



**FCTUC** FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
  
DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Caracterização da Qualidade do Ambiente Interior num Edifício Escolar Recentemente Requalificado**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

**Autor**

**Ana Rita Vaz Parreiral**

**Orientador**

**Professor Doutor José Joaquim da Costa**

**Júri**

**Presidente** Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Professor Doutor José Joaquim da Costa

**Vogais**

Professor Doutor Manuel Carlos Gameiro da Silva

**Coimbra, Setembro, 2011**

## Agradecimentos

Para a execução deste trabalho foi imprescindível o contributo de algumas pessoas, às quais expresso aqui o meu agradecimento.

Ao Professor José Costa agradeço a orientação deste trabalho, a transmissão de conhecimentos, críticas e sugestões essenciais à sua realização.

Ao Dr. Rui Costa, Director do Agrupamento de Escolas de Mortágua, agradeço a permissão para a realização das medições na Escola Básica 2,3 Dr. José Lopes de Oliveira.

À Engenheira Sara Francisco agradeço todos os esclarecimentos e apoio prestados, o material facultado e a disponibilidade demonstrada. Agradeço também ao Engenheiro Gonçalo Brites pela disponibilização de informação necessária à elaboração desta dissertação.

Gostaria de deixar um agradecimento especial às funcionárias do Bloco C pela disponibilidade e simpatia demonstradas ao longo da minha permanência no edifício. Sem a sua colaboração e compreensão não teria sido possível a concretização dos objectivos no tempo disponibilizado para tal.

Para finalizar fica um obrigado às colegas que estiveram presentes nestes últimos tempos, Clotilde Ribeiro, Inês Lucas e Vânia Mendes pelo apoio, incentivo e boa disposição que sempre demonstraram.

## Resumo

Esta dissertação tem como objectivo a caracterização da qualidade do ambiente interior do Bloco C, da Escola Básica 2,3 Dr. José Lopes de Oliveira, que recentemente foi alvo de uma intervenção de reabilitação.

Para a concretização deste objectivo foram efectuadas medições das concentrações de CO<sub>2</sub> e PM<sub>10</sub>, da temperatura e da humidade relativa do ar interior, níveis de iluminação e de ruído no interior de algumas salas do Bloco C. Posteriormente foi efectuado o tratamento dos dados registados e verificadas as suas conformidades com a legislação actual.

Os caudais de ar novo efectivos em cada uma das salas foram obtidos através das taxas de renovação de ar, determinadas pela aplicação da técnica dos gases traçadores em período de decaimento da concentração. Neste caso, usou-se como gás traçador o CO<sub>2</sub> emitido pelos ocupantes (CO<sub>2</sub> metabólico).

Conhecidos os valores dos caudais de ar novo efectivos, foram comparados com os caudais de ar novo adequados às diferentes salas monitorizadas, de modo a que a média da concentração de CO<sub>2</sub> no período considerado apresentasse conformidade com a legislação (< 1500 ppm). Foi, assim, possível determinar quais as salas que apresentavam um défice de ar novo.

No que diz respeito à iluminação, foram comparados os valores dos níveis de iluminação natural e artificial, em cada sala analisada. Para a caracterização do conforto acústico procedeu-se à verificação da conformidade do nível de ruído resultante do sistema de ventilação.

Da observação de todos os resultados obtidos concluiu-se que a qualidade do ambiente interior não é uniforme em todas as salas e que se verificam poucas conformidades com a legislação.

**Palavras-chave:** Qualidade do ambiente interior, Caudal de ar novo, Taxa de renovação de ar, Nível de iluminação, Nível de ruído.

## Abstract

This thesis intends to characterise the air indoor environmental quality in Building C of Escola Básica 2,3 Dr. José Lopes de Oliveira, which was recently renovated.

For that purpose, CO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub> concentration, temperature and relative humidity of indoor air, lighting and noise levels were measured inside some of the rooms in Building C. Then, logged data was processed and its conformity to current legislation verified.

Actual fresh air flow in each of the rooms was obtained through air renewal rates calculated by applying the tracer gas method in the concentration decay period. In this case, the tracer gas used was CO<sub>2</sub> released by building occupants (metabolic CO<sub>2</sub>).

Once actual fresh air flow values were ascertained, they were compared with fresh air flows suitable for the various monitored rooms, so the average CO<sub>2</sub> concentration during the analysed period would conform to legislation (< 1500 ppm). This meant it was possible to establish which rooms presented a fresh air shortage.

As far as lighting is concerned, values of natural and artificial light levels were compared in each of the analysed rooms. In order to characterise acoustic comfort, conformity of the noise level resulting from ventilation system operation was assessed.

Analysis of all data obtained led to the conclusion that the indoor environmental quality inside all rooms is not uniform and that conformity to legislation only occurs in few cases.

**Keywords:** Indoor environmental quality, Flow of fresh air, Air exchange rate, Lighting level, Noise level.

## Índice

Índice de Figuras .....	v
Índice de Tabelas .....	vi
Simbologia e Siglas .....	vii
Simbologia.....	vii
Siglas .....	vii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do Tema .....	1
1.2. Objectivos e Metodologia .....	2
1.3. Estrutura da Dissertação .....	3
2. Qualidade do Ambiente Interior .....	4
2.1. Introdução .....	4
2.2. Enquadramento Legislativo .....	5
2.3. Qualidade do Ar Interior .....	7
2.4. Conforto Térmico .....	10
2.5. Conforto Visual.....	11
2.6. Conforto Acústico.....	12
3. Metodologia.....	15
3.1. Introdução .....	15
3.2. Caracterização do Edifício .....	16
3.3. Descrição do Método .....	19
3.4. Equipamentos de Medição .....	24
4. Análise dos Resultados.....	26
4.1. Concentração de CO <sub>2</sub> .....	26
4.2. Concentração de PM <sub>10</sub> .....	31
4.3. Temperatura e Humidade Relativa .....	33
4.4. Determinação do Caudal de Ar Novo .....	37
4.5. Estimativa do Caudal de Ar Novo Adequado.....	41
4.6. Nível de Iluminação .....	45
4.7. Nível de Ruído .....	46
4.8. Notas Conclusivas.....	47
5. Conclusões.....	49
5.1. Conclusões .....	49
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	51
6. Referências Bibliográficas.....	52
7. Anexos.....	54
Anexo A – Plantas do Sistema de Ventilação (Bloco C) .....	54
Anexo B – Plantas do Sistema de Iluminação (Bloco C) .....	58
Anexo C – Vista do Exterior do Bloco C .....	61
Anexo D – Imagens dos Equipamentos de Medição.....	62
Anexo E – Concentração de CO <sub>2</sub> .....	63
Anexo F – Temperatura e Humidade Relativa .....	66
Anexo G – Taxa de Renovação de Ar .....	69
Anexo H – Imagens do interior do Bloco C .....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.2.1. Localização do Bloco C .....	16
Figura 4.1.1. Concentração de CO <sub>2</sub> na Sala 2 .....	26
Figura 4.1.2. Concentração de CO <sub>2</sub> na Sala 3 .....	27
Figura 4.1.3. Concentração de CO <sub>2</sub> na Sala 8 .....	27
Figura 4.1.4. Concentração de CO <sub>2</sub> na Sala 13 .....	28
Figura 4.1.5. Concentração de CO <sub>2</sub> na Sala 14 .....	28
Figura 4.1.6. Concentração de CO <sub>2</sub> na Sala 16 .....	29
Figura 4.2.1. Concentração de PM <sub>10</sub> (mg/m <sup>3</sup> ) .....	32
Figura 4.2.2. Concentração de partículas por classes dimensionais: valores médios das medições no intervalo da tarde .....	33
Figura 4.3.1. T e HR na Sala 2 .....	34
Figura 4.3.2. T e HR na Sala 3 .....	34
Figura 4.3.3. T e HR na Sala 8 .....	35
Figura 4.3.4. T e HR na Sala 13 .....	35
Figura 4.3.5. T e HR na Sala 14 .....	36
Figura 4.3.6. T e HR na Sala 16 .....	36
Figura 4.4.1. Intervalos de decaimento na Sala 2 .....	37
Figura 4.4.2. Regressão linear ao decaimento I .....	38
Figura 4.4.3. Regressão linear ao decaimento II .....	38
Figura 4.4.4. Regressão linear ao decaimento III .....	39
Figura 4.5.1. Estimativa para Sala 11 com 100% de ocupação .....	42
Figura 4.5.2. Estimativa para Sala 11 com 75% de ocupação .....	42
Figura 4.5.3. Estimativa para Sala 19 com 100% de ocupação .....	43
Figura 4.5.4. Estimativa para Sala 19 com 75% de ocupação .....	43
Figura 4.6.1. Verificação regulamentar do nível de iluminação .....	45
Figura 4.7.1. Verificação regulamentar do nível de ruído .....	46
Figura 4.8.1. Observações .....	47
Figura A.1. Planta do Sistema de Ventilação do Piso 0 .....	54
Figura A.2. Planta do Sistema de Ventilação do Piso 1 .....	55
Figura A.3. Planta do Sistema de Ventilação do Piso 2 .....	56
Figura A.4. Planta da localização das UTA's na cobertura .....	57
Figura B.1. Planta do Sistema de Iluminação do Piso 0 .....	58
Figura B.2. Planta do Sistema de Iluminação do Piso 1 .....	59
Figura B.3. Planta do Sistema de Iluminação do Piso 2 .....	60
Figura C.1. Imagens do exterior do Bloco C .....	61
Figura D.1. Equipamentos utilizados .....	62
Figura E.1. Concentração de CO <sub>2</sub> na Sala 4 .....	63
Figura E.2. Concentração de CO <sub>2</sub> na Sala 11 .....	64
Figura E.3. Concentração de CO <sub>2</sub> na Sala 19 .....	64
Figura E.4. Concentração de CO <sub>2</sub> na Sala de Professores .....	65
Figura E.5. Concentração de CO <sub>2</sub> no Bar de Professores .....	65
Figura F.1. T e HR na Sala 4 .....	66

---

Figura F.2. T e HR na Sala 11 .....	67
Figura F.3. T e HR na Sala 19 .....	67
Figura F.4. T e HR na Sala de Professores .....	68
Figura F.5. T e HR no Bar de Professores .....	68
Figura G.1. Taxa de renovação de ar (sala 3 e 4) .....	69
Figura G.2. Taxa de renovação de ar (sala 8 e 11) .....	70
Figura G.3. Taxa de renovação de ar (sala 13 e 14) .....	71
Figura G.4. Taxa de renovação de ar (sala 16 e 19) .....	72
Figura H.1. Imagens do interior do Bloco C .....	75

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.3.1. Principais factores e fontes que afectam a QAI .....	7
Tabela 2.3.2. Concentrações máximas de referência de poluentes no interior de edificios ..	8
Tabela 3.2.1. Locais servidos por cada UTA .....	19
Tabela 3.3.1. Calendarização das medições .....	20
Tabela 3.3.2. Média do peso e da altura dos alunos em função da idade .....	23
Tabela 3.3.3. Ocupação das salas .....	23
Tabela 3.4.1. Características dos equipamentos .....	24
Tabela 3.4.2. Distribuição dos equipamentos pelas salas .....	24
Tabela 4.1.1. Verificação de conformidade .....	30
Tabela 4.4.1. Taxas de renovação de ar .....	39
Tabela 4.4.2. Caudais de ar novo efectivos .....	40
Tabela 4.5.1. Concentração de equilíbrio para a ocupação de 100% e 75% .....	44
Tabela 4.5.2. $Q_{AN}$ efectivo vs $Q_{AN}$ adequado .....	44

## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

[CO<sub>2</sub>] – Concentração de dióxido de carbono (ppm)

[CO<sub>2</sub>]<sub>MR</sub> – Concentração máxima de referência do CO<sub>2</sub> (ppm)

[CO<sub>2</sub>]<sub>MedT</sub> – Concentração média de CO<sub>2</sub> num dado intervalo de tempo (ppm)

[CO<sub>2</sub>]<sub>Ext</sub> – Concentração de CO<sub>2</sub> medido no exterior (ppm)

CC – Critério de conformidade

Q<sub>AN</sub> – Caudal de ar novo (m<sup>3</sup>/h)

T – Temperatura (°C)

HR – Humidade Relativa (%)

λ – Taxa de renovação de ar (h<sup>-1</sup>)

### Siglas

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

QAI – Qualidade do Ar Interior

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos em Edifícios

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

UTA – Unidade de Tratamento de Ar



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento do Tema

O desenvolvimento tecnológico e o aumento do padrão de vida da sociedade promoveram o progresso na concepção dos edifícios para habitação, trabalho e outros, uma vez que é neles que as pessoas passam a maior parte do seu dia. Passou a ser considerado um conjunto de exigências funcionais que permitiram o aumento do conforto dos ocupantes.

O conforto ambiental que um edifício possa proporcionar aos seus ocupantes depende de factores como a qualidade do ar interior, o ambiente térmico, a iluminação e o ruído, e tem implicações na saúde e na produtividade dos ocupantes.

Sejam edifícios novos, existentes ou requalificados, deve sempre ser considerada a natureza multifacetada dos problemas do ambiente interior (Alfano *et al.*, 2010). A qualidade do ar interior nos edifícios é um determinante essencial para uma vida saudável e o bem-estar dos ocupantes. Um conjunto de substâncias perigosas emitidas a partir de materiais de construção e equipamentos ou devidas a actividades humanas em ambientes fechados conduz a uma ampla gama de problemas de saúde (WHO, 2011).

Associado à qualidade do ambiente interior de um edifício deve estar um eficiente consumo energético. Os equipamentos que promovem o conforto térmico e a iluminação são um dos principais consumidores de energia num edifício. Desta forma deverá ser assegurado o conforto com limitação para o consumo de energia. Esta conciliação nem sempre será fácil de conseguir, mas com recurso à actual legislação, a solução ideal poderá ser alcançada.

Neste trabalho apenas será abordada a temática da qualidade do ambiente interior de um edifício escolar.

Actualmente, um aluno passa cerca de 37% do seu dia no interior de um edifício escolar e, muitas vezes, sujeito a um ar interior composto por um conjunto diversificado de poluentes, que poderão comprometer a sua saúde a curto e a longo prazo.

Os alunos mais jovens são mais susceptíveis à poluição do ar porque o seu organismo ainda não se encontra totalmente desenvolvido.

Uma ventilação eficaz é um factor determinante para a manutenção de uma elevada qualidade do ar interior e do conforto térmico, não só para a segurança dos ocupantes, como também para a redução das irregularidades associadas aos elementos construtivos.

Uma ventilação insuficiente, nas escolas, tem sido associada a problemas respiratórios e a doenças infecciosas com prejuízo para os resultados da aprendizagem. Uma má ventilação também está associada a níveis mais elevados de poluentes químicos e problemas com humidade, sendo este um problema comum nas escolas (WHO, 2011).

Para a realização das actividades inerentes a uma sala de aula é muito importante a utilização de uma iluminação eficiente, através da conjugação da iluminação natural com a artificial. Por outro lado, se o ruído de fundo de uma sala de aula é excessivo, a capacidade de concentração de alunos e professores e o entendimento entre eles podem ser muito afectados.

Estudos realizados em vários países apontaram a existência de inúmeras lacunas no ambiente interior das escolas. Um direito que assiste a todos os alunos, professores e funcionários de uma escola é a existência de um ambiente interior saudável. O investimento na qualidade dos edifícios escolares será extremamente proveitoso a longo prazo devido à melhoria dos resultados de aprendizagem e a uma redução nas despesas dos cuidados de saúde (Alfano *et al.*, 2010).

## **1.2. Objectivos e Metodologia**

A presente dissertação tem como principal objectivo a caracterização da qualidade do ambiente interior de algumas das salas de aula do Bloco C da Escola Básica 2,3 Dr. José Lopes de Oliveira, através da determinação dos caudais de ar novo existentes e da verificação da sua conformidade à luz da actual legislação. Será estimado o caudal de ar novo adequado com o intuito de promover a situação de conforto para professores e alunos. Serão ainda analisados outros parâmetros, tais como o nível de iluminação e o nível de ruído ambiente no interior das salas.

As taxas de renovação de ar e o respectivo caudal de ar novo serão determinadas em diversas salas com recurso ao método do gás traçador através da técnica do decaimento, utilizando o dióxido de carbono produzido pelo metabolismo dos ocupantes. Para a consecução dos objectivos traçados, proceder-se-á à monitorização contínua da concentração interior de dióxido de carbono ao longo de um dia de aulas. O cálculo do caudal de ar novo adequado será feito sempre que se verificar uma situação de não conformidade.

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos. Inicia-se com o capítulo introdutório, que expõe o enquadramento do tema, sendo também enunciado o objectivo, metodologia e estrutura da dissertação.

No capítulo 2 apresentam-se os fundamentos teóricos subjacentes à caracterização da qualidade do ambiente interior, com ênfase para edifícios escolares e o respectivo enquadramento legislativo.

No capítulo 3 apresenta-se a metodologia adoptada para este caso de estudo, uma breve descrição do edifício e identificam-se os equipamentos utilizados nas medições.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos para cada parâmetro em estudo e em cada local de medição, efectuando-se a verificação regulamentar. São ainda indicadas algumas notas conclusivas.

Por fim são enunciadas as conclusões, reflectindo a análise dos resultados observados no capítulo anterior, e são apresentadas sugestões para trabalhos a desenvolver no futuro.

## 2. QUALIDADE DO AMBIENTE INTERIOR

### 2.1. Introdução

No Manual REHVA (Alfano *et al.*, 2010), a Qualidade do Ambiente Interior é definida como uma medida de efeito conjunto do conforto térmico, conforto visual, conforto acústico e das condições de qualidade do ar interior num ambiente específico.

A qualidade do ambiente interior de um edifício pode ser expressa através de exigências específicas, que integrem o edifício ao ambiente exterior e à satisfação dos ocupantes nos ambientes interiores.

Conforto é um conceito subjectivo e difícil de avaliar, pois varia de pessoa para pessoa. Contudo, conforto pode ser descrito como a interpretação pessoal de estímulos, através de respostas fisiológicas (sensações) e de emoções. Os estímulos ambientais são físicos, objectivos e quantificáveis, sendo percebidos pelo indivíduo através dos seus sentidos, e manifestados através de sensações.

Os edifícios escolares são ocupados, quase na totalidade, por crianças e jovens em fase de desenvolvimento do seu organismo, nomeadamente das vias respiratórias. Quando expostos, desde cedo, a ambientes interiores de baixa qualidade, poderão comprometer a sua saúde e qualidade de vida no futuro.

A saúde e conforto dos alunos e professores estão entre os muitos factores que contribuem para a aprendizagem e produtividade nas salas de aula, que por sua vez afectam o desempenho escolar dos alunos.

Proporcionar um ambiente saudável e confortável pode ser considerado um investimento nos alunos e professores.

A incapacidade de responder de forma rápida e eficaz à má qualidade do ar interior nas escolas pode conduzir a que, a curto e longo prazo, se verifiquem graves consequências.

## 2.2. Enquadramento Legislativo

Nos últimos anos, o sector dos edifícios apresentou um elevado consumo energético. Com vista a promover a melhoria do desempenho energético e das condições de conforto dos edifícios, surgiu a Directiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro. Da transposição desta directiva para a legislação nacional resultou um pacote legislativo composto por:

- Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE);
- Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 Abril, Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE);
- Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 Abril, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

O SCE tem como finalidade assegurar a aplicação regulamentar, certificar o desempenho energético e a qualidade do ar interior nos edifícios e identificar as medidas correctivas ou de melhoria de desempenho aplicáveis aos edifícios e respectivos sistemas energéticos, nomeadamente caldeiras e equipamentos de ar condicionado, quer no que respeita ao desempenho energético, quer no que respeita à qualidade do ar interior.

O RSECE estabelece as condições a observar no projecto de novos sistemas de climatização, nomeadamente, os requisitos em termos de conforto térmico e de qualidade do ar interior e os requisitos mínimos de renovação e tratamento de ar que devem ser assegurados em condições de eficiência energética. Estabelece ainda, os requisitos em termos da concepção, da instalação e do estabelecimento das condições de manutenção a que devem obedecer os sistemas de climatização, para garantia de qualidade e segurança durante o seu funcionamento normal. Impõe os limites máximos de consumo de energia nos edifícios e os limites de potência aplicáveis aos sistemas de climatização. Este regulamento estabelece também as condições de manutenção dos sistemas de climatização, de monitorização e de auditoria de funcionamento dos edifícios em termos dos consumos de energia e da qualidade do ar interior.

O RCCTE estabelece as regras a observar no projecto de todos os edifícios de habitação e dos edifícios de serviços, sem sistemas de climatização centralizados de modo a que sejam cumpridas as exigências de conforto térmico, e as necessidades de água quente sanitária, sem dispêndio excessivo de energia. Impõe ainda, que sejam minimizadas as

situações patológicas nos elementos de construção provocadas pela ocorrência de condensações superficiais ou internas, com potencial impacto negativo na durabilidade dos elementos de construção e na qualidade do ar interior.

No que respeita a sistemas de iluminação de edifícios, a legislação portuguesa não é específica. Apesar da iluminação ter um contributo significativo para o consumo de energia, tanto nos edifícios de habitação como de serviços, não estão estabelecidos limites de densidade de iluminação.

A Norma Europeia EN 12464-1 de 2002 especifica os requisitos de iluminação para os locais de trabalho interior, que satisfaçam as necessidades de conforto visual e desempenho.

Em relação ao ruído, a legislação portuguesa apresenta:

- Decreto-Lei n.º 129/2002 de 11 de Maio, Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE);

- Decreto-Lei n.º 146/2006 de 31 Julho;
- Decreto-Lei n.º 182/2006 de 6 de Setembro;
- Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro, Regulamento Geral do Ruído;
- Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de Junho, apresenta as alterações ao RRAE.

O RRAE estabelece os requisitos acústicos dos edifícios, com vista a melhorar as condições de qualidade da acústica desses edifícios.

O Decreto-Lei n.º 146/2006 resultou da transposição da Directiva n.º 2002/49/CE, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente. Este decreto-lei tem como objectivo determinar a exposição ao ruído ambiente exterior e elaborar planos de acção que visem prevenir e reduzir o ruído ambiente, em especial quando os níveis de exposição sejam susceptíveis de provocar efeitos prejudiciais para a saúde humana e de preservar a qualidade do ambiente acústico.

O Decreto-Lei n.º 182/2006 de 6 de Setembro resultou da transposição da Directiva n.º 2003/10/CE que adoptou prescrições mínimas de segurança e saúde respeitantes à exposição dos trabalhadores aos riscos devidos ao ruído. Este decreto-lei estabelece o valor limite de exposição, os valores de acção de exposição superior e inferior

e determina um conjunto de medidas a aplicar sempre que sejam atingidos ou ultrapassados esses valores.

O Regulamento Geral do Ruído estabelece o regime de prevenção e controlo da poluição sonora, visando a salvaguarda da saúde humana e o bem-estar das populações.

## 2.3. Qualidade do Ar Interior

A Qualidade do Ar Interior depende das características químicas, físicas e biológicas do ar num dado espaço interior. A QAI resulta da interacção entre a localização do edifício, o clima, o sistema de ventilação, as fontes de contaminação e o número de ocupantes. Na Tabela 2.3.1 são descritos alguns dos factores e as respectivas fontes que afectam a QAI.

**Tabela 2.3.1. Principais factores e fontes que afectam a QAI  
(adaptado de Matos *et al.*, 2010)**

<b>Factor</b>	<b>Fonte</b>
Dióxido de carbono	Metabolismo das pessoas, queima de combustíveis fósseis.
Monóxido de carbono	Emissões de veículos, combustão, fumo do tabaco.
Formaldeído	Materiais utilizados na construção, tecidos, cola, carpetes, mobiliário.
Partículas	Fumo, entradas de ar, papel, isolamento de tubagens, resíduos de água, carpetes, filtros de AVAC, limpezas.
Compostos Orgânicos Voláteis (COV)	Fotocopiadoras e impressoras, computadores, carpetes, mobiliário, produtos de limpeza, fumo, tintas, adesivos, calafetagem, perfumes, laca, solventes.
Ozono	Campos electromagnéticos fortes ou fontes de luz ultravioleta como fotocopiadoras, impressoras e alguns tipos de filtros dos sistemas de ar condicionado.
Matéria microbiana	Água estagnada em sistemas de AVAC, materiais molhados e húmidos, desumidificadores, condensadores das torres de arrefecimento, torres de refrigeração.

Os ocupantes sujeitos a uma má qualidade do ar interior podem manifestar, a curto prazo, diversos sintomas, tais como: irritação dos olhos/olhos vermelhos, garganta seca/irritada, nariz entupido ou defluxo nasal, dores de cabeça, fadiga injustificada (particularmente no final do dia) e tonturas. Estes sintomas podem evoluir para problemas de saúde mais sérios, a curto e médio prazo (Alfano *et al.*, 2010).

Para além da saúde dos ocupantes, também a produtividade e o conforto destes podem ser afectados quando expostos aos poluentes.

De um estudo realizado por Myhrvold *et al.*, (1996), concluíram que existem diferenças significativas no desempenho dos alunos quando estes estão sujeitos a ambientes com reduzida concentração de CO<sub>2</sub>.

No âmbito das auditorias à QAI previstas no RSECE, os poluentes que devem ser objecto de verificação de conformidade e as respectivas concentrações máximas de referência (C<sub>MR</sub>) são apresentados na Tabela 2.3.2.

**Tabela 2.3.2. Concentrações máximas de referência de poluentes no interior de edifícios (RSECE)**

Tipo	Parâmetros	C <sub>MR</sub>
Físicos	Partículas suspensas no ar (PM <sub>10</sub> )	0,15 mg/m <sup>3</sup>
Químicos	Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	984 ppm
	Monóxido de Carbono (CO)	10,7 ppm
	Ozono (O <sub>3</sub> )	0,1 ppm
	Formaldeído (HCHO)	0,08 ppm
	Compostos Orgânicos Voláteis Totais (COV <sub>totais</sub> )	0,6 mg/m <sup>3</sup>
Microbiológicos	Bactérias e Fungos	500 UFC/m <sup>3</sup>
	Legionella	100 UFC/L água

A melhoria da QAI nos edifícios pode ser atingida através da redução dos contaminantes no exterior e interior. A diminuição das fontes poluidoras, a remoção dos contaminantes na fonte (através de sistemas de exaustão) e a diluição dos poluentes através



de uma eficiente ventilação, são as formas de reduzir os contaminantes no interior dos edifícios.

O CO<sub>2</sub> é um gás incolor, inodoro e insípido, constituinte da atmosfera terrestre com concentrações de aproximadamente 380 ppm, em regiões não poluídas. No interior de edifícios as concentrações de CO<sub>2</sub> podem variar entre 500 e 5000 ppm (Alfano *et al.*, 2010).

Num edifício escolar, mais concretamente numa sala de aula, a principal fonte de emissão de CO<sub>2</sub> deve-se à ocupação humana.

Relacionando a média temporal da concentração de CO<sub>2</sub> ([CO<sub>2</sub>]<sub>MedT</sub>), a concentração exterior ([CO<sub>2</sub>]<sub>Ext</sub>), a ocupação máxima da sala (N<sub>ocup.max</sub>) e a ocupação efectiva (N<sub>ocup</sub>), pode-se verificar a conformidade legal da concentração de CO<sub>2</sub> pela aplicação das seguintes condições:

- 1º Critério de Conformidade

$$([CO_2]_{MedT} - [CO_2]_{Ext}) \times \frac{N_{ocup.max}}{N_{ocup}} + [CO_2]_{Ext} \leq [CO_2]_{MR}$$

- 2º Critério de Conformidade

$$([CO_2]_{MedT} - [CO_2]_{Ext}) \times \frac{N_{ocup.max}}{N_{ocup}} + [CO_2]_{Ext} \leq [CO_2]_{MR} \times 1,5$$

Caso a condição imposta pelo 1º Critério de Conformidade não se verifique, o edifício só pode ser considerado em conformidade se verificar o 2º Critério de Conformidade (NT-SCE-02).

O material particulado é composto por uma mistura de partículas sólidas ou líquidas suspensas no ar, que variam em tamanho, composição química e origem. O tamanho das partículas está directamente ligado ao seu potencial para causar problemas de saúde. Quanto à origem, as partículas podem resultar de fenómenos naturais ou da actividade humana.

A gama de tamanhos das partículas que afectam a saúde humana varia de 0,1 a 10  $\mu\text{m}$ . As partículas que apresentem um diâmetro superior a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) não são facilmente inaladas, enquanto as partículas com diâmetro inferior a 10  $\mu\text{m}$ , ao atingirem a região torácica, são responsáveis por efeitos adversos na saúde.

Níveis excessivos da concentração de partículas podem causar reacções alérgicas, tais como olhos secos, irritações de nariz e pele, tosse, espirros e dificuldades respiratórias (EPA, 2009).

## **2.4. Conforto Térmico**

O conforto térmico é definido como uma condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico. As condições de conforto térmico variam de pessoa para pessoa, sendo difícil satisfazer a todos num mesmo espaço (ASHRAE, 2004).

O conceito de conforto térmico não é exacto, pelo que não implica uma temperatura e humidade relativa exactas. O conforto térmico depende de factores que podem ser quantificados, como a temperatura do ar, velocidade do ar e humidade. Depende também de factores subjectivos como o estado mental, hábitos educação da pessoa. Assim, a preferência individual de conforto varia consoante a adaptação particular ao ambiente local.

A temperatura e a humidade relativa do ar interior são dois dos vários parâmetros ambientais que influenciam as condições de conforto térmico. A satisfação com o ambiente térmico pode também ser influenciada por factores como a velocidade do ar, nível de actividade do ocupante e o vestuário. Estes dois últimos representam os parâmetros individuais.

Ambientes excessivamente quentes ou frios podem afectar o comportamento motor e cognitivo dos ocupantes. Muitos estudos têm revelado que um ambiente térmico inadequado, em salas de aula, afecta a capacidade de compreensão dos alunos. A temperatura do ar numa sala de aula é um factor determinante no processo de aprendizagem pelo que deve ser dada grande importância ao conforto térmico. A exposição a temperaturas elevadas reduz o desempenho dos alunos, enquanto as temperaturas baixas reduzem a destreza manual e velocidade dos alunos (Zeiler *et al.*, 2009).

Para os parâmetros avaliados nesta dissertação, temperatura e humidade relativa, a legislação estabelece como condição de conforto, para a estação de aquecimento a temperatura de 20°C e para a estação de arrefecimento a temperatura de 25°C e a humidade relativa de 50%.

## **2.5. Conforto Visual**

A iluminação natural e artificial tem como objectivo proporcionar boas condições de visão associadas à visibilidade, segurança e orientação dentro de um determinado ambiente, permitindo a realização de actividades laborais, produtivas e outras.

De forma a otimizar o desempenho visual e consequente aumento da visibilidade, o sistema de iluminação deve ser escolhido e dimensionado de acordo com as tarefas a realizar no local.

Para a prática de uma boa iluminação é essencial que, para além da iluminação necessária, também as necessidades qualitativas e quantitativas sejam satisfeitos (EN 12464-1).

As necessidades de iluminação podem ser determinadas pela satisfação de três necessidades humanas básicas:

- Conforto visual – os ocupantes têm uma sensação de bem-estar; de forma indirecta também contribui para um alto nível de produtividade;
- Desempenho visual – os ocupantes são capazes de realizar tarefas visuais, mesmo em circunstâncias difíceis e durante períodos mais longos;
- Segurança.

Um ambiente luminoso pode ser determinado através dos seguintes parâmetros:

- Distribuição de luminosidade;
- Iluminância;
- Brilho;
- Direcionalidade da luz,

- Reprodução de cor e aparência de cor da luz,
- Luz do dia.

A iluminância ou nível de iluminação corresponde à quantidade de luz necessária para executar convenientemente uma tarefa. O equipamento necessário à sua medição, o luxímetro, reflecte a quantidade de fluxo luminoso que um determinado elemento ou plano de trabalho recebe. A iluminância é expressa em lux.

A iluminância e sua distribuição na área de tarefas e na área circundante tem um grande impacto sobre a rapidez, a segurança e conforto com que a pessoa percebe e realiza a tarefa visual.

Alfano *et al.*, (2010) considera que uma das características físicas mais crítica nos ambientes escolares é a iluminação, pois o ambiente visual afecta a capacidade dos estudantes e conseqüentemente o seu desempenho.

Segundo Wu *et al.*, (2003), a luz natural está estreitamente associado com a melhoria no desempenho dos alunos, sem prejuízo para a saúde destes.

Na iluminação de edifícios, a eficiência energética pode ser alcançada com uso adequado da luz natural e artificial, com recurso a sistemas integrados de iluminação natural e artificial.

A Norma Europeia EN 12464-1 estabelece que o nível de iluminação numa sala de aula atinge a situação de conforto aos 300 lux, não devendo este valor ser inferior aos 200 lux. Quando as tarefas a realizar, na sala de aula, sejam mais exigentes do ponto de vista visual, é necessário o ajuste das condições de iluminação, ou seja, deve ser aumentado o nível de iluminação.

## **2.6. Conforto Acústico**

O ruído é um fenómeno acústico que produz uma sensação audível desagradável, que constitui uma causa de incómodo, ou mesmo, de doença.

O ouvido humano apresenta um limiar audível de 0 dB e um limiar de dor de 130 dB, sendo este o nível máximo de intensidade audível sem ocorrência de danos para o indivíduo.

Não só a intensidade de ruído indica a sua perigosidade, o tempo de exposição é também um factor determinante desta.

Nas salas de aula, a comunicação entre os alunos e professores tem uma contribuição fundamental no processo de aprendizagem. Contudo, muitas vezes este processo é afectado pela exposição ao ruído proveniente de fontes exteriores e interiores.

Neste contexto, a inteligibilidade do discurso, ou seja, capacidade de compreensão das palavras faladas é um aspecto que depende fortemente dos níveis de ruído existentes no local. A concentração, a atenção visual, a capacidade de leitura, entre outros aspectos, também ficam comprometidas quando há exposição a elevados níveis de ruído no interior das salas de aulas. Desta forma o desempenho escolar dos alunos pode ser prejudicado.

O conforto acústico no interior de uma sala de aula pode ser afectado pela transmissão de ruído aéreo e de percussão proveniente das instalações técnicas, como por exemplo, dos sistemas de AVAC.

Segundo Alfano *et al.*, (2010), para um edifício escolar existente, os indicadores mais simples que permitem caracterizar o conforto acústico nos ambientes escolares são: o nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, e o tempo de reverberação.

O tempo de reverberação é definido como o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora decresça 60 dB, após a interrupção abrupta de uma fonte de ruído estacionária. Depende do volume da sala e das características de absorção dos seus limites e é calculado pela fórmula de Sabine:

$$T = 0,16 \frac{V}{A} = 0,16 \frac{V}{\sum \alpha_i S_i}$$

em que:

T – tempo de reverberação (s);

V – volume da sala (m<sup>3</sup>);

A – área de absorção do som (m<sup>2</sup>);

$\alpha_i$  – coeficiente de absorção do som na superfície S<sub>i</sub> (adimensional);

S<sub>i</sub> – superfície geral do espaço interior (m<sup>2</sup>).

O tempo de reverberação está relacionado com a inteligibilidade do discurso, podendo esta ser favorecida quando o tempo de reverberação for baixo.

O nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A é definido como o valor do nível de pressão sonora de um som constante que tem, num dado intervalo de tempo, a mesma energia ponderada de acordo com a curva A que o som flutuante considerado. É calculado pela expressão seguinte:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \int_T \frac{p_A^2(t)}{p_0^A} dt \right]$$

onde:

$L_{Aeq}$  – nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A (dB(A));

$p_A(t)$  – pressão sonora instantânea, ponderada A (Pa);

$p_0$  – valor de pressão sonora de referência (igual a 20  $\mu$ Pa);

T – intervalo de tempo de medição (s).

A verificação global da acústica dos sistemas de AVAC pode utilizar como critério o nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A.

A legislação (RRAE) impõe que o nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A, para uma sala de aula com funcionamento contínuo dos equipamentos, seja igual ou inferior a 35 dB(A).

## 3. METODOLOGIA

### 3.1. Introdução

Depois de abordados os fundamentos teóricos necessários ao enquadramento do tema e a respectiva regulamentação, neste capítulo procede-se à apresentação da metodologia utilizada para a caracterização da qualidade do ambiente interior num edifício escolar recentemente requalificado.

Nesta dissertação, a caracterização da qualidade do ambiente interior tem por base a análise dos seguintes parâmetros:

- QAI – concentração de CO<sub>2</sub> e das partículas suspensas no ar (PM<sub>10</sub>);
- Conforto Térmico – Temperatura e Humidade Relativa;
- Conforto Visual – Iluminância;
- Conforto Acústico – Nível de ruído.

A medição da concentração de CO<sub>2</sub>, T e HR decorreu de forma contínua entre as 8h30 e as 18h30, sensivelmente, com registos de minuto a minuto. Este período corresponde ao horário de funcionamento do complexo escolar. A medição das partículas suspensas no ar efectuou-se antes e depois da ocupação das salas, ao longo do dia. A iluminância e o nível de ruído no interior das salas foram medidos pontualmente. A medida da iluminância foi efectuada com recurso à utilização da iluminação artificial e da iluminação natural, individualmente.

Através da análise da evolução temporal da concentração de CO<sub>2</sub>, em especial nos períodos onde se verifica o decaimento da concentração, determinou-se a taxa de renovação de ar da sala e calculou-se o caudal de ar novo efectivo.

Com base numa formulação matemática para a determinação da evolução temporal de um poluente, foram estimados os caudais de ar novo adequados a cada sala.

De seguida é efectuada a caracterização sumária do edifício e identificação dos seus sistemas de climatização e iluminação, e posteriormente é descrita a metodologia e os equipamentos utilizados nas medições.

### 3.2. Caracterização do Edifício

O objecto de estudo desta dissertação é o Bloco C da Escola Básica 2,3 Dr. José Lopes de Oliveira, inserida no Agrupamento de Escolas de Mortágua, com localização em Mortágua, concelho de Mortágua. A Escola Básica é formada por 3 blocos independentes (ver Figura 3.2.1). O Bloco A é composto por 2 pisos onde se localizam os serviços administrativos, o bar e a biblioteca. O Bloco B possui um conjunto de salas destinadas a diversas actividades (como por exemplo aulas de música, apoio a alunos com necessidades especiais) distribuídas por 1 piso. O Bloco C é constituído por 3 pisos (designados por piso 0, piso 1 e piso 2), com uma área total útil de aproximadamente 2128,1 m<sup>2</sup>. Tem um total de 19 salas de aula (salas teóricas, de tecnologias e laboratórios), um espaço reservado a professores (sala e bar), diversos arrumos e instalações sanitárias.

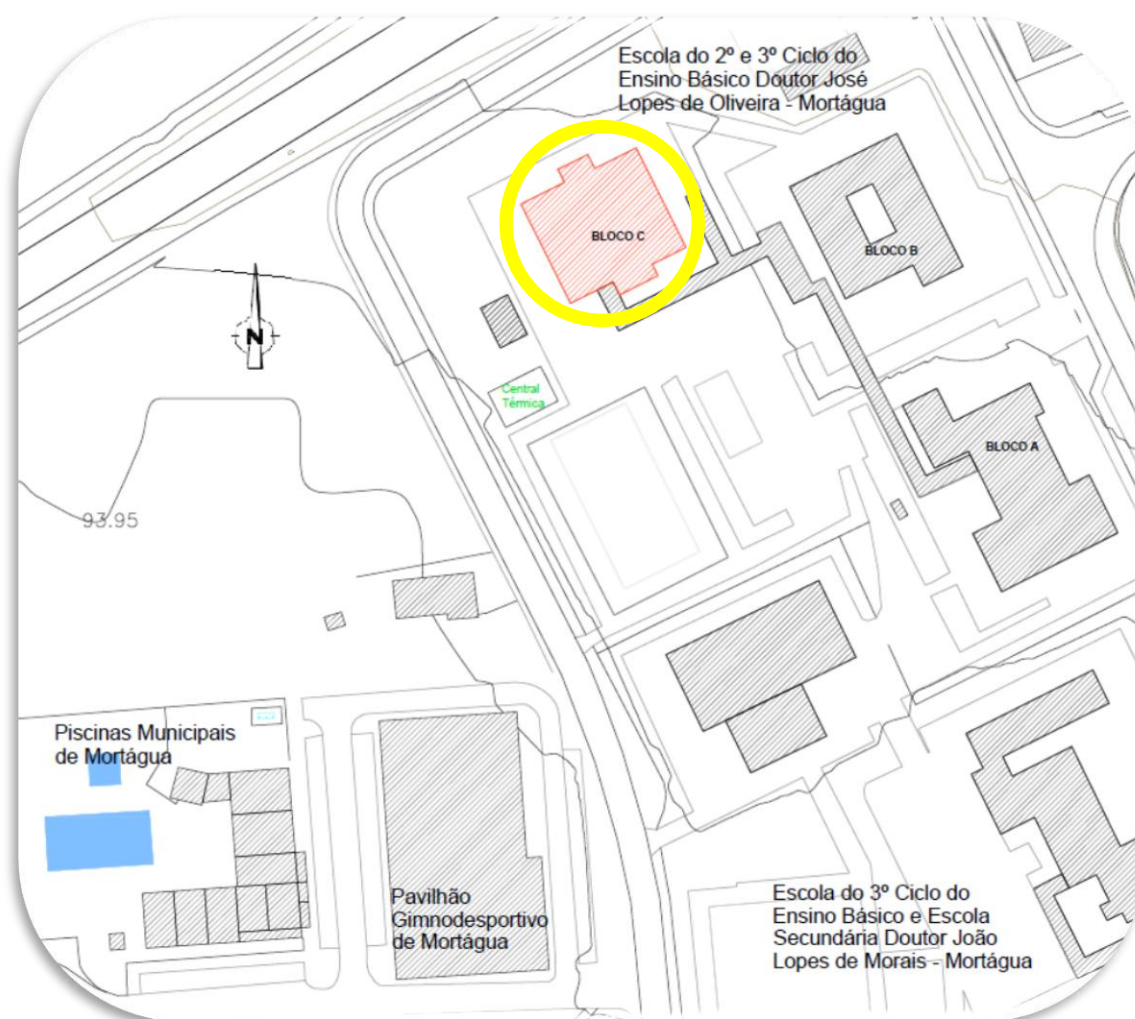


Figura 3.2.1. Localização do Bloco C



---

Este complexo escolar foi alvo de uma intervenção de requalificação da envolvente exterior e interior entre Julho e Setembro de 2009. Esta intervenção teve como principal objectivo o melhoramento das condições de conforto térmico e acústico, através da renovação de coberturas, substituição dos vãos envidraçados e climatização de todos os espaços nos 3 blocos (A, B, C).

Nos Anexos C e H apresentam-se algumas imagens do exterior do Bloco C e do interior das salas analisadas, respectivamente.

Para a caracterização do Sistema de Climatização, consultou-se a informação contida nas Memórias Descritivas e Justificativas do Projecto de Instalações Mecânicas de AVAC do Bloco C.

O dimensionamento do sistema de climatização teve em consideração as taxas de ocupação, as taxas de iluminação e dos equipamentos, e os caudais de ventilação. As condições de conforto consideradas têm por base os requisitos de conforto térmico impostos pela legislação (RCCTE): temperatura do ar de 20°C para a estação de aquecimento e uma temperatura do ar de 25°C e 50% de humidade relativa para a estação de arrefecimento.

A energia térmica necessária ao funcionamento dos equipamentos instalados no Bloco C (ventiloconvectores e UTA's) provém de uma central térmica que alimenta também outros edifícios do complexo e ainda uma piscina. A central térmica é composta por 3 bombas de calor de geotermia com recuperação e por uma bomba de calor do tipo ar-água como apoio.

O circuito destinado ao Bloco C foi dimensionado e regulado para fornecer uma potência de 185kW quando em aquecimento e arrefecimento, como a potência instalada é superior a 4Pm, o RSECE estipula a existência de um sistema centralizado para o edifício.

As cinco UTA's existentes têm como função a introdução dos caudais mínimos de ar novo em conformidade com a actual legislação (30 m<sup>3</sup>/h.ocupante em salas de aula). Nas situações em que não é possível assegurar a manutenção das condições de conforto térmico somente com a renovação do ar ou introdução de ar novo existe um sistema localizado de climatização, com o recurso a ventiloconvectores.

O ar novo necessário é captado junto aos equipamentos, a rejeição do ar de retorno é efectuada em sentido oposto à captação, a mais de 5 ou 20 m de distância da admissão de ar novo. Quer o ar novo tratado a ser insuflado quer o ar de retorno, são conduzidos por uma rede de condutas devidamente isoladas.

Neste sistema a volume constante, correspondente aos caudais mínimos de ar novo, o ar é insuflado por intermédio de difusores ou grelhas, enquanto a captação do ar de retorno é efectuada por intermédio de grelhas.

No dimensionamento das grelhas e difusores foi considerado que ao nível dos ocupantes, o ruído não seja superior a 25 dB(A) e que a velocidade do ar não será superior a 0,2 m/s.

Estas unidades são responsáveis pela climatização de cada espaço, podendo ser do tipo horizontal de montagem no tecto ou do mesmo tipo para montagem em parede.

Com vista a diminuir os custos operacionais de energia da instalação, as UTA's estão equipadas com recuperadores de calor por fluxos cruzados de forma a aproveitar parte da energia rejeitada no ar extraído.

Foi implementado um sistema de controlo centralizado, baseado em microprocessadores controladores que permitam transmitir e receber dados de e para uma central de controlo e monitorização, através de um sistema de comunicações de rede que poderá sobrepor-se à regulação e controlo, alterando as condições ambientais sempre que tal seja necessário, em face do resultado da análise de todos os dados disponíveis. Todos os locais climatizados são controlados de forma independente mas centralizada, nomeadamente, temperatura variável em função do tipo de utilização e do horário das actividades.

É permitido o acesso a todos os equipamentos e dispositivos que compõem o sistema de climatização através de portas de visita nas condutas, portas ou painéis nas unidades de tratamento de ar entre outros.

No Anexo A encontram-se as plantas do sistema de ventilação para cada piso e a identificação de cada UTA, localizadas na cobertura deste Bloco.

Na Tabela 3.2.1 são indicadas os locais servidos por cada uma das UTA's.

**Tabela 3.2.1. Locais servidos por cada UTA**

UTA	Salas
A	Circulação
B	1, 2, 8, 9, 14, 15 e 16
C	3, 10 e 17
D	4, 5, 11, 12, 18, 19, 20
E	SP, BP, 13 e 21

O Sistema de Iluminação do Bloco C é constituído por lâmpadas tubulares fluorescentes, em número e potência adequados ao local de instalação.

As luminárias utilizadas em função do local foram:

- Corredores – 4 lâmpadas por luminária, de 18W cada;
- Quadros das salas de aula – lâmpadas de 36W ao longo de todo o comprimento do quadro;
- Salas de aula – 2 lâmpadas por luminária, de 36W cada.

Nas salas de aula o número de luminárias pode ser de 15, 12 ou 9, consoante a área da sala, conforme se apresenta nas plantas do sistema de iluminação do Anexo B.

### 3.3. Descrição do Método

Com vista à obtenção do Certificado Energético e da Qualidade do Ar Interior da Escola Básica 2,3 Dr. José Lopes de Oliveira, a 8 de Junho de 2010, foi realizada a primeira campanha de medições da Auditoria à Qualidade do Ar Interior (Silva, 2010). Tendo em conta os resultados desta campanha de medições, no Bloco C, as salas que verificaram não conformidades na concentração de CO<sub>2</sub>, foram as seleccionadas para integrarem o presente estudo.

No total foram analisadas 9 salas de aula, a sala dos professores (SP) e o bar dos professores (BP). A campanha de medições decorreu ao longo de um período de 10 horas, sensivelmente, na estação de arrefecimento entre os dias 31 de Maio e 6 de Junho. Sendo realizada de modo a não causar alterações na rotina dos ocupantes do Bloco C.

Na Tabela 3.3.1 encontra-se a calendarização das medições efectuadas.

**Tabela 3.3.1. Calendarização das medições**

<b>Dia da medição</b>	31 Maio 2011	1 Junho 2011	3 Junho 2011	6 Junho 2011
<b>Salas analisadas</b>	2 e 3	SP, BP e 13	4, 8 e 11	14, 16, 19

O método dos gases traçadores é um dos principais métodos para a determinação da taxa de renovação de ar de um edifício. Este método consiste na injeção de uma determinada quantidade de um gás, com propriedades específicas, no interior do compartimento em estudo. Neste caso o CO<sub>2</sub> emitido pelos ocupantes vai funcionar como um gás traçador, sendo este o contaminante de referência usado na verificação da eficácia do sistema de ventilação. A técnica do decaimento é usada nos períodos em que não há ocupantes, uma vez que neste período não existe a emissão de CO<sub>2</sub> e a concentração existente tende a diminuir por acção da extracção efectuada pelo sistema de ventilação.

Alfano *et al.*, (2010) e Silva *et al.*, (2011) propuseram um método para a formulação matemática da evolução temporal da concentração de um poluente num compartimento unizona interior. Segundo este método, a equação geral para a concentração média de um poluente num espaço unizona é:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{G}{V} + \lambda C_{\text{ext}} - \lambda C - v_d \frac{S}{C} - \frac{Q_{\text{ac}}}{V} C \varepsilon_{\text{ac}} \quad (1)$$

em que:

C – concentração média instantânea do poluente (mg/m<sup>3</sup>);

C<sub>ext</sub> – concentração do poluente no exterior (mg/m<sup>3</sup>);

G – geração do poluente no interior do compartimento (mg/h);

V – volume da sala (m<sup>3</sup>);

λ – taxa de renovação do ar (h<sup>-1</sup>) (λ=Q<sub>AN</sub>/V);

v<sub>d</sub> – taxa de deposição de poluente (mg/h.m<sup>2</sup>);

S – superfície de deposição (m<sup>2</sup>);

Q<sub>ac</sub> – caudal através do purificador de ar (m<sup>3</sup>/h);

ε<sub>ac</sub> – eficiência do purificador de ar (adimensional).

Reduzindo a intensidade da fonte emissora, os efeitos da absorção ou deposição do poluente no interior do compartimento e a remoção através da filtragem do sistema purificador de ar, são atenuados podendo os seus termos serem desprezados. Assim vem:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{G}{V} + \lambda C_{\text{ext}} - \lambda C \quad (2)$$

Integrando a equação anterior, mantendo constante  $V$ ,  $G$ ,  $Q$ ,  $C_{\text{ext}}$  num instante de tempo inicial  $t = 0$ , onde a concentração inicial  $C_0 = C_{\text{ext}}$ , até um genérico instante de tempo  $t$ , vem:

$$C(t) = C_{\text{equi}} + (C_0 - C_{\text{equi}})e^{-\lambda t} \quad (3)$$

A concentração de equilíbrio,  $C_{\text{equi}}$ , é o valor da concentração quando cessa a variação na concentração. Quando o primeiro membro da equação 2 é nulo, a concentração de equilíbrio obtém-se por:

$$C_{\text{equi}} = C_{\text{ext}} + \frac{G}{V\lambda} \quad (4)$$

ou seja:

$$C_{\text{equi}} = C_{\text{ext}} + \frac{G}{Q} \quad (5)$$

A taxa de renovação de ar pode ser obtida através da reorganização da equação 3, resultando:

$$\frac{C(t) - C_{\text{equi}}}{C_0 - C_{\text{equi}}} = e^{-\lambda t} \quad (6)$$

$$\ln\left(\frac{C(t) - C_{\text{equi}}}{C_0 - C_{\text{equi}}}\right) = -\lambda t \Leftrightarrow \ln(C(t) - C_{\text{equi}}) = \ln(C_0 - C_{\text{equi}}) - \lambda t \quad (7)$$

A aplicação de logaritmos na equação 6 permite a linearização da evolução da concentração, na forma de uma equação  $y=mx+b$  (equação 7), sendo esta equação usada para determinar a taxa de renovação de ar pela técnica do decaimento.

De seguida é descrito o modo de determinação da taxa metabólica de produção de dióxido de carbono pelos ocupantes de um espaço interior.

A produção de CO<sub>2</sub> de uma pessoa está relacionada com o volume de oxigénio consumido, sendo:

$$\dot{V}_{\text{CO}_2} = \text{RQ} \times \dot{V}_{\text{O}_2} \quad (8)$$

em que:

$\dot{V}_{\text{CO}_2}$  – volume de CO<sub>2</sub> produzido (l/s);

$\dot{V}_{\text{O}_2}$  – volume de O<sub>2</sub> consumido (l/s);

RQ – razão entre o volume produzido de CO<sub>2</sub> e o volume consumido de O<sub>2</sub> (normalmente = 0,83).

O consumo de O<sub>2</sub> depende da área da superfície corporal da pessoa e do nível de actividade metabólica desta:

$$\dot{V}_{\text{O}_2} = \frac{0,00276 \times A_{\text{Du}} \times M}{0,23 \times \text{RQ} + 0,77} \quad (9)$$

em que:

$A_{\text{Du}}$  – área de DuBois da superfície corporal da pessoa analisada (m<sup>2</sup>);

M – nível actividade metabólica (considerado = 1,2 met).

A área da superfície corporal é função da massa corporal ( $W_b$ ), expressa em kg, e da altura do corpo ( $H_b$ ), expressa em metros:

$$A_{\text{Du}} = 0,202 \times W_b^{0,425} \times H_b^{0,725} \quad (10)$$

A quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por um pessoa é dada por:

$$\dot{G}_{\text{CO}_2} = \rho_{\text{CO}_2} \times \dot{V}_{\text{CO}_2} \quad (11)$$

em que:

$\dot{G}_{\text{CO}_2}$  – emissão de CO<sub>2</sub> por pessoa (kg/h);

$\rho_{\text{CO}_2}$  – densidade do CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>).

Para a determinação da taxa de produção de CO<sub>2</sub>, correspondente às características reais dos ocupantes do Bloco C, teve-se em consideração que, neste bloco, são leccionadas aulas para alunos do 5º ao 9º ano de escolaridade, em que a faixa etária predominante é dos 10 aos 14 anos. Considerando os dados antropométricos para a população europeia em idade escolar apresentados no Manual REHVA, o peso médio e a altura média dos alunos (considerando 50% raparigas e 50% rapazes) em função da idade são apresentados na Tabela 3.3.2.

**Tabela 3.3.2. Média do peso e da altura dos alunos em função da idade (adaptado de Alfano *et al.*, 2010)**

Idade	Peso médio (kg)	Altura média (cm)
10	32,5	137
11	35,5	143,5
12	40,5	150,5
13	45	156
14	50,5	161,5

Na Tabela 3.3.3 são apresentados o número de ocupantes em cada sala, em função do horário das aulas, no respectivo dia de medição.

**Tabela 3.3.3. Ocupação das salas**

	Sala 2	Sala 3	Sala 4	Sala 8	Sala 11	Sala 13	Sala 14	Sala 16	Sala 19
Ocupação máxima	36	21	23	25	25	26	27	25	34
08h50 - 09h35	22	21	12	19	20	26	21	20	15
09h35 - 10h20	22	21	12	19	20	26	21	20	15
10h20 - 10h45									
10h45 - 11h30	21	19	10	21	19	26	21	23	19
11h30 - 12h15	21	19	10	21	19	26	21	23	19
12h15 - 12h25									
12h25 - 13h10		21			20		10	23	
13h10 - 13h20									
13h20 - 14h05					19				
14h05 - 14h15									
14h15 - 15h00	21	21	10	20	21		21	21	19
15h00 - 15h45	21	21	10	20	21		21	21	19
15h45 - 16h05									
16h05 - 16h50	20	21		8	21		23	21	20
16h50 - 17h35	20	21		9			12	21	20

No espaço reservado aos professores (sala e bar) não foi possível indicar o número de ocupantes ao longo do dia, contudo a maior ocupação ocorreu no intervalo das 10h20 às 10h45. No dia da medição neste espaço, apenas decorreram aulas no horário da manhã, pelo que da parte da tarde a sala esteve vazia.

### 3.4. Equipamentos de Medição

Para esta campanha de medições foram usados seis aparelhos distintos, cujas imagens estão disponíveis no Anexo D.

Para a monitorização contínua da concentração do CO<sub>2</sub>, temperatura e humidade relativa foram usados os seguintes aparelhos: Sensotron PS32, Fluke 975, GrayWolf IQ-410. Foi usado um aparelho por sala que iniciava o registo dos parâmetros antes do início da ocupação da sala.

Na Tabela 3.4.1, são comparadas os intervalos de medição e a precisão com que estes três aparelhos funcionam, apenas para os parâmetros em análise neste estudo.

**Tabela 3.4.1. Características dos equipamentos**

Parâmetro	Sensotron PS32		Fluke 975		GrayWolf IQ-410	
	Intervalo	Precisão	Intervalo	Precisão	Intervalo	Precisão
<b>CO<sub>2</sub>, ppm</b>	0 a 5000	± 10	0 a 5000	±75	0 a 10000	± 50
<b>T, °C</b>	10 a 45	± 0,5	-20 a 60	± 0,5	-10 a 70	± 0,3
<b>HR, %</b>	0 a 100	± 3,5	10 a 90	± 2	0 a 100	± 2

A distribuição dos equipamentos de medição de CO<sub>2</sub> por sala foi aleatória e apresenta-se na Tabela 3.4.2.

**Tabela 3.4.2. Distribuição dos equipamentos pelas salas**

	Sensotron PS32	Fluke 975	GrayWolf IQ-410
Salas	2, 4, 19, BP	3, 8, 13, 16	11, 14, SP



O aparelho usado para a medição das partículas em suspensão foi o HANDHELD 3016 IAQ Particle Counter, que apresenta um intervalo de medição dos 0,3 aos 10,0  $\mu\text{m}$ . Os resultados obtidos são apresentados segundo as seguintes classes de tamanho: 0,3  $\mu\text{m}$ , 0,5  $\mu\text{m}$ , 1,0  $\mu\text{m}$ , 2,5  $\mu\text{m}$ , 5,0  $\mu\text{m}$  e 10,0  $\mu\text{m}$ . Com este aparelho também é possível medir a temperatura e a humidade relativa.

Para a medição da iluminância foi usado um luxímetro com capacidade de medição dos 0 aos 20000 lux, com uma precisão de  $\pm 5\%$  da leitura.

O nível sonoro contínuo equivalente, ponderado A foi obtido com recurso ao sonómetro 2260 Investigator (Brüel & Kjær). Este sonómetro é um analisador em tempo real, com classe de exactidão I, homologado pelo Instituto Português da Qualidade.

O Sensotron PS32 apresentou uma anomalia na medição da temperatura, o que afectou o registo contínuo deste parâmetro nas salas onde foi utilizado. Como solução, servem de referência os valores registados, pontualmente, pelo medidor de partículas, aquando da medição destas.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1. Concentração de CO<sub>2</sub>

A análise à concentração de CO<sub>2</sub> começa com a demonstração gráfica dos valores medidos em função da hora da medição e da ocupação registada. Depois procedeu-se à verificação da conformidade, exigida no RSECE, com aplicação dos Critérios de Conformidade (já referidos anteriormente).

Neste trabalho, a concentração de CO<sub>2</sub> encontra-se sempre expressa em ppm (partes por milhão).

A evolução da concentração de CO<sub>2</sub> registada e o número de ocupantes presentes ao longo de um dia de medições, nas salas 2, 3, 8, 13, 14 e 16 são apresentados nas figuras que se seguem. Para as restantes salas, as representações gráficas podem ser consultadas no Anexo E.

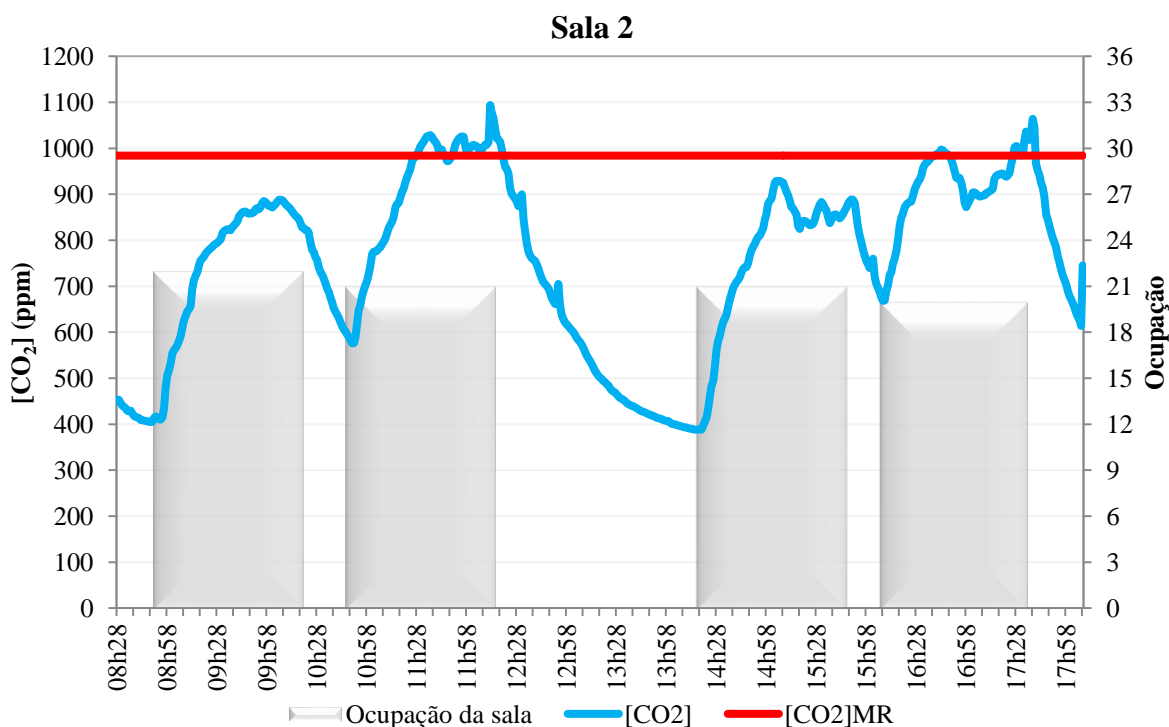


Figura 4.1.1. Concentração de CO<sub>2</sub> na Sala 2

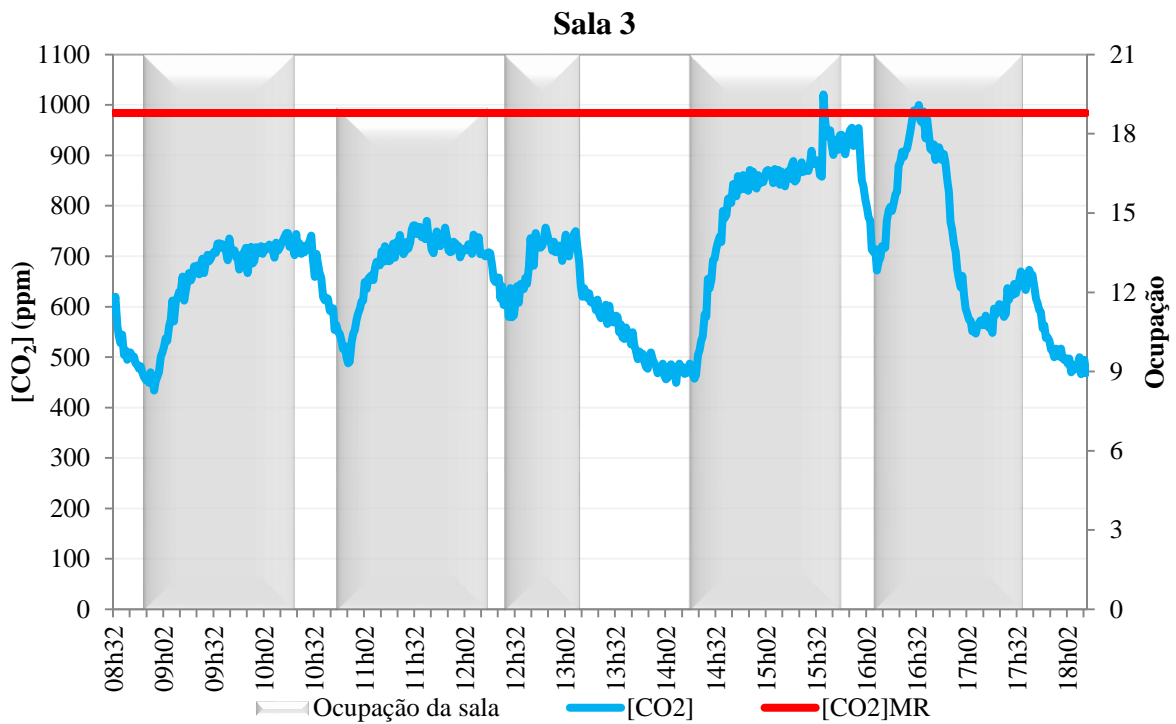


Figura 4.1.2. Concentração de CO<sub>2</sub> na Sala 3

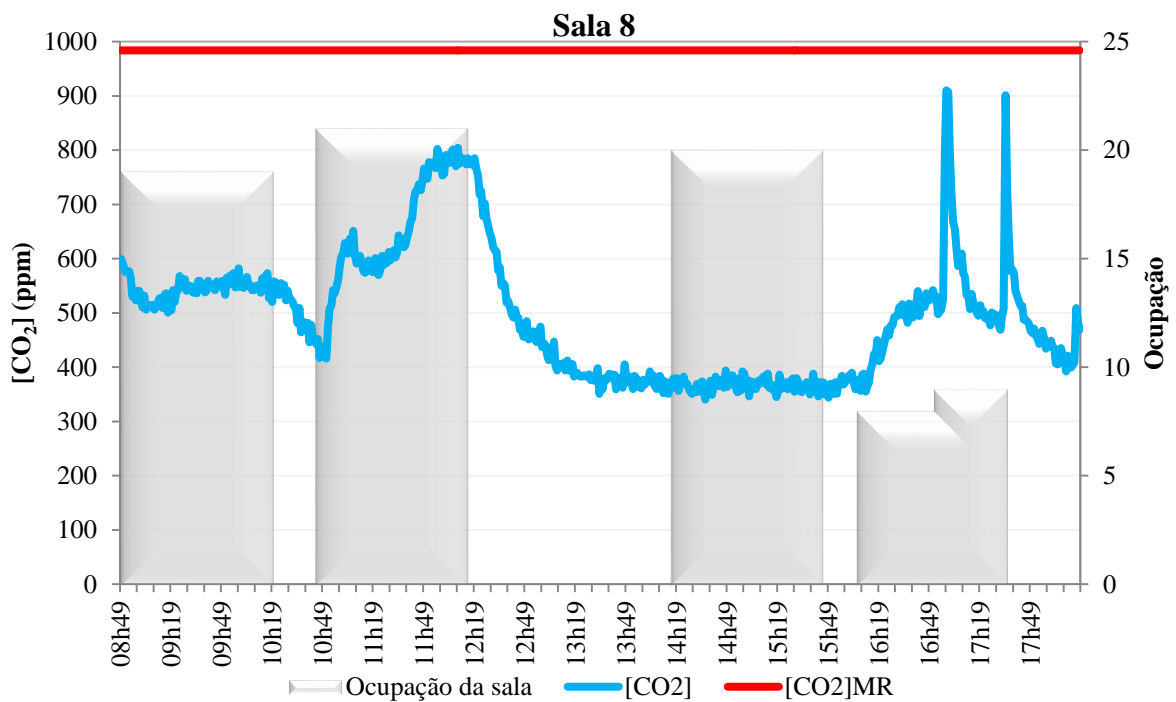


Figura 4.1.3. Concentração de CO<sub>2</sub> na Sala 8

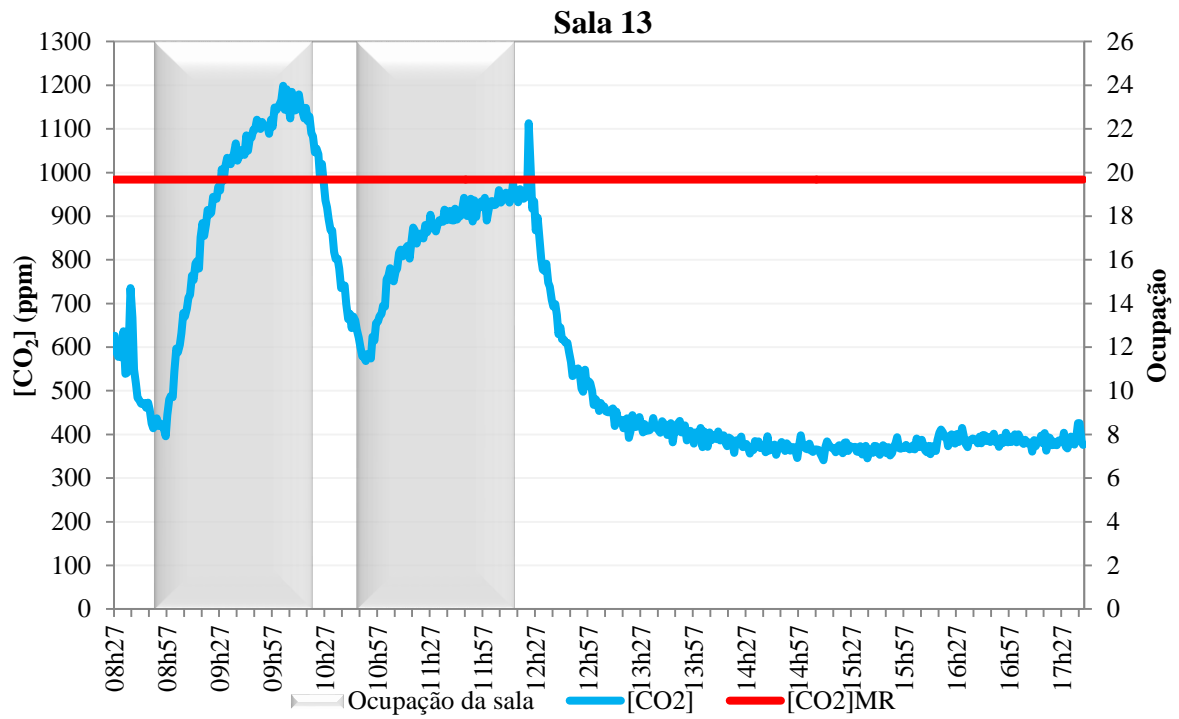


Figura 4.1.4. Concentração de CO<sub>2</sub> na Sala 13

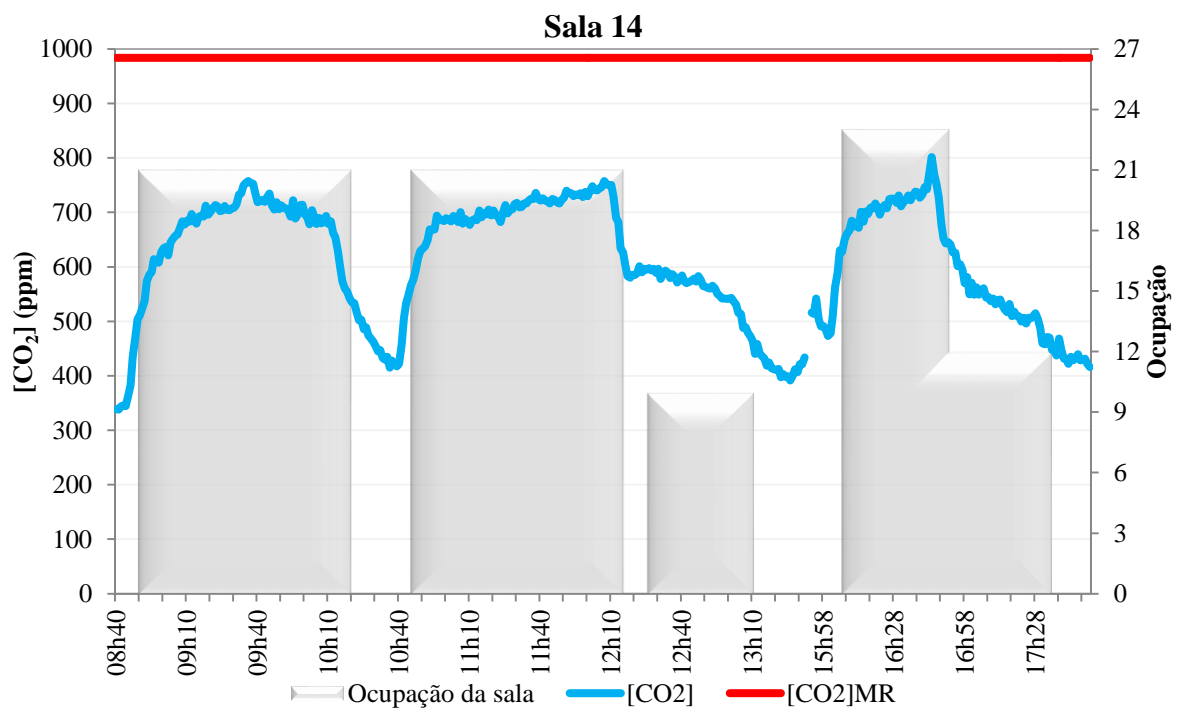
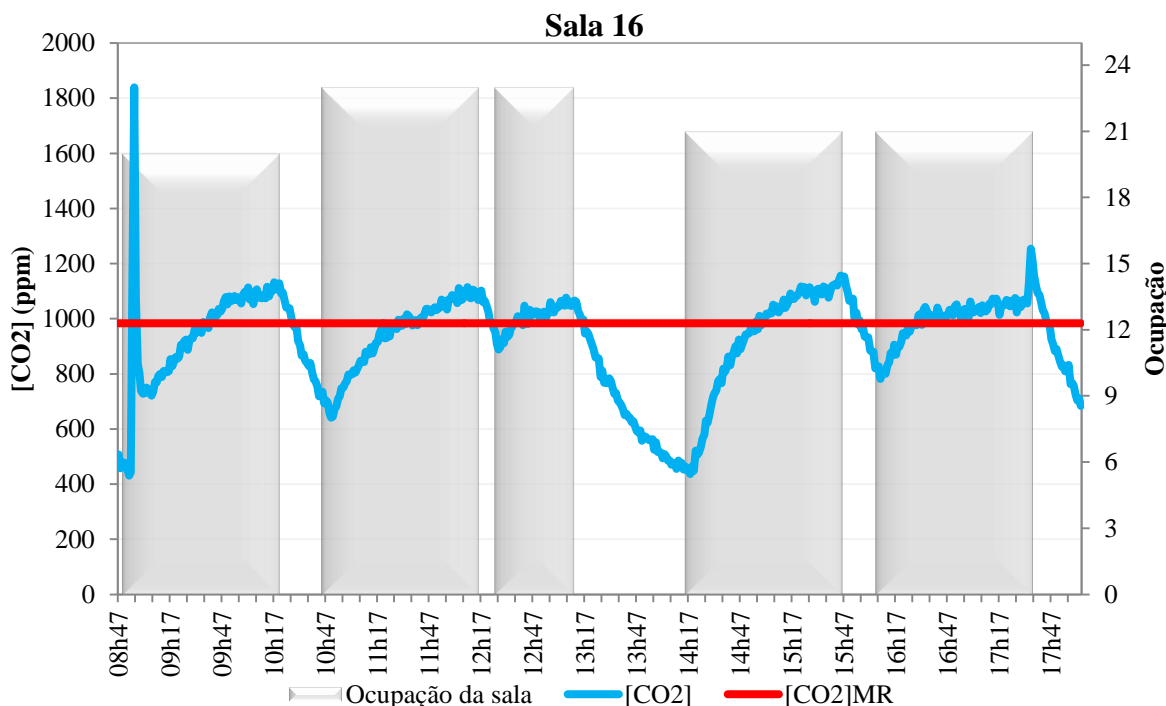


Figura 4.1.5. Concentração de CO<sub>2</sub> na Sala 14



**Figura 4.1.6. Concentração de CO<sub>2</sub> na Sala 16**

Na sala 14, entre as 13h32 e as 15h53, não ocorreu registos de medição devido a um problema técnico com o equipamento.

Recorrendo aos critérios de conformidade, nos períodos em que as salas estavam ocupadas, procedeu-se à verificação da condição de conformidade para a concentração de CO<sub>2</sub>.

A  $[CO_2]_{MedT}$  representa a média da concentração de CO<sub>2</sub> num intervalo de tempo que corresponde à duração de cada aula.

Na Sala e Bar dos Professores a ocupação considerada ocorre no intervalo da manhã (das 10h20 às 10h45). Para as salas de aula a ocupação ocorre durante o horário das aulas.

Na Tabela 4.1.1 são apresentados os resultados obtidos.

**Tabela 4.1.1. Verificação de conformidade  
(C – em conformidade; NC – não-conforme)**

		[CO <sub>2</sub> ] <sub>MedT</sub>	[CO <sub>2</sub> ] <sub>ext</sub>	N <sub>max.ocup</sub>	N <sub>ocup.</sub>	CC	1°CC	2°CC
Sala 2	08h50 - 10h20	756	354	36	22	1012	NC	C
	10h45 - 12h15	900	354	36	21	1289	NC	C
	14h15 - 15h45	755	354	36	21	1041	NC	C
	16h05 - 17h35	906	354	36	20	1347	NC	C
Sala 3	08h50 - 10h20	655	354	21	21	655	C	
	10h45 - 12h15	684	354	21	19	719	C	
	12h25 - 13h10	688	354	21	21	688	C	
	14h15 - 15h45	801	354	21	21	801	C	
	16h05 - 17h35	744	354	21	21	744	C	
Sala 4	08h50 - 10h20	474	341	23	12	596	C	
	10h45 - 12h15	550	341	23	10	823	C	
	14h15 - 15h45	520	341	23	10	753	C	
Sala 8	08h50 - 10h20	544	341	25	19	608	C	
	10h45 - 12h15	645	341	25	21	703	C	
	14h15 - 15h45	368	341	25	20	374	C	
	16h05 - 16h50	459	341	25	8	710	C	
	16h50 - 17h35	568	341	25	9	972	C	
Sala 11	08h50 - 10h20	1615	341	25	20	1933	NC	NC
	10h45 - 12h15	2325	341	25	19	2951	NC	NC
	12h25 - 13h10	992	341	25	20	1155	NC	C
	13h20 - 14h05	795	341	25	19	938	C	
	14h15 - 15h45	931	341	25	21	1044	NC	C
	16h05 - 16h50	1712	341	25	21	1973	NC	NC
Sala 13	08h50 - 10h20	927	342	26	26	927	C	
	10h45 - 12h15	834	342	26	26	834	C	
Sala 14	08h50 - 10h20	677	332	27	21	776	C	
	10h45 - 12h15	702	332	27	21	807	C	
	12h25 - 13h10	560	332	27	10	948	C	
	16h05 - 16h50	710	332	27	23	775	C	
	16h50 - 17h35	541	332	27	12	802	C	
Sala 16	08h50 - 10h20	944	332	25	20	1097	NC	C
	10h45 - 12h15	937	332	25	23	989	NC	C
	12h25 - 13h10	1003	332	25	23	1061	NC	C
	14h15 - 15h45	916	332	25	21	1027	NC	C
	16h05 - 17h35	995	332	25	21	1121	NC	C
Sala 19	08h50 - 10h20	616	332	34	15	976	C	C
	10h45 - 12h15	1035	332	34	19	1590	NC	NC
	14h15 - 15h45	1122	332	34	19	1745	NC	NC
	16h05 - 17h35	790	332	34	20	1110	NC	C
SP	10h20 - 10h45	724	342	18	18	724	C	
BP	10h20 - 10h45	474	342	13	13	474	C	

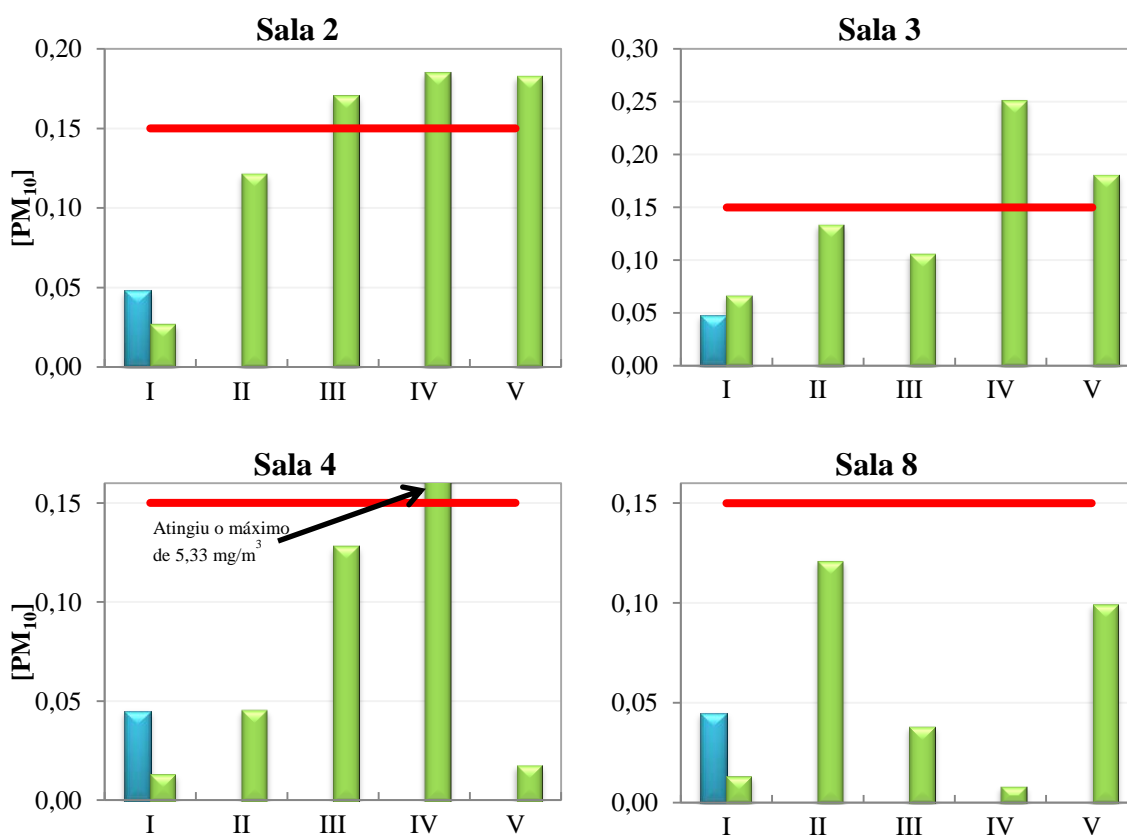
## 4.2. Concentração de PM<sub>10</sub>

As concentrações de PM<sub>10</sub> (expressas em mg/m<sup>3</sup>) foram medidas, pontualmente, em cada um dos seguintes intervalos:

- I – antes do início das aulas;
- II – intervalo da manhã;
- III – intervalo de almoço;
- IV – intervalo da tarde;
- V – depois do final das aulas.

As representações gráficas dos valores obtidos, em cada sala de aula, encontram-se na Figura 4.2.1, representados pelas barras verdes.

A concentração exterior (representada pela barra azul) corresponde à medição feita antes do início das aulas no exterior do edifício e a concentração máxima de referência (C<sub>MR</sub>, a vermelho) é a estipulada pelo RSECE.



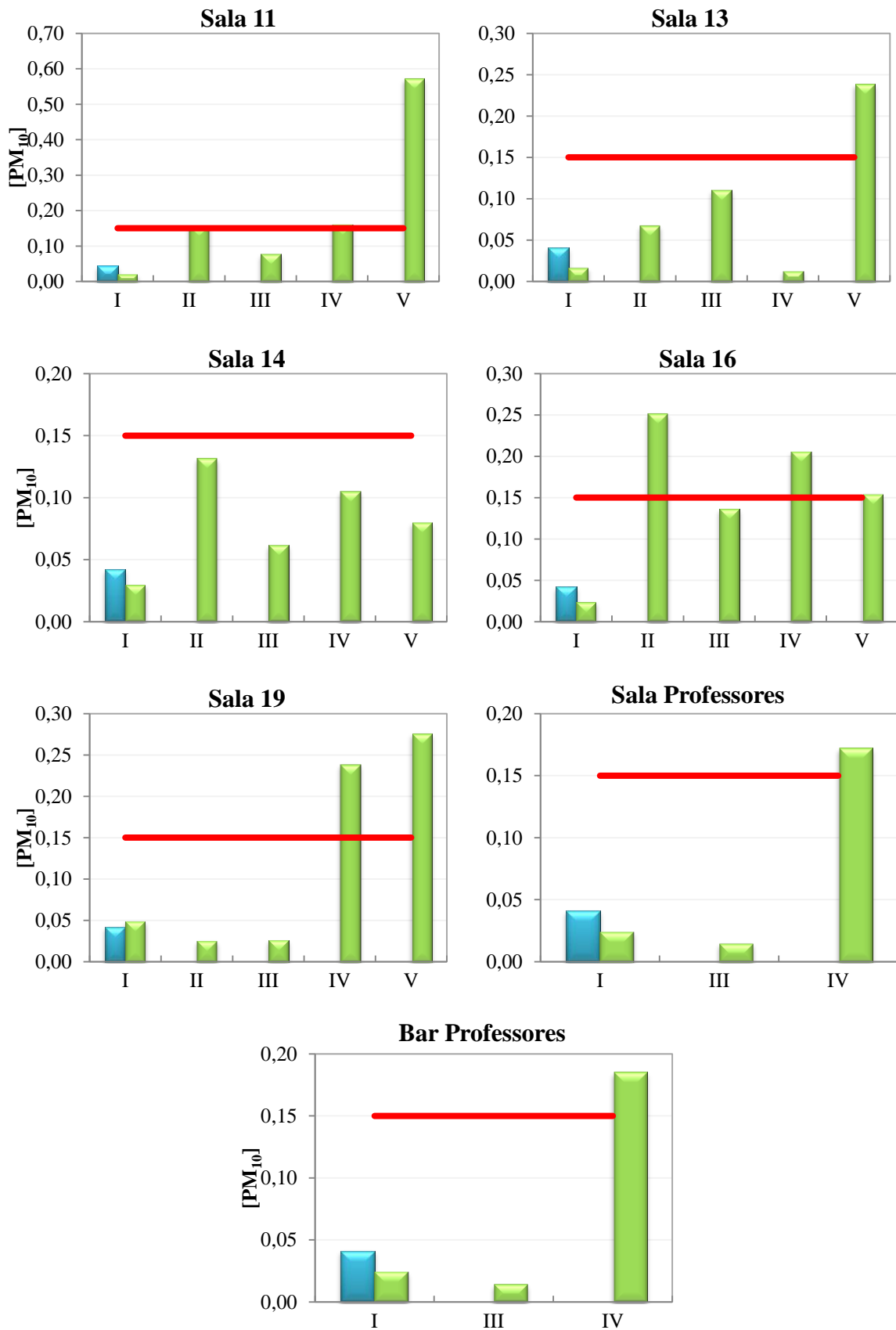
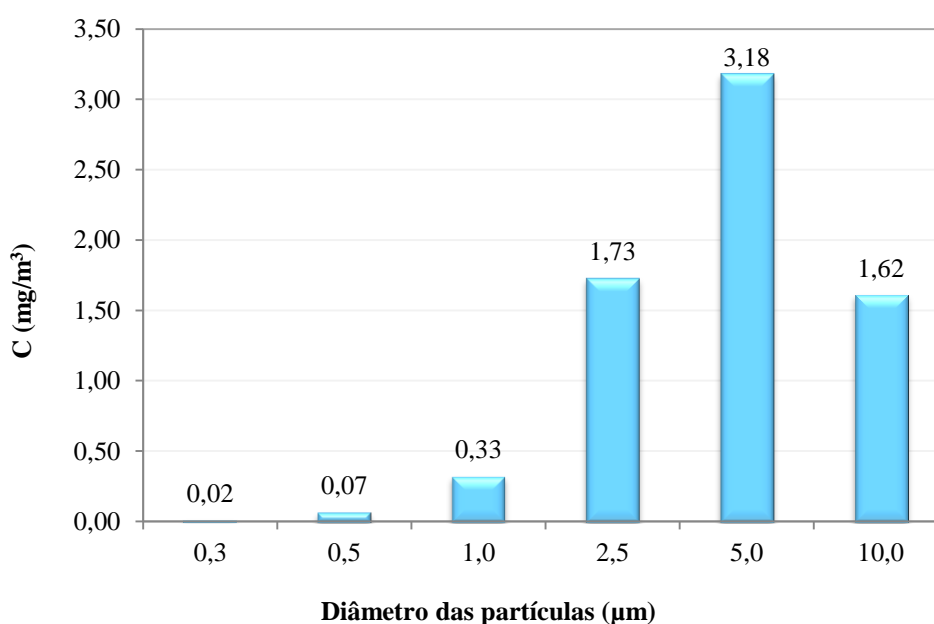


Figura 4.2.1. Concentração de PM<sub>10</sub> (mg/m<sup>3</sup>)



A concentração de  $PM_{10}$  registadas na sala 4, no intervalo da tarde, atingiu um valor muito elevado. Esta é uma sala de tecnologias, onde decorrem aulas de Educação Tecnológica. No decorrer destas aulas poderão ser manipulados materiais, objectos e ferramentas que promovem a dispersão das partículas.

Na Figura 4.2.2, relativa às medições efectuadas na Sala 4 no intervalo da tarde, observa-se a predominância das partículas de maiores dimensões, corroborando a explicação apontada no parágrafo anterior.



**Figura 4.2.2. Concentração de partículas por classes dimensionais: valores médios das medições no intervalo da tarde**

### 4.3. Temperatura e Humidade Relativa

As medições da temperatura e humidade relativa do ar interior, registadas nas salas 2, 3, 8, 13, 14 e 16 encontram-se nas figuras seguintes, através da representação gráfica da evolução de cada parâmetro em função do tempo. Para as restantes salas, as figuras apresentam-se no Anexo F.

Conforme indicado anteriormente, em algumas das salas, apenas foi possível o registo pontual da temperatura.

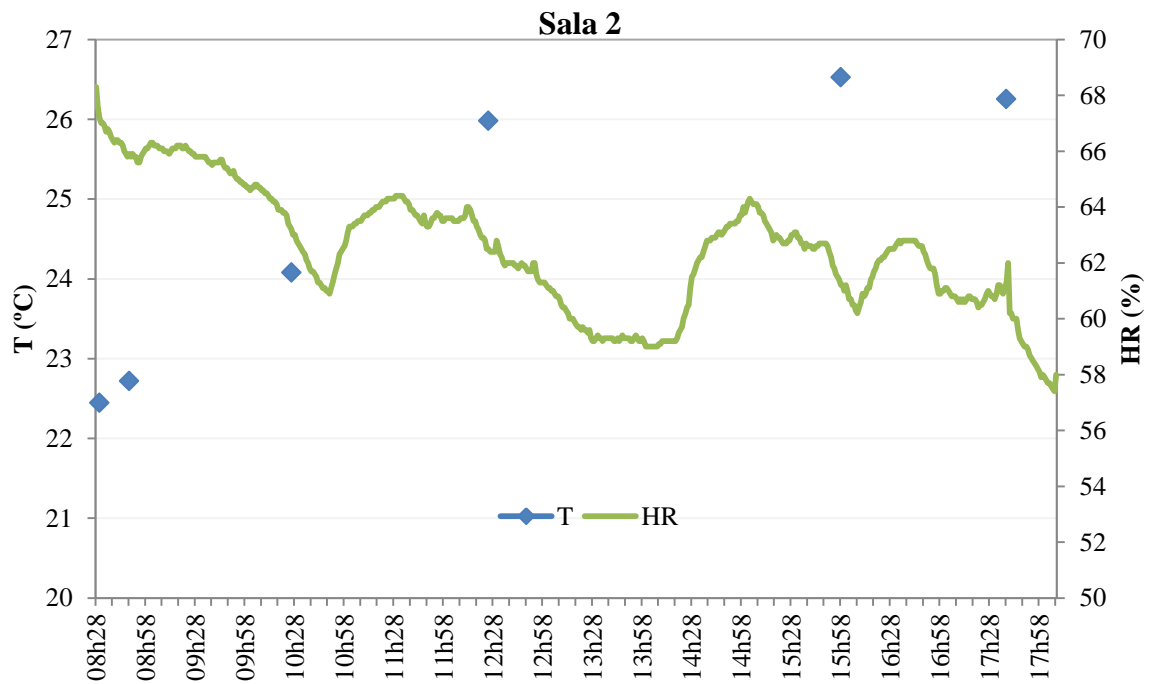


Figura 4.3.1. T e HR na Sala 2

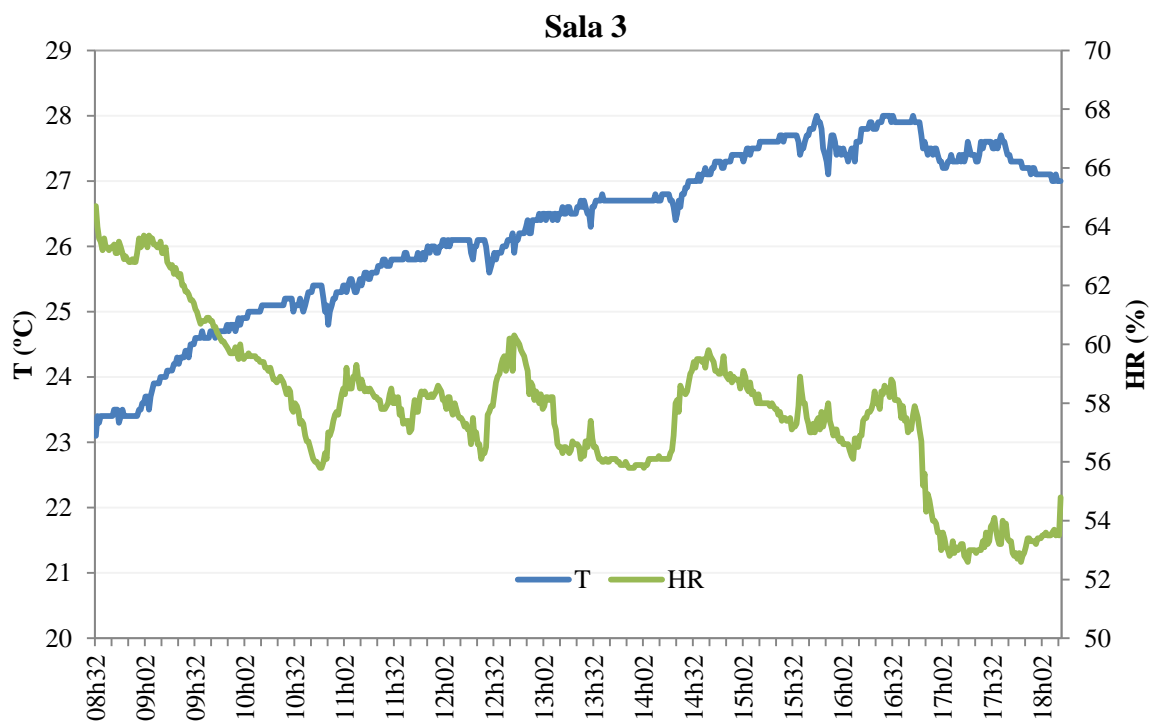


Figura 4.3.2. T e HR na Sala 3

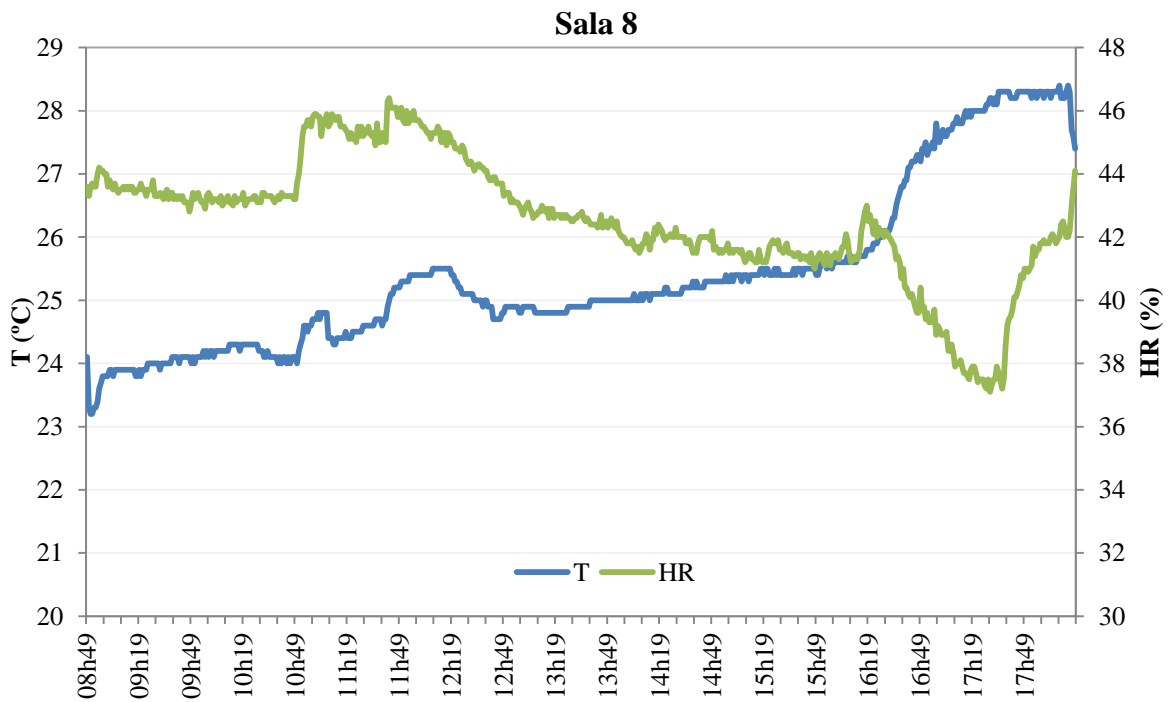


Figura 4.3.3. T e HR na Sala 8

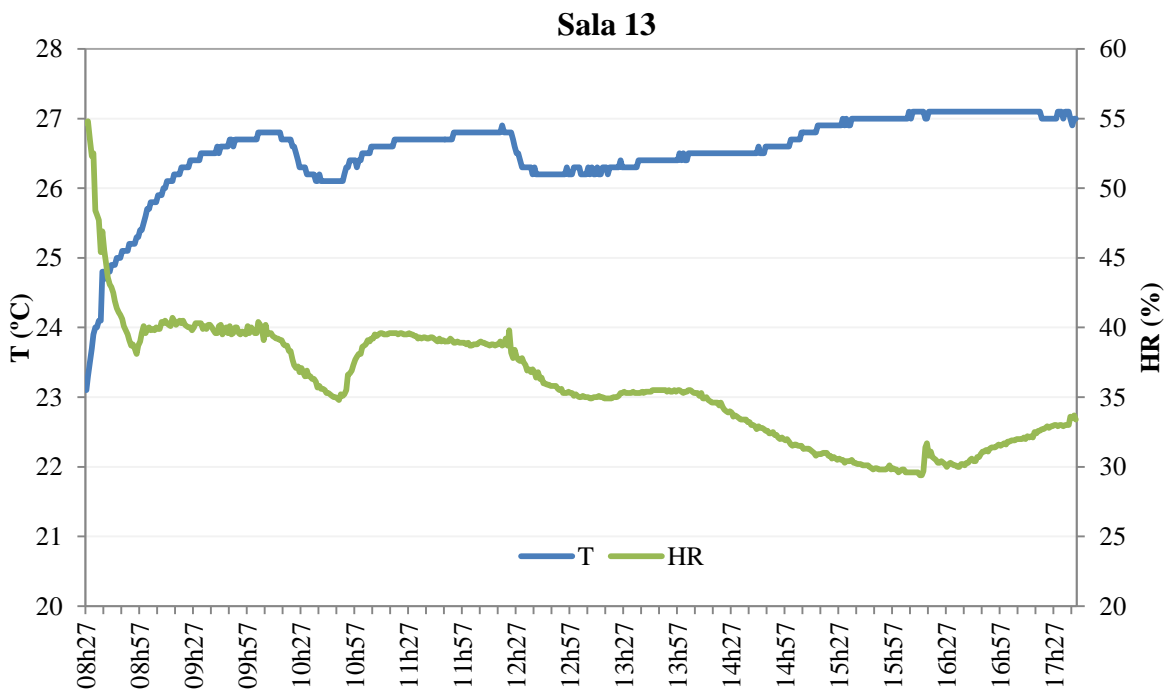


Figura 4.3.4. T e HR na Sala 13

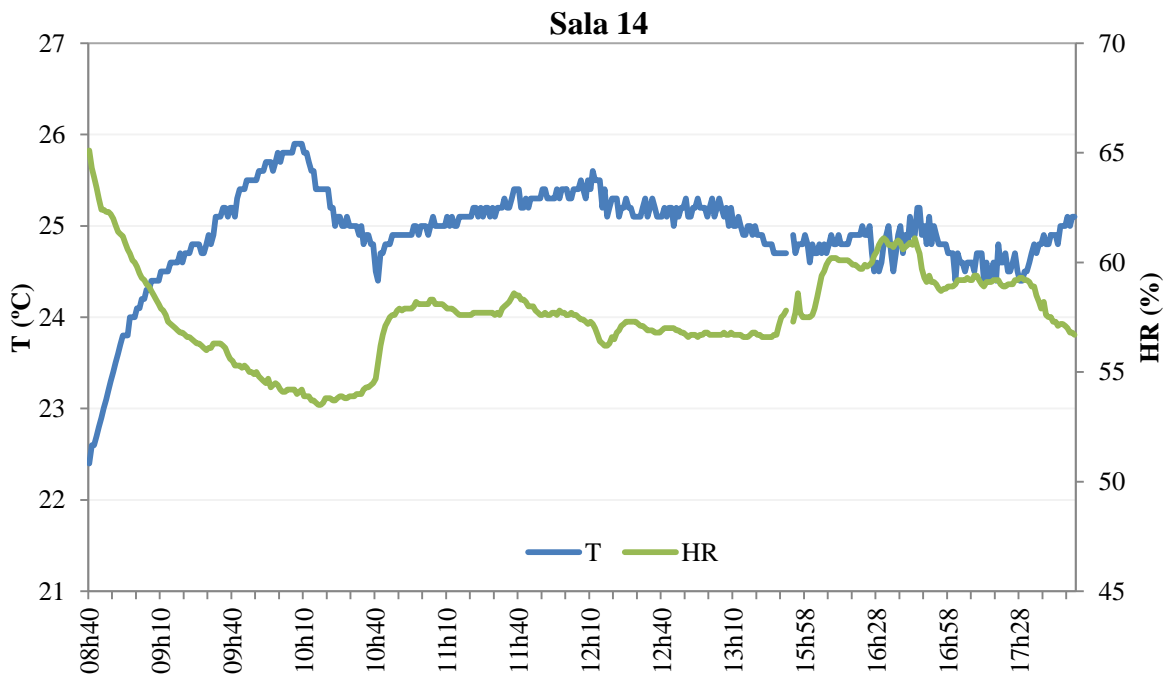


Figura 4.3.5. T e HR na Sala 14

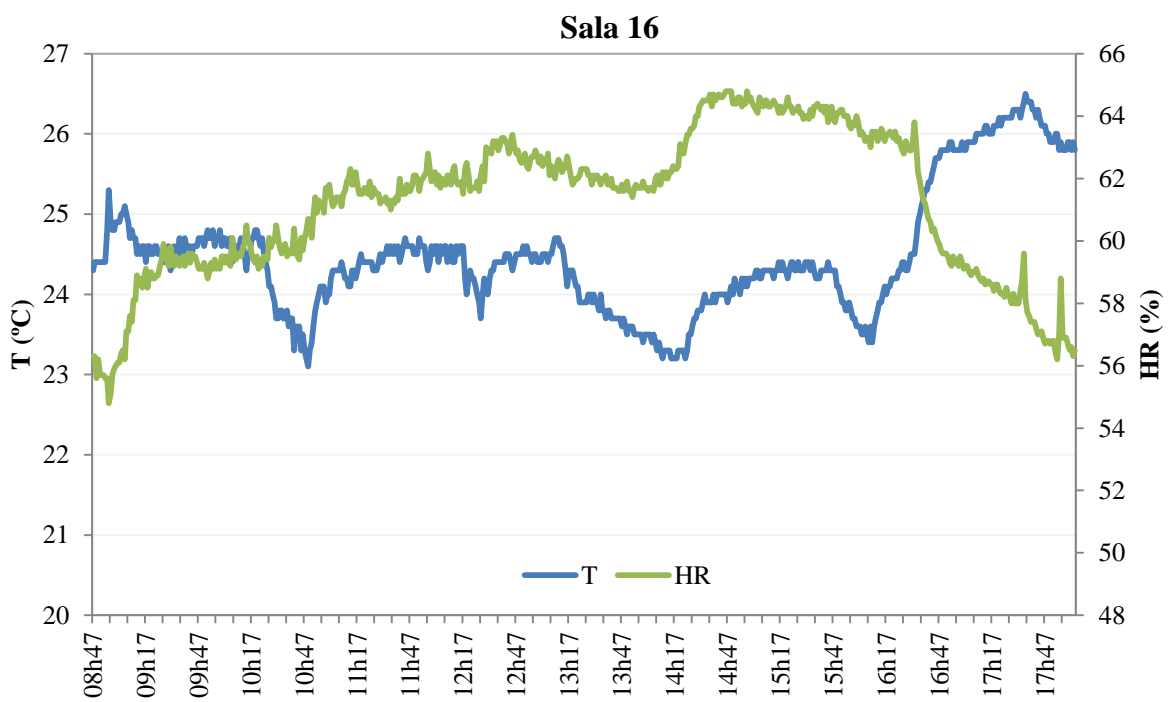


Figura 4.3.6. T e HR na Sala 16

#### 4.4. Determinação do Caudal de Ar Novo

A taxa de renovação de ar foi determinada para os períodos de decaimento da concentração de CO<sub>2</sub>, quando não existiam ocupantes nas salas de aula, mantendo-se igualmente em funcionamento o sistema de ventilação. Estes períodos correspondem aos intervalos entre as aulas.

Para a escolha dos intervalos de decaimento foi considerado que a hora de entrada e saída das aulas não corresponde à hora teórica para tal, podendo haver discrepância de alguns minutos.

Analisando a evolução da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do dia de medição, seleccionaram-se os intervalos de tempo em que a sala estava desocupada e que tenha ocorrido um decaimento significativo. Estes intervalos correspondem na sua maioria ao intervalo da manhã (I), de almoço (II) e da tarde (III). Posteriormente determinou-se a equação da recta de regressão linear do método dos mínimos quadrados aplicados aos valores medidos.

Na Figura 4.4.1 são assinalados os intervalos de decaimento considerados na análise à sala 2.

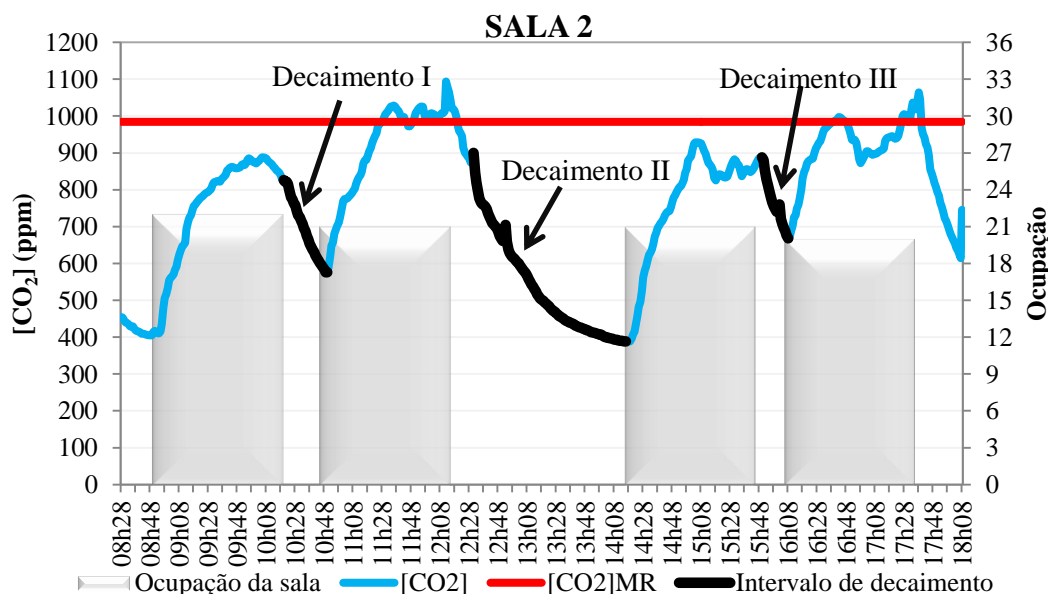


Figura 4.4.1. Intervalos de decaimento na Sala 2

De seguida apresentam-se as representações gráficas do logaritmo natural da diferença entre a concentração do gás traçador e a sua concentração no exterior, em função do tempo. O intervalo de tempo considerado não é constante pois depende da altura em que

ocorreu a desocupação das salas. Inclui-se o traçado da recta de regressão linear com base no método dos mínimos quadrados e a equação respectiva, cujo módulo do declive corresponde ao valor da taxa de renovação de ar. É também apresentado o quadrado do coeficiente de correlação.

Para a sala 2, o intervalo de decaimento I considerado decorreu das 10h20 às 10h50. O decaimento do intervalo de almoço ocorreu entre as 12h31 e as 14h16. Para o intervalo da tarde foi considerado o período de decaimento das 15h50 às 16h08.

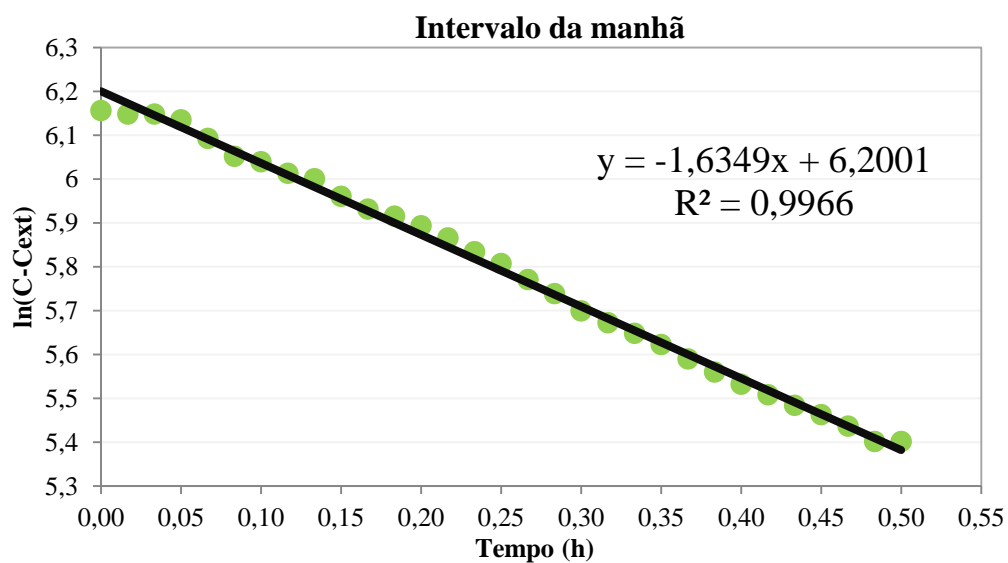


Figura 4.4.2. Regressão linear ao decaimento I

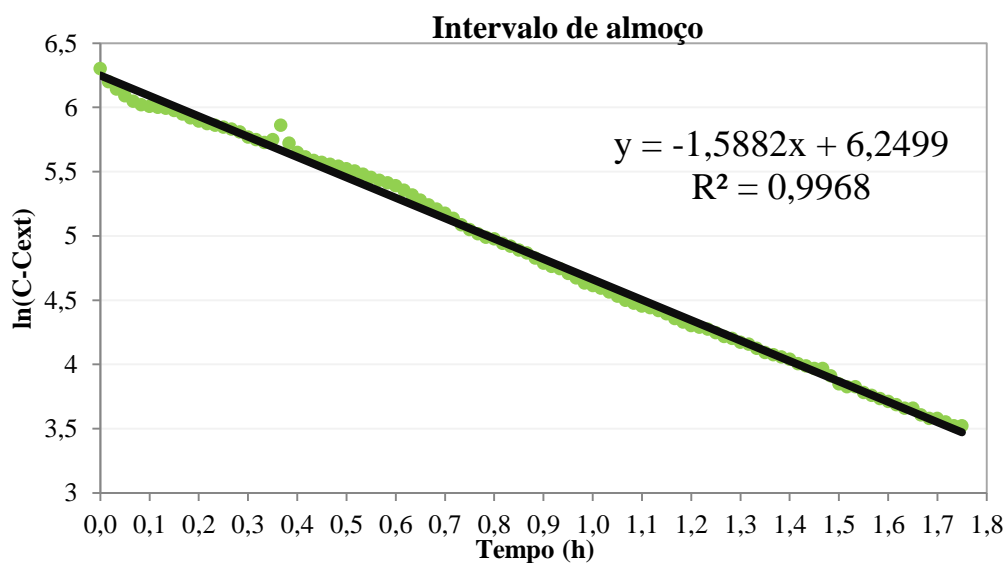
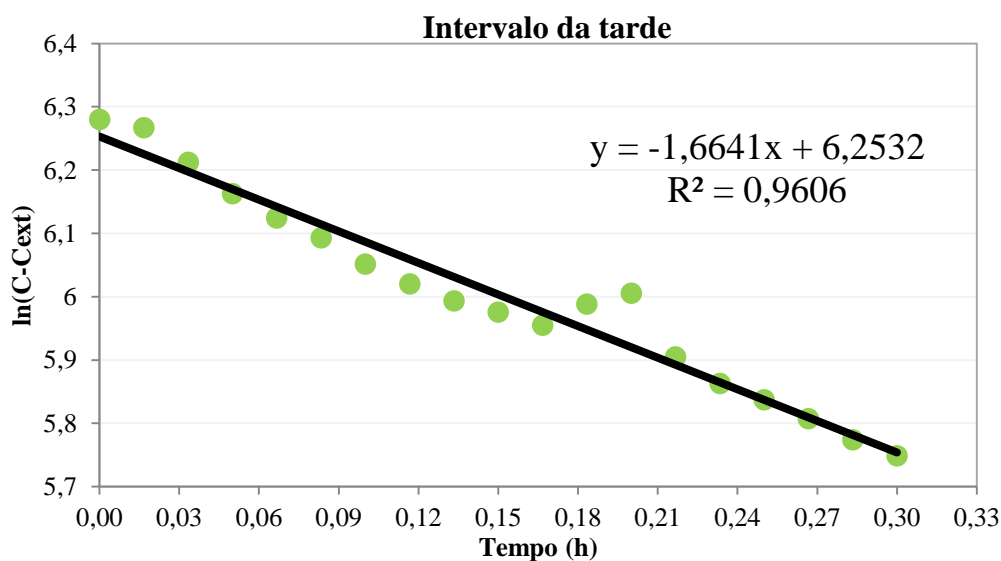


Figura 4.4.3. Regressão linear ao decaimento II



**Figura 4.4.4. Regressão linear ao decaimento III**

O procedimento efectuado foi o mesmo para todas as salas de aula monitorizadas. Obtiveram-se os valores de  $\lambda$  de cada intervalo de decaimento conforme se apresenta Tabela 4.4.1, para a totalidade das salas de aula analisadas.

**Tabela 4.4.1. Taxas de renovação de ar**

	Salas								
	2	3	4	8	11	13	14	16	19
	$\lambda$ ( $\text{h}^{-1}$ )								
I	1,6349	2,7294	1,4489	2,3138	<b>0,4902</b>	2,3029	2,8582	1,7683	<b>1,9989</b>
II	<b>1,5882</b>	<b>0,9161</b>	<b>1,1244</b>	<b>2,1243</b>	1,6378	<b>1,4735</b>	3,0913	1,7124	2,0612
III	1,6641	3,1254	1,6691	3,2943	0,7152	-	<b>1,8265</b>	<b>1,4948</b>	2,0043
	$R^2$								
I	0,9966	0,9687	0,9815	0,9091	0,9211	0,9752	0,9833	0,9864	0,9978
II	0,9968	0,8945	0,9082	0,9751	0,8862	0,8779	0,9788	0,992	0,9957
III	0,9606	0,9688	0,9665	0,9696	0,8644	-	0,7082	0,9714	0,9947

No Anexo G encontram-se as representações gráficas que permitiram a determinação da taxa de renovação de ar para as restantes salas.

Numa perspectiva conservadora, de entre os 3 períodos de decaimento analisados em cada sala, considerou-se o menor valor determinado da taxa de renovação de ar para calcular o respectivo caudal de ar novo efectivo. Tais valores encontram-se realçados na Tabela 4.4.1.

Os valores de  $Q_{AN}$  assim obtidos para todas as salas em estudo – multiplicando a taxa de renovação de ar pelo volume da sala – encontram-se listados na Tabela 4.4.2, juntamente com a lotação máxima. Verifica-se uma importante discrepância entre os valores resultantes de caudal de ar novo por ocupante nas diversas salas (desde 3,3 até 19  $m^3/h.ocup.$ ).

**Tabela 4.4.2. Caudais de ar novo efectivos**

Salas	V ( $m^3$ )	$\lambda$ ( $h^{-1}$ )	$Q_{AN}$ ( $m^3/h$ )	Ocup. max.	$Q_{AN}$ ( $m^3/h.ocup$ )
<b>2</b>	289,2	1,5882	459,31	36	12,76
<b>3</b>	176,1	0,9161	161,33	21	7,68
<b>4</b>	284,4	1,1244	319,78	23	13,9
<b>8</b>	228,6	2,1243	485,61	25	19,42
<b>11</b>	168,6	0,4902	82,65	25	3,31
<b>13</b>	237	1,4735	349,22	26	13,43
<b>14</b>	170,4	1,8265	311,24	27	11,53
<b>16</b>	170,4	1,4948	254,71	25	10,19
<b>19</b>	174,3	1,9989	348,41	34	10,25

Os valores mais baixos registam-se nas salas 11 e 19, que, recorde-se (v. Tabela 4.1.1), foram as salas onde não cumprem com o 2º critério de conformidade para o  $CO_2$ .



## 4.5. Estimativa do Caudal de Ar Novo Adequado

Com base nos dados antropométricos e nas equações anteriormente referidas (8, 9, 10 e 11), foi determinada a taxa de geração de CO<sub>2</sub> em função da idade dos alunos. Em média, um aluno nas condições referidas emite 0,01347 m<sup>3</sup>/h de dióxido de carbono. Um professor emite 0,01854 m<sup>3</sup>/h, considerando que tem uma área de superfície corporal de 1,8 m<sup>2</sup>.

A estimativa do Q<sub>AN</sub> adequado tem em conta a evolução da concentração de CO<sub>2</sub> calculada a partir da equação 3. Considerando que C<sub>ext</sub> = C<sub>0</sub>, é então calculada a evolução da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo de 4 horas, para uma ocupação total da sala (100%) e para uma ocupação de 75%. Considerou-se que a concentração de CO<sub>2</sub> no exterior é 350 ppm. Ao longo deste período a taxa de emissão de CO<sub>2</sub> é constante.

Este procedimento foi aplicado, especialmente, às salas que não verificaram o 2º critério de conformidade, ou seja, a sala 11 e 19.

Considerando as taxas de ocupação de 100% e de 75% da lotação, foi estimada a evolução prevista da concentração de CO<sub>2</sub> para dois caudais ponderados:

- Q1 – caudal de ar novo efectivo medido em cada sala (conforme descrito no subcapítulo anterior);
- Q2 – caudal de ar novo adequado, i.e., que permita que a média da concentração de CO<sub>2</sub> durante as 4 horas não ultrapasse os 1476 ppm.

Nas figuras seguintes apresentam-se os traçados das curvas para cada um dos caudais, de acordo com a ocupação considerada, 100% e 75%, para as salas que registaram um menor caudal de ar novo.

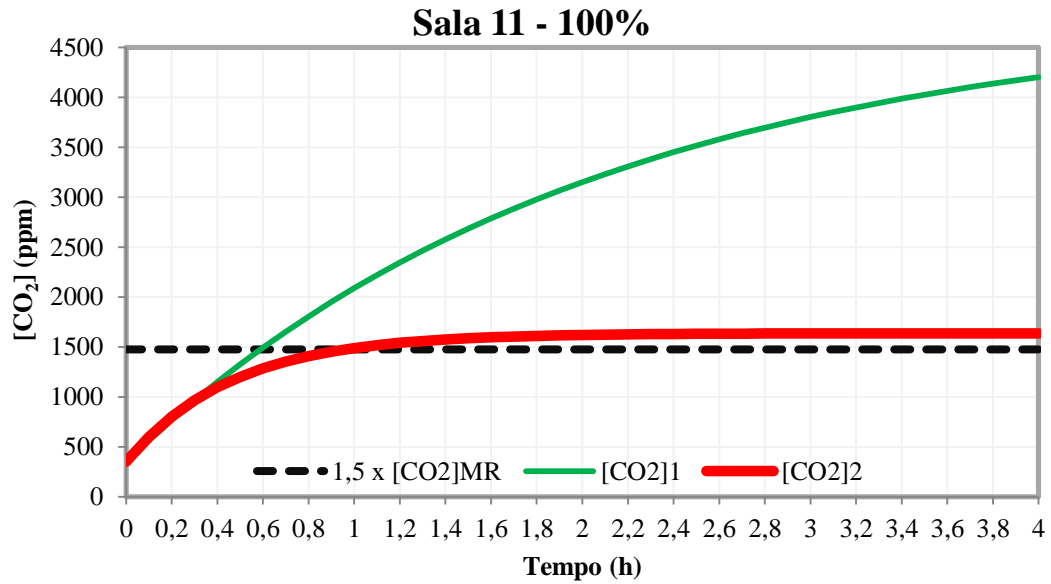


Figura 4.5.1. Estimativa para Sala 11 com 100% de ocupação

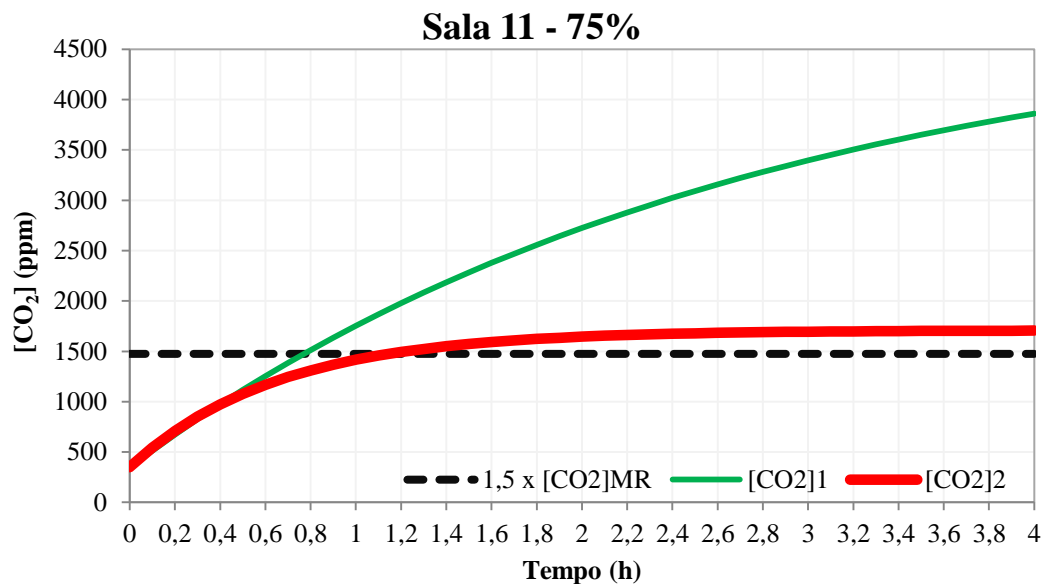


Figura 4.5.2. Estimativa para Sala 11 com 75% de ocupação

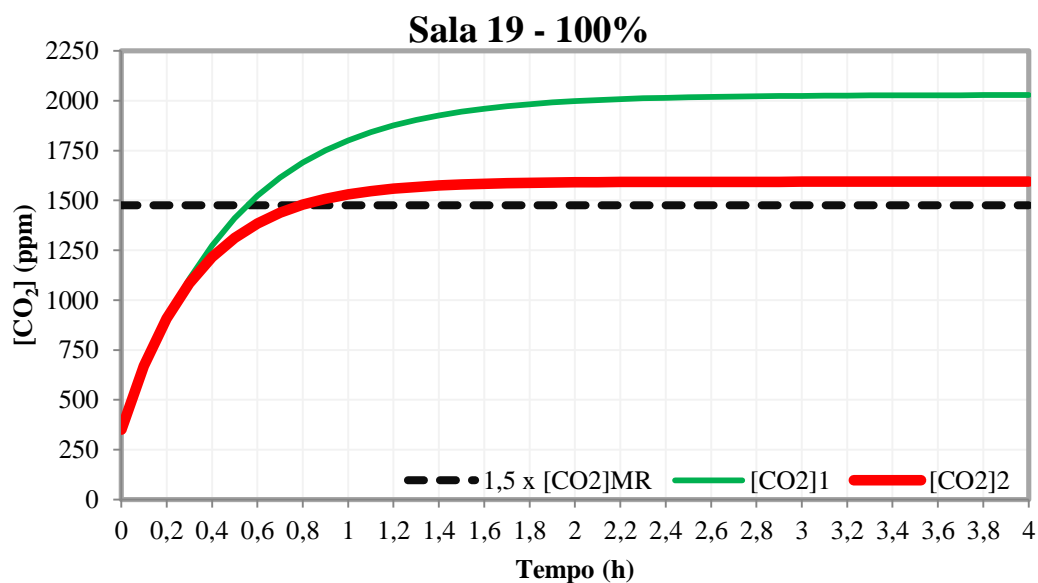


Figura 4.5.3. Estimativa para Sala 19 com 100% de ocupação

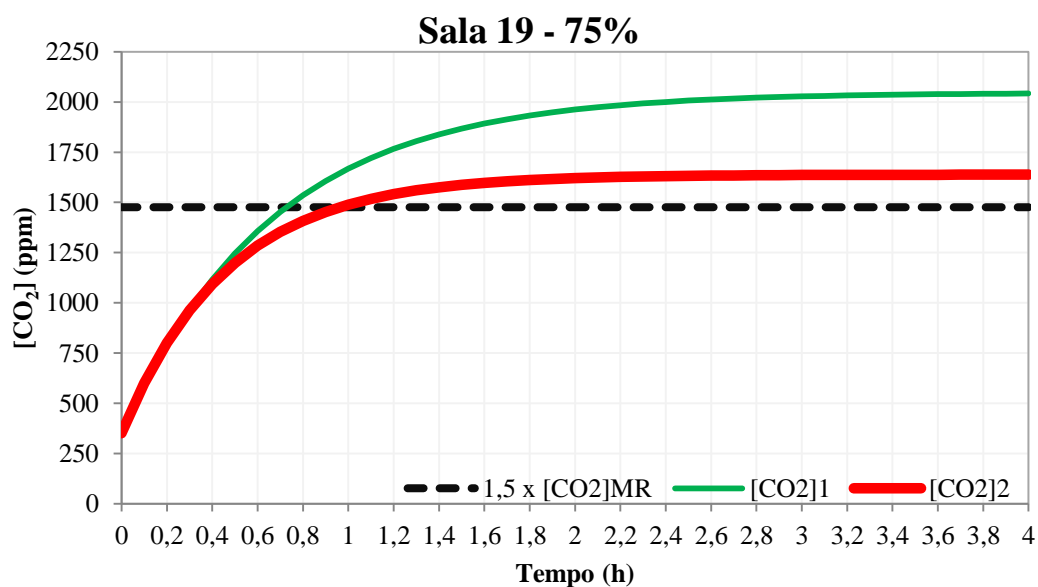


Figura 4.5.4. Estimativa para Sala 19 com 75% de ocupação

Na Tabela 4.5.1 apresentam-se os valores dos caudais de ar novo efectivo e adequado ( $\text{m}^3/\text{h.ocupante}$ ), a concentração de equilíbrio e a média da concentração de  $\text{CO}_2$  nas 4 horas de estimativa, para a ocupação de 100% e de 75%.

**Tabela 4.5.1. Concentração de equilíbrio para a ocupação de 100% e 75%**

	Ocupação 100%			Ocupação 75%		
	Q	C <sub>equi</sub>	[CO <sub>2</sub> ] <sub>MedT</sub>	Q	C <sub>equi</sub>	[CO <sub>2</sub> ] <sub>MedT</sub>
Sala 11						
Q1	3,31	4482	2854	3,31	4556	2511
Q2	14,59	1287	1476	13,81	1358	1476
Sala 19						
Q1	10,25	1679	1803	10,25	1697	1750
Q2	15,24	1244	1476	14,71	1288	1476

Para a sala 11, a concentração de equilíbrio não é atingida nas 4h de estimativa, considerando o caudal de ar novo efectivo. Aplicando o caudal de ar novo adequado, a concentração de equilíbrio é atingida ao fim de aproximadamente 40 e 50 minutos para uma ocupação de 100% e 75%, respectivamente.

Na sala 19, com o caudal de ar novo efectivo é atingida a concentração de equilíbrio ao fim de aproximadamente 45 minutos e 1 hora, para uma ocupação de 100% e 75%, respectivamente. Para o caudal de ar novo efectivo, a concentração de equilíbrio é atingida passados 25 e 40 minutos (aproximadamente), para as respectivas ocupações.

Aplicando este procedimento às restantes salas, foi possível relacionar o caudal efectivo com o caudal adequado para cada sala, obtendo-se a diferença de caudais conforme o que se apresenta na Tabela 4.5.2.

**Tabela 4.5.2. Q<sub>AN</sub> efectivo vs Q<sub>AN</sub> adequado**

Sala	2	3	4	8	11	13	14	16	19
<b>Ocupação de 100%</b>									
Q1	459,36	161,28	319,7	485,5	82,75	349,18	311,31	254,75	348,5
Q2	506,66	290,72	264,97	334,96	364,72	348,48	398,71	363,89	518,06
$\Delta Q$	-9,3%	-44,5%	20,7%	44,9%	-77,3%	0,2%	-21,9%	-30,0%	-32,7%
<b>Ocupação de 75%</b>									
Q1	344,52	120,96	239,78	364,13	62,06	261,89	233,48	191,06	261,38
Q2	353,7	200,06	153,35	224,23	258,9	233,2	284,73	257,96	375,17
$\Delta Q$	-2,6%	-39,0%	56,4%	62,4%	-76,0%	12,3%	-18,0%	-25,9%	-30,3%

A diferença de caudais representa um défice (assinalado a vermelho) ou um excesso (assinalado a verde) do caudal de ar novo.

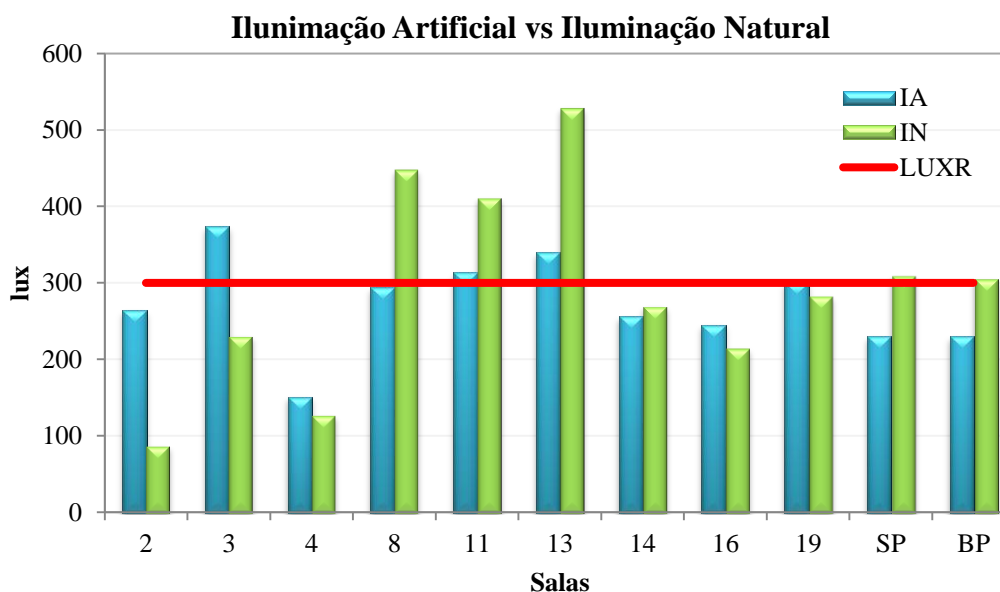
## 4.6. Nível de Iluminação

O nível de iluminação artificial (IA) das salas de aulas observadas foi medido em pontos estratégicos, nomeadamente, nos intervalos entre as luminárias. Desta forma consegue-se verificar o nível de iluminância mais baixo a que os alunos e professores poderão estar sujeitos.

Em relação à iluminação natural (IN), aquando das medições da iluminância, as condições meteorológicas apresentavam alguma nebulosidade. Sendo assim, esta situação poderá representar, em alguns casos, uma situação limite da utilização da luz natural sem recurso à iluminação artificial.

As medições foram efectuadas em vários pontos da sala, ao nível dos ocupantes e os resultados apresentados representam a média desses pontos.

A verificação regulamentar (LUXR) do sistema de iluminação existente é apresentada na Figura 4.6.1.



**Figura 4.6.1. Verificação regulamentar do nível de iluminação**

Nos pontos mais favoráveis da iluminação artificial, ou seja, onde esta incide perpendicularmente, os valores observados eram superiores ao valor regulamentar na maioria das salas.

A sala 4 apresentou uma situação irregular, no que respeita à iluminação artificial. Em cada luminária desta sala, apenas uma das lâmpadas funcionava.

## 4.7. Nível de Ruído

Para a determinação do nível de ruído produzido pelo sistema de climatização deveriam ter sido feitas medições ao ruído ambiente da sala, com o sistema em funcionamento e desligado. Através da diferença de valores entre estas duas situações, seria possível obter com exactidão o nível de ruído do sistema de climatização.

Como o sistema de climatização funciona durante o período de funcionamento de todo o complexo escolar, não foi possível efectuar medições com o sistema desligado.

Deste modo os valores medidos num intervalo de 10 minutos em cada sala, ao nível dos ocupantes, correspondem ao nível de ruído ambiente global. Tendo em conta que aquando das medições não havia alunos no interior nem exterior do edifício (não havia aulas a decorrer em todo o complexo escolar), a porta e janelas de cada sala estavam fechadas e o ruído proveniente do exterior era irrelevante, considerou-se que o valor da medição corresponderia quase na totalidade ao ruído proveniente do sistema de climatização.

Na Figura 4.7.1 são apresentados os níveis de ruído registados em cada uma das salas.

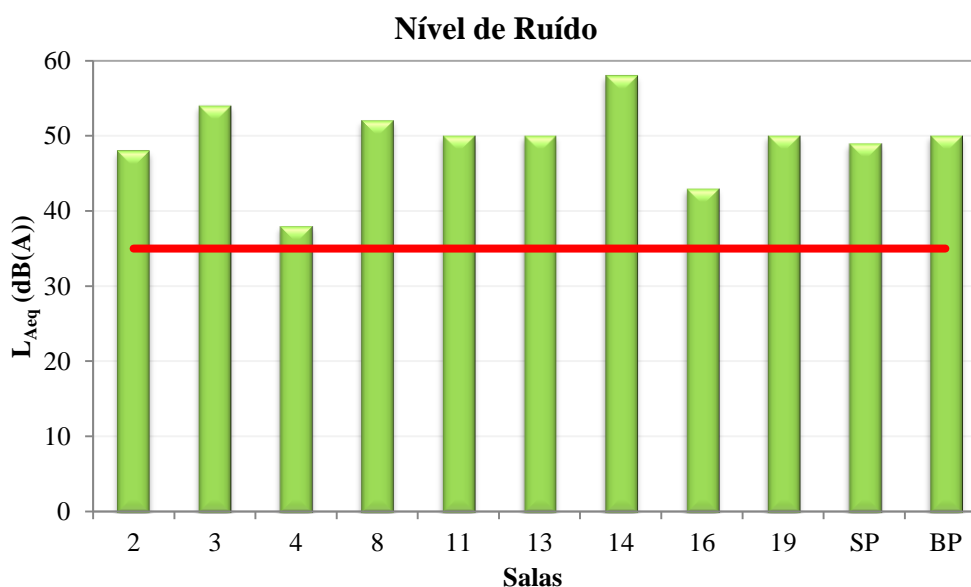


Figura 4.7.1. Verificação regulamentar do nível de ruído

O limite imposto pela legislação, 35 dB(A), está representado pela linha a vermelho.

## 4.8. Notas Conclusivas

No decorrer das medições observou-se que os resultados foram afectados por alguns factores.

A evolução da concentração do CO<sub>2</sub> nem sempre apresentou um crescimento uniforme, o facto de janelas ou portas serem abertas conduz a um decaimento, apesar de o número de ocupantes na sala se manter constante. Outra situação ocorre quando há uma maior proximidade humana aos equipamentos de medição, talvez motivada pela curiosidade. Estas situações são exemplificadas na Figura 4.8.1.

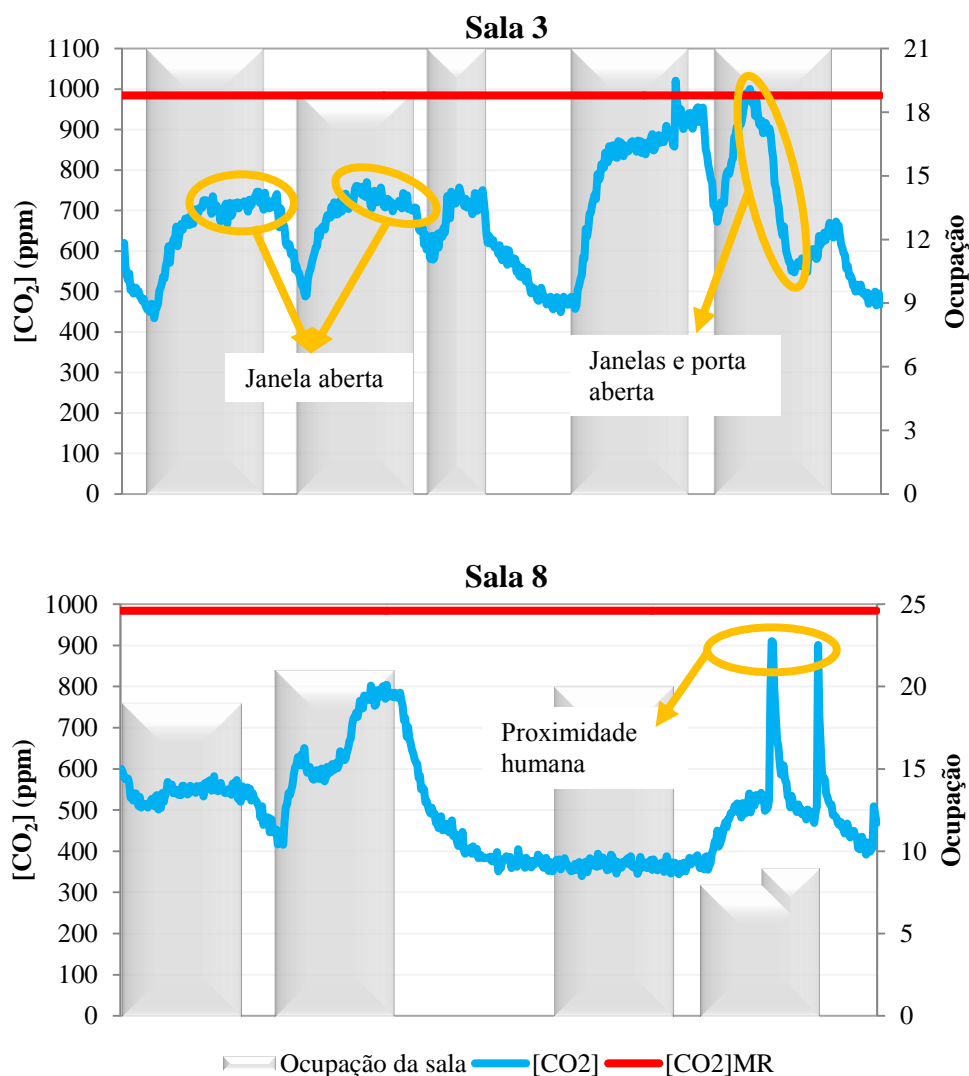


Figura 4.8.1. Observações

Pela visualização dos gráficos da concentração de CO<sub>2</sub> foi possível confirmar, numa primeira análise, que a concentração de CO<sub>2</sub> numa sala é dependente do número de ocupantes existente em determinado horário.

A aplicação dos critérios de conformidade permite identificar as salas que respeitam os limites estabelecidos pelo RSECE. Observou-se que das 11 salas analisadas 7 cumprem o 1º CC, 2 salas o 2º CC, e as restantes não cumprem a regulamentação.

Na análise da concentração de PM<sub>10</sub> observou-se que apenas as salas 8 e 14 apresentam valores inferiores à concentração máxima de referência, em todos os intervalos de medição. A sala 2, sendo uma sala de tecnologias, apresenta valores superiores ao limite regulamentar, mas tal como na sala 4 (já referenciada anteriormente), o tipo de actividades desenvolvidas no seu interior podem justificar esses valores. Para as restantes salas observou-se que, principalmente as medições efectuadas à tarde apresentam valores elevados, tal facto pode dever-se às limpezas que iam sendo efectuadas no edifício.

Em relação às temperaturas registadas, na grande maioria das salas, a temperatura observada é superior ao limite que estabelece o conforto térmico. Apenas a sala 19 apresentou temperaturas inferiores a 25°C.

No que diz respeito à humidade relativa, verificou-se que esta varia em função do número de ocupantes, podendo também ser influenciada por janelas ou portas abertas, tal como a concentração de CO<sub>2</sub>.

A iluminação de algumas das salas não verifica a situação de conforto. Uma das condicionantes da iluminação deste edifício é a existência de cortiça no tecto de algumas das salas, nomeadamente, nas salas 2, 4, 14, 16 e 19. São estas salas que verificaram uma iluminação natural e artificial menos eficiente. O nível de iluminação artificial na sala 4 é ainda mais prejudicado pelo facto de apenas uma das lâmpadas de cada luminária estar a funcionar.

O nível de ruído observado é superior ao limite máximo estabelecido pela legislação, em todas as salas.



## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Conclusões

Este trabalho teve como objectivo a caracterização da qualidade do ambiente interior num edifício escolar que recentemente foi alvo de uma intervenção de requalificação. Para a sua concretização foram efectuadas medições de alguns parâmetros e, posteriormente, foi efectuado o tratamento dos dados registados e verificadas as suas conformidades com a legislação actual.

Os parâmetros medidos foram as concentrações de CO<sub>2</sub> e de PM<sub>10</sub>, a temperatura e a humidade relativa do ar interior, o nível de iluminação e de ruído no interior de algumas salas.

As taxas de renovação de ar e os correspondentes caudais de ar novo (Q<sub>AN</sub>) foram determinados aplicando o método dos gases traçadores, com recurso à técnica do decaimento, utilizando o CO<sub>2</sub> emitido pelos ocupantes. Depois de determinados os Q<sub>AN</sub> efectivos foram estimados os Q<sub>AN</sub> adequados para cada sala.

Da comparação global dos dados obtidos verificou-se que nenhuma sala apresentou uma boa qualidade do ambiente interior, ou seja, nenhuma sala verificou conformidade legislativa, em simultâneo, de todos os parâmetros analisados.

Na sala e no bar dos professores, concluiu-se que existia uma boa QAI, apesar da temperatura do ar interior atingir valores superiores ao estabelecido como conforto. Dispõem de boa iluminação natural, mas a iluminação artificial apresentou um défice de 23,3%. Quanto ao nível de ruído, estas salas apresentaram um excesso de ruído de 40% e 42,9%, respectivamente. Contudo, além do sistema de climatização, existem alguns computadores e electrodomésticos que também podem influenciar este valor.

Das nove salas analisadas, apenas três não apresentaram um défice de caudal de ar novo, considerando uma ocupação de 100%. Considerando uma ocupação de 75%, como sendo, em média, representativa da média das salas de aula neste Bloco C da escola, o valor do caudal de ar novo efectivo determinado nas salas 8, 4 e 13 excede em 44,9%, 20,7% e 0,2%, respectivamente, o caudal necessário para garantir uma concentração média

---

de CO<sub>2</sub>, num intervalo de tempo de 4h, inferior a 1500 ppm. Nestas salas, a humidade relativa é inferior ao limite (50%), enquanto a temperatura do ar interior é superior ao limite para conforto térmico (25°C). As salas 8 e 13 possuem bons níveis de iluminação (apenas a sala 8 apresentou um défice de 2% em termos da iluminação artificial). Em relação ao conforto acústico, a situação é bem diferente, pois estas duas salas apresentaram um nível de ruído excessivo (mais de 40% superior ao recomendado). Na sala 4 o nível de ruído não é tão elevado como nas anteriores, registando-se apenas um excesso de 8,6% em relação ao máximo permitido.

A sala 11 foi a que apresentou um maior défice de caudal de ar novo (77,3%), seguida pelas salas 3 e 19 com défices de caudal de 44,5% e 32,7%, respectivamente. Nas salas 3 e 19 verificaram-se níveis de iluminação natural insuficientes. Todas as salas (11, 3 e 19) apresentaram níveis de ruído excessivos em mais de 40%.

Restam as salas 2, 14 e 16, com défices de caudal igual ou inferior a 30%. Verificou-se que o nível de iluminação destas salas não é adequado, e a iluminação natural na sala 2 apresenta um valor bastante baixo.

Considerando as UTA's que servem as diferentes salas monitorizadas, não foi possível confirmar se alguma das UTA's seria menos eficiente. O mais provável é que a rede de condutas para distribuição do ar insuflado não esteja correctamente dimensionada e/ou que os ensaios de recepção da instalação não tenha contemplado a correcta regulação dos caudais insuflados em cada terminal (difusor). Comparando as salas 14 e 16, uma vez que estas se situam no mesmo piso e são ambas servidas pela UTA B, verificou-se que a sala 16 apresenta uma menor taxa de renovação de ar. Tal situação poderá estar associada ao facto de esta sala ser o término da rede de condutas, ou seja, como as condutas de insuflação e de retorno são contínuas para o mesmo piso, o caudal que chega a cada sala não é o mesmo. Aplicando esta tendência a todas as condutas, concluiu-se que o caudal de ar novo diminui ao longo da conduta. Seguindo este raciocínio concluiu-se também que, quanto maior o caudal, maior é o ruído proveniente das condutas, uma vez que a sala 14 apresenta um nível de ruído mais elevado do que a sala 16.

As salas 14 e 8 são as que apresentaram um maior nível de ruído, são ambas servidas pela UTA B, a sala 14 localiza-se no piso 2 e a sala 8 no piso 1. Pela ordem de ideias descritas no parágrafo anterior, aplicando a proximidade da sala à UTA, a sala mais próxima desta apresentou um ruído mais elevado.

Verificou-se que, não existindo défice de caudal de ar novo, a humidade relativa no interior das salas cumpre o limite regulamentar.

Os níveis de iluminação natural observados nas salas 2, 3 e 4 foram os mais baixos. Tal situação poderá ser uma consequência do efeito da envolvente exterior às fachadas destas salas, nomeadamente, à existência de árvores e da elevação do terreno, a um nível de cota superior onde se localiza o Bloco B.

Com base na verificação de todas as situações de incumprimento observadas ao longo deste estudo, concluiu-se que a adaptação a caudais de ar novo adequados poderá beneficiar a qualidade do ar interior e o conforto térmico do Bloco C.

Como melhoria das condições de iluminação nas salas onde se verificaram inconformidades, propõe-se a correcção da avaria observada na sala 4 e uma distribuição adequada das mesas em todas as salas, de forma a minimizar o desconforto para alunos e professores.

Em relação ao conforto acústico, uma vez que todas as salas apresentam incumprimento propõe-se que sejam tomadas medidas com vista à redução do nível de ruído.

## **5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros**

Como linhas de orientação para a realização de trabalhos no futuro, propomos o alargamento das medições a outros poluentes (conforme RSECE) e a um maior número de salas, de modo a tornar mais significativa a avaliação da Qualidade do Ar Interior. Deverão também ser efectuadas medições na estação de aquecimento, permitindo assim complementar a caracterização da qualidade do ambiente interior.

A aplicação de inquéritos aos ocupantes do edifício proporcionará a apreciação da sua percepção no que diz respeito às condições de conforto, possibilitando o registo de queixas, caso existam. Os inquéritos proporcionam uma avaliação subjectiva das condições existentes, podendo ser um instrumento de apoio às acções a desenvolver.

As medições dos níveis de ruído deverão considerar, comparativamente, o ruído ambiente no interior das salas, com o sistema de climatização em funcionamento e desligado. Deste modo será possível isolar o ruído proveniente do sistema de climatização e, assim, elaborar com maior exactidão um plano de melhoria do conforto acústico.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfano, F.R.A. *et al.* (2010), “Ambiente Interior e Eficiência Energética nas Escolas” (1ª Parte – Princípios), Manual REHVA nº13, Ingenium Edições, Lisboa.
- ASHRAE (2004), “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, ASHRAE Standard 55, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning, Atlanta, 4.
- Costa, J.J. (2010), “Relatório Preliminar de Auditoria à Qualidade do Ar Interior – Escola Básica 2,3 Dr. José Lopes de Oliveira, Mortágua”, Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial – ADAI, Coimbra.
- Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril, “Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios”, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Diário da República – I Série-A, 2416-2468.
- Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril, “Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios”, Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, Diário da República – I Série-A, 2468-2513.
- Decreto-Lei nº 96/2008 de 9 de Junho, “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios”, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, Diário da República – I Série-A, 3359-3372.
- EPA (2009), “Indoor Air Quality Tools for Schools – Reference Guide”, EPA – U.S. Environmental Protection Agency.
- European Standard EN 12464-1, (2002), “Light and lighting – Lighting of Work Places – Part 1: Indoor Work Places”, European Committee for Standardization, Brussels.
- Matos, J., Brantes, J., Maria, A., Cunha, A. (2010), “Qualidade do Ar em Espaços Interiores – Um Guia Técnico”, Agência Portuguesa do Ambiente, Amadora.

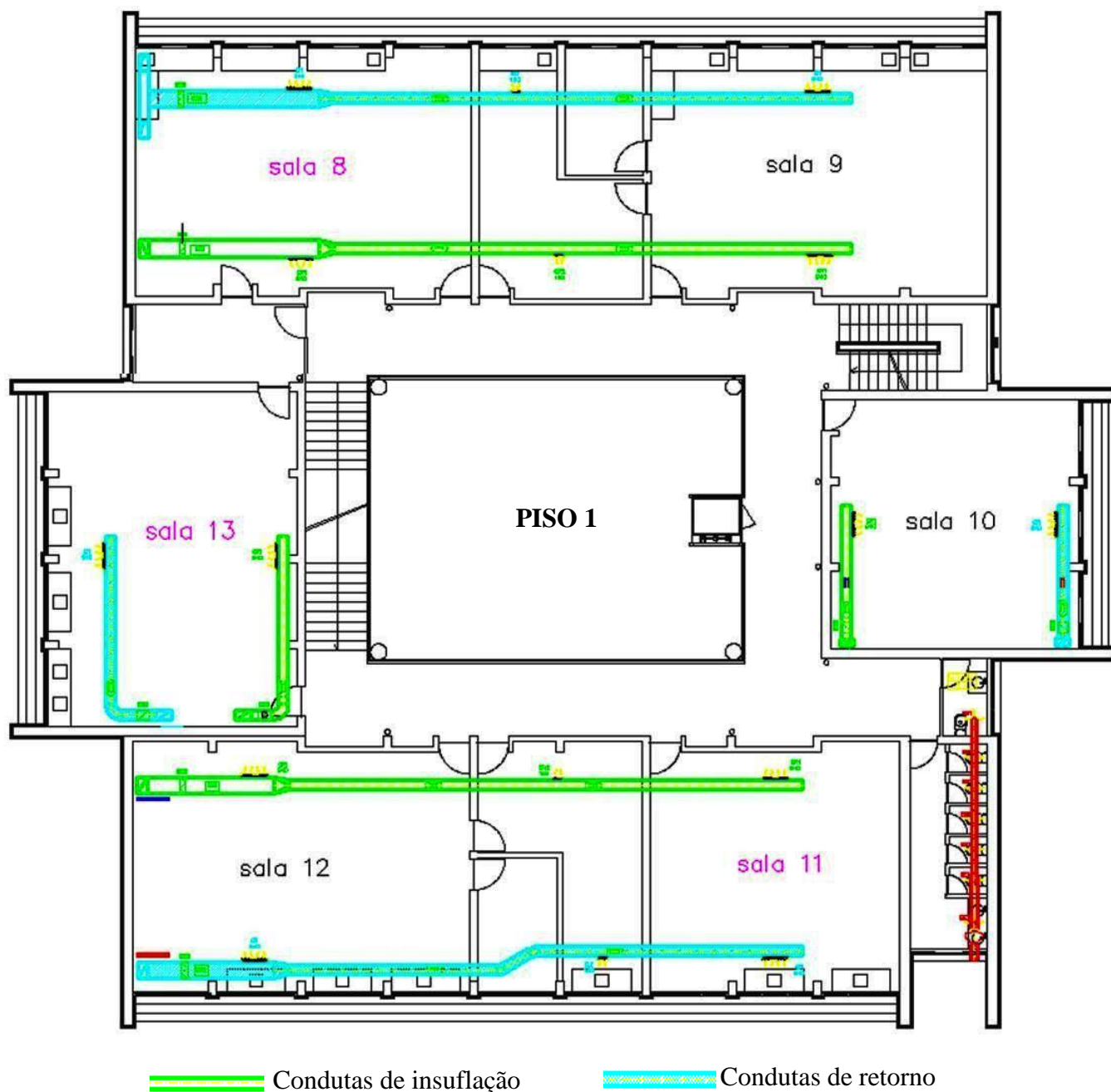
- Myhrvold, A.N., Olsen, E., and Lauridsen, O. (1996), “Indoor Environmental in Schools – pupils health and performance in regard to CO<sub>2</sub> concentrations”, RF – Rogaland Research, Stavanger, Norway.
- Nota Técnica NT-SCE-02 (2009), “Metodologia para auditorias periódicas de QAI em edifícios de serviços existentes no âmbito do RSECE”, ADENE – Agência para a Energia.
- Santos, P. (2009), “Memória Descritiva e Justificativa, Projecto de Execução, Projecto de Instalações Mecânicas de Aquecimento e Ventilação e Ar Condicionado – Condições Técnicas Especiais”, CHAMA – Equipamentos Térmicos, Lda, Mortágua.
- Santos, P. (2009), “Memória Descritiva e Justificativa, Projecto de Execução, Projecto de Instalações Mecânicas de Aquecimento e Ventilação e Ar Condicionado”, CHAMA – Equipamentos Térmicos, Lda, Mortágua.
- Santos, Paulo (2009), “Memória Descritiva e Justificativa, Projecto de Licenciamento, Verificação Regulamentar RSECE”, CHAMA – Equipamentos Térmicos, Lda, Mortágua.
- Silva, M.G. et al. (2011), “The influence of the wind on the infiltration rates in a web-based monitored office building”, ROOMVENT2011 - The 12<sup>th</sup> International Conference on Air Distribution in Rooms, June 19-22, Trondheim, Norway.
- WHO, (2011), “Methods for Monitoring Indoor Air Quality in Schools”, World Health Organization, Regional Office for Europe, Germany.
- Wu, W. , Ng, E. (2003), “A review of the development of daylighting in schools”, *Lighting Res. Technol.*, 35, 111-125.
- Zeiler, W. and Boxema, G. (2009), “Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter”, *Building and Environment*, 44, 2308-2317.

## 7. ANEXOS

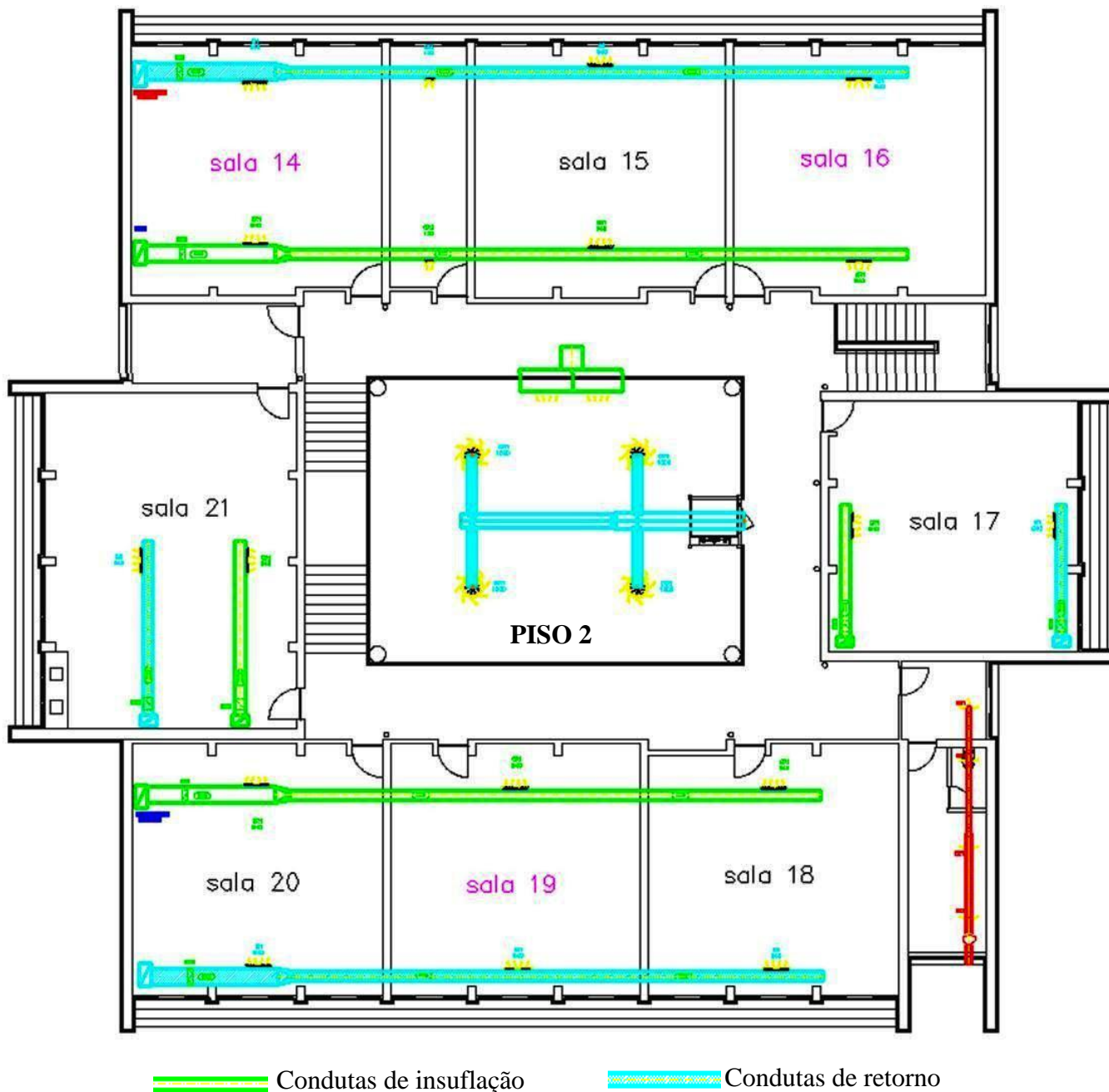
### Anexo A – Plantas do Sistema de Ventilação (Bloco C)



Figura A.1. Planta do Sistema de Ventilação do Piso 0

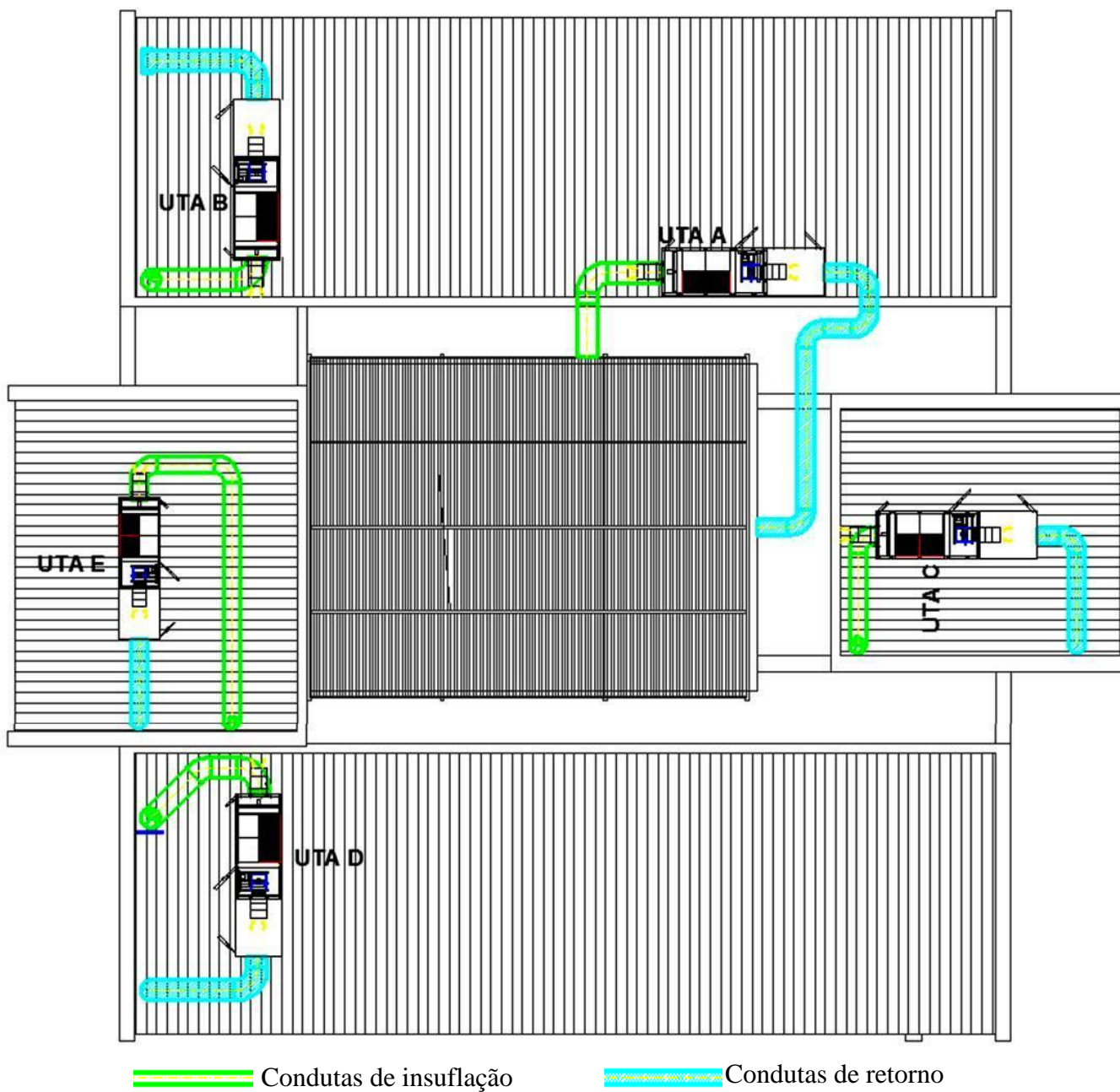


**Figura A.2. Planta do Sistema de Ventilação do Piso 1**



**Figura A.3. Planta do Sistema de Ventilação do Piso 2**





**Figura A.4. Planta da localização das UTA's na cobertura**

**Anexo B – Plantas do Sistema de Iluminação (Bloco C)****Figura B.1. Planta do Sistema de Iluminação do Piso 0**



**Figura B.2. Planta do Sistema de Iluminação do Piso 1**



**Figura B.3. Planta do Sistema de Iluminação do Piso 2**



## Anexo C – Vista do Exterior do Bloco C



Figura C.1. Imagens do exterior do Bloco C

## Anexo D – Imagens dos Equipamentos de Medição

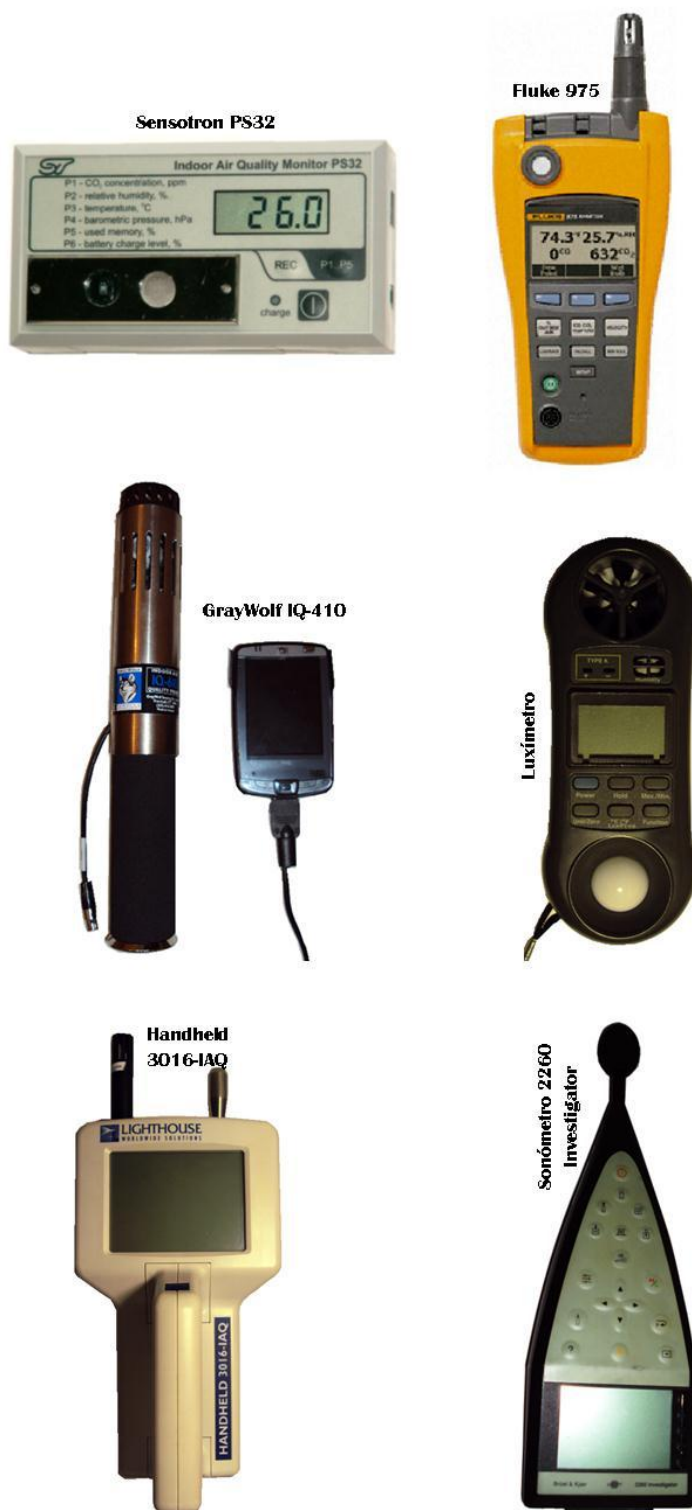
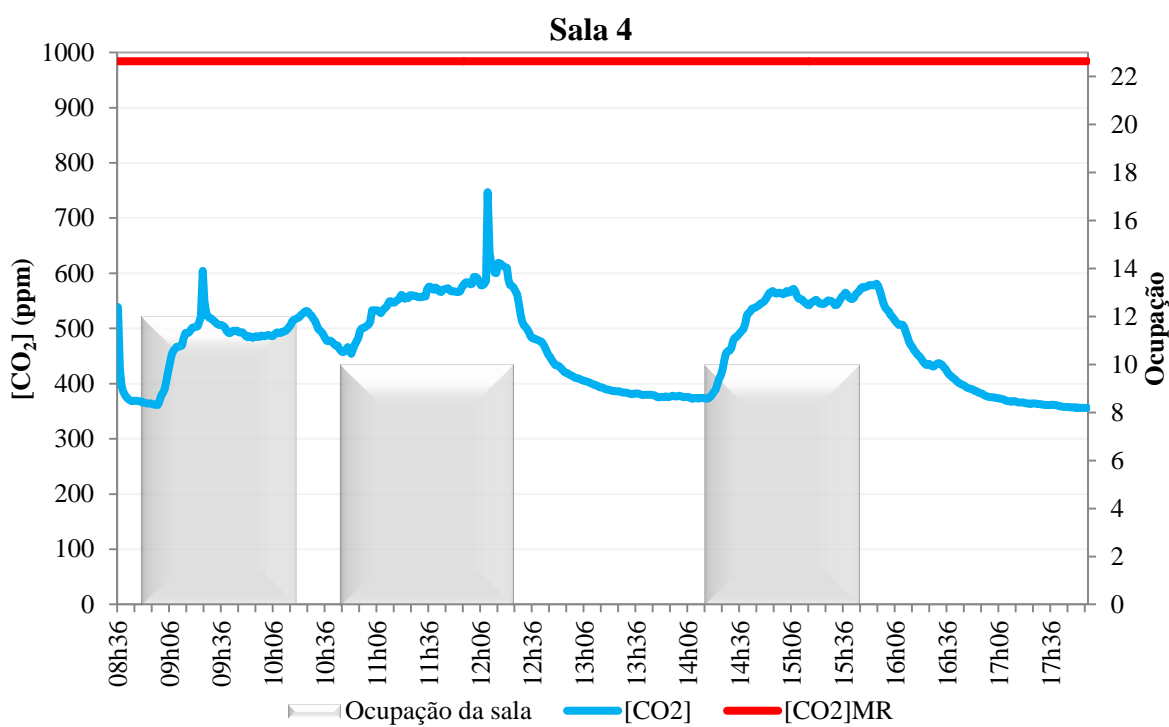


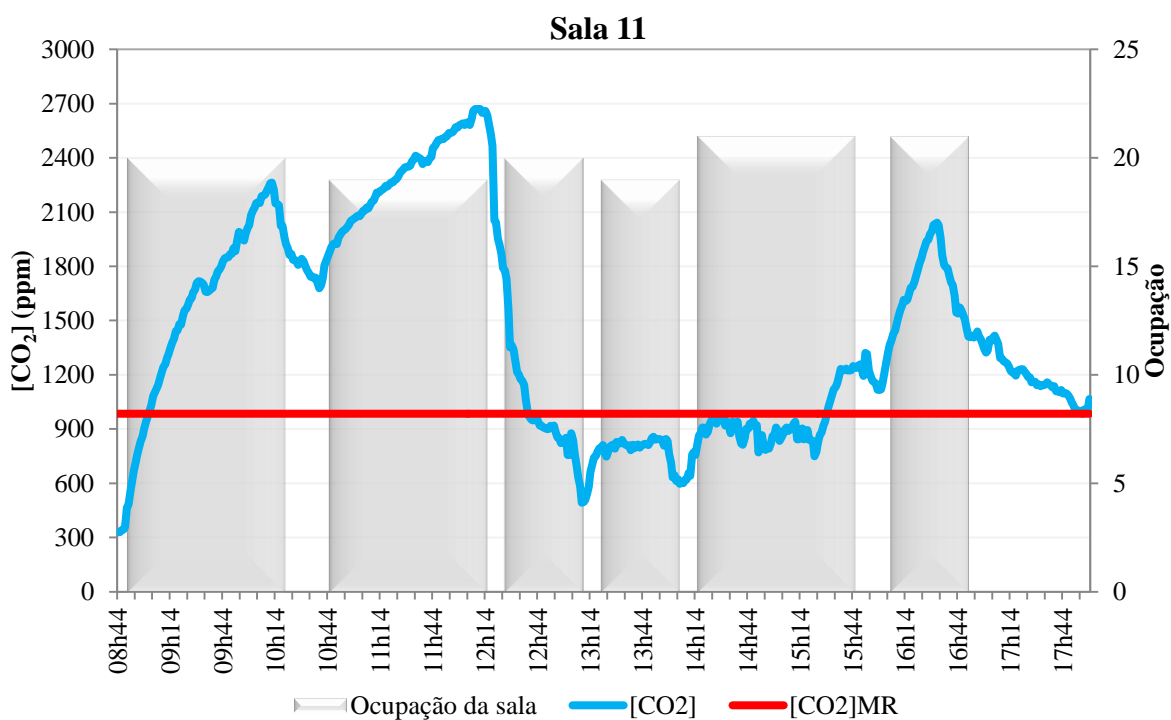
Figura D.1. Equipamentos utilizados

## Anexo E – Concentração de CO<sub>2</sub>

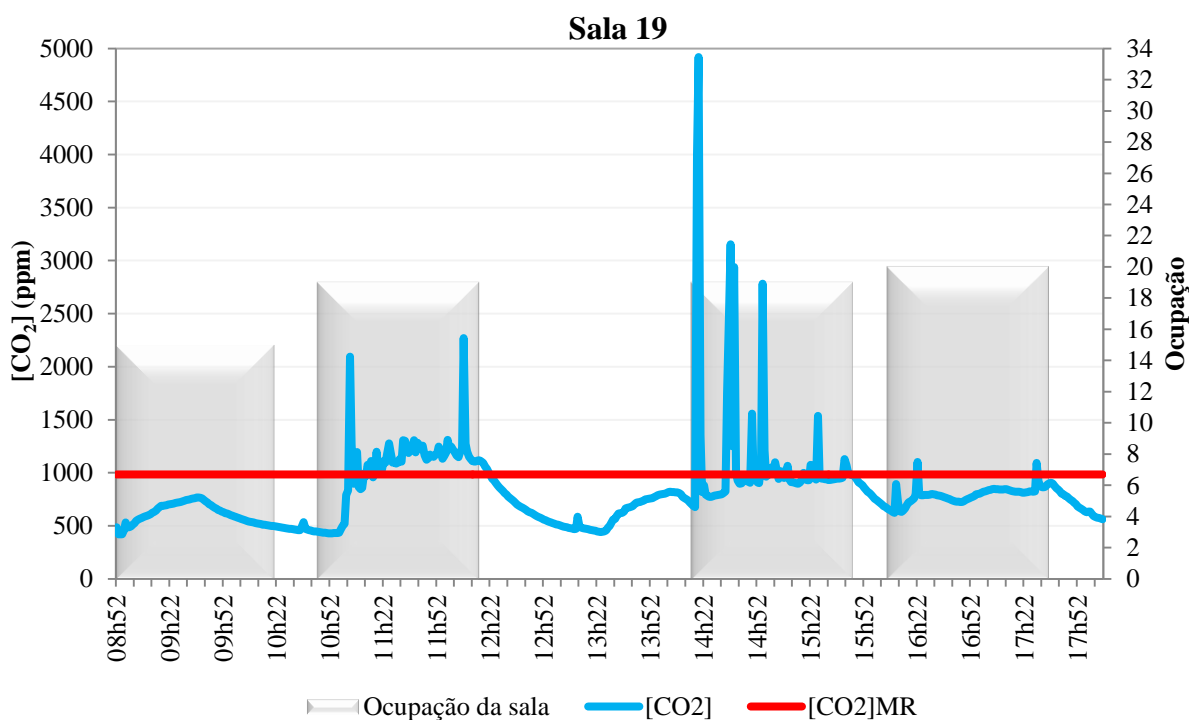
Neste anexo encontra-se a evolução da concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do dia, e a respectiva ocupação registada nas salas 4, 11, 19, SP e BP.



**Figura E.1. Concentração de CO<sub>2</sub> na Sala 4**



**Figura E.2. Concentração de CO<sub>2</sub> na Sala 11**



**Figura E.3. Concentração de CO<sub>2</sub> na Sala 19**



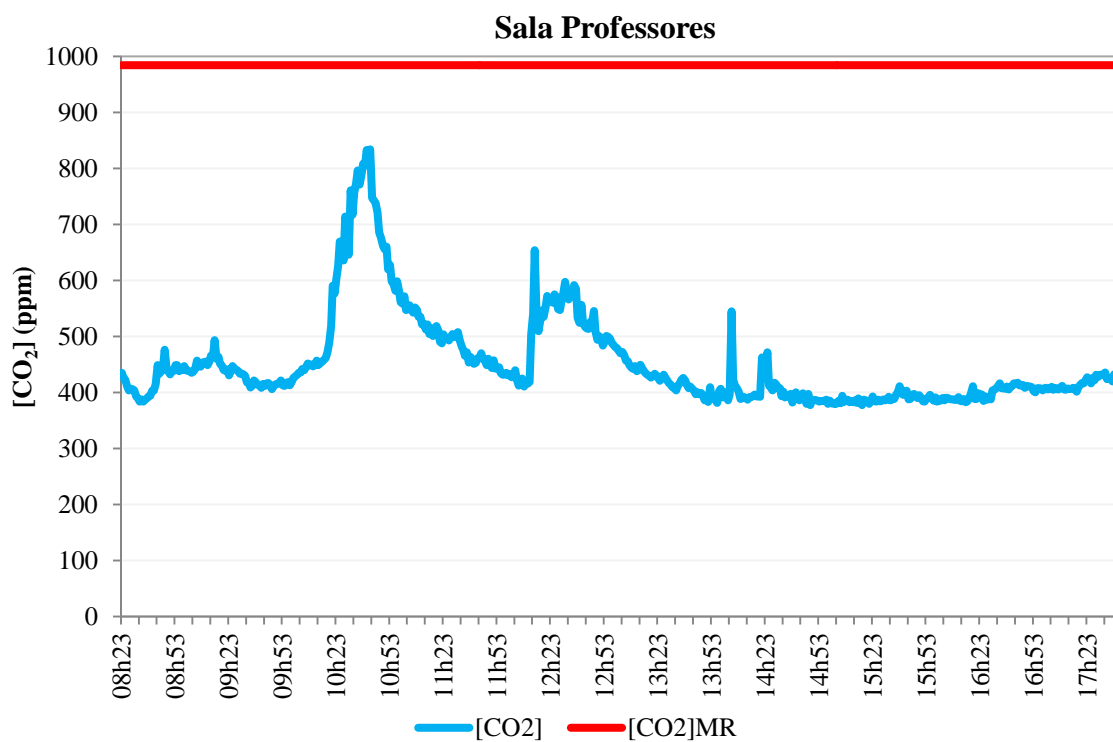


Figura E.4. Concentração de CO<sub>2</sub> na Sala de Professores

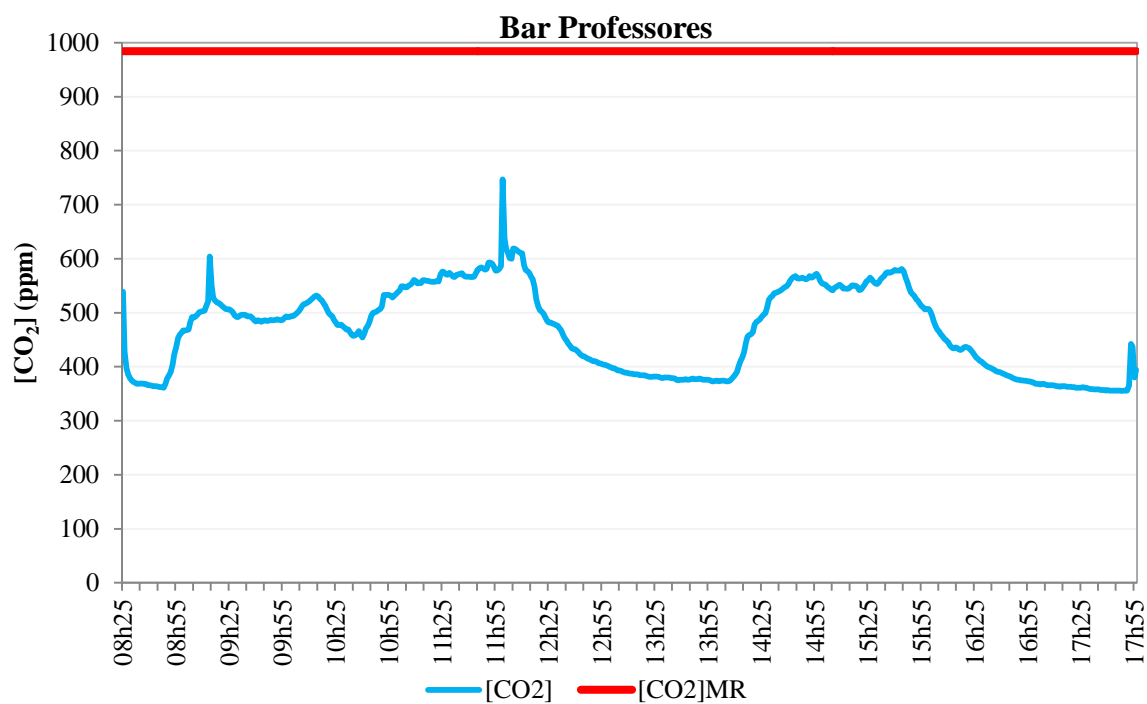
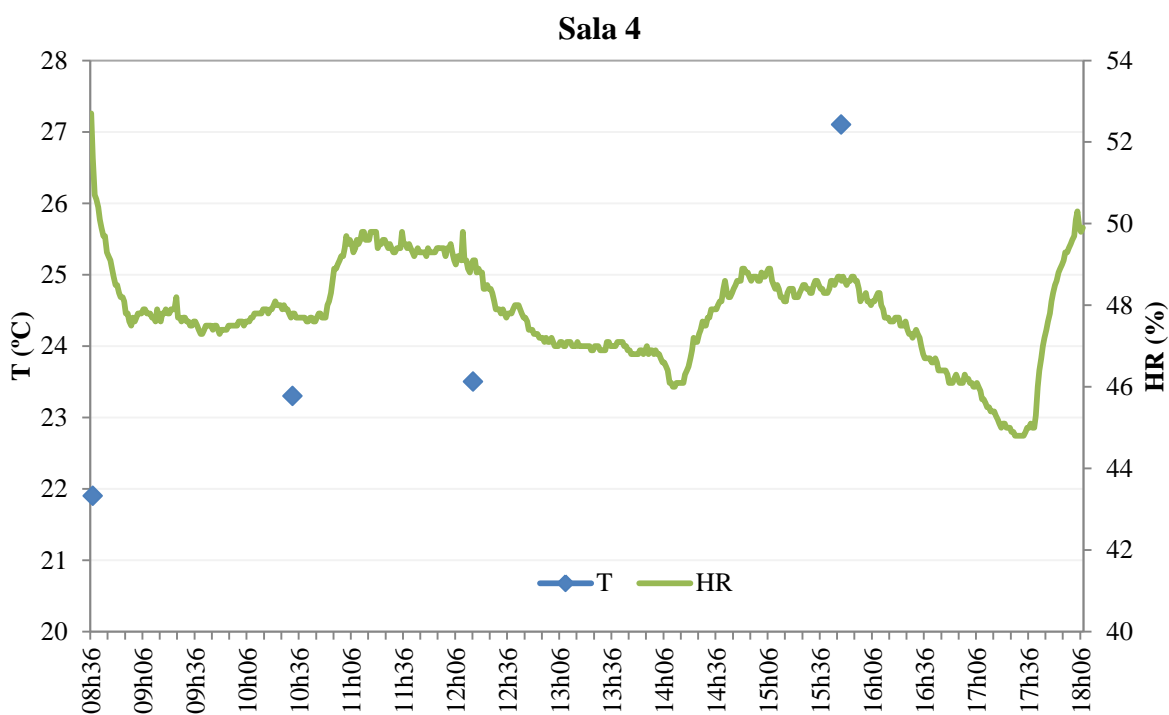


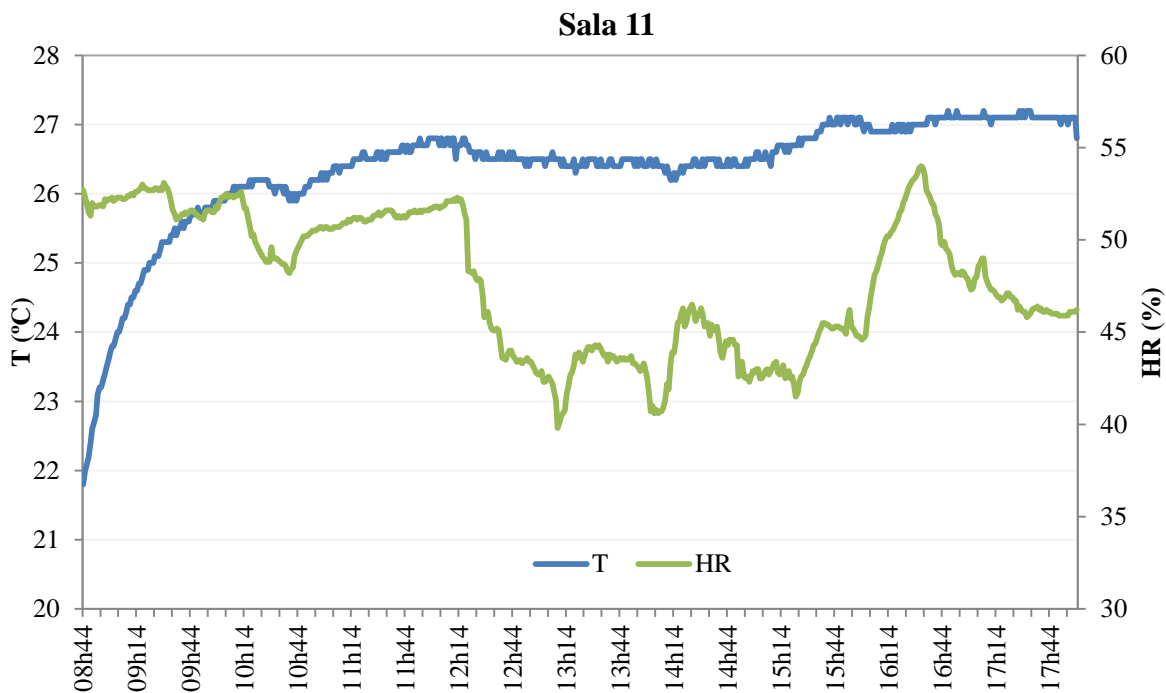
Figura E.5. Concentração de CO<sub>2</sub> no Bar de Professores

## Anexo F – Temperatura e Humidade Relativa

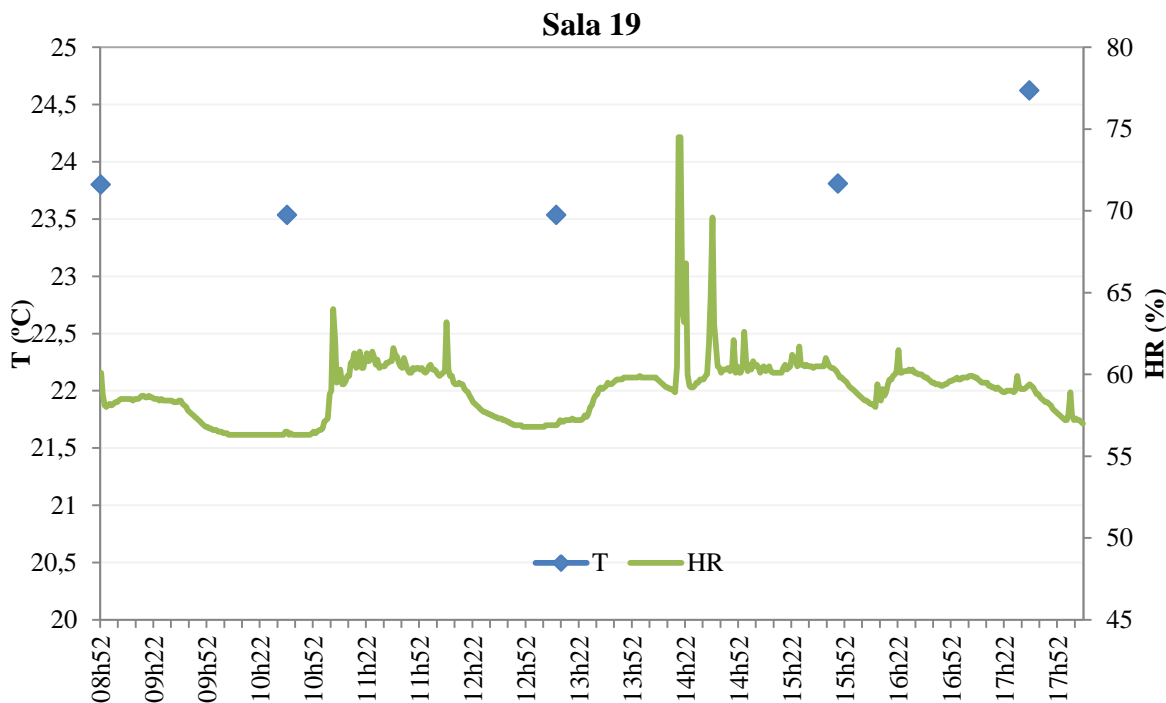
Os registos da temperatura e humidade relativa do ar interior, nas salas 4, 11, 19, SP e BP, SP, são aqui apresentados.



**Figura F.1. T e HR na Sala 4**



**Figura F.2. T e HR na Sala 11**



**Figura F.3. T e HR na Sala 19**

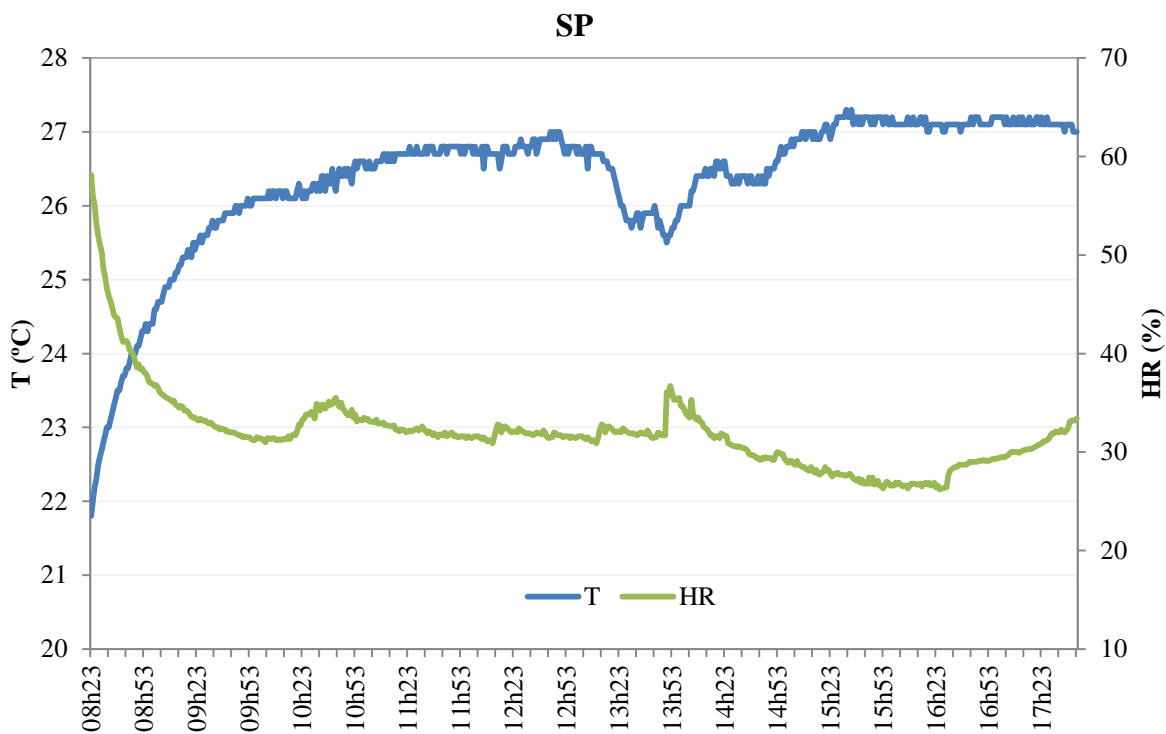


Figura F.4. T e HR na Sala de Professores

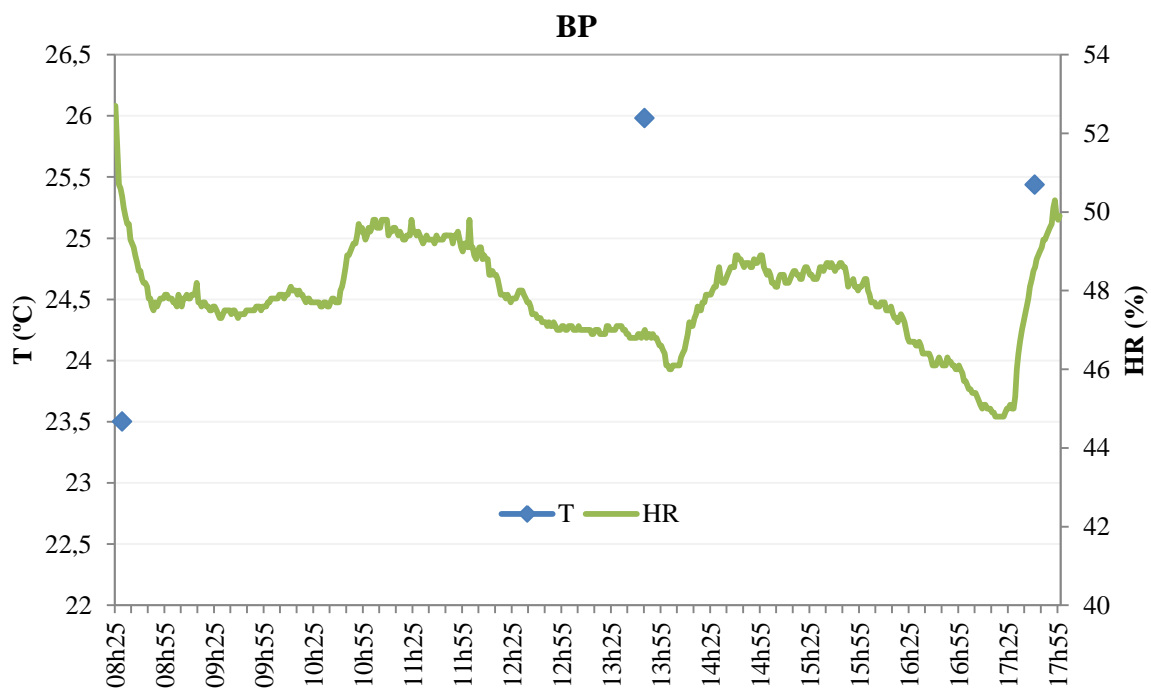


Figura F.5. T e HR no Bar de Professores

## Anexo G – Taxa de Renovação de Ar

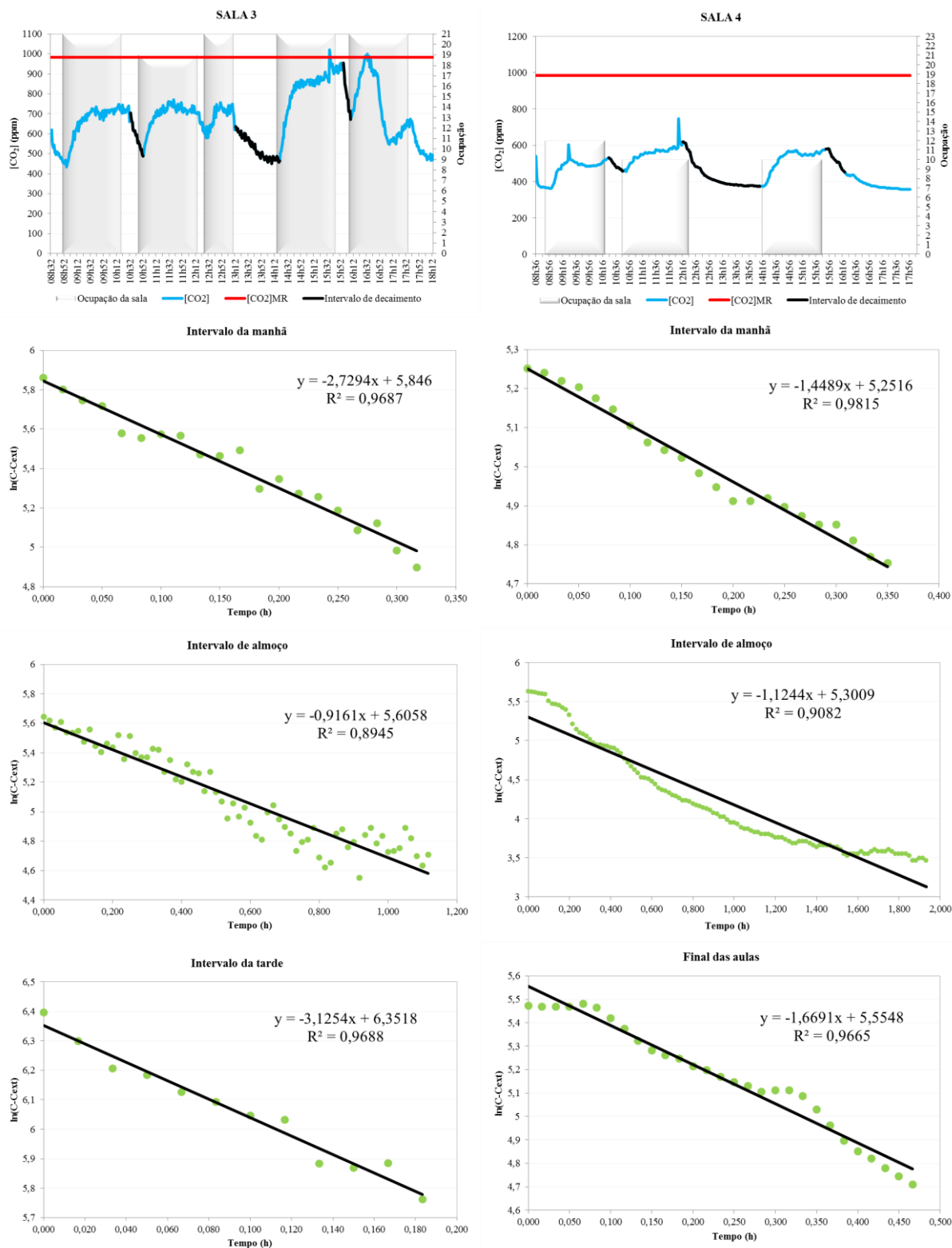


Figura G.1. Taxa de renovação de ar (sala 3 e 4)

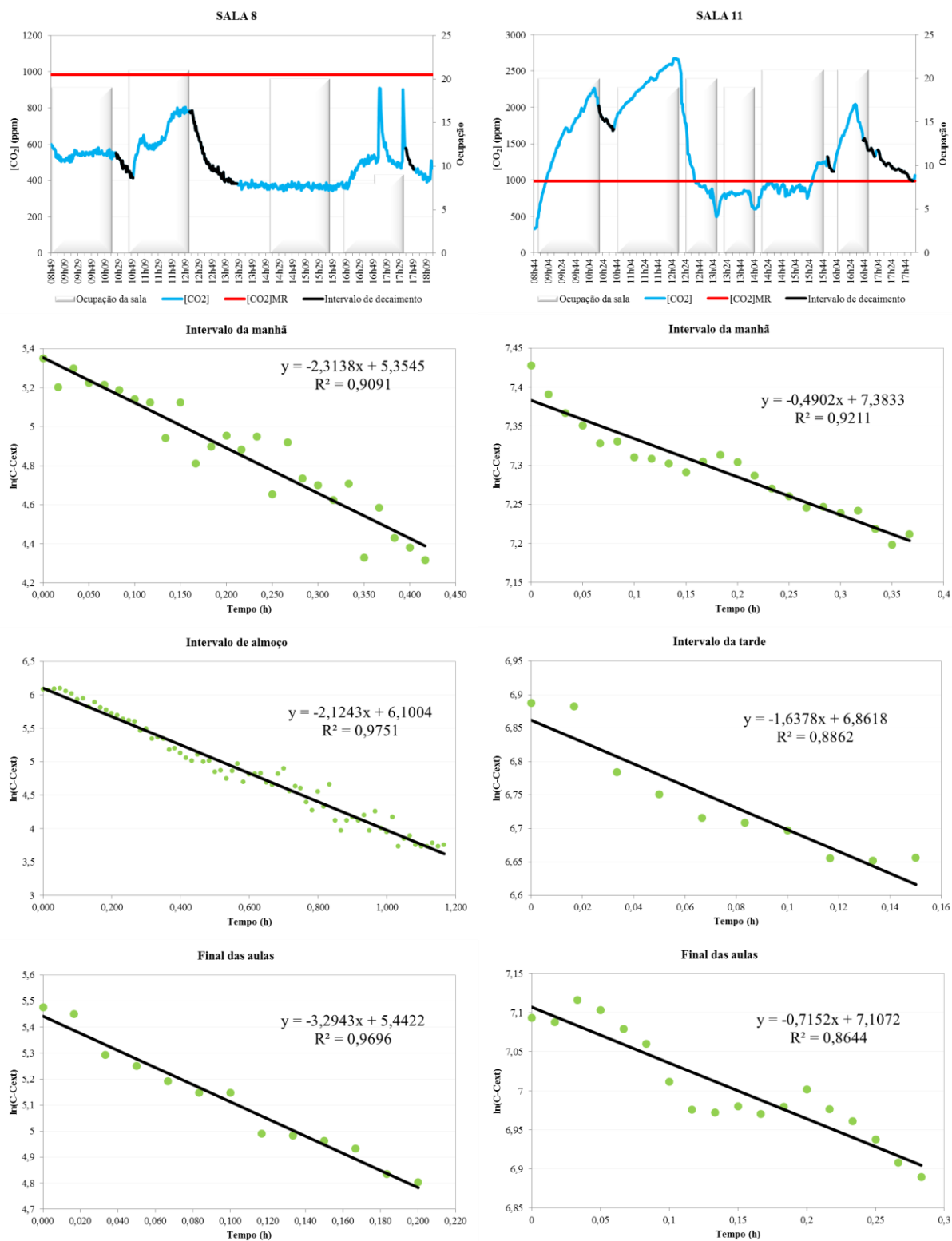


Figura G.2. Taxa de renovação de ar (sala 8 e 11)

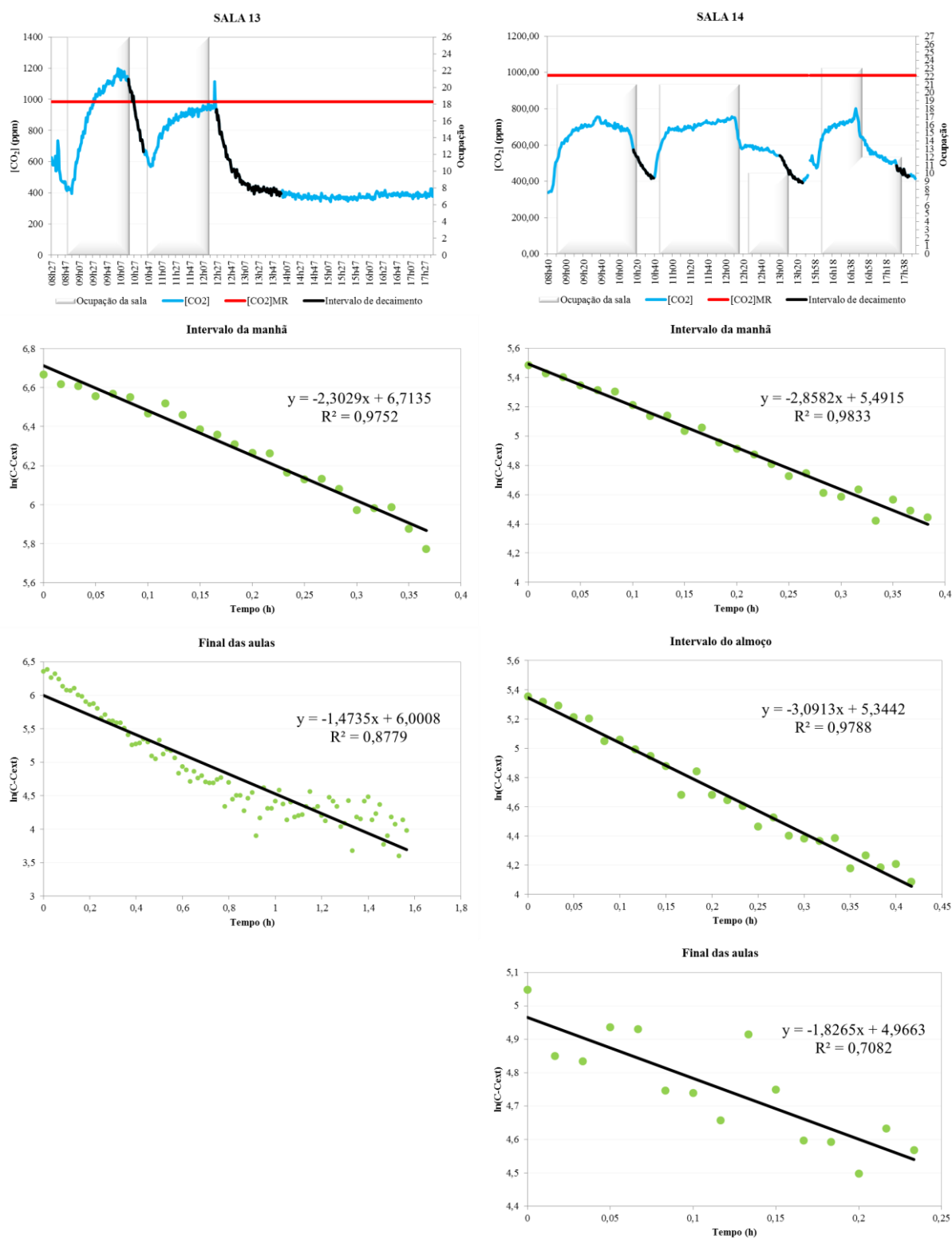


Figura G.3. Taxa de renovação de ar (sala 13 e 14)

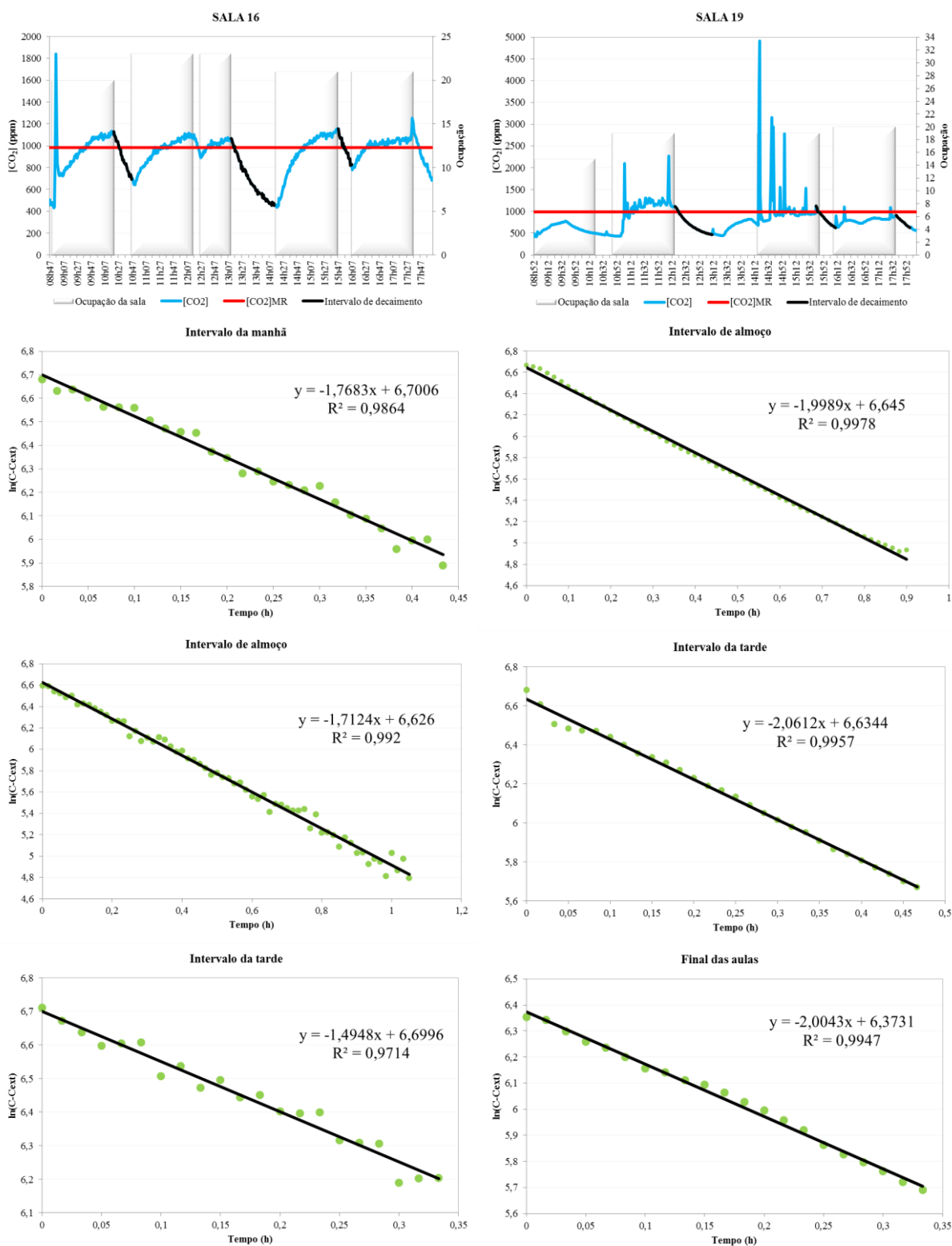


Figura G.4. Taxa de renovação de ar (sala 16 e 19)



## Anexo H – Imagens do interior do Bloco C

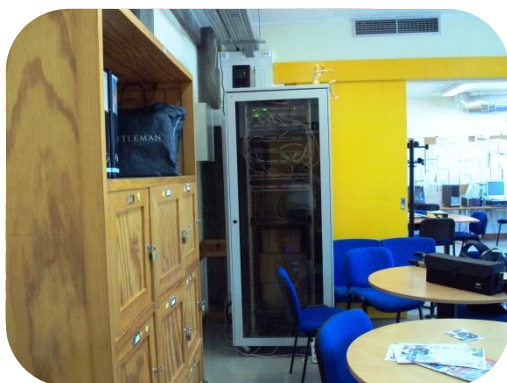
### ÁTRIO



### SALA PROFESSORES



### BAR PROFESSORES



### SALA 2





**SALA 3**



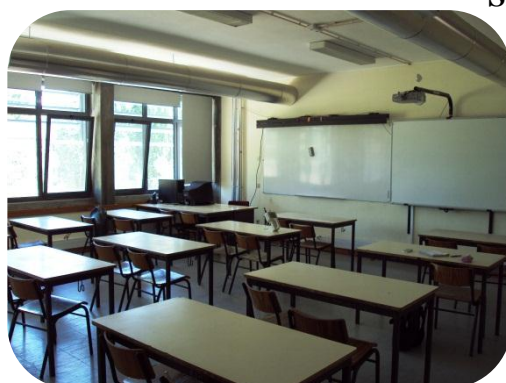
**SALA 4**



**SALA 8**



**SALA 11**



**SALA 13**



**SALA 14**



**SALA 16**



**SALA 19**



**Figura H.1. Imagens do interior do Bloco C**