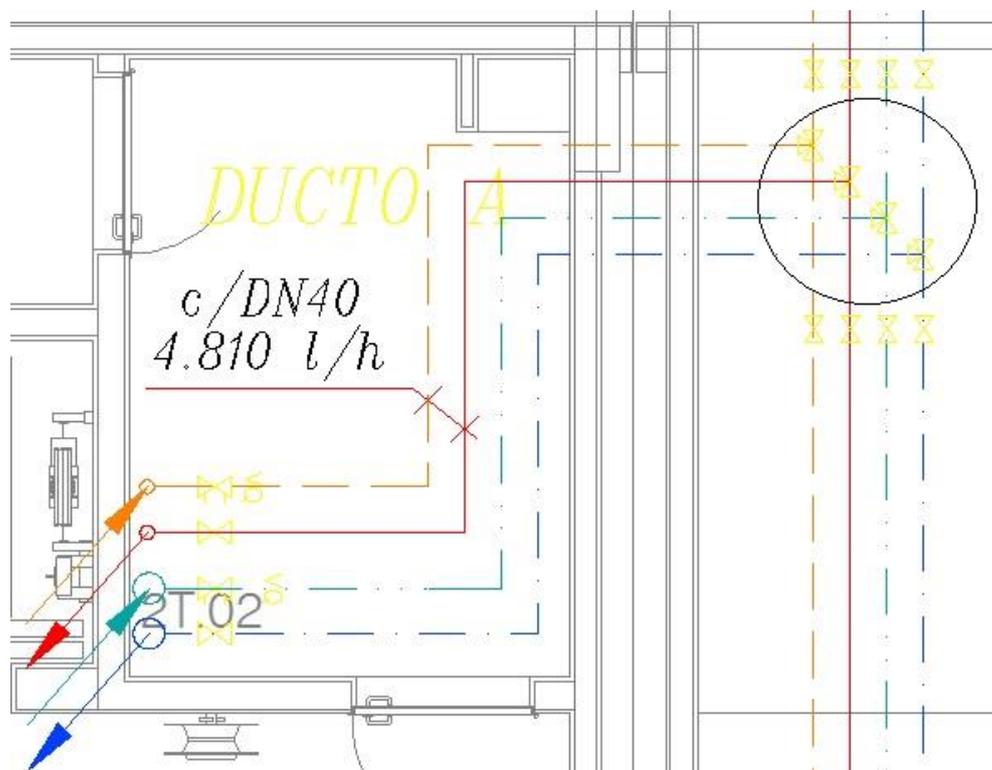


Figura 4.6. Inserção de quatro válvulas de 3 vias na tubagem da rede hidráulica no ducto A.

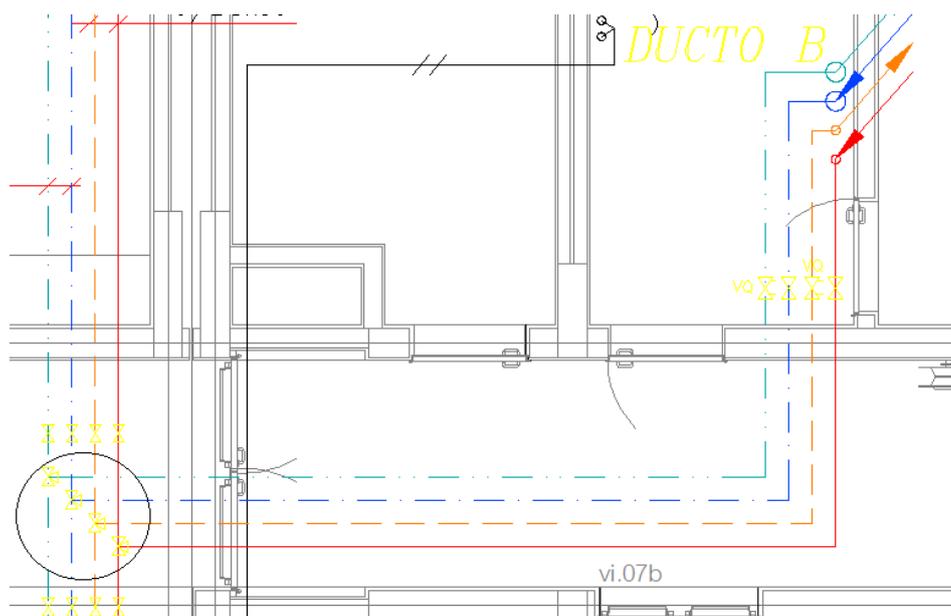


Figura 4.7. Inserção de quatro válvulas de 3 vias na tubagem da rede hidráulica no ducto B.

Entre as salas de aula é necessário instalar cerca de 20m de tubagem (5m para cada linha: aquecimento e arrefecimento, avanço e retorno). O esquema desta alteração está ilustrado na Figura 4.8.

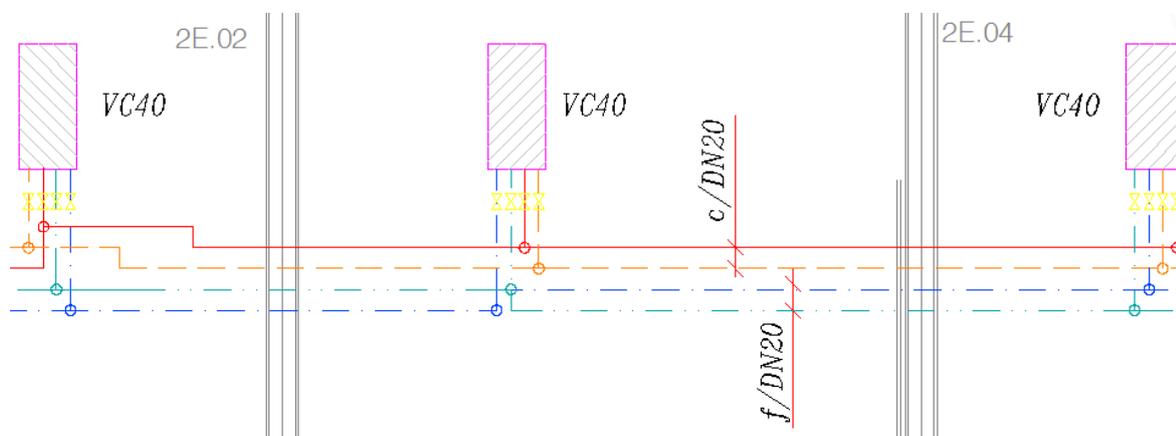


Figura 4.8. Instalação de tubagem na rede hidráulica entre as salas 2E.02 e 2E.03.

Para fazer a ligação do *chiller*/bomba de calor ao circuito, serão necessários cerca de 60m de tubagem. Propõe-se que o equipamento de produção de energia térmica se situe no corredor exterior do piso 2, como se esquetiza na Figura 4.9.

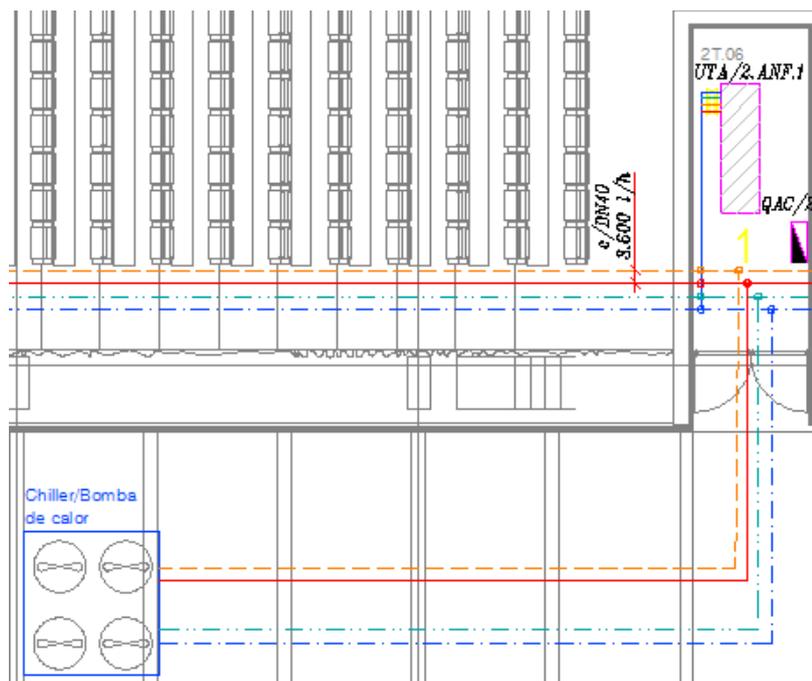


Figura 4.9. Localização e ligação do Chiller/Bomba de calor.

No que respeita ao sistema de condutas, é necessário criar uma ligação entre os dois anfiteatros de modo que sejam servidos pela mesma UTA, libertando a outra para fornecer ar tratado para as salas de aulas, como se mostra na Figura 4.10.

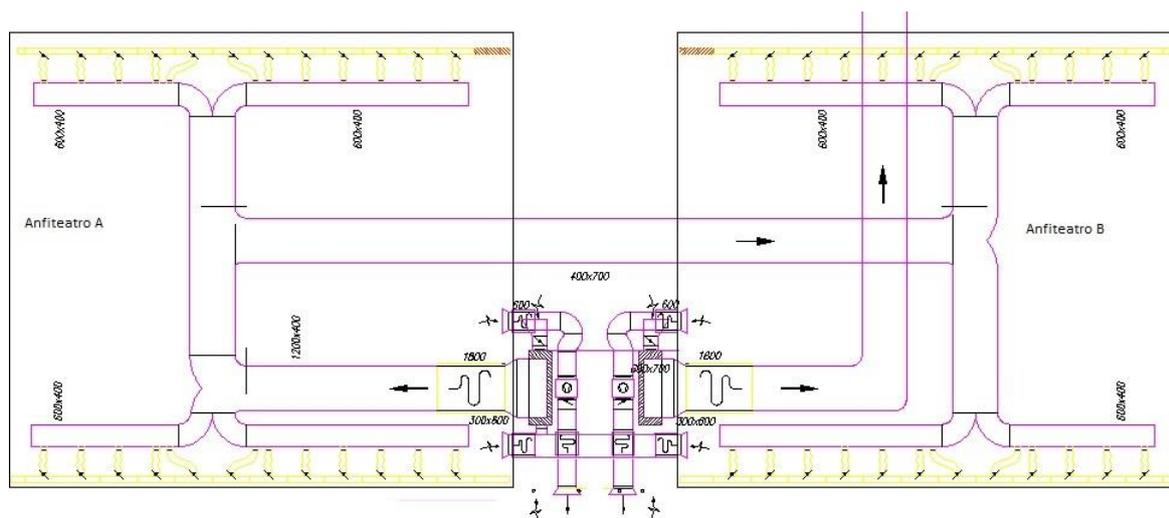


Figura 4.10. Esquema do traçado de condutas dos anfiteatros do piso 2.

A conduta que começa na UTA do lado direito, apresentada na Figura 4.10, e sai do anfiteatro B, é direccionada para as salas de aula, unindo-se às condutas já existentes nesses espaços, como se mostra na Figura 4.11. Além disso, é criada uma ligação que

garante que o retorno do ar do anfiteatro B seja feito na “nova” UTA (à esquerda na Figura 4.10), cortando a ligação à respectiva UTA original.

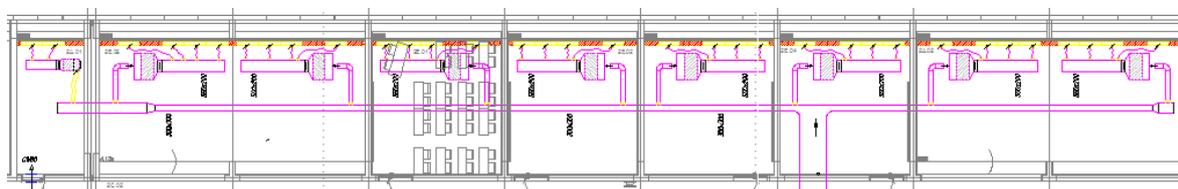


Figura 4.11. Esquema do traçado de condutas das salas de aula do piso 2.

#### 4.4. Notas conclusivas

De acordo com o relatório gerado através do HAP, estima-se que os gastos anuais relativos ao AVAC representem 60,5% do consumo eléctrico (Figura 4.12). Mais uma vez fica provada a importância de ter sistemas de climatização cada vez mais eficientes, já que estes são os responsáveis pela maior fatia do consumo energético em edifícios.

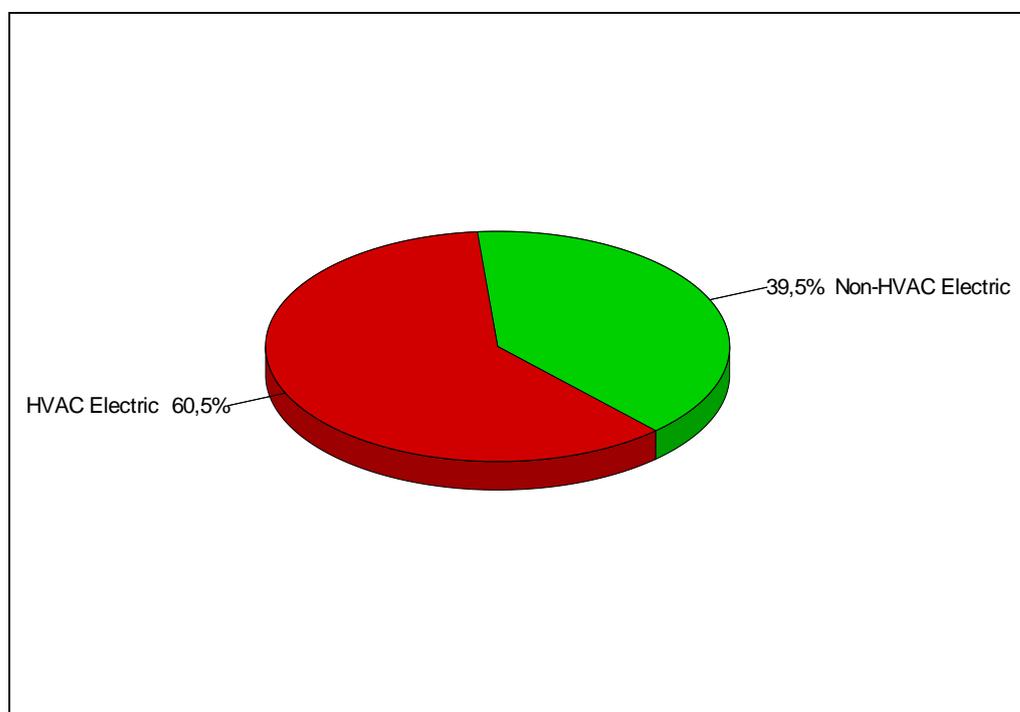


Figura 4.12. Relação de consumo de electricidade entre AVAC e não-AVAC.

O consumo de energia eléctrica no que concerne ao AVAC encontra-se discriminado na Tabela 4.2, atingindo os 14.500€ anuais, sendo a parcela relativa ao aquecimento a responsável pela maior despesa anual, com uma estimativa de 9.000€.

**Tabela 4.2.** Consumo anual respeitante ao sistema AVAC.

Consumos anuais [€]	
Sistema de ventilação	3.500
Arrefecimento	1.700
Aquecimento	9.000
Bombas de circulação	300
Total	14.500

Deve-se salientar que a componente relativa ao sistema de ventilação não inclui o sistema de controlo por demanda de CO<sub>2</sub>, já que o programa de cálculo e simulação HAP não está preparado para isso, o que pode levar a uma poupança adicional na ordem dos 30% (Siemens, 2010).

Em relação ao investimento inicial necessário para a implementação do sistema de climatização e de ventilação proposto, ronda os 31.500€ como se pode verificar mais detalhadamente no APÊNDICE C. A maior despesa é a compra do *chiller*/bomba de calor com módulo hidráulico incorporado, como seria expectável, que ronda os 25.000€. É de ter em conta que neste valor não estão incluídos os custos de mão-de-obra da instalação.

Seria importante, num trabalho futuro, determinar a energia despendida para o sistema de AVAC, especificamente para o piso 2 durante um ano. Deste modo seria possível comparar os valores do projecto proposto com os reais. Actualmente os consumos energéticos são referentes a todo o edifício, não havendo discriminação nem por pisos, nem por tipologia (sistema de AVAC, iluminação, *hottes*,...).

## 5. CONCLUSÃO

Depois de realizado um estudo das características do edifício da FFUC, de modo a perceber quais os aspectos a ser melhorados, verifica-se que existem diversos problemas a necessitarem de intervenção urgente. O tema abordado na presente dissertação teve como objectivo colmatar a deficiente climatização e qualidade do ar verificada no piso 2, onde se encontram a maioria dos espaços frequentados por alunos para a sua aprendizagem (salas de aula, anfiteatros, etc.) e, simultaneamente, propor soluções que contribuam para a racionalização dos consumos energéticos no edifício. Como existe uma relação directa entre a concentração de CO<sub>2</sub> e o bem-estar das pessoas com as características térmicas dos espaços, aliada aos grandes consumos energéticos para climatizar todo edifício na sua forma original, considerou-se que seria o primeiro ponto de partida para a reabilitação deste edifício.

Com as alterações propostas – a concepção de um sistema de AVAC para o piso 2 independente do resto do edifício – espera-se assegurar o conforto de todos os utentes do piso em questão, e ainda assim reduzir a factura energética e as emissões carbónicas. Para isso recomenda-se a instalação de um *chiller*/bomba de calor, com funcionamento eléctrico (a caldeira actual funciona a gás natural, menos eficiente e mais poluente) e um sistema de ventilação com controlo de necessidade por CO<sub>2</sub>, que garante uma boa ventilação, aliada a uma redução do consumo energético dos ventiladores.

Sugere-se que um trabalho dedicado à racionalização dos consumos e à melhoria do ambiente interior neste edifício seja focado no sistema de ventilação dos laboratórios, e no controlo das *hottes* lá inseridas. Por razões de limitação de gastos em energia, o sistema central de AVAC está desligado durante longos períodos ao longo do ano. A falta de ventilação nos laboratórios leva a que o caudal de ar extraído nas *hottes*, numerosas e geralmente mantidas em funcionamento permanente durante o dia, não seja compensado, impondo uma situação de subpressão na globalidade do edifício. Este facto aumenta gravemente as infiltrações – bem notórias nos vãos de acesso ao edifício e monitorizadas também nos terminais de ventilação dos laboratórios – e dificulta o processo de climatização (aumenta os consumos e diminui a eficiência), degradando seriamente o

## CONCLUSÃO

---

conforto térmico e a qualidade do ar interior, não só nos espaços de circulação (átrios e corredores), como também nos laboratórios.

Com a realização desta tese espera-se motivar não só a FFUC mas os gestores de outros edifícios (públicos e privados) para uma melhoria constante, para a racionalização de consumos energéticos através de estratégias e de equipamentos mais eficientes, e mostrar que, embora sendo necessário algum investimento, este pode ser amortizado a curto prazo, ao contribuir também para a melhoria das condições de trabalho e, portanto, para a produtividade dos utentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- “Estação meteorológica ADAI@DEM,.” 2016. <https://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=ICOIMBRA14#history>, acesso em 2/3/2016.
- “ADENE - Agência para a Energia,.” 2016. <http://www.adene.pt/>, acesso em 6/4/2016.
- ASHRAE. 2011. *2011 ASHRAE HANDBOOK HVAC Applications BUILDING OPERATIONS AND MANAGEMENT*. Applicatio.
- Delgado, F. 2007. “A More Efficient Design for Reversible Air – Air Heat Pumps.” 39: 1244–49.
- Jenkins, D., R. Tucker, M. Ahadzi, and R. Rawlings. 2008. “The Performance of Air-Source Heat Pumps in Current and Future Offices.” *Energy and Buildings* 40(10): 1901–10.
- Ma, Zhenjun, Paul Cooper, Daniel Daly, and Laia Ledo. 2012. “Existing Building Retrofits : Methodology and State-of-the-Art.” *Energy & Buildings* 55: 889–902. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.018>.
- Mysen, Mads, Sveinung Berntsen, Per Nafstad, and Peter G Schild. 2005. “Occupancy Density and Benefits of Demand- Controlled Ventilation in Norwegian Primary Schools Occupancy Density and Benefits of Demand-Controlled.” (December).
- Nassif, Nabil. 2012. “A Robust CO<sub>2</sub> -Based Demand-Controlled Ventilation Control Strategy for Multi-Zone HVAC Systems.” *Energy & Buildings* 45: 72–81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.018>.
- Pérez-Lombard, Luis. 2008. “A Review on Buildings Energy Consumption Information ‘.” 40: 394–98.
- Schell, Mike B., Stephen C. Turner, and R. Omar Shim. 1998. “Application of CO<sub>2</sub>-Based Demand Controlled Ventilation Using ASHRAE Standard 62: Optimizing Energy Use and Ventilation.” : 1213–25.
- Siemens, 2010. “Demand-Controlled Ventilation.”
- da Silva, Filipe Alexandre. 2016. “Plano de Racionalização do Consumo de Energia para o Edifício da Faculdade de Farmácia da Universidade de Coimbra.”



## APÊNDICE A

Nº	Espaço	Área m <sup>2</sup>	Ventilação (método prescritivo)								
			Ocupação [nº pessoas]	QAN (ocupação) [m <sup>3</sup> /h]	QAN (poluentes) [m <sup>3</sup> /h]	QAN (máximo) [m <sup>3</sup> /h]	ev QAN efectivo [m <sup>3</sup> /h]	QAN efectivo [l/s]	Volume Rph m <sup>3</sup>		
Ensino Teórico-Prático											
2E.01	Sala Prática de Farmácia	37,4	30	720	112,2	720	0,8	900	250	101,0	8,9
2E.02	Sala de aula Teórica	37,4	30	720	112,2	720	0,8	900	250	101,0	8,9
2E.03	Sala de aula Teórica	37,4	30	720	112,2	720	0,8	900	250	101,0	8,9
2E.04	Sala de aula Teórica	37,4	30	720	112,2	720	0,8	900	250	101,0	8,9
2E.05	Sala de estudo	73,1	30	720	219,3	720	0,8	900	250	197,4	4,6
2E.06	Sala de Informática p/ alunos	50,6	20	480	151,8	480	0,8	600	167	136,6	4,4
2E.07	Anfiteatro A	228,5	192	3840	685,5	3840	0,8	4800	1333	617,0	7,8
2E.08	Anfiteatro B	228,5	192	3840	685,5	3840	0,8	4800	1333	617,0	7,8
2E.09	Sala de Conferências	95,5	90	1800	286,5	1800	0,8	2250	625	257,9	8,7
Espaços Administrativos, Apoio											
2A.01	Sala de Funcionários	19,35	2	48	58,05	58,05	0,8	73	20	52,2	1,4
2A.02	Sala Museu	73,1	30	720	219,3	720	0,8	900	250	197,4	4,6
2A.05	Centro de Cópias	58,6	3	72	175,8	175,8	0,8	220	61	158,2	1,4



## APÊNDICE B

Nº	Espaço	Área m <sup>2</sup>	Ventilação (método analítico) com 100% de ocupação							
			Ocupação [nº pessoas]	Volume m <sup>3</sup>	Adu M	G [mg/h]	Q [m <sup>3</sup> /h]	QAN efectivo [m <sup>3</sup> /h]	Rph	
Ensino Teórico-Prático										
2E.01	Sala Prática de Farmácia	37,4	30	101,0	1,8	1,2	1101600	592	740	7,3
2E.02	Sala de aula Teórica	37,4	30	101,0	1,8	1,2	1101600	592	740	7,3
2E.03	Sala de aula Teórica	37,4	30	101,0	1,8	1,2	1101600	592	740	7,3
2E.04	Sala de aula Teórica	37,4	30	101,0	1,8	1,2	1101600	592	740	7,3
2E.05	Sala de estudo	73,1	30	197,4	1,8	1,2	1101600	592	740	3,8
2E.06	Sala de Informática p/ alunos	50,6	20	136,6	1,8	1,2	734400	395	494	3,6
2E.07	Anfiteatro A	228,5	192	617,0	1,8	1,2	7050240	3790	4738	7,7
2E.08	Anfiteatro B	228,5	192	617,0	1,8	1,2	7050240	3790	4738	7,7
2E.09	Sala de Conferências	95,5	90	257,9	1,8	1,2	3304800	1777	2221	8,6
Espaços Administrativos, Apoio										
2A.01	Sala de Funcionários	19,35	2	52,2	1,8	1,2	73440	39	49	0,9
2A.02	Sala Museu	73,1	30	197,4	1,8	1,2	1101600	592	740	3,8
2A.05	Centro de Cópias	58,6	3	158,2	1,8	1,2	110160	59	74	0,5

Nº	Espaço	Área m <sup>2</sup>	Ventilação (método analítico) com 50% de ocupação							
			Ocupação [nº pessoas]	Volume Adu m <sup>3</sup>	M	G [mg/h]	Q [m <sup>3</sup> /h]	QAN efectivo Rph [m <sup>3</sup> /h]		
Ensino Teórico-Prático										
2E.01	Sala Prática de Farmácia	37,4	30	101,0	1,8	1,2	550800	296	370	3,7
2E.02	Sala de aula Teórica	37,4	30	101,0	1,8	1,2	550800	296	370	3,7
2E.03	Sala de aula Teórica	37,4	30	101,0	1,8	1,2	550800	296	370	3,7
2E.04	Sala de aula Teórica	37,4	30	101,0	1,8	1,2	550800	296	370	3,7
2E.05	Sala de estudo	73,1	30	197,4	1,8	1,2	550800	296	370	1,9
2E.06	Sala de Informática p/ alunos	50,6	20	136,6	1,8	1,2	367200	197	247	1,8
2E.07	Anfiteatro A	228,5	192	617,0	1,8	1,2	3525120	1895	2369	3,8
2E.08	Anfiteatro B	228,5	192	617,0	1,8	1,2	3525120	1895	2369	3,8
2E.09	Sala de Conferências	95,5	90	257,9	1,8	1,2	1652400	888	1110	4,3
Espaços Administrativos, Apoio										
2A.01	Sala de Funcionários	19,35	2	52,2	1,8	1,2	36720	20	25	0,5
2A.02	Sala Museu	73,1	30	197,4	1,8	1,2	550800	296	370	1,9
2A.05	Centro de Cópias	58,6	3	158,2	1,8	1,2	55080	30	37	0,2

## APÊNDICE C

### Investimento inicial em equipamento

Equipamento	Unidades	Preço unit. [€]	Quantidade	Total [€]
<i>Chiller</i> /bomba de calor com módulo hidrónico	un	25000	1	25000
Válvula seccionamento DN40	un	17	5	85
Válvula seccionamento DN50	un	25	5	125
Tubagem	ml	7,84	40	313,6
Tubagem	ml	10,49	40	419,6
Curvas, tês, reduções	un	40	1	40
Válvula anti-retorno	un	70	2	140
Tomadas de pressão e temperatura	un	6	2	12
Juntas anti-vibráteis	un	20	4	80
Válvula de 3 vias motorizadas	un	170	8	1360
Sensor CO <sub>2</sub>	un	211	12	2532
Regulador de caudal de ar dinâmico	un	110	12	1320
TOTAL				31427,2



## APÊNDICE D

Esquema de princípio do sistema de climatização do piso 2:

